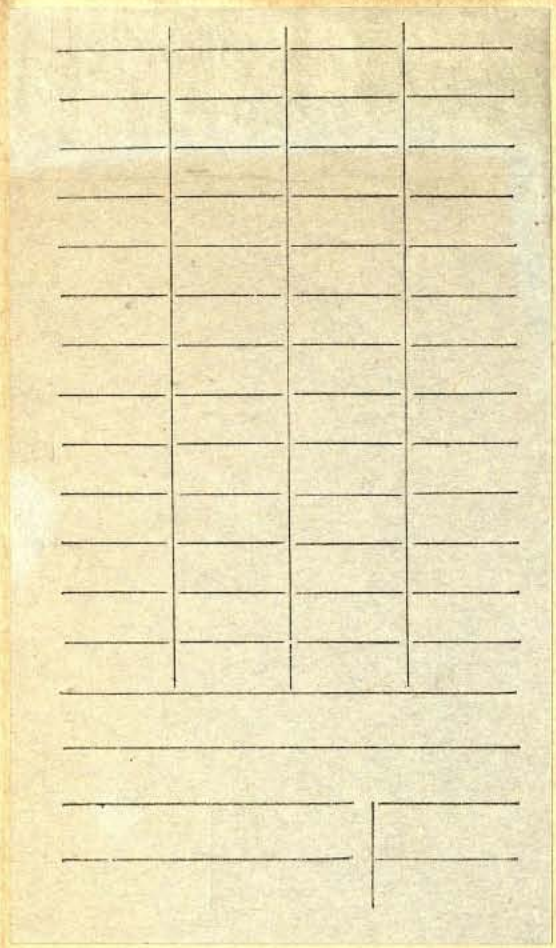
3102 П

В. Л. МАКОВСКИЙ

ТОННЕЛИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
АКАДЕМИИ АРХИТЕКТУРЫ СССР
1943



621.19
М163

Переучет 1998 г.

В. Л. МАКОВСКИЙ

ТОННЕЛИ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО

Рада Народного господарства
Львівського економічного
адміністративного району
ТЕХНІЧНА
БІБЛІОТЕКА

3102 П

ЦБНТИ
МИНАВТОДОРА РСФСР
СИФ 24.12 1985 г.

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ АРХИТЕКТУРЫ СССР
Москва—1947

ПРЕДИСЛОВИЕ

В современных условиях достижение максимального технического прогресса страны немыслимо без наличия развитой тоннельной техники. Отсюда вытекает настоятельная необходимость научно-технического вооружения наших советских инженеров специальными основами тоннельного дела.

Наша техническая литература тоннелестроения до настоящего времени охватывала лишь отдельные отрасли. Поэтому потребность в специально расширенном руководстве по тоннелестроению исключительно велика. В этом отношении труд инженера В. Л. Маковского, отражающий богатейший проектный и производственный материал мирового тоннельного опыта, достаточно восполняет ощущаемый пробел.

Обширность многостороннего мирового опыта вынудила автора остановиться на наиболее важных моментах.

Настоящий труд по тоннелям характеризует современное состояние тоннельной техники не только в области путей сообщения, но и в промышленных, оборонных и других отраслях народного хозяйства.

Мировая тоннельная техника за последнее пятилетие сильно шагнула вперед. Строительство Московского метрополитена дало ряд новых методов производства тоннельных работ, новых строительных идей, что выдвинуло советскую тоннельную технику на передовые позиции. Московский метрополитен им. Л. М. Кагановича является блестящим образцом советской тоннельной техники.

Советскому Союзу предстоит в ближайшем будущем обогатиться рядом рекордных тоннельных сооружений в виде железнодорожных тоннелей (Кавказский хребет), подводных тоннелей под Невой, Москвой-рекой, Волгой, Доном, метрополитенов (в Москве, Ленинграде, Киеве) и тоннельных сооружений специального назначения

Товарищ Сталин в своем обращении к коллективу строителей третьей очереди Московского метрополитена указал, что строительство Метрополитена в условиях войны имеет не только хозяйственное, культурное, но и оборонное значение.

Опыт Великой Отечественной войны показал, какое исключительно важное государственное значение имеет наличие крупных, оборонного назначения подземных сооружений. Подземные заводы важнейших отраслей военной промышленности, ангары, гаражи, электростанции, убежища—вот далеко не полный перечень защищенных объектов, непрерывно действующих в период воздушных бомбардировок и химических атак. Все это указывает на необходимость подготовки высококвалифицированных кадров тоннельщиков, которые бы обладали широкими теоретическими и практическими знаниями тоннельного дела.

Метрострой явился практической школой, в которой инженеры овладели приемами тоннельного дела во всем его многообразии, непрерывно расширяя свои теоретические и практические знания. Вместе с тем накопленный мировой опыт тоннелестроения еще не дает возможности раскрыть „неопределенности" ряда индивидуальных природных явлений, влияющих на результаты научных обобщений и практически на правильность выбора метода тоннелестроения.

Особый научно-технический интерес представляет сделанная автором попытка дать анализ методов тоннельных работ в неустойчивых породах, наиболее сложной отрасли тоннельного дела.

Дальнейшее развитие этого анализа даст тоннельному инженеру практическую ориентировку в сложной обстановке подземных работ, подсказывая наиболее правильное и оправданное на практике техническое решение задач преодоления природных трудностей при производстве работ в неустойчивых породах.

Создавая свой труд, доцент В. Л. Маковский базировался главным образом на обширных материалах его практической деятельности в течение 15-летнего периода работы на Метрострое в качестве главного инженера и начальника Технического отдела Метропроекта, на данных личного заграничного опыта (в Англии, Франции, Бельгии и Германии) и его опыта на строительстве железнодорожных тоннелей Советского Союза.

Труд В. Л. Маковского „Тоннели" будет несомненно способствовать распространению современных знаний тоннельного дела в широких технических кругах и представит большой научный и практический интерес для инженеров в их производственной работе, а также явится весьма ценным пособием для студентов.

Начальник Главтоннельметростроя
Генерал-директор пути
и строительства II ранга
М. САМОДУРОВ

ВВЕДЕНИЕ

Считаясь с огромным количеством практических и теоретических данных, отражающих богатейшую мировую тоннельную технику, приходится констатировать, что задача создания курса о тоннелях представляется исключительно сложной. При разрешении ее необходимо всесторонне осветить вопросы тоннельного строительства и обобщить многогранный комплекс природных и геотехнических факторов, прямо или косвенно влияющих на тоннельное сооружение и на процесс создания его.

Помимо этого, необходимо уделить особое внимание анализу тоннельно-строительных катастроф, стоивших человеческих жертв и потери больших материальных средств.

Изучению подлежат тоннельные сооружения, заложенные в разнообразнейших природных условиях и имеющие различные размеры, конфигурацию и эксплоатационное назначение.

Считаясь с фактом недостающих нам теоретических знаний в области тоннельного дела на современном этапе развития техники (в частности, я имею в виду теорию горного давления), приходится при проектировании новых сооружений основываться не только на опыте уже эксплоатируемых тоннельных образцов, но в рамках необходимой общественной безопасности допускать ряд новых смелых решений, не имеющих еще прецедентов в мировой тоннельной практике. Только при такой постановке вопроса, учитывая, кроме того, технико-экономическую сторону дела, можно добиться надлежащего, непрерывного технического прогресса.

Тоннельные сооружения являются долговечными памятниками, отражающими строительные достижения, а также изобретательское, организаторское, техническое творчество и инициативу людей данной эпохи.

Пример — Московский метрополитен им. Л. М. Кагановича. Тоннельные сооружения Московского метрополитена, являющиеся поистине выдающимся шедевром мирового метростроения и триумфом советской тоннельной техники, могли быть созданы только в социалистическую, сталинскую эпоху.

Богатейший опыт создания тоннельных сооружений доказал, что человек при современной технике в состоянии преодолевать природные препятствия и предотвращать неожиданные катастрофы при тоннельных работах, в каком бы масштабе работы ни проводились.

Разнообразие природных условий не позволяет инженеру полностью базироваться только на опыте ранее построенных им тоннелей. Предпринимая новые работы, тоннельному инженеру приходится сталкиваться с новыми фактами и вести подземные работы соответствующими новыми методами, с новых позиций, при специальном техническом вооружении.

Практика ведения тоннельных работ за последнее двадцатилетие обогатилась мощным техническим вооружением в виде специальных

тоннельных машин, буровых инструментов, новых взрывчатых веществ, специальных машин по погрузке взорванной породы, транспортирующих средств и т. д. Особенно богата практика последних лет новыми системами и новыми методами производства тоннельных работ.

В зависимости от местных геотехнических условий прокладка каждого тоннеля является в большинстве случаев задачей чисто индивидуального порядка, поэтому нельзя выработать незыблемые правила, охватывающие собой все природные условия, и сформулировать их определенным образом. На основе данных практики могут быть установлены лишь руководящие принципы производства тоннельных работ. Разнообразие тоннельной обстановки в каждом отдельном случае выявляет необходимость в специальном подходе, в выработке целесоответствующих приемов работ.

Большое значение имеет вопрос изучения ряда практических примеров, включающих характерные особенности тоннельных работ, проведенных за последнее время.

Стремление охватить в данном труде всю специальную область тоннельных работ неосуществимо. Практически приходится поэтому ограничиваться рассмотрением и исследованием лишь ряда наиболее характерных и технически интересных примеров сооружения тоннелей.

Тоннельные работы, производившиеся в разных странах мира с применением разнообразнейших методов производства работ и оборудования, которые дают в определенных условиях действительно экономические преимущества и производственный эффект, нередко остаются достоянием лишь узкого круга инженеров данного района и не известны тоннельщикам, которым приходится сталкиваться с аналогичными работами впоследствии, в другой стране. Автор поставил себе целью в настоящем труде объединить наиболее интересные вопросы мирового тоннельного опыта и сделать их достоянием широкой технической общественности. В большинстве случаев, если и публикуются сведения о той или иной работе, то они даются лишь в порядке информации, без строгой научно-технической критики и детального анализа примененных методов работ.

Здесь опущен ряд методов, хотя примененных на практике, но не давших надлежащего эффекта, зато указываются наиболее надежные и экономичные приемы. В некоторых случаях приводятся и неудачные методы, имеющие поучительное значение.

Сооружение тоннелей является одной из сложнейших областей инженерно-строительного искусства.

При прокладке железнодорожных деривационных, подводных и других тоннелей, через горные массивы и под водными протоками, строителю приходится:

а) преодолевать проявляющееся горное давление в зависимости от характера геологических напластований и физико-механических свойств залегающих пород;

б) бороться с большими притоками и гидростатическим давлением подземных вод, прорывающихся иногда внезапно и грозящих затопить тоннельные работы и уже созданный тоннель;

в) вести борьбу с высокой температурой в тоннеле, с горячими источниками, вредными газами, активными карстами.

Для этого требуется мощная техническая вооруженность и специальные обширные знания методов тоннельных работ. Особенности ведения тоннельных работ заключаются в том, что в силу возникающих в процессе тоннелирования неожиданностей, не предусмотренных гидрогеологическим прогнозом, строителю приходится на ходу менять принятый способ работ. Малейшее промедление в обстановке производства тоннельных работ может привести к чрезвычайно тяжелым последствиям, вплоть до строительных катастроф, аварий, обвалов. В результате всего этого иногда создается настолько напряженное и огромное давление приведенных в движение грунтовых масс, пересекаемых тоннелем, что продолжать

дальнейшую проходку не представляется возможным. В этом случае приходится итти на обход данного места, за счет развития трассы тоннеля.

Трудности тоннельных работ значительно осложняются при ведении их в городе. В этом случае, кроме того, приходится считаться:

а) с залегающей у поверхности сложной сетью подземных сооружений городского хозяйства в виде канализации, водопровода, газопровода, телефонных, телеграфных и других проводов;

б) с домами и искусственными сооружениями, под которыми прокладывается трасса тоннеля;

в) с проезжей частью улиц и уличным движением.

Поэтому городское тоннелирование требует специального подхода, ибо урон забоя, выпуск грунта сказываются в виде осадок на поверхности.

При этом неизбежны разрушение элементов сети подземного хозяйства, что может лишить жителей города воды, света, канализации; деформации, трещины, а иногда и разрушение домов; провалы проезжей части мостовой, остановка уличного движения и т. д.

Мировая практика строительства городских тоннелей выработала ряд способов и приемов работ, отличающихся от применявшихся прежде методов тоннельных работ и обеспечивающих при надлежащем и правильном ведении их полную безопасность поверхности. Под строительством городских тоннелей главным образом имеется в виду сооружение линий метрополитена.

Метрополитен, представляющий собой целый комплекс тоннельных сооружений в виде перегонных однопутных, двухпутных и многопутных тоннелей, раструбов, эскалаторных тоннелей, переходных камер, тоннельных пересечений, подводных тоннелей, подземных станций крупных профилей, требует для своего создания применения разнообразнейших комбинированных и специальных методов работ.

Подходя к установлению метода производства тоннельных работ, в основном влияющего на тип создаваемого метрополитена, необходимо учесть особенности геотехнических условий и городского режима по направлению прокладываемой трассы тоннелей.

Предпринятые в грандиозном масштабе и в чрезвычайно тяжелых природных условиях тоннельные работы на Метрострое вызвали к жизни ряд новых приемов тоннелирования, являющихся ценным вкладом в мировую тоннельную технику.

В процессе работ практически выявилась технико-экономическая целесообразность применения того или иного метода производства работ в московских условиях. Особо следует отметить щитовой способ производства работ, при котором, производя механизированным путем разработку лба забоя, монтаж обделки и непрерывную погрузку и транспортировку породы, достигается полная индустриализация тоннельных работ при высоких темпах и качестве прокладываемых тоннелей. Щитовой способ принят для сооружения перегонных, станционных и подводных тоннелей линий Московского метрополитена им. Л. М. Кагановича.

Совершенно исключительный по своим результатам сдвиг был дан развернувшимся в тоннельном деле стахановским движением. Были достигнуты рекордные скорости проходки штолен — по 4,2 *пог. м* в смену (рекорд бригады т. Лушника, шахты № 75—77 Метростроя).

В городских условиях при наличии над трассой тоннеля зданий и подземных сооружений коммунального хозяйства, при которых вопрос осадок является решающим, приведенная скорость является непревзойденной, но далеко не пределом для наших стахановцев.

При проходке щитом в устойчивых породах скорость до 8 *м* в сутки готового тоннеля — величина, практически достигнутая Метростроем.

Главное заключается в том, что советские техники научились не только решать задачу

сооружения тоннеля, но и держать курс на культурное и мастерское проведение самого процесса тоннелирования.

Мощная техновооруженность позволяет при щитовой проходке провести не только полную механизацию основных трудоемких процессов, но и механизацию нетрудоемких работ.

Стахановские методы, внедренные в тоннельную технику, ломают установившиеся приемы организации, производства и механизации работ, выявляя совершенно новые, высокоэффективные технико-экономические показатели и темпы сооружения тоннелей.

Высокая производительность труда, дающая быстрое продвижение забоя вперед, настоятельно требует перестройки принципов механизации работ, в частности забойных машин и инструментов, погрузочных машин, тоннельного транспорта и подъема.

Процессы разработки забоя, погрузки, откатки и подъема должны быть строго согласованы между собой. Ни один из элементов запроектированной и установленной системы оборудования не должен тормозить или лимитировать развитие успеха, который обеспечен при условии правильного проведения стахановских методов. Перед инженерно-техническим коллективом тоннельщиков Союза открывается широкая арена для творческой работы в области проектирования ряда новых тоннельных методов, новых тоннельных машин и оборудования.

Богатейшая промышленность СССР в состоянии вооружить нас любыми техническими агрегатами и оборудованием, и наша основная задача будет заключаться в том, чтобы создать высший класс комплексной механизации всех тоннельных процессов.

Этим самым мы в специальной области сооружения тоннелей определенно превзойдем достижения науки и техники за пределами нашей страны.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОННЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТОННЕЛЕСТРОЕНИЯ

Искусство пробивки подземных ходов было известно еще в древности.

Новейшие археологические исследования и раскопки указывают, что тоннельные работы проводились за тысячелетия до нашей эры.

Подводный тоннель длиною 900 *м* был сооружен 4000 лет назад в мягких глинистых грунтах под дном реки Евфрат в Вавилоне. Этот тоннель поперечным сечением $4 \times 3{,}5$ *м* был построен из кирпича на асфальтовом растворе. Работы по сооружению тоннеля велись в открытом котловане, при этом река была временно отведена от своего русла.

Однако имеются основания предполагать, что указанный тоннель, соединявший храм с царским дворцом, не является первым, поскольку для проведения таких сложных работ строители, повидимому, должны были уже располагать определенным опытом в тоннельном деле.

Разнообразнейшие тоннельные выработки обнаружены в Индии. Индусы часто создавали тоннели для подземных храмов и гробниц.

Искусство прокладки тоннельных сооружений было известно в древней Греции, Египте, Ассирии, Риме. Подземные ходы, проложенные в древности, имели своей целью главным образом обеспечить секретность передвижения.

В Египте одним из фараонов был проложен длинный узкий подземный ход к усыпальнице.

Древнегреческий историк Диодор Сицилиус (жил в I веке до н. э.) упоминает о постройке Вавилонского тоннеля царицей Ассирии Семирамидой.

Тоннели использовали в древности во время войн, для проходки под стенами осаждаемого города с целью разрушения стен и открытия доступа в город. Римляне в боевой обстановке скрытно от врага строили тоннели для подачи воды.

Для осушения оз. Фусино, под горой Сальвино, римлянами был сооружен тоннель протяжением 5 *км*; поперечное сечение тоннеля $3 \times 1{,}8$ *м*. Проходка этого тоннеля (начатая за 41 г. до н. э.) была осуществлена из ряда наклонных и вертикальных шахт глубиной до 120 *м*. На строительстве этого тоннеля в течение 11 лет работало 30 000 человек.

В Италии имеется целый ряд древних водопроводных тоннелей и коллекторов, часть которых используется даже и в настоящее время.

Так, вблизи Неаполя обнаружен древний тоннель длиною 1 200 *м*, размерами поперечного сечения 8×9 *м*. Под оз. Альбано обнаружен тоннель длиною свыше 1,5 *км*, размерами сечения $2{,}4 \times 1{,}5$ *м*.

Подземные лабиринты и катакомбы Рима представляют собою большие подземные древние каменоломни, где добывался известняк и туф.

Греческим историком Геродотом (485—425 г. до н. э.) упоминался тоннель на о. Самос в Эгейском море. Этот тоннель, пройденный в скале, служил в древности (687 лет до н. э.) для подачи воды в г. Самос. Тоннель был обследован археологами в 1882 г., при этом установлена его длина в 1,6 *км* при размерах поперечного сечения $1{,}8 \times 1{,}8$ *м* и глубине заложения тоннеля от поверхности 270 *м*. Изумительные тоннельные творения древности прошли через тысячелетия до наших дней.

* * *

Замечательным памятником тоннельного искусства является подземный тоннель в Иерусалиме, сооруженный за 800 лет до н. э. Этот тоннель начинается у источника Марии, проходит под Иерусалимской каменной стеной и несет воду на протяжении 0,4 *км*. Высота тоннеля 1,7—3,1 *м*. Ширина тоннеля 0,6 — 0,9 *м*. Тоннель имеет много отдельных штольных ходов, совершенно «забросанных».

Сохранившиеся на стенах тоннеля древние надписи дали возможность установить, что проходка тоннеля велась одновременно с двух сторон на сбойку.

При этом строителями были допущены ошибки при разбивке оси тоннеля, вследствие чего получилось значительное удлинение хода (500 *м* вместо 300 *м*).

Следует отметить, что все эти тоннели прокладывались исключительно примитивными приемами — без применения взрывчатых веществ и каких-либо тоннельных машин. Тем не менее они представляют собой замечательные образцы древнего тоннельного искусства.

При сооружении этих тоннелей, помимо обычных приемов выдалбливания скалы с помощью клиньев и разных ручных инструментов, применялся способ накаливания скалы огнем до высокой температуры с последующим внезапным ее охлаждением водой или уксусом, что вызывало растрескивание породы, благодаря чему получалась возможность облегченной проходки (рис. 1).



Рис. 1. Выломка скальных пород огневым способом

Имеется предположение, что впервые порох для подземных работ был применен в горном деле на руднике примерно в 1600 г. Однако дата и место его применения не установлены. В тоннельном деле порохострельную работу ввели впервые во Франции в 1679 г. при проходке в известняках тоннеля-канала Лангедок (соединяющего Рону с Гаронной) длиною 150 *м*, поперечным сечением 6,6 × 8,7 *м*.



Рис. 2. Подземные разработки в древности

Состояние техники подземного дела в древности приводится в труде Агриколы «De Re Metalica libri XII», изданном в Базеле в 1556 г. На рис. 2 дана иллюстрация из этого труда.

В средние века тоннельные работы велись преимущественно в военных целях. Упадок культуры при феодальном строе породил застой и в развитии тоннельного строительства. Только в 1450 г. была начата пробивка тоннеля через Альпы, на высоте 2 *км*, с целью улучшения сообщения между Ниццей и Генуей. Однако этот тоннель, пройденный на длину 2,3 *км*, не был закончен.

Изобретение в 1847 г. итальянцем Собреро нитроглицерина и применение его шведом Нобелем для взрывных работ создало целую эпоху в истории техники и обусловило прогресс техники подземного строительства в скальных породах. Изобретение французским инженером Соммелье тоннельного перфоратора дало возможность механизировать процесс производства буровзрывных работ и значительно увеличить темпы проходки тоннелей.

В дальнейшем техника бурения непрерывно совершенствовалась и получила особое развитие при сооружении тоннелей в США. К середине XIX в. строители тоннелей уже располагали элементами мощного механизированного оборудования для производства работ. Имеются в виду буровые станки, оборудование для водоотлива, вентиляции, транспорта, взрывчатые материалы.

Необходимость сооружения тоннелей была вызвана развитием транспорта. В XVIII и в первые годы XIX столетия было сооружено большое число тоннелей.

Позднее, с появлением и развитием железных дорог, стали строить горные железнодорожные тоннели, открывшие новую эру в истории цивилизации.

Необходимость в сооружении тоннелей вызывается главным образом наличием на трассе прокладываемого пути естественных препятствий, обход которых вызывает значительную затрату средств. Кроме того, устройство обходного пути сопряжено со значительным ухудшением условий эксплоатации дороги.

В некоторых случаях наличие естественных препятствий (например, высокие горные кряжи, глубокие водные преграды) не дает возможности устроить обход, и поэтому приходится прибегать к сооружению тоннелей.

С развитием железных дорог выявилась необходимость в пересечении горных массивов тоннелями большого протяжения. Горные массивы, затрудняя непрерывность сообщения, вызывали большие эксплоатационные затруднения, препятствуя развитию мощного и постоянного грузопотока.

Обход горных препятствий за счет крутых подъемов и значительного удлинения трассы не отвечал требованиям железнодорожного транспорта.

В связи с этим выявилась настоятельная необходимость в проведении крупных тоннелей через горные хребты.

Открытие железной дороги между Дарлингтоном и Стоктоном (Англия) в 1825 г. дало большой толчок делу тоннельного строительства. Решающий сдвиг в тоннельной технике произошел после изобретения тоннельных машин и взрывчатых веществ. Одним из первых железнодорожных горных тоннелей в мире считается тоннель Тер Нуар (Франция), начатый строительством в 1826 г. Поперечное сечение этого тоннеля 5×3 *м*, а протяжение 1,5 *км*. Затем большие железнодорожные тоннели были проложены в Швейцарии. Здесь инженерное искусство строителей получило свое исключительное развитие.

Горная железнодорожная линия Вена — Триест, построенная в 1846—1853 гг., имела до 15 тоннелей, причем наибольший из них был протяжением до 1 430 *м*.

Хаунштейнский тоннель в Альпах имел длину 2 496 *м*.

Линия железной дороги Мон-Сени насчитывала 36 тоннелей.

В 1857 г. начали прокладывать через горную цепь Альп крупный железнодорожный тоннель Мон-Сени. Тоннель этот, протяжением 12,8 *км*, для обеспечения непрерывного железнодорожного сообщения между Турином и Парижем, был сооружен в скальных породах, непосредственно под перевалом. Тоннель строился силами Франции, Италии и Швейцарии в течение 13 лет и был открыт лишь в 1871 г. В 1872 г. был проложен грандиозный Сен-Готардский тоннель для двухпутного движения, протяжением 14,98 *км*, соединяющий Швейцарию с Италией. Строительство этого тоннеля, заложенного на глубине 1,5 *км* от поверхности, продолжалось 10 лет; тоннель был открыт для эксплоатации в 1881 г. В 1880 г. было приступлено к пробивке через Альпы Арльбергского тоннеля протяжением 10,24 *км*, а в 1895 г. — к сооружению самого длинного в мире Симплонского железнодорожного тоннеля через Альпы протяжением 19,73 *км*. Официальное открытие Симплонского тоннеля для железнодорожного движения состоялось 1 июня 1906 г. В период с 1906 по 1913 г. в Швейцарии построен Лечбергский железнодорожный тоннель протяжением 14,53 *км* на глубине 1 *км*, под горным ледником.

Всего к 1915 г. в Швейцарии было построено 627 железнодорожных тоннелей общей длиной в 281,2 *км*. Большое число железнодорожных тоннелей построено в Анг-

лии, Германии, Франции, Италии, Бельгии, Норвегии, а также в странах Америки.

В 1927 г. в США открыт для движения однопутный железнодорожный тоннель Моффат протяжением 9,92 *км* на железнодорожной линии Соленое озеро — Денвер.

В 1928 г. в штате Вашингтон на Великой Северной железной дороге был сдан в эксплоатацию однопутный Каскадный тоннель (Нью-Каскад) протяжением 12,4 *км*.

Размеры поперечных сечений тоннелей Моффат и Нью-Каскад 7,2 × 4,8 *м*.

В Японии построено свыше 100 тоннелей общим протяжением около 45 *км*. В 1928 г. закончен строительством тоннель Шимицу длиною 9,7 *км* на железнодорожной линии Нагаока — Такасаки. В 1934 г. закончен начатый строительством в 1918 г. Таннский тоннель протяжением 7,8 *км* на железнодорожной линии Атами — Мисима. Размеры поперечного сечения тоннеля 5,48 × 4,26 *м*.

В 1931 г. в Италии на железнодорожной линии Болонья — Флоренция закончен постройкой Большой Апеннинский железнодорожный тоннель протяжением 18,5 *км*, являющийся из двухпутных железнодорожных тоннелей самым длинным в мире.

В Советском Союзе имеется до 150 горных железнодорожных тоннелей общим протяжением в 60 *км*. Первые железнодорожные тоннели построены в России в 1859 г.: Ковенский — длиной 1 280 *м* и Виленский — длиной 430 *м*. В 1890 г. был открыт для движения самый крупный в стране Сурамский тоннель в Грузии длиной 3 998 *м*. Новороссийский тоннель имеет длину 1 384 *м*. Железная дорога, огибающая оз. Байкал, проходит через 39 тоннелей общим протяжением в 7,3 *км*.

На Дальнем Востоке построено до 20 железнодорожных тоннелей. Почти столько же железнодорожных тоннелей сооружено на Закавказской дороге. Ряд тоннелей построен на Армавир-Туапсинской и Черноморской железных дорогах.

Наряду с сооружением горных железнодорожных тоннелей в Западной Европе и в особенности в Америке широко развилось строительство подводных, гидротехнических тоннелей, метрополитенов и других тоннелей специального назначения.

По своему назначению тоннели классифицируются следующим образом.

1. Горные тоннели — для сообщения через горные хребты.

2. Подводные тоннели (взамен мостов) — для автомобильного, пешеходного и железнодорожного движения под водными преградами (протоки, проливы, реки).

3. Тоннели метрополитенов и глубоких вводов железных дорог — для пассажирского и грузового движения.

4. Гидротехнические тоннели: а) утилизационные — для отвода и подачи воды при гидроэлектроустановках и б) ирригационные тоннели — для целей орошения.

5. Судоходные тоннели — тоннели-каналы для судоходного движения.

6. Коммунальные тоннели — для всевозможных видов городских подземных сооружений (водопровод, газопровод, канализация, теплофикация, телефон, телеграф, почта, электрокабели).

7. Тоннели специального оборонного назначения—подземные ангары, гаражи, бомбо- и газоубежища, заводы, электростанции, склады и другие помещения.

8. Тоннели комплексного назначения, допускающие по своим габаритам поперечного сечения пропуск различных видов транспорта и устройств канализации.

ГОРНЫЕ ТОННЕЛИ

Горные хребты, являющиеся естественным препятствием для нормального сообщения, в практике транспортного строительства обычно прорезаются тоннелями. Из тоннелей горного типа преимущественно различаются тоннели железнодорожные для парового и электрического транспорта и тоннели для автомобильного и гужевого движения. В горных условиях, например в Швейцарии, встречаются тоннели и под фуникулеры (канатная или зубчатая железная дорога).

По глубине заложения горные тоннели разделяются на тоннели базисного и вершинного типа.

Глубина заложения горных тоннелей по отношению к уровню моря определяется после исследования характеристики ожидаемых природных трудностей в местных условиях в период прокладки базисного тоннеля и затруднений, ожидаемых в период эксплоатации вершинного тоннеля.

Следует иметь в виду, что условия эксплоатации вершинных горных тоннелей значительно хуже условий эксплоатации базисных тоннелей; к тому же увеличиваются расходы по содержанию припортальных

участков, выемок, подверженных оползням и снежным обвалам.

В зависимости от характера продольного профиля горные железнодорожные тоннели бывают двускатного и односкатного профиля. В силу особенностей топографических условий (сильно пересеченная местность) тоннели иногда прокладываются по сложной трассе; в таких случаях они получаются спирального или петлевого вида.

ТОННЕЛИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ

Чтобы проследить этапы развития и усовершенствования методов постройки длинных тоннелей через горные хребты, следует остановиться на истории строительства тоннелей через горную цепь Альп.

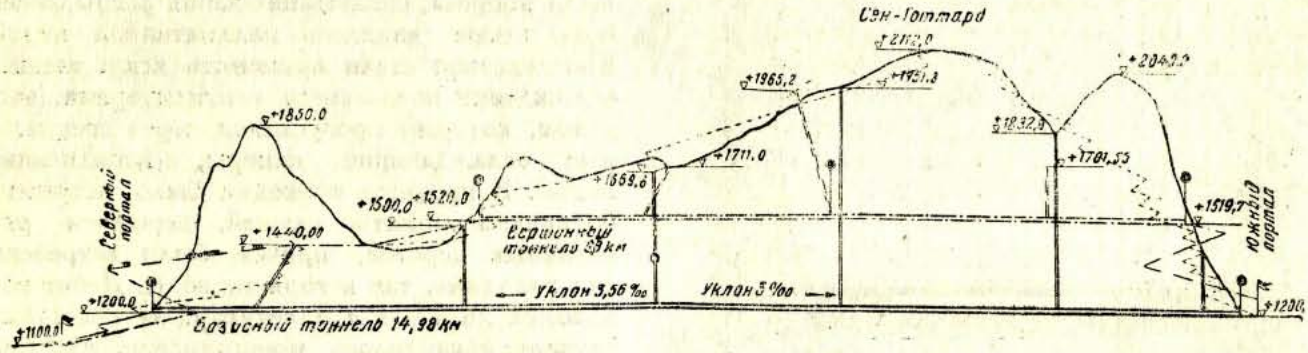


Рис. 3. Сен-Готардский тоннель (продольный разрез)

Из построенных и находящихся в эксплоатации железнодорожных тоннелей наиболее значительными являются Сен-Готардский, Симплонский (Швейцария—Италия), Таннский (Япония) и Апеннинский (Италия).

Сен-Готардский тоннель проложен в Центральных Альпах. Он соединяет пункт Гошенен (на севере) на высоте 1 100 *м* над уровнем моря с пунктом Ейроло (на юге) на высоте 1 145 *м*. Тоннель протяжением 14,98 *км* предназначен для двухпутного железнодорожного движения (рис. 3). Поперечное сечение тоннеля в свету 7,4 × 8 *м*. К пробивке направляющих штолен приступили в 1872 г. одновременно с двух порталов — на сбойку. Размеры направляющих штолен 2,5 × × 2,5 *м*. На протяжении около 2 600 *м* работы производились в скальных породах, причем было применено машинное бурение как с гидравлической, так и с электрической энергией. При взрывных работах суточный успех проходки штолен составлял 4,49 *м*. Удаление породы и подача материалов производились рабочими поездами с воздуховозами.

В процессе проходки тоннеля наблюдался большой приток подземных вод (до 348 *л* в секунду), заливавших основные работы. Температура в тоннельных выработках доходила до 30,8° С.

Обделка тоннеля была из бутовой кладки.

При проходке тоннеля особенно большое горное давление было обнаружено при пересечении глинистых пластов, которые деформировали деревянное крепление; при этом в некоторых выработках происходили обвалы. Для проходки зоны с значительным горным давлением пришлось прибегать к системе металлического крепления.

Сбойка штолен произошла 28 февраля 1880 г., при этом были отмечены следующие невязки осей: в плане — до 250 *мм*, по вертикали—100 *мм*, а вдоль оси тоннеля—360 *мм*. Первый поезд по Сен-Готардскому тоннелю пропущен 24 мая 1881 г. Продолжительность строительства Сен-Готардского тоннеля 9 лет и 4 месяца.

Следует указать, что за время строительства тоннеля произошло 580 несчастных случаев, из которых 177 смертных и 403 травматических.

Симплонский тоннель пересекает горный хребет на протяжении 19 730 *м*, возвышаясь над уровнем моря на 705 *м*. Тоннель проходит на протяжении 10 660 *м* по территории Италии и 9 070 *м* — по территории Швейцарии.

Симплонский тоннель является самым длинным железнодорожным тоннелем в мире.

Тоннель построен в виде двух отдельных, параллельных однопутных тоннелей при расстоянии между их осями в 17 *м*; оба тоннеля соединены квершлагами через каждые 200 *м*. Размеры тоннеля в свету 5×5,35 *м* (рис. 4). В зависимости от пересекаемых тоннелем пород каменная обделка при крепких скальных

породах имеет 35 *см* в ключе. В местах пересечения тоннелем зоны с большим горным давлением толщина ключа обделки доходит до 1,5 *м*, а в некоторых местах до 1,7 *м*, при этом размер тоннельной обделки соответствует по внешнему контуру 9,3×10,32 *м*.

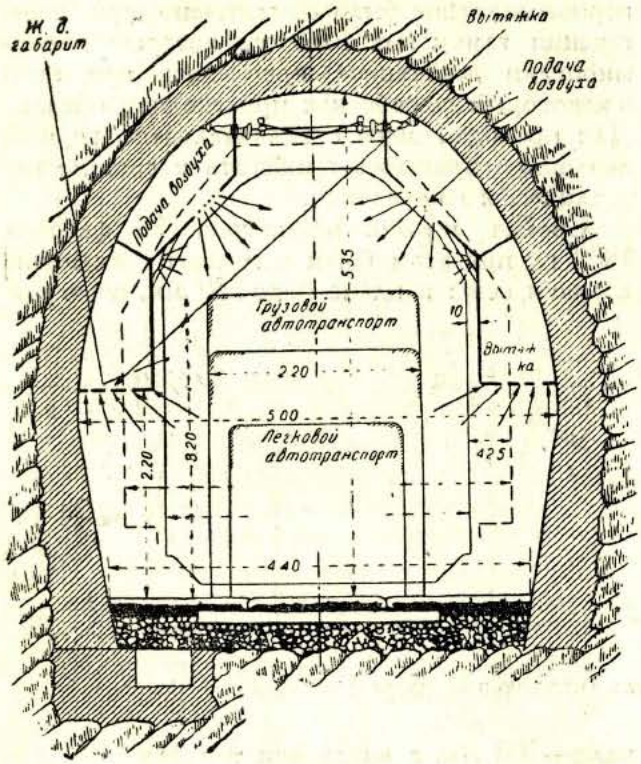


Рис. 4. Симплонский железнодорожный тоннель (приспособление его для автомобильного движения)

Решение о строительстве двух однопутных тоннелей было принято главным образом в связи с ожидавшимся значительным горным давлением, обильным притоком вод, газов, высокой температурой.

Симплонский тоннель имеет двускатный профиль. Отметки порталов разнятся по высоте на 53 *м*. Со стороны Швейцарии имеется уклон 0,002, со стороны Италии — 0,007. Длина разделительной площадки 500 *м*. По своему положению над уровнем моря Симплонский тоннель является наиболее глубоко заложенным, базисным тоннелем. Толща кровли горного массива над шелыгой свода Симплонского тоннеля достигает в высшей точке 2 150 *м*.

К работам по пробивке направляющей штольни было приступлено в мае 1895 г. С швейцарской и итальянской сторон пробивалось по два направляющих хода и производились поперечные сбойки через каждые 200 *м*. Принятая система облегчала искусственную подачу воздуха к забою, где температура доходила до 56° С, а равно условия внутритоннельного транспорта, отвода подземных вод и безопасности производства работ.

Порода разрабатывалась взрывным способом. Бурение велось с применением гидравлических сверл системы Брандта при давлении рабочей жидкости до 100 *ат*. По забою штольни закладывалось до 10—12 скважин, глубиной шпура в 1,5 *м*.

Особые затруднения вызывала исключительно высокая температура в забое (56° С). Применение усиленной вентиляции не разрешало вопроса, охлаждение забоя распылением воды также являлось паллиативной мерой. Впоследствии стали применять искусственное охлаждение подаваемым вентиляторами воздухом, который пропускался через специальные охлаждающие камеры, наполненные льдом. В процессе проходки было встречено большое количество ключей, пересечен ряд активных карстов, причем были встречены как холодные, так и горячие воды. Дебит вод доходил до 1 200 *л* в секунду. В некоторых случаях приходилось приостанавливать тоннельные работы, пропускать воду полным сечением по всей штольне и вести борьбу с водой установкой ряда металлических перемычек.

При проходке Симплонского тоннеля с итальянской стороны пришлось встретиться с особенно большим горным давлением. Разрушенные породы (сланцы) производили усиленное давление на деревянные крепи и на готовые своды; начальная деформация крепей возрастала, и дело доходило до обвалов. В дальнейшем пришлось применять тоннельные крепления усиленных металлических конструкций.

При постройке Симплонского тоннеля применялись также бурильные машины, действовавшие при помощи сжатого воздуха. При этом суточная скорость проходки направляющих штолен достигала 11,2 *м*.

Первый Симплонский тоннель был открыт для эксплоатации в 1906 г. Параллельный с ним тоннель был начат разработкой в 1912 г. В 1914 г. работы были прерваны из-за мировой войны, и лишь в 1921 г. второй Симплонский тоннель был открыт для эксплоатации (рис. 5, 6).

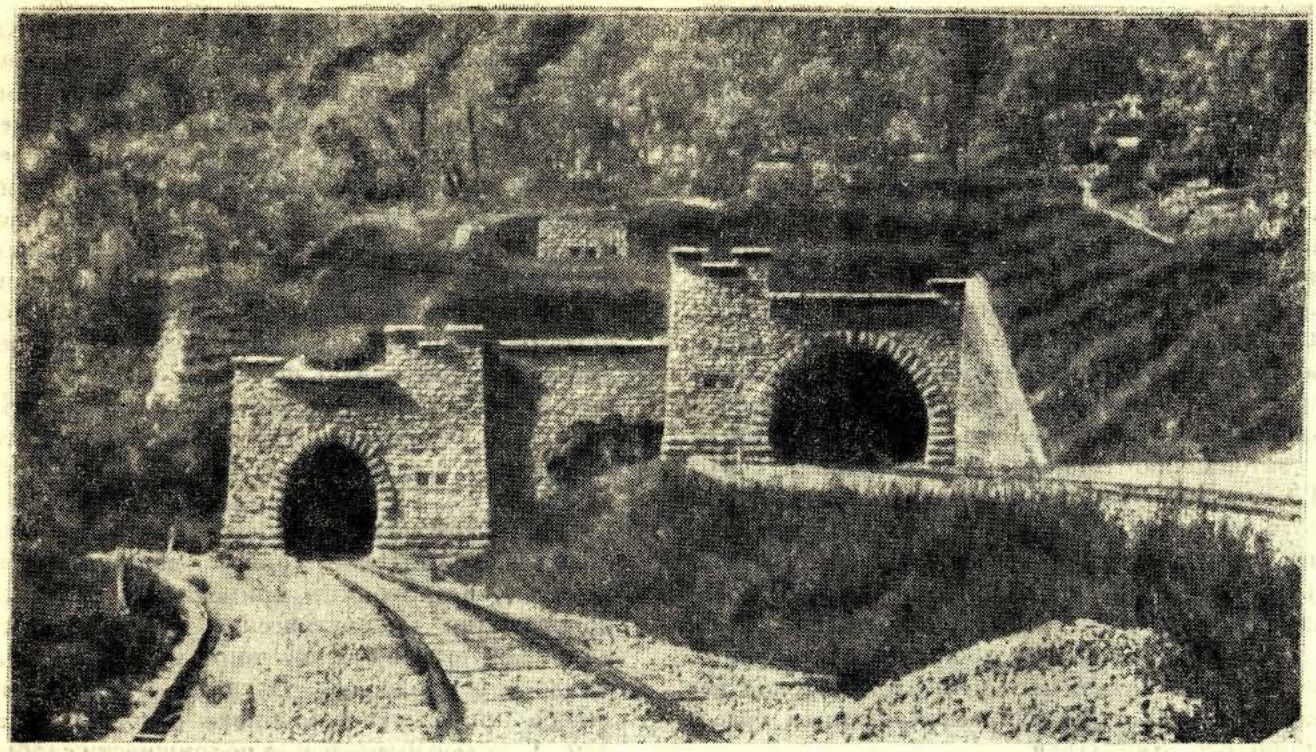


Рис. 5. Симплонский тоннель (порталы)



Рис. 6 Станция Бриг (Швейцария), от которой начинается Симплонский тоннель

Рада Народного господарства Львівського економічного адміністративного району

Лечбергский тоннель (протяжением 14,5 *км*) является единственным из альпийских тоннелей, который в период постройки потребовал изменения первоначально установленной трассы.

Работы по сооружению Лечбергского тоннеля были начаты в 1906 г. и почти около двух лет велись в устойчивых породах нормальными приемами, без всяких осложнений. Однако по мере продвижения забоя приток подземных вод в июле 1908 г. начал резко возрастать. 24 июля забой был внезапно прорван лавиной песка с водой под большим напором. Стремительность прорыва привела к затоплению тоннеля на протяжении около 1,5 *км*. Было установлено, что р. Кандэр, под которой на глубине 180 *м* был заложен тоннель, имела гидравлическую связь с песчаными грунтами, заполнявшими глубокий древний размыв, пересеченный тоннелем.

От проходки в условиях неустойчивых песчаных грунтов, насыщенных водой под напором в 180 *м*, по запроектированной трассе пришлось отказаться.

Дальнейшие работы по сооружению Лечбергского тоннеля решено было вести по новой трассе, в обход на расстоянии 1,5 *км* от завала, с использованием части уже построенного тоннеля протяжением 1 180 *м* от северного портала.

Проходка тоннеля по новой трассе протекала без осложнений, если не считать припортальных участков тоннеля, прорезавших оползневую зону. Был построен ряд тоннельных галлерей, защищавших железнодорожное полотно на указанных участках от горных снежных лавин и каменных осыпей.

Таннский двухпутный тоннель на железнодорожной линии Токио — Кобэ (Япония) был начат строительством в 1913 г. Протяжение тоннеля — около 7,8 *км*, сечение в свету 5,48 × 4,26 *м*. Тоннель проходит в исключительно тяжелых геологических условиях. Он пересекает массив вулканических образований, нарушенных дислокациями пород. Последние имеют трещины и выклинивания до 10—15 *м*, заполненные глинистым материалом и слабыми илистыми грунтами, проявлявшими сильное давление на крепи.

Напор подземных вод доходил до 20 *ат*. Встречались и горячие источники с температурой до 35° С. С целью преодоления указанных трудностей в процессе проходки были применены разнообразнейшие методы тоннельных работ.

Вначале работы производились при двух направляющих штольнях, с раскрытием профиля по австрийскому методу работ (см. главу VII). Но в дальнейшем, при пересечении глинистых пород, проявивших при пучении исключительное давление на крепи, пришлось перейти на металлическое крепление. Работы осложнялись также значительным притоком в разработки вод под большим напором. Для возможности ведения дальнейших работ пришлось пробить вначале специальную дренажную штольню, затем была пробита система дренажных галлерей. На некоторых участках было пройдено до пяти галлерей, параллельных оси основного тоннеля.

При пересечении слабых грунтов наблюдалось значительное горное давление, при котором, несмотря на применение усиленной конструкции металлических крепей, вести дальнейшую разработку тоннеля не представлялось возможным. В связи с этим пришлось прибегнуть к пробивке обходных штолен. С целью уменьшения подвижности слабых пород и возможности проходки в них предварительно производились бурение скважин и инъекция пород. Для борьбы с водой, проникавшей по трещинам скальных пород, прибегали к бурению скважин и к интенсивной цементации пород. Кроме того, применялись методы химического закрепления пород хлористым кальцием и жидким стеклом. На некоторых участках слабых грунтов работы велись с применением сжатого воздуха. Однако в условиях пород Таннского тоннеля наблюдалась значительная утечка воздуха, которая несколько уменьшалась торкретированием обнажаемых поверхностей выработок. При пересечении зоны слабых грунтов применялись крепления массивными бетонными блоками и мощными металлическими крепями.

Для проходки дренажной штольни в северной части Таннского тоннеля применялся специальный щит с закрытой грудью под сжатым воздухом.

Однако применение щита в данном случае оказалось неудачным, так как в процессе проходки корпус щита был затянут плывунами и затонул.

В дальнейшем забой штольни врезался в скальную породу и работы велись взрывным способом. На другом участке трассы горное давление оказалось настолько чрезмерным, что, несмотря на наличие мощного

стального крепления, произошло обрушение кровли выработки на протяжении 60 *м*.

Большие деформации по всему контуру стальных креплений (в кровле, подошве и боках выработки) проявлялись при пересечении пучащих глинистых грунтов.

Толщину свода тоннельной обделки пришлось доводить до 1,9 *м*. Ни одна конструкция обделки тоннелей мира не имеет таких больших размеров.

После 16 лет упорного труда строителей Таннский тоннель был закончен постройкой и открыт для движения в 1934 г.

Апеннинский тоннель на железнодорожной линии Болонья — Флоренция (Италия) пересекает горные кряжи с высотами до 2 000 *м* над уровнем моря. Протяжение Большого Апеннинского тоннеля 18,5 *км*. Несмотря на то, что он по своему протяжению уступает Симплонскому тоннелю (19,7 *км*) с точки зрения тоннельно-строительного дела, осложненного режима природных условий, методов производства работ (высокая температура, горячие и напорные воды, сильное горное давление, подземные газы, давление струй до 13 *ат*), этот тоннель является по своей сложности одним из наиболее выдающихся в мире. Условия геологических напластований по трассе тоннеля чрезвычайно разнообразны. Были пересечены глинистые сланцы, песчаники, мергели, известняки с исключительно высоким коэфициентом крепости, глины, проявлявшие значительное пучение, и т. д. Породы были разбиты трещинами и имели включения слабых пород.

В процессе проходки сланцы перерождались в глину и проявляли значительное давление на крепи. В период пересечения глинистых грунтов и песков вскрывались газовые мешки, причем газ выходил под давлением. Дебит вод из отдельных струй достигал 250 *л/сек*.

Разработка тоннеля производилась из портальных участков и наклонных шахт. Шахты имелись в середине тоннеля, где была устроена станция для обгона местных поездов скорыми. Длина станционной камеры 154 *м* при пролете 16,97 *м*. От станции отходили тупики для отстаивания поездов.

К сооружению Большого Апеннинского тоннеля приступили в 1920 г. с обоих порталов на сбойку. В основном при строительстве тоннеля была применена бельгийская двухштольневая система производства работ. При пробивке тоннеля были достигнуты большие скорости проходки: до 14,4 *м* готового тоннеля в сутки и до 425 *м* в месяц (май 1928 г.) (рис. 7).

В зависимости от характера пересекаемых пород тоннельные обделки были созданы шести типов—без обратного свода и с обратным сводом. При этом толщина свода в замке колебалась от 61 *см* до 1,07 *м*. В стенах тоннеля через каждые 50 *м* были устроены нормальные ниши и три ниши для укрытия рабочих при производстве ремонтных работ в период эксплоатации тоннеля. Кроме того, было сооружено десять больших камер для складов материалов и рельсов.

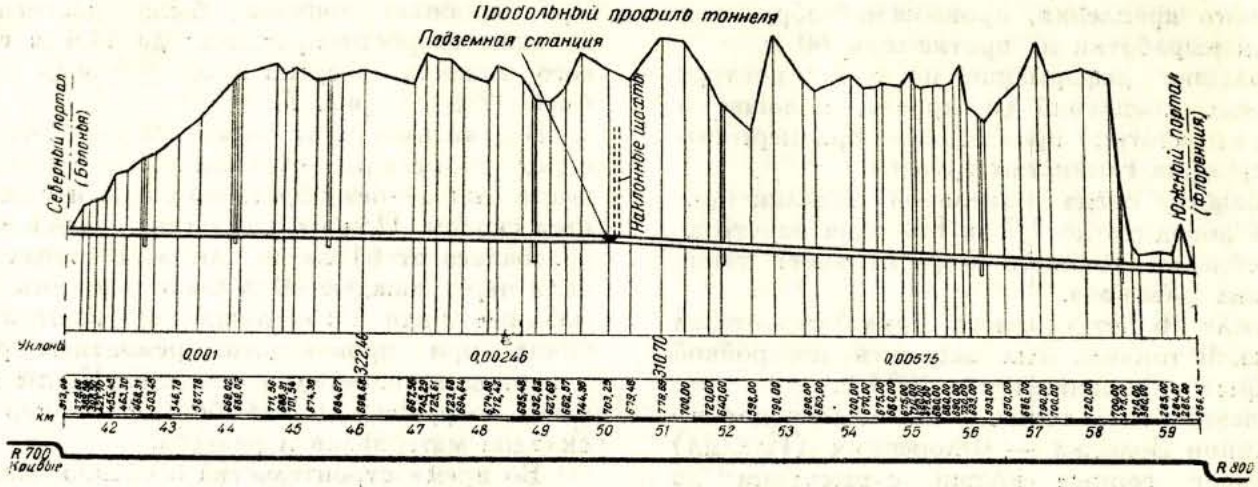
Во время строительства особенно большие затруднения выявились при пересечении участков глинистых пород. Деформация креплений была настолько велика, что сечение выработок сокращалось до размеров, не позволяющих пропускать вагонетки, поддерживать необходимые трубопроводы и вести нормально работы. В связи с этим на участках с большим давлением была применена штольня полуциркульного сечения (радиусом 3,25 *м*) из тридцатисантиметровых деревянных блоков.

Следует отметить, что вследствие значительного горного давления пришлось вести дополнительную реконструкцию тоннеля, в результате чего было переложено до 7 800 $м^3$ каменной кладки.

Скорость проходки в условиях большого горного давления была значительно снижена и доходила до 20 *м* в месяц.

В процессе работ по сооружению Апеннинского тоннеля строителям пришлось вести ожесточенную борьбу с газами, которые в большом количестве устремлялись через трещины породы в подземные выработки. В начале работ выделение газов было вызвано взрывом при обвале крепления. Газы выходили отдельными струями и под большим напором. Катастрофа сопровождалась рядом жертв среди проходчиков. В дальнейшем тоннельные работы были переведены на газовый режим.

Взрывные работы велись с особыми мерами предосторожности. По всем тоннельным выработкам были уложены специальные водопроводные трубы, дававшие возможность вести борьбу с подземными пожарами. Бензиновозы были заменены воздуховозами. Работа вентиляционных установок была усилена. Но, несмотря на ряд принятых мер, работа в га-



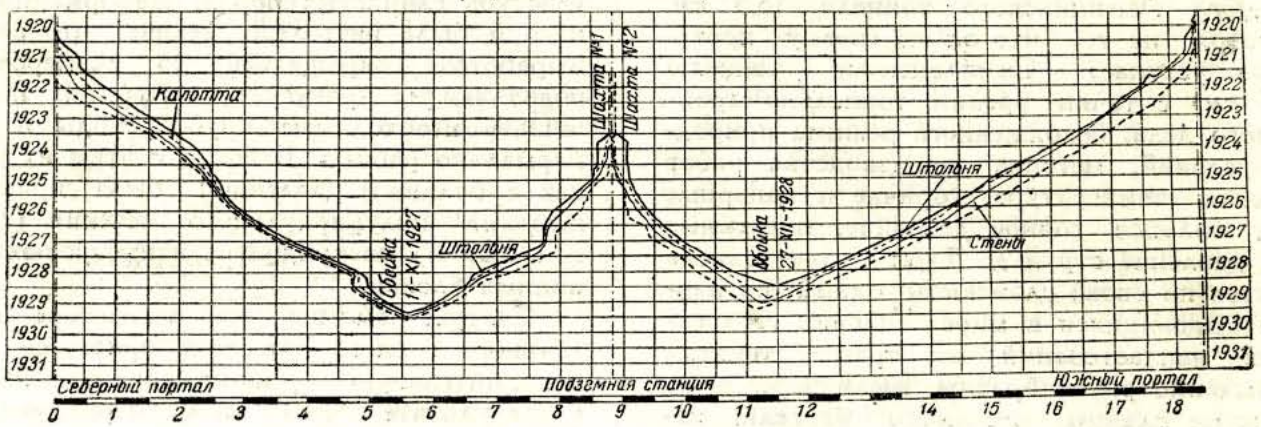






Рис. 7. Большой Апеннинский тоннель на железнодорожной линии Болонья — Флоренция (Италия)

зовом режиме привела к ряду катастроф, которые, помимо людских и материальных жертв, вынуждали прерывать работы на продолжительное время (до полугода).

Пожары в тоннеле происходили неоднократно, причем горение деревянного крепления сопровождалось обвалом горных участков. Тоннельные выработки заполнялись дымом, приходилось прекращать работы на всем протяжении тоннеля, несмотря на интенсивную работу вентиляционных установок. Обвалы тоннеля распространялись на протяжении до 300 *м*. Температура в тоннельных выработках доходила до 63° С и более. Один из пожаров длился три дня; несмотря на попытки установить ряд решеток и тушить огонь сильными струями воды, пожар не прекращался. В связи с этим пришлось полностью затопить штольневые выработки; чтобы не прекращать дальнейших работ, было решено проложить обходный параллельный штольневый ход, на расстоянии 15 *м* от оси тоннеля, протяжением до 200 *м*.

Помимо борьбы с газом, строителям Апеннинского тоннеля пришлось вести большую борьбу с подземными водами. Следует указать, что дебит вод доходил до 440 *л/сек*. На некоторых участках при прорыве вода полностью заливала тоннельные работы, заполняла штольневые выработки, в результате чего приходилось прекращать работы. Для ограждения остальных участков тоннеля от затопления устраивались каменные перемычки с заложенными в них трубопроводами. После выпуска воды в перемычку нагнетался цементный раствор и работы возобновлялись.

Особенно большие неприятности доставили строителям шесть подземных струй воды, которые с исключительной силой, под давлением до 12 *ат*, устремлялись в тоннельные выработки. В этом случае борьба велась также установкой кирпичной перемычки с трубопроводами, при помощи которых производился выпуск воды.

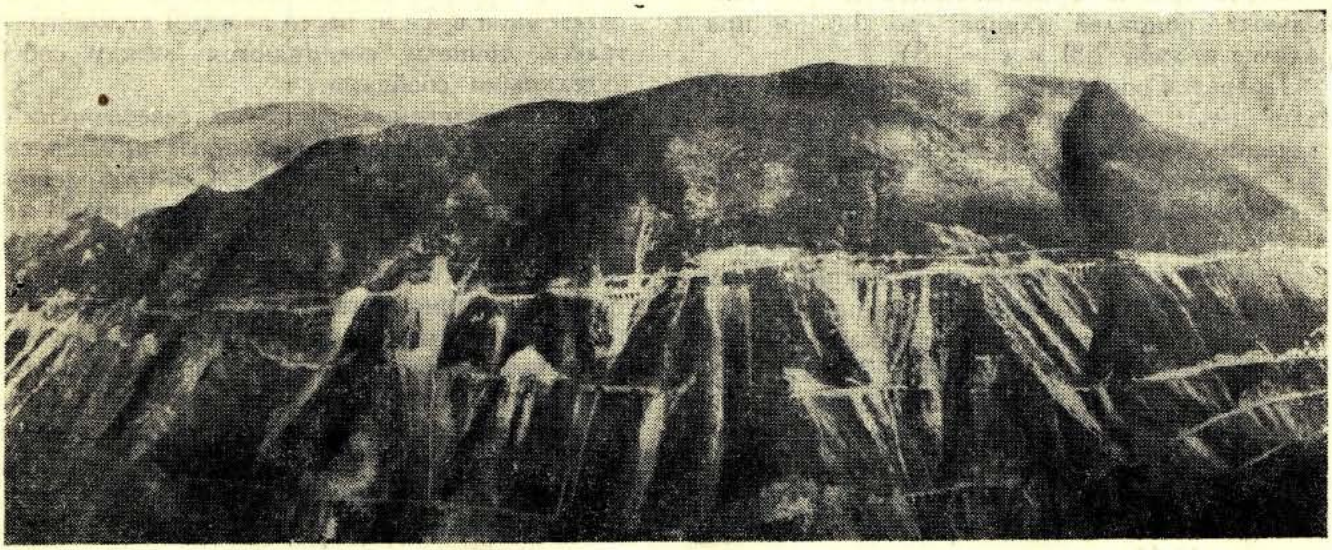


Рис. 8. Трансиранская железная дорога (панорама перевального участка, содержащего 10 тоннельных спиралей)

В одном месте установленная кирпичная перемычка не выдержала напора. Пришлось немедленно установить металлическую перемычку. После пропуска обильного количества вод масса слабого грунта, скопившегося за перемычкой, была укреплена нагнетанием цементного раствора под давлением.

* * *

При постройке Багдадской железной дороги, обеспечивающей сквозное движение между Босфором и Персидским заливом, было осуществлено пересечение Таурусского горного хребта высотою 1 500 *м* над уровнем моря.

При этом на участке линии длиною 47 *км* построено 10 тоннелей, из них тоннель между Шора и Мосулом (горный участок Анатолийского плато) имеет длину 950 *м*. Последний участок Багдадской железной до-

роги Мосул — Бейдзей закончен постройкой в июле 1939 г.

Трансиранская железнодорожная магистраль из Бендер-Шах (на Каспийском море) через Тегеран в Бендер-Шахпун на Персидском заливе, имеющая протяжение 1 300 *км*, открытая для движения 20 августа 1938 г., содержит на своей трассе целый ряд тоннелей. Для преодоления перевалов и при подходе к северному склону Эльбурца было принято развитие трассы с применением до 10 тоннельных спиралей длиною до 1,6 *км* при радиусе кривой 200 *м* (рис. 8).

Прорезая оползневую зону, некоторые тоннели имеют мощную железобетонную конструкцию несимметричного сечения обделки. Ряд тоннельных сооружений базируется на подпорных стенах высотой до 26 *м*.

Учитывая сейсмичность района, при проектировании тоннельных конструкций были учтены технические мероприятия против действия землетрясения на северном участке трассы. Перевал Гадук, высотой 2 440 *м*, прорезается тоннелем длиною 2 885 *м* на уровне 2 080 *м*. На южном участке трасса проходит через ущелья и труднодоступные Ларистанские горы, прорезаемые тоннелями. На участке длиною в 32 *км* построено 38 тоннелей длиною 15,11 *км*, т. е. почти на половине длины участка трассы.

На новой железнодорожной линии Тегеран — Тавриз, открываемой участками по мере окончания строительства — до Казвина (144 *км*) открыта в марте 1944 г. и до Зенджана (314 *км*) в октябре 1941 г., — построен ряд тоннелей. Между Тавризом и Миане сооружено два тоннеля длиною по 590 *м* каждый. Осталась еще проходка четырех тоннелей, один из которых имеет длину более 2 *км*.

Характеристика горных железнодорожных тоннелей приведена в табл. 1 (см. стр. 23—26).

ТОННЕЛИ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

В качестве наиболее интересных в техническом отношении горных тоннелей для автомобильного движения можно привести ряд проектируемых и строящихся тоннелей через Альпы.

Автомобильный тоннель под Монбланом для соединения автострады Рим — Париж на протяжении 12,5 *км* по проекту прорезает скальный горный массив, преимущественно гранито-гнейсы и кристаллические сланцы. Исключительный интерес представляет собой проектируемый метод транспортировки породы. Последняя будет дробиться специальными камнедробилками до размеров фракции в 5—6 *см* и транспортироваться с водой по чугунным лоткам. Этот вид гидравлического транспорта заслуживает серьезного изучения. Под Монбланом имеется в виду сооружение двух однопутных тоннелей шириною в свету по 6 *м*, расположенных на взаимном расстоянии в 25 *м*; через каждый километр по трассе тоннели соединяются между собой отдельными сбойками.

Для соединения южно- и североевропейских автомобильных дорог проектируется сооружение через Альпы Сен-Готардского тоннеля для автомобильного движения. В настоящее время европейские автомобильные дороги между собой не связаны из-за естественного препятствия в виде Альпийских гор. Существующие дороги через Сен-Готард не обеспечивают непрерывности движения в связи со снежными заносами и обвалами. Около четырех месяцев гужевые дороги через Сен-Готард закрыты для движения. Таким образом, выявляется настоятельная необходимость в пробивке специального тоннеля для автодвижения.

Длина проектируемого вершинного тоннеля для автомобильного движения составляет 9,8 *км*, а по варианту базисного тоннеля, проходящего на 900 *м* под перевалом Сен-Готард, 15,1 *км*. Отдано предпочтение варианту базисного тоннеля, прорезающего массив альпийских гнейсов и диоритов, где по данным геологического прогноза не ожидается проявления сильного горного давления в период проходки.

В поперечном сечении тоннеля предусматривается устройство вентиляции, которая является решающей в эксплоатации данного тоннеля. Ширина проезжей части составляет 6,5 *м*, высота тоннеля в свету 4,2 *м*. Подачу свежего воздуха предполагают вести под проезжей частью, а вытяжку по верхней части тоннеля. В зависимости от проявляемого горного давления намечены три типа бетонной обделки с толщиной ключа свода от 0,35 до 1 *м*. В тоннеле предусмотрен специальный тротуар шириной в 65 *см* для охраны и прохода пассажиров в случае аварии машин. Габариты тоннеля дают возможность пропуска кабелей и других проводок.

Таблица 1

Горные железнодорожные тоннели мира
(даты постройки и технические показатели)

Годы строительства	Наименование тоннелей	Страна	Тоннель: однопутный (О), двухпутный (Д)	Длина в *км*	Высота в *м*	Ширина в *м*	Трасса тоннеля: прямая (П), кривая (К)	Порода	Обделка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1837—1841	Бокс	Великобритания	Д	2,90	8,40	9,00	—	Скала	Кирпич
1840—1842	Блехингли	»	»	1,28	7,50	7,20	П	Глина	»
1842—1843	Салтвуд	»	»	0,80	7,65	7,20	»	Песок	»
1845—1848	Монгрейв	»	»	1,12	5,70	7,95	К	Скала	»
1854—1856	Лайдгент	»	»	1,28	6,00	7,50	—	Разные горные породы	Бутовая кладка
1854—1876	Хузак	Америка	»	7,52	5,94	7,50	П	Скала	Кирпич
1854—1871	Сендпат	»	О	1,44	4,95	4,80	»	»	Без обделки
1855—1861	Берджон	Великобритания	Д	1,28	6,30	8,40	»	»	»
1856—1858	Незертон	»	»	2,72	7,29	8,10	»	Разные горные породы	Кирпич
1857—1871	Мон-Сени	Франция	»	12,84	7,38	7,86	К	Скала	Бутовая кладка
1859—1862	Ковенский	СССР	»	1,28	6,40	8,90	»	Глина	Кирпич
1859—1863	Букхорн-Вестон	Великобритания	»	0,64	7,20	7,50	П	»	»
1866—1870	Носике	»	О	0,48	6,06	4,80	»	Скала	Дерево
1866—1895	Текуик квак	Мексика	—	9,92	4,20	4,20	»	»	Блоки
1871—1873	Балтимора	Америка	Д	2,08	5,55	8,10	К	Разные горные породы	Бутовая кладка
1871—1874	Клифтон	Великобритания	»	1,60	6,24	7,80	П	Скала	»
1871	Кристина	Италия	О	1,43	—	5,6	—	Глин. породы	—
1872—1874	Черчхил	Америка	Д	1,12	5,76	8,25	К	Глина	Бутовая кладка
1872—1875	Мусконетконг	»	»	1,44	6,30	7,80	П	Разные горные породы	»
1872—1881	Сен-Готард	Швейцария	»	14,98	7,40	8,00	К	Скала	»
1874—1877	Бергхен	Америка	»	1,28	6,30	8,10	П	»	Бутовая кладка
1878—1880	Осакаяма	Япония	О	0,64	4,20	4,20	—	»	Кирпич
1879—1886	Северн	Великобритания	Д	7,04	7,35	7,80	К	»	»
1879	Фрида	Германия	»	1,07	—	8,20	—	»	—
1879	Кюльштанд	»	»	1,53	—	8,20	—	»	—
1880—1883	Арльберг	Австрия	»	10,24	7,50	8,20	П	»	Без обделки
1882—1889	Ронго	Италия	»	8,26	—	—	—	»	Бутовая кладка
1883—1886	Восбург	Америка	»	1,12	6,21	8,40	К	Разные горные породы	»
1886—1888	Стемпед	»	О	3,04	6,60	4,95	—	»	Бетон

Продолжение

Годы строительства	Наименование тоннелей	Страна	Тоннель: однопутный (О); двухпутный (Д)	Длина в км	Высота в м	Ширина в м	Трасса тоннеля: прямая (П), кривая (К)	Порода	Обделка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1887	Мариенталь	Германия	О	1,04	—	5,50	—	Разные горные породы	—
1888—1890	Литлтом	Великобритания	„	0,64	6,03	4,20	—	Скала	Кирпич
1888—1892	Коуборн	„	Д	3,36	7,35	8,10	П	„	Бутовая кладка
1888—1892	Тотлсу	„	„	5,60	7,80	8,10	К	Разные горные породы	„
1889	Большой Новороссийский	СССР	„	1,38	—	8,75	—	„	—
1889	Малый Новороссийский	„	„	0,38	—	8,75	—	„	—
1890—1892	Ниагара	Америка	О	2,08	6,30	5,70	П	Скала	Кирпич
1890	Баск	„	„	2,72	6,30	5,70	—	„	Дерево
1890	Сурамский	СССР	Д	3,99	—	8,95	—	—	—
1890	Вейсенштейнский	Швейцария	—	3,70	—	—	П	—	—
1891—1894	Ист-Ривер-Газ	Америка	—	—	2,55	3,15	„	Разные горные породы	—
1893	Панир	Индия	Д	0,96	6,21	8,85	—	„	—
1893	Кремолино	Италия	—	3,41	—	5,60	—	Скала	—
1894	Туркино	„	Д	6,45	—	8,00	—	„	—
1895	Амтхил	Великобритания	„	0,64	7,50	7,65	—	Глина	Кирпич
1895—1897	Гейтсбай	„	„	2,72	7,65	8,10	—	„	„
1895	Грейвхолтц	—	О	5,28	—	—	—	Скала	—
1895—1906 1912—1921	Симплон	Италия—Франция	„	19,73	5,35	5,00	К	Разные горные породы	—
1895	Коль-де-Кабр	Франция	Д	6,80	—	9,00	—	Скала	—
—	Боулдер	Америка	О	1,92	6,45	4,71	К	„	Бут
—	Палисадс	„	„	—	—	5,40	—	„	—
1897	Квимгервим	Великобритания	„	0,96	—	—	К	Разные горные породы	Чугун
1897—1900	Каскад	Америка	„	4,16	6,45	4,80	П	Скала	Бетон
1898	Джаджурский	СССР	Д	1,71	—	8,75	„	Разные горные породы	—
1899	Рехберг	Чехословакия	О	0,32	—	5,50	„	Скала	—
1899	Колледи-Тенда	Италия	Д	8,10	—	8,00	„	Разные горные породы	—
1900—1901	Шерман	Америка	„	0,48	—	—	„	Скала	—
1900	Медон	Франция	„	3,34	7,30	9,00	„	Разные горные породы	Бетон
1901	Коль-Сен-Мишель	„	О	3,49	—	5,00	„	Скалистые и глинистые породы	—
1901	Чикаго - ж. д.	Америка	—	1,04	4,25	4,80	К	Глина	Бетон

Продолжение

Годы строительства	Наименование тоннелей	Страна	Тоннель: однопутный (О), двухпутный (Д)	Длина в *км*	Высота в *м*	Ширина в *м*	Трасса тоннеля: прямая (П), кривая (К)	Порода	Обделка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1902—1908	Хаверстинг	Мексика	О	2,24	6,00	4,50	П	Скала	—
1903	Барриентос	»	Д	1,16	8,46	11,10	»	Разные горные породы	Бетон
1903—1905	Гелитцин	Америка	О	1,12	7,05	2,25	»	Скала	Бетон и бут
1903	Альбула	Швейцария	»	5,86	—	4,50	»	»	—
1904—1905	Скрантон	Америка	О	1,44	6,60	5,10	К	Скала	Бетон и бут
1904—1907	Капитол Хилл	»	»	1,28	6,00	4,80	»	Мягкие грунты	Кирпич и бетон
1905	Алфрейтор	Великобритания	Д	0,80	7,65	7,95	—	Скала	Кирпич
1905—1909	Пен-Твин	Америка	О	2,88	5,49	4,89	К	»	Кирпич-бетон
1905—1909	Берджен	»	»	3,52	5,42	5,70	П	»	»
1905—1909	Гунизон	»	»	9,28	3,42	3,15	»	»	Бетон
1905	Гаттико	Италия	—	3,30	—	—	—	»	—
1905	Вохейн	Югославия	Д	6,24	—	8,20	—	Скала	—
1905	Кругобайкальские:	СССР	»	0,78	—	8,75	—	»	—
1905	»	»	»	0,55	—	8,95	—	»	—
1906—1909	Берджен	—	»	1,28	8,07	9,00	П	»	Бетон
1906—1913	Лечберг	Швейцария	»	14,53	6,69	7,50	—	»	—
1906	Босрук	Австрия	О	4,77	—	5,50	—	»	—
1906	Буково	»	»	0,93	—	5,50	—	»	—
1906	Караванкен	»	Д	7,93	—	8,20	—	»	—
1907	Сан-Паул	—	—	2,56	—	—	—	—	Дерево
1907—1909	Пен-Твин	Америка	—	0,32	5,46	11,91	П	Разные горные породы	Кирпич-бетон
1908	Артурпасс	Ново-Зеландия	О	8,50	5,03	4,50	»	Скала	Бетон
1908	Коль-де-Монт	Франция	»	1,88	—	6,00	—	Скалистые и глинистые породы	—
1909—1911	Фу-Чин-Линг	Китай	»	1,48	5,46	3,65	П	Скала	Бутовая кладка

Продолжение

Годы строительства	Наименование тоннелей	Страна	Тоннель: однопутный (О), двухпутный (Д)	Длина в км	Высота в м	Ширина в м	Трасса тоннеля: прямая (П), кривая (К)	Порода	Обделка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1909—1913	Нехакса	Мексика	—	3,44	2,95	2,75	—	Разные горные породы	Бетон
1909	Тауэренский	—	Д	8,55	—	8,20	—	—	—
1910—1915	Мон'дор	Франция—Швейцария	»	6,08	6,00	7,86	—	Скала	Бутовая кладка
1910	Риккен	Швейцария	О	8,60	—	5,20	—	»	—
1910	Вассерфлутский	»	—	3,56	—	—	—	»	—
1910	Албисский	»	—	1,51	—	—	—	—	—
1910	Юнгфрауский	»	—	7,31	—	—	—	—	—
1911—1913	Пирай	Бразилия	О	8,40	3,96	3,86	—	Скала	—
1912—1918	Монтрайль	—	»	5,20	5,93	3,90	—	»	Бетон
1913	Навагинский	СССР	»	0,51	—	5,20	—	—	—
1913	Гойтхский	»	»	0,63	—	5,20	—	—	—
1914—1916	Роджерс	Америка	Д	8,00	6,34	8,70	П	Скала	—
1914—1917	Твин-Пик	Калифорния	»	3,63	4,50	7,20	—	Разные породы	Бетон
1915	Гренхенбергский	Швейцария	О	8,56	—	—	—	—	—
1916	Хауинштейнский	»	Д	8,13	—	8,40	—	Скала	—
1916	Северо-Донецкий	СССР	О	2,06	—	5,20	—	Глина	Бут и бетон
1924—1927	Моффат	Америка	»	9,92	7,20	4,80	—	Скала	Бетон
1926—1928	Нью-Каскад	»	»	12,40	7,20	4,80	—	»	»
1924—1928	Шимицу	Япония	»	9,70	—	—	—	—	—
1913—1929	Пью-Моренс	Франция — Испания	Д	5,12	—	—	—	—	—
1918—1934	Таннский	Япония	О	7,80	5,48	4,26	—	—	—
1929	Мерефа—Херсон	СССР	»	0,87	—	5,26	—	Глина	Бетон и бут
1920—1930	Большой Апеннинский тоннель	Италия	»	18,50	7,90	8,80	»	Разные горные породы	»
1930	Гадукский	Иран	—	2,89	—	—	—	Скала	»
1934	Бюссанг	Франция	Д	8,22	8,00	9,80	П	Скала	Бетон
1944	Тоннели ж. д. Тегеран—Тавриз	Иран	—	2×0,59	—	—	—	»	»

ПОДВОДНЫЕ ТОННЕЛИ

Для сообщения под дном реки прокладывают подводные тоннели. Последние предназначаются для железных дорог, автомобильного и гужевого транспорта, пешеходного движения и других специальных целей.

Первый подводный тоннель под р. Темзой в Лондоне был начат строительством в 1807 г. Вэзеем. После проходки 130 *м* вода из реки прорвалась в забой, и тоннель был полностью затоплен водой и прорвавшимся грунтом.

Лишь через 15 лет, в начале 1823 г., инженером Марком Брюннелем, изобретателем «щита» — подвижной металлической крепи для защиты проходчиков от завала в забое, было возобновлено строительство подводного тоннеля под р. Темзой под обыкновенную дорогу.

Идея щита, по заявлению Брюннеля, появилась у него в результате наблюдения за работой морского червя-точильщика, прокладывающего себе путь в деревянной обшивке кораблей (в деревянных сваях и т. д.) и оставляющего за собой после проходки трубчатую оболочку.

Процесс производства работ в тоннеле сопровождался рядом серьезных аварий, связанных с прорывом воды из реки. После ликвидации в 1827 г. серьезной аварии работы были продолжены. В начале 1828 г. произошла строительная катастрофа, связанная с гибелью рабочих и с затоплением тоннеля. Дальнейшие работы были прекращены. Однако Брюннель, вместе со своим сыном, продолжал упорно совершенствовать элементы конструкции щита и методы производства работ по выемке грунта и креплению лба забоя.

В 1836 г. Брюннелю было вновь разрешено возобновить работы по прокладке подводного тоннеля, который был закончен сооружением в 1842 г.

Тоннель Брюннеля имел в длину 150 *м* в подводной части и прямоугольное поперечное сечение спаренной конструкции бинокля высотой 6,7 *м* и шириной 11,3 *м* (рис. 9).

Обделка тоннеля была кирпичная при толщине стен до 4 *м*.

Несмотря на то, что конструкция перекрытия тоннеля была заложена лишь на 4 *м* под дном русла реки и на 13 *м* ниже горизонта воды в реке, тоннель был пройден Брюннелем без применения сжатого воздуха.

Значительный период строительства первого в Европе подводного тоннеля (35 лет) и несовершенство примененного Брюннелем способа работ задержали развитие строительства подводных тоннелей.

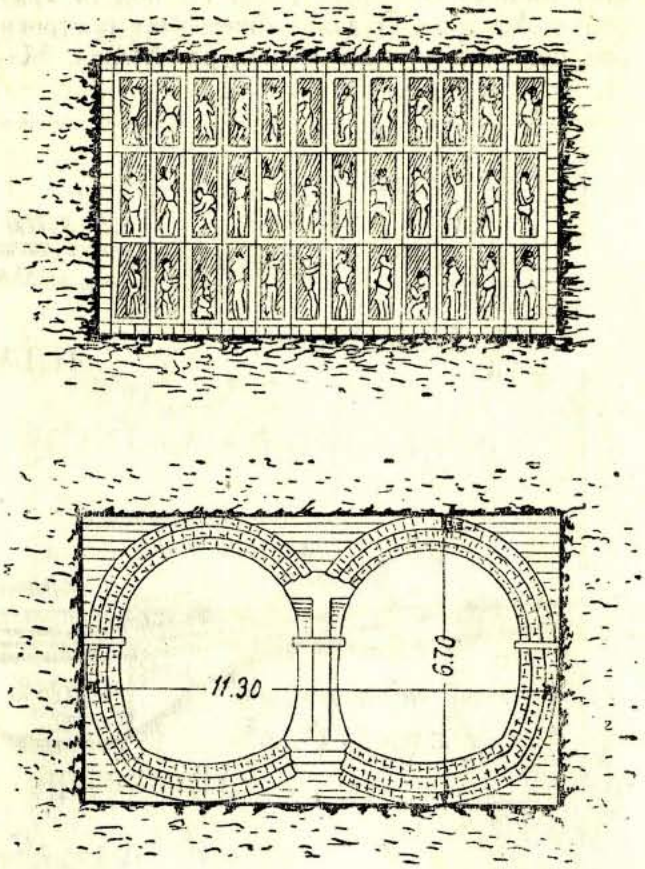


Рис. 9. Первый подводный тоннель под р. Темзой в Лондоне

Лишь после изобретения Барлоу и Гредхэдом (1869 г.) в Англии и одновременно Альфредом Бич в США круглого корпуса щита, являющегося прототипом современного щита, в сочетании с применением сжатого воздуха для горизонтальной проходки (патент Кохрэна) стало возможно успешное проведение процесса подводного тоннелирования (см. главу VIII). При этом кирпичная кладка для обделки тоннеля была заменена чугунными сегментами, образующими тюбинговый тоннель. Следует отметить, что современные обделки из бетонных блоков и стальных сегментов до сих пор не вытеснили конструкции из чугунных тюбингов.

Таким образом, лишь после коренного усо-

вершенствования щита инженером Гредхэдом и применения сжатого воздуха началось строительство ряда подводных тоннелей в Европе и Америке.

Одним из крупных подводных тоннелей для экипажного движения является подводный тоннель Блэкволл (1897 г.) под р. Темзой в Лондоне. В дальнейшем был построен ряд подводных тоннелей под рр. Мерси, Мо-

В зависимости от физико-механических свойств пересекаемых проходкой горных пород, условий их напластований, величины гидростатического напора, размеров прокладываемого тоннеля, величины кровли над шелыгой свода под руслом реки и др. устанавливаются методы производства работ.

Известен ряд подводных тоннелей для железнодорожного движения и автомобиль-



Рис. 10. Подводный тоннель Холланд под р. Гудсон

сквой, Сеной, Шпрее (в Европе) и Гудсон, Ист-Ривер, Чикаго (США).

Наиболее выдающимися подводными тоннелями для автомобильного движения являются: Холланд-тоннель (рис. 10, 11); Мидтаун-тоннель (Линкольн) под р. Гудсон (США); тоннель, соединяющий Окленд и Аламеду (США); подводный тоннель под р. Детройт (в Северной Америке); тоннель под р. Мерси между Ливерпулем и Биркенхэдом (Англия); под р. Эльбой в Гамбурге (Германия); под р. Шельдой в Антверпене (Бельгия).

Строительство подводных тоннелей относится к разряду наиболее сложных работ в области тоннельного дела. Помимо борьбы с горным давлением, при подводном тоннелировании приходится учитывать возможность прорыва воды из реки.

ного транспорта, построенных вместо мостов. В зависимости от местных условий мосты очень часто загромождают русло реки и стесняют судоходство. Пропуск под мостами речных, морских и в особенности океанских судов требует возвышения пролетного строения над уровнем высокого горизонта вод до 40 *м* (а иногда и до 60 *м*). Между тем сооружение таких постоянных мостов сопряжено с устройством длинных, высоких, весьма неудобных подходов. Разводные, подвесные мосты и переправы являются паллиативным решением, не обеспечивающим непрерывность одновременного движения на мосту и под мостом.

Кроме того, мост является уязвимым сооружением при воздушном нападении противника во время войны. Обрушение в реку пролетного строения большого моста может

вызвать длительный перерыв в судоходстве. При сооружении же подводного тоннеля недостатки, связанные с устройством мостового перехода, устраняются. Это побудило разви-

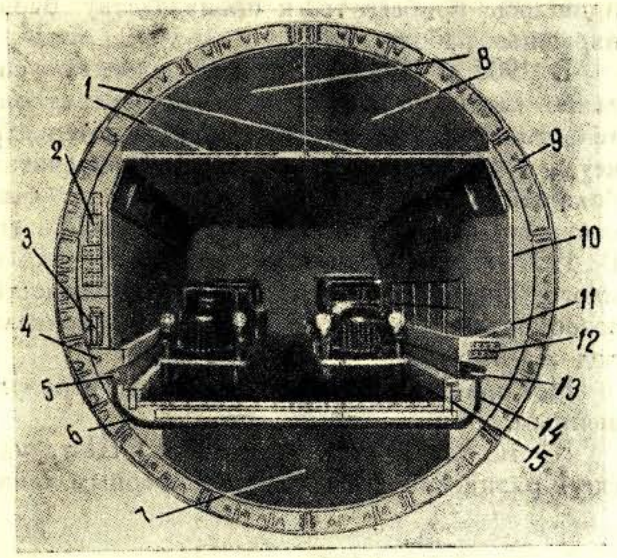


Рис. 11. Холланд-тоннель:

1 — окна для вытяжки испорченного воздуха, *2* — телефонные и телеграфные кабели, *3* — огнетушители, *4* — водопровод, *5* и *6* — подача свежего воздуха, *7* — канал для свежего воздуха, *8* — канал для вытяжки испорченного воздуха, *9* — чугунные сегменты конструкции тоннеля, *10* — стена, *11* — тротуар, *12* — электрокабели, *13* и *14* — подача свежего воздуха, *15* — дренаж

вать технику подводного тоннелирования. Как указывалось выше, ряд подводных тоннелей построен в Европе и Америке под реками Москвой, Темзой, Мерси, Сеной, Шельдой, Гудсоном (рис. 12) Ист-Ривер, Детройтом. Диаметры тоннелей доходят до 14,6 *м* (р. Мерси), а длина каждого из тоннелей измеряется километрами.

Некоторые проекты подводных тоннелей являются исключительными по своей технической грандиозности.

В качестве примеров можно привести следующие данные о подводных тоннелях ряда стран.

США. Закончены постройкой и сданы в эксплоатацию новые подводные линкольнские тоннели для автомобильного движения под р. Гудсон, между Нью-Йорком и Нью-Джерси (см. главу XVIII).

Англия. Проект тоннеля под Ла-Маншем для связи Англии и Франции имеет более чем столетнюю давность. В свое время постройка тоннеля под Ла-Маншем была предметом обсуждения между Фоксом и Наполеоном. По последнему проекту 1939 г., имелось в виду построить два однопутных железнодорожных тоннеля с порталами: на английском берегу — в Дувре и на французском — в Калэ. Один из тоннелей предназначен для железнодорожного пути из Англии во Францию, другой — из Франции в Англию.

Общее протяжение каждого из тоннелей, трассированных на взаимном расстоянии 15 *м*,— 51,2 *км*. Тоннели на протяжении 32 *км* должны пройти непосредственно под дном моря. Глубина воды 60 *м*.

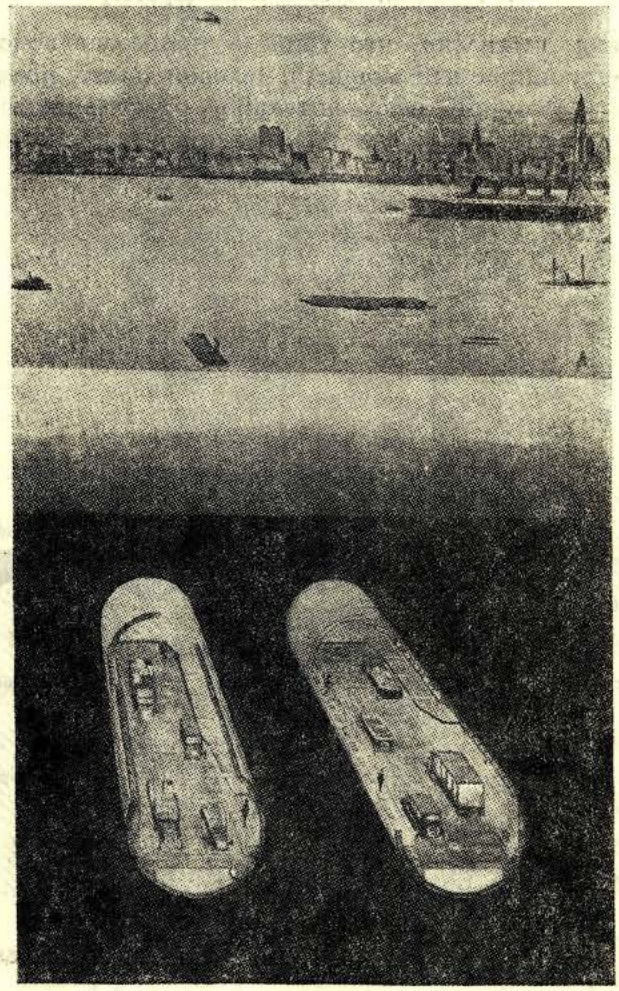


Рис. 12. Тоннели Холланд под р. Гудсон (схематический вид тоннелей)

Параллельно проектировался специальный тоннель под Ла-Маншем для автомобильного сообщения.

С рекогносцировочной целью в 1882 г. на берегу Франции была пройдена шахта глуби-

ной 84 *м*, а на берегу Англии шахта глубиной 45 *м*, из которых на сбойку по трассе проектируемых тоннелей были пройдены пилот-штольни, по 2 *км* с каждой стороны. При

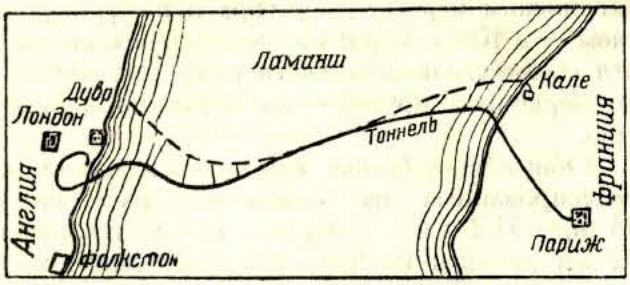


Рис. 13. Проект подводного тоннеля под Ла-Маншем, Дувр — Калэ (трасса)

этом выявлено, что тоннель прорезает водонепроницаемый мощный меловой пласт, представляющий исключительно благоприятные условия для механизированной проходки (рис. 13, 14).

технико-производственный эффект, так как скорость проходки агрегата доходила до 4,8 *м* в час.

Однако при пересечении пород с большим коэфициентом крепости в красных песчаниках пришлось прибегнуть к производству буровзрывных работ.

В 1907 и 1914 гг. адепты проекта усиленно пытались продолжить начатое строительство тоннеля, но эти попытки потерпели неудачу. Французский маршал Фош считал большой ошибкой то, что тоннель не был построен перед войной 1914—1918 гг. В 1939 г. во Франции и Англии уделяли много внимания вопросу о необходимости возобновления работ по сооружению тоннеля под Ла-Маншем.

Но практически вопрос остался неразрешенным.

Кроме того, проектируются: а) Шотландско-Ирландский тоннель под Северным каналом для соединения Шотландии с Ирландией; б) Эвертонский тоннель под р. Мерси протяжением 2 мили, параллельно построенному в 1934 г. большому Мерсийскому тоннелю диаметром 14,6 *м*.

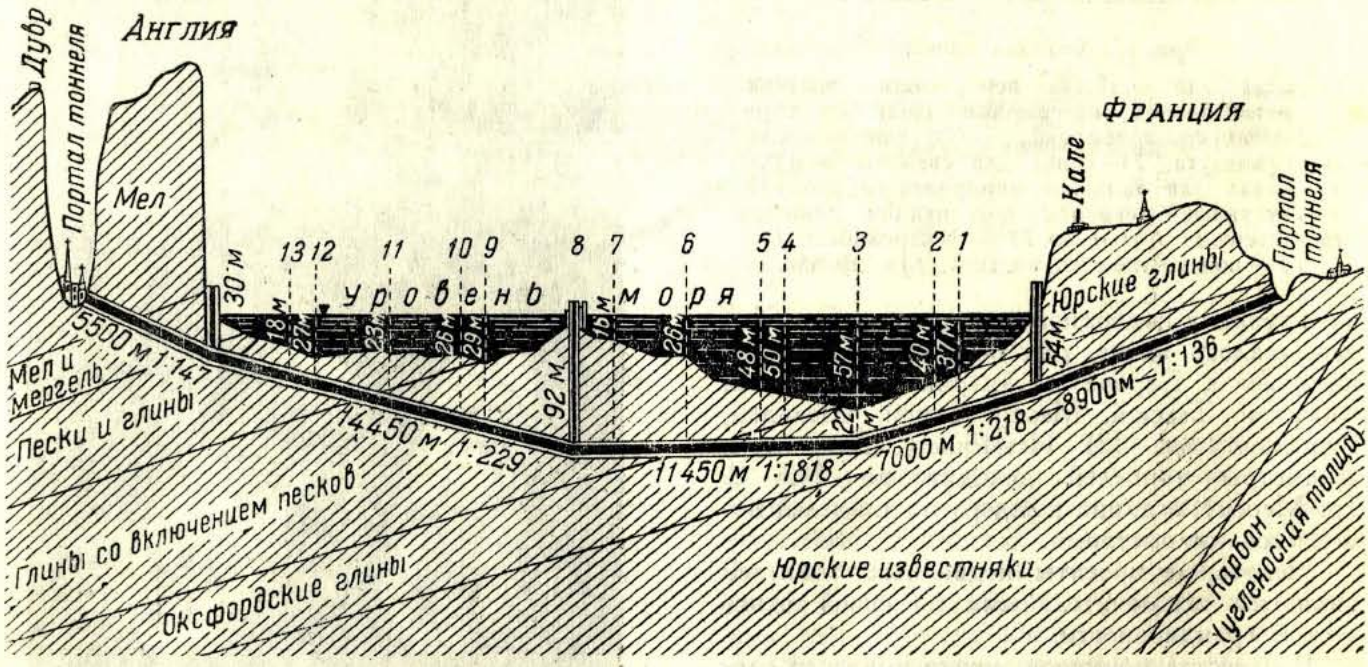


Рис. 14. Проект подводного тоннеля под Ла-Маншем (геологический разрез)

В частности, при проходке меловых мергелей под Ла-Маншем со стороны Англии была применена тоннельная машина системы Бомона и Инглиш, которой пройдена пилот-штольня диаметром 2,13 *м* на протяжении 1 700 *м*. Эта машина, работа которой основана на принципе резания мела при гидравлическом транспорте породы, дала большой

Япония. В свое время был выдвинут проект тоннеля для автомобильного движения между Кореей и Японией. Этот тоннель про-

тяжением 150 *км* должен был связать юг Кореи в пункте Фузана с Фарамизой в Японии. Грандиозность этого проекта видна из сопоставления его с самым длинным в мире Симплонским тоннелем, имеющим протяжение 19,7 *км*. Стоимость строительства определялась в 1,5 млрд. иен. Срок строительства был рассчитан на 10 лет. В ноябре 1942 г. в Японии закончен строительством тоннель Квас-Мон под морем между г. Симоносека и г. Модзи на о. Ку-Юшу. Тоннель длиною 6,3 *км* начат строительством в сентябре 1937 г.

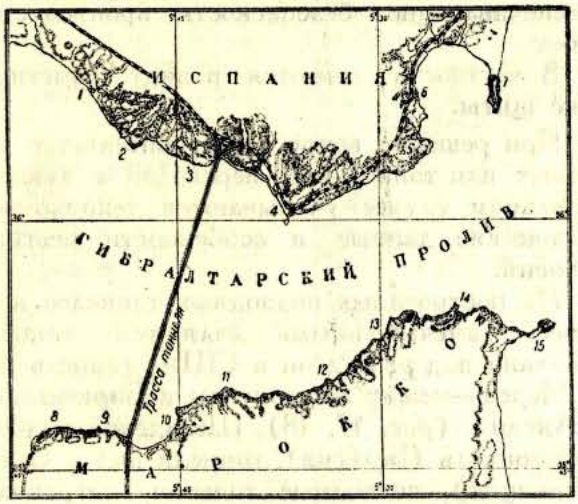


Рис. 15. Проект тоннеля под Гибралтарским проливом (план):

1 — Torre Sara, *2* — Punta Camarinal, *3* — Punta Poloma, *4* — Tarifa, *5* — Punta Carnero, *6* — Algesiras, *7* — Gibraltar, *8* — Spartel, *9* — Tanger, *10* — Malabata, *11* — Al Boassa, *12* — Alcazar, *13* — Cires, *14* — Punta Leona, *15* — Ceuta

Тоннель Квас-Мон сокращает время пробега железнодорожных составов между г. Токио и крупным центром на о. Ку-Юшу г. Кагошими до 31 ч. 45 м. вместо 40 часов при пользовании паромом. Стоимость тоннеля 24 млн. долларов.

Испания. Был начат и прекращен строительством тоннель под Гибралтарским проливом, между Марокко и Пунта Фельгуэро в Испании. Длина тоннеля, залегающего в скальных породах,— 40 *км* (25 миль). Максимальная глубина заложения над уровнем моря 396 *м* (рис. 15, 16).

В практике подводного тоннелирования выработаны различные способы работ: щитовая проходка под сжатым воздухом, опускание кессонов-тоннелей, заводные секции, а также комбинированный открытый способ работ.

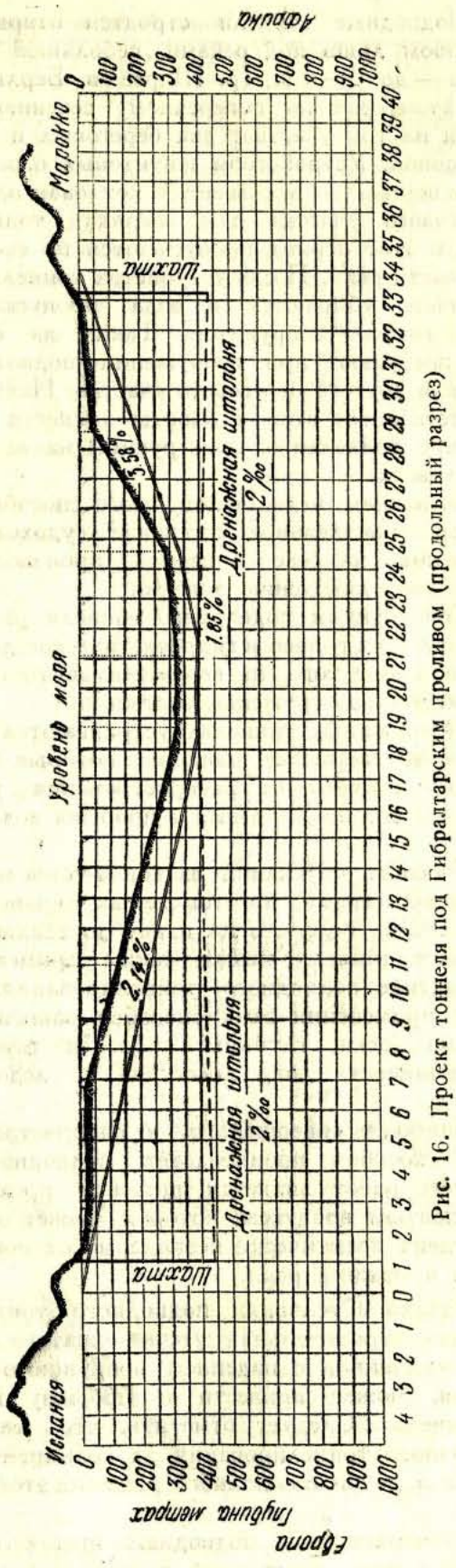


Рис. 16. Проект тоннеля под Гибралтарским проливом (продольный разрез)

Подводные тоннели строятся открытым способом лишь под реками небольшой глубины — до 3—4 *м* (р. Шпрее в Берлине); при этом река по поперечному сечению делится на три участка: два береговых и один островной. Устройством шпунтовых ограждений и перемычек вскрывается котлован одного берегового участка для закладки тоннеля; суда в этот период пропускаются по свободной части реки. После устройства тоннеля перемычки убираются и вода пропускается через готовое сооружение. Таким же образом поступают при сооружении подводного тоннеля другого берегового участка. Наиболее ответственным этапом работы является стыкование тоннельных конструкций на островном участке.

Основным недостатком этого способа является значительное стеснение судоходного движения на реке в период производства работ по сооружению тоннеля.

Конструкции подводного тоннеля рассчитываются на горное и гидростатическое давление и, кроме того, на вес затонувшего судна в максимально груженом состоянии.

В подводных тоннелях устраиваются специальные защитные шандоры, которые ограждают тоннель от распространения воды в случае его повреждения и прорыва воды из реки.

Способы опускания кессонов-тоннелей и заводных секций, изготовляемых заранее на стапелях на берегу и на плаву доставляемых к трассе тоннеля, нашли также применение в практике подводного тоннелирования. Но успех применения этих способов зависит от режима реки, глубины, скорости течения, размываемости дна, ледостава и ледохода и т. д.

Наиболее совершенным и распространенным способом производства подводно-тоннельных работ является щитовая проходка под сжатым воздухом, которая может быть проведена практически независимо от поверхности и режима реки.

Однако в условиях подводного тоннелирования стремительная утечка сжатого воздуха, связанная с падением воздушного давления, может привести к прорыву воды в тоннель. Следует отметить, что техника подводного тоннелирования за границей еще не нашла до сих пор полного решения этого вопроса.

Применяемые в подводных щитах оснащения в виде секторных и шандорных затворов, барьерных ящиков, спасательных экранов и т. д. являются весьма паллиативными средствами.

В мировой практике тоннелестроения известны случаи, когда в нужный момент указанные отдельные агрегаты щита работали неудовлетворительно.

В СССР, в условиях социалистического труда, где вопросам техники безопасности уделяется исключительное внимание, разработаны системы подводных щитов, удовлетворяющие высоким техническим требованиям и обеспечивающие безопасность производства работ.

В частности, имеются в виду герметические щиты.

При решении вопроса о строительстве мостовых или тоннельных переходов в каждом отдельном случае учитываются технико-экономические данные и особенности местных условий.

Из построенных подводных тоннелей наиболее замечательными являются тоннель Холланд под р. Гудсон в США, тоннель под р. Мерси—между Ливерпулем и Биркенхэдом в Англии (рис. 17, 18), Шельдский подводный тоннель (Бельгия), тоннели под р. Сеной (Франция), подводные тоннели метрополитена под Москвой-рекой (СССР), тоннель Оклэнд—Аламеда под бухтой Сан-Франциско (США), тоннель Детройт — Канада (Северная Америка) под р. Детройт, тоннель под р. Гарлем (США), Бостонский тоннель (США), водопроводный тоннель пор р. Дунаем (Венгрия).

Большое развитие подводное тоннелирование получило в Америке. Достаточно отметить, что под р. Гудсон уже проложено шесть подводных железнодорожных тоннелей и четыре подводных тоннеля для автомобильного движения. Под р. Ист-Ривер проложено до двадцати тоннелей.

Характеристика подводных тоннелей приведена в табл. 2 (см. стр. 33—34).

ТОННЕЛИ МЕТРОПОЛИТЕНОВ И ГЛУБОКИЕ ВВОДЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Типы метрополитенов. Сооружение внеуличных городских железных дорог для движения с большой скоростью (метрополите-

Таблица 2

Характеристика главнейших подводных тоннелей мира

Наименование подводного тоннеля	Страна	Длина в *м*	Диаметр в *м*	Глубина заложения в *м*	Глубина воды в *м*	Кровля над шелыгой от дна в *м*	Грунтовые условия	Род обделки	Метод строительства	Период строительства	Характер движения
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Тоннель под р. Темзой	Англия	360	Прямоугольн. 11,3 × × 6,7	26,40	12	8,00	Пески, глина, галька	Кирпич	Прямоугольный щит	1823—1842	Уличное движение
Вашингтон под р. Чикаго	Америка	66	10,8 × × 3,3	9,75	—	—	Глина	„	Открыт. способ перемычки	1866—1869	„
Солсстрит под р. Чикаго	„	85	—	—	—	—	„	„	„	1869—1871	„
Гудсон Н.-Йорк и Н.-Джерси	„	1695	5,85	29,10	18,00	5,00	Ил, глина	Кирпич, чугун	Щит	1874—1905	Железная дорога
Мерси	Англия	1593	3,05	48,00	30,00	6,70	Пески, скала	Чугун, бетон	„	1881—1886	Водосток
Сити и южн. часть Лондонской ж. д. под р. Темзой	„	297	3,60	22,50	9,00	—	Глина	Чугун	„	1886—1890	Железная дорога Андер-граунда
Сент-Клер	Канада	1800	6,3	22,10	12,00	—	„	Чугун, бетон	„	1888—1891	Железная дорога
Глазго	Шотландия	210	4,8	19,50	10,50	5,00	Глина, песок	„	„	1890—1893	Обыкновенная дорога
Ван-Бурен под р. Чикаго	Америка	473	9,6	12,60	5,60	—	Песок	Кирпич	Открыт. способ перемычки	1890—1894	Трамвайное движение
Блэкволл под р. Темзой	Англия	1890	8,23	24,40	11,70	4,00	Песок, глина, галька	Чугун, бетон	Щит	1892—1897	Обыкновенная дорога
Сифон де Клиши под р. Сеной	Франция	462	3,50	12,50	—	9,00	Глина	Чугун	„	1892—1894	Водосток
Сифон де Конкорд под р. Сеной	„	237	3,28	6,80	—	3,50	„	„	„	1895—1897	„
Тоннель под р. Шпрее	Германия	195	3,75	12,00	5,00	3,40	Песок	Стальн. Метал. оболочка, бетон	„	1896—1899	Трамвайное движ.
Сифон де Уаз	Франция	266	2,50	7,50	—	5,00	„	„	„	1896—1897	Водосток
Гринвич	Англия	365	3,85	21,10	14,10	—	Песок, гравий ил	Чугун	„	1900—1901	Обыкновен. дор.
Ист-Бостон	Америка	1290	8,4× ×7,5	27,00	14,10	5,00	Песок, глина	Бетон	Полущит незамкнут. контура	1901—1903	„
Гарлем-Ривер	„	192	—	13,80	9,00	—	Ил, песок	Чугун, бетон	Кессон-тоннель	1901—1904	Железная дорога
Баттери - тоннель под р. Ист-Ривер	„	1964	2 тюба по 4,65	28,50	14,10	4,60	Песок, глина, скала, ил	„	Щит	1902—1907	„

Продолжение

Наименование подводного тоннеля	Страна	Длина в м	Диаметр в м	Глубина заложения в м	Глубина воды в м	Кровля над шелыгой от дна в м	Грунтовые условия	Род обделки	Метод строительства	Период строительства	Характер движения
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Гудсон (на Пенсильванской ж. д.)	Америка	1977	6,90	29,10	15,90	6,00	Скала, ил	Чугун, бетон	Щит	1903—1905	Железная дорога
Ист - Ривер (на Пенсильванской ж. д.)	„	1175	6,90	26,40	15,00	3,60	Песок, глина, скала	„	„	1904	„
Роттергайт под р. Темзой	Англия	2083	9,14	29,60	12,00	2,00	Глина, песок, гравий	„	„	1904—1908	Обыкновенн. дор.
Гарлем-Ривер	Америка	183	2 тюба по 4,80	—	—	0,50	Глина	Чугун в бетон. конструкции	Заводные секции	1905—1907	Железная дорога
Мост Сен-Мишель (р. Сена)	Франция	190	7,3 × × 5,4	—	—	1,00	„	Чугун	Кессоны-тоннели	1905—1907	Метрополитен
Детройт (ж. д.)	Америка	806	7,10	—	—	0,50	„	Метал. оболочка, бетон	Заводные секции	1906—1909	Железная дорога
Гудсон—Менхеттен	„	1793	5,00	27,60	18,00	4,00	Ил, скала	Чугун, бетон	Щит	1906—1910	„
Эльбский тоннель	Германия	448	2 × ×6,00	22,20	10,11	—	Пески	Сталь, бетон	„	1907—1911	Обыкновенная дорога
Мирабо под р. Сеной	Франция	400	7,3 × ×5,8	15,30	5,60	—	Пески, мергель	Бетон, чугун	Кессоны-тоннели	1907—1909	Метрополитен
Под р. Шпрее (метрополитен)	Германия	405	6,60 × ×3,40	—	—	0,60	Пески	Бетон	Открыт. способ	1909—1913	„
Ист-Ривер	Америка	1320	5,40	30,00	15,00	—	Пески, скала	Чугун	Щит	1914—1917	„
Гарлем-Ривер	„	330	5,70	—	9,10	—	Ил, песок	Бетон	Заводные секции	1914—1917	„
Холланд - тоннель под р. Гудсон	„	2827	8,99	31,40	—	—	Ил, скала	Чугун	Щит	1927	Автодвижение
Оклэнд—Аламеда под р. Детройт	„	1372	11,28	26,50	—	—	„	Железобетон	Заводные секции	1928	„
Детройт—Виндзор	„	1782	9,47	25,00	—	—	„	Чугун, железобетон	Щит, заводные секции	1930	„
Бостонский тоннель	„	2012	9,45	33,50	—	—	„	Сталь, бетон	Щит	1932	„
Антверпен под р. Шельдой	Бельгия	2110	9,16	30,20	—	—	Песок, глина	Чугун	„	1933	„
Мерси	Англия	4620	14,03	51,80	—	—	Скала, глина	„	Эректор, полущит	1934	„
Мидтаун—Линкольн	Америка	2438	9,45	32,00	—	—	Ил, скала	Сталь, чугун	Щит	1934	„
Квас—Мон	Япония	6300	—	—	—	—	—	—	—	1937—1942	Железная дорога
р. Москва	СССР	4 × ×250	4 тюба по 6 м	—	—	—	—	Чугун	Щит	1943	Метрополитен

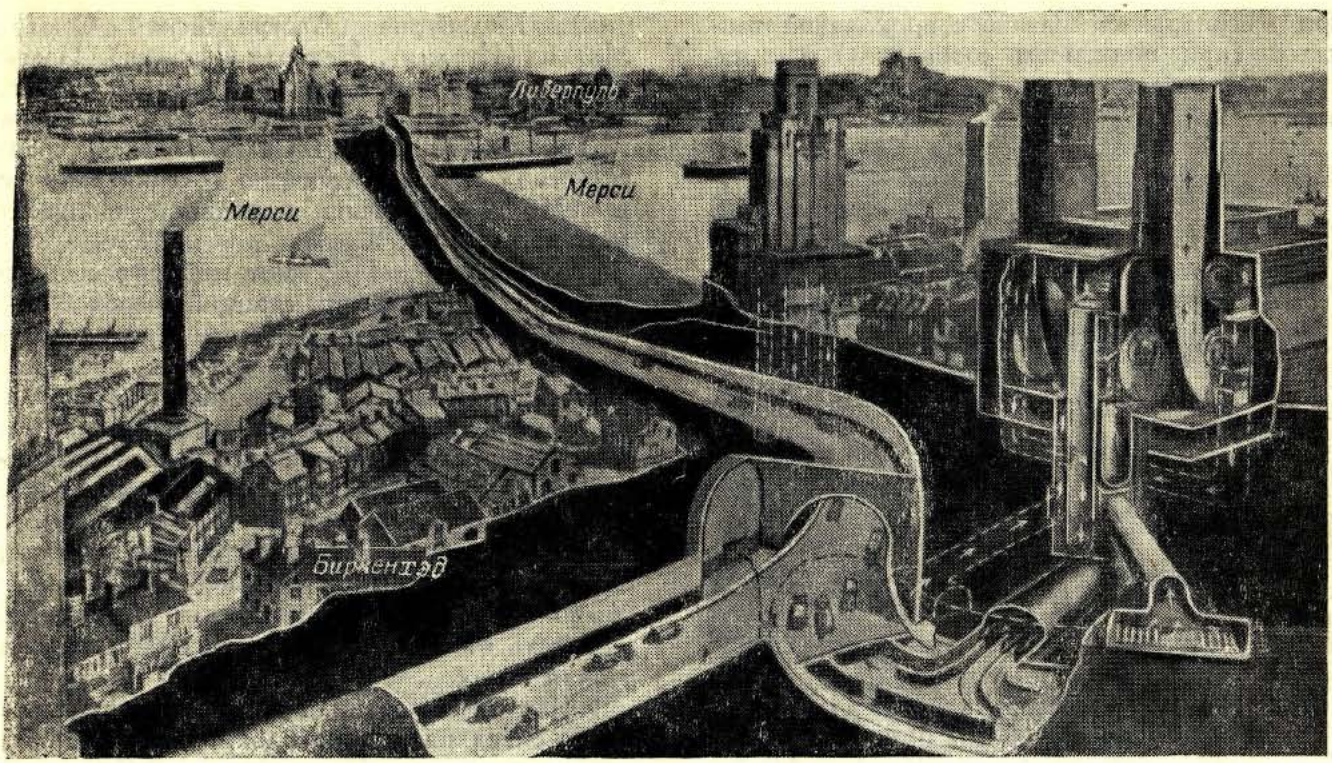


Рис. 17. Подводный тоннель под р. Мерси (схематический вид)

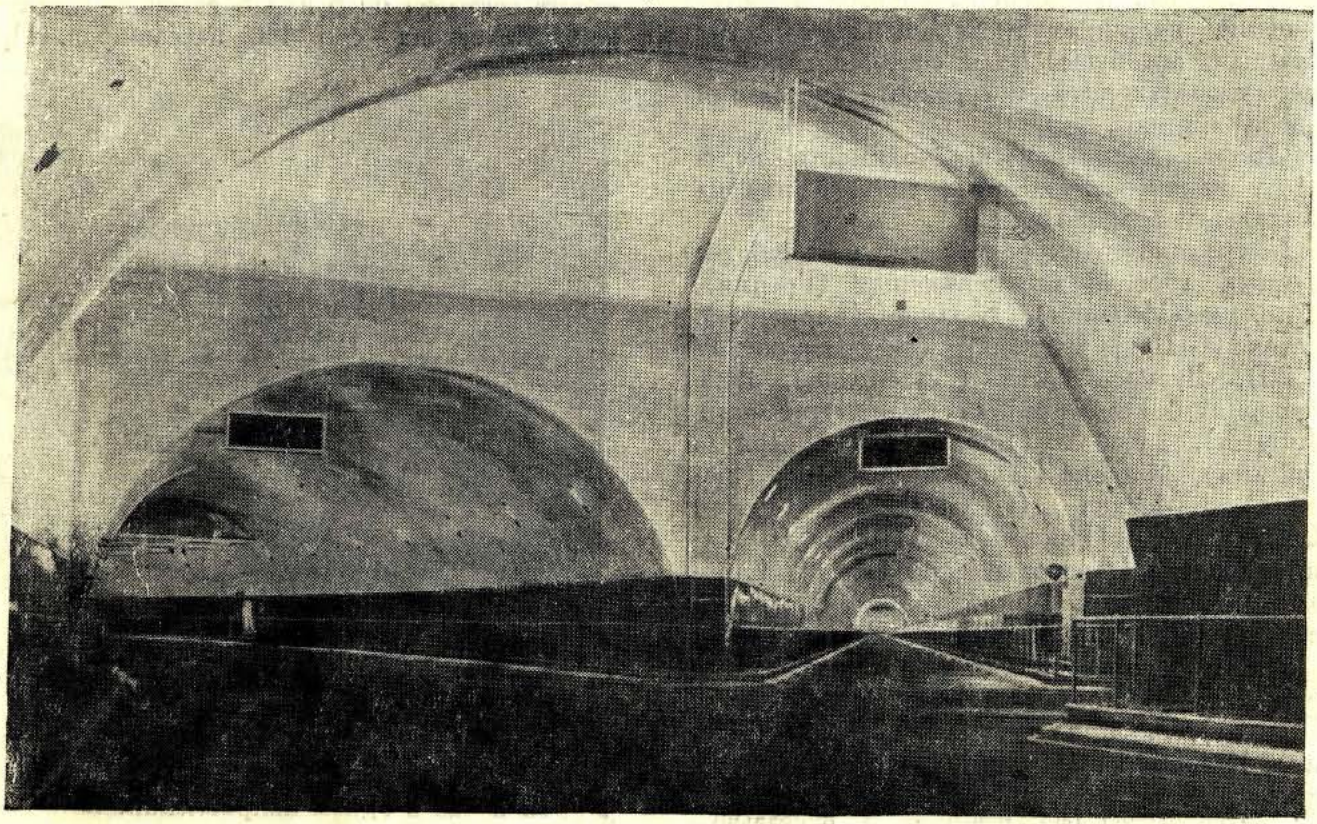


Рис. 18. Подводный тоннель под р. Мерси (общий вид)

нов [1]) неразрывно связано с прокладкой тоннелей (при подземном сообщении) и с постройкой эстакад (при надземном сообщении).

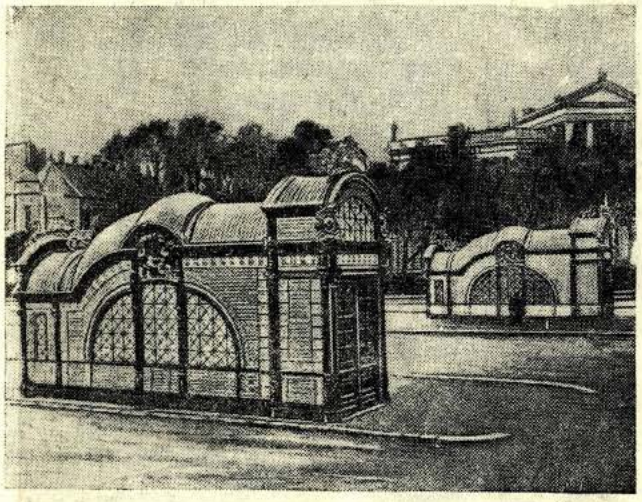


Рис. 19. Метрополитен Будапешта (входы на станцию Арена)

С ростом больших городов непрерывно возрастает потребность в перевозках; площади уличных проездов становятся недостаточными, наличные транспортные средства (трамваи, автобусы) не в состоянии полностью удовлетворять потребности населения в передвижении.

Отсюда возникает необходимость переводить уличное движение в тоннели или на эстакады метрополитена.

Метрополитены построены в наиболее крупных городах мира: Афинах (Греция), Барселоне (Испания), Берлине (Германия), Бостоне (США), Будапеште (Венгрия, рис. 19 и 20), Буэнос-Айресе (Аргентина), Вене (Австрия), Гамбурге (Германия), Глазго (Англия), Кобэ (Япония), Ливерпуле (Англия), Лондоне (Англия), Мадриде (Испания), Москве (СССР), Нью-Йорке (США), Осло (Норвегия), Париже (Франция), Сиднее (Австралийский Союз), Стокгольме (Швеция), Токио (Япония), Филадельфии (США) и Чикаго (США).

Кроме того, составлены проекты метрополитенов для Брюсселя (Бельгия), Варшавы (Польша), Гаванны (о. Куба), Генуи (Италия), Калькутты (Индия), Марселя (Франция), Мельбурна (Австралийский Союз), Милана (Италия), Неаполя (Италия), Праги (Чехословакия) и Рима (Италия). В 1945 г. закончены изыскания и проект метрополитена г. Торонто (Канада). В СССР ведется строительство метрополитена в Ленинграде и в 1946 г. закончены изыскания и проект метрополитена г. Киева.

Метрополитены бывают местного сообщения при расположении станций через 600—800 *м* и экспрессного сообщения с расположением станций через 2—2,5 *км*. Увеличенные расстояния между станциями устанавливаются при выходе линий к периферии.

В практике строительства и эксплоатации метрополитенов установлено, что расстояния между станциями могут быть от 500 до 1 500 *м*. При этом коммерческая скорость движения поездов метрополитенов составляет до 45 *км* в час, а максимальная техническая скорость от 65 до 85 *км* в час. Частота движения поездов от 3 до 1,25 мин.

Модернизированная система централизации, сигнализации и блокировки обеспечивает безопасность следования поездов и автоматическую остановку их в случае проезда запрещенного сигнала. Поезд метрополитена может состоять из 6 или 8 вагонов. Емкость каждого вагона — до 180 пассажиров. При

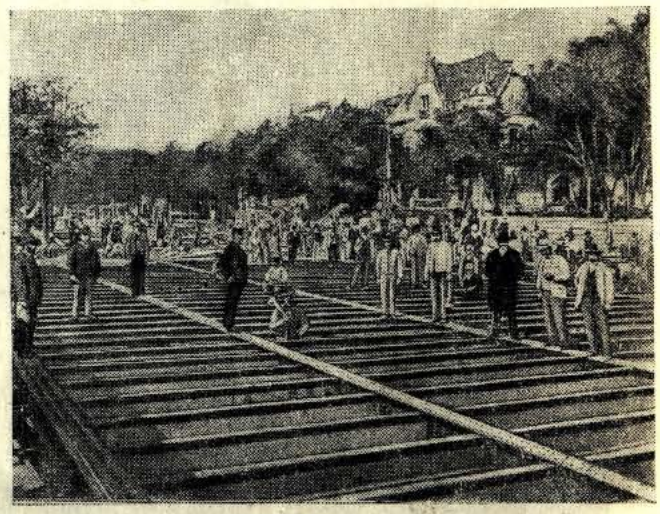


Рис. 20. Метрополитен Будапешта (устройство металлического перекрытия станции Арена)

таких данных провозная способность линии метрополитена достигает 60—80 тыс. пассажиров в час в одном направлении.

Таким образом, метрополитен является наиболее мощным и быстроходным городским

[1] Метрополитен (фр. métropolitain, буквально—столичный, от греческого metropolis—метрополия)—подземная железная дорога в крупных городах.

транспортом, который работает независимо и в комплексе с автомобильным транспортом решает общую проблему городского транспорта.

Для обеспечения связи между городом и пригородными зонами и устранения необходимости пересадок пассажиров, прибывающих к вокзалам с пригородных поездов, на другие виды городского транспорта в крупных городах обычно устраивают глубокие вводы железных дорог непосредственно в город.

Внутригородская часть линии глубоких вводов железных дорог, трассируемая по застроенной территории и уличным проездам, прокладывается аналогично метрополитенам на эстакадах или в тоннелях, с остановочными станциями подземного или надземного типа.

Тоннели метрополитенов и глубоких вводов, в зависимости от городских топографических и геотехнических условий, бывают мелкого заложения — до 10 *м* (Нью-Йорк, Берлин, Париж) и глубокого заложения — до 60 *м* (Москва, Лондон).

Современная практика строительства городских железных дорог установила, что наиболее приемлемым и правильным решением является устройство городской железной дороги подземного типа, как наиболее удовлетворяющего условиям планировки уличного движения, городского строительства и санитарно-гигиеническим требованиям города.

При проектировании метрополитенов с целью обеспечения максимальной безопасности следования поездов предусматривается пересечение железнодорожных путей на разных уровнях, так чтобы была исключена возможность столкновения поездов.

Строительство городских тоннелей для метрополитенов осложняется тем, что в период ведения подземных работ приходится считаться с городскими условиями, с застроенностью территорий и наличием сложной сети подземных сооружений.

Движение поездов на метрополитене обеспечивается электрической энергией с постоянным током при напряжении от 600 до 850 *в*. В качестве рабочего питательного провода в метрополитене обычно служит третий (контактный) рельс.

При наличии в городах крупного грузового движения прибегают к устройству так называемого грузового, или товарного, метрополитена. Например, в Чикаго линия грузового метрополитена достигает 120 *км*, специальные тоннели этого метрополитена однопутного и двухпутного профиля проложены от крупных железнодорожных станций и пристаней непосредственно к городским складам и рынкам.

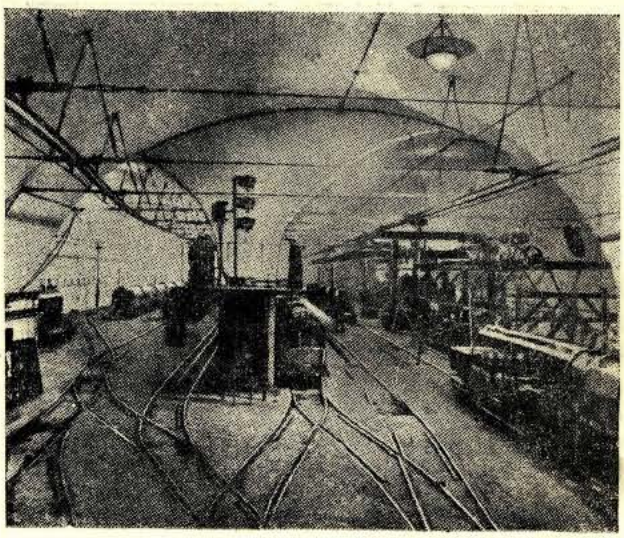


Рис. 21. Подземный грузовой метрополитен (тоннели)

Тоннели проходят в плотных глинах; обделка тоннелей из железобетона. Подвижной состав с электротягой (мощность электровоза 75—80 *л. с.*); грузоподъемность вагонов 13 *т*. Размеры тоннелей грузового метрополитена 3,4 × 3,8 *м*.

Грузовой метрополитен протяжением 10,4 *км* имеется также и в Лондоне. В этом метрополитене автоматические электрические поезда с почтовым грузом круглосуточно движутся в специальных чугунных тюбах, заложенных на глубине 23 *м* от поверхности (рис. 21, 22).

Как указывалось выше, в практике метростроения городские железнодорожные линии прокладываются надземного или подземного типа. Метрополитен надземного типа, устроенный в виде мостовых эстакад, получил распространение преимущественно в начальный период зарождения метрополитенов в крупных городах, главным образом в Нью-Йорке, Чикаго и Берлине. Следует учесть, что распространение надземного, а не подземного типа метрополитена вызывалось главным образом теми трудностями технического порядка, с которыми была связана прокладка тоннелей (геологические условия, осложненные мест-

ным городским режимом). Кроме того, приходилось считаться с наличием паровой тяги, при которой тоннели заполнялись дымом, отравлялся воздух в вагонах и станциях, делая пребывание людей под землей весьма неприятным.

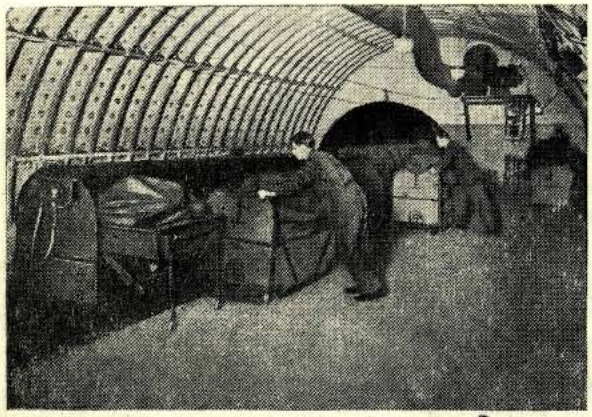


Рис. 22. Подземный грузовой метрополитен (почтовая станция)

Однако следует отметить, что такие города, как Париж и Лондон, несмотря на все эти трудности, все же строили метрополитены преимущественно подземного типа.

В Нью-Йорке и Берлине надземный метрополитен создавался в виде металлических мостовых эстакад. По мере того как тоннельная техника совершенствовалась, особенно с введением электрической тяги, стали переходить к прокладке метрополитена в тоннелях.

Этому способствовало исключительное стеснение уличной территории опорами эстакады метрополитена, которые загромождали улицу, являясь помехой для городского движения.

Вместе с тем следует отметить, что к 1902 г. в Нью-Йорке было построено до 130 *км* метрополитена на эстакадах. В дальнейшем метрополитены строились исключительно подземного типа. В настоящее время в Нью-Йорке имеется более 300 км тоннелей метрополитена. Огромное количество эстакад уничтожено.

В Берлине строительство эстакадных линий было прекращено еще в 1911 г., и в дальнейшем развитие Берлинского метрополитена проводилось исключительно прокладкой тоннелей. В Гамбурге часть линий метрополитена построена на эстакадах.

При сооружении метрополитенов подземного типа тоннели делаются круглого или сводчатого типа из металла, бетона, железобетона, камня и т. д. В зависимости от местных городских, топографических и геологических условий, а равно и от условий эксплоатации метрополитена, последний строится мелкого или глубокого заложения. При мелком заложении тоннели метрополитена устраиваются с плоским перекрытием. При глубоком заложении тоннели устраиваются сводчатого или круглого типа, как, например, в Москве, Париже, Лондоне. Плоское перекрытие получило распространение в Берлине, Нью-Йорке.

В общем комплексе тоннельных сооружений метрополитена станции, являющиеся остановочными пунктами, включающими платформы, где происходит посадка и высадка пассажиров, занимают особое положение. Станции метрополитена располагаются под большими площадями, в местах скрещения улиц с наиболее оживленным движением.

В практике метростроения станции бывают с островными или боковыми платформами и станции комбинированного, многоплатформенного типа (две островные платформы, островная платформа и боковые и т. п.). При островных платформах значительно упрощается устройство входов и выходов со станций.

Весьма просто решается и вопрос пересадок с одной станции на другую в узловых пунктах, когда пересекаются две или несколько линий метрополитена.

Что касается боковых платформ, то хотя они и представляют известные преимущества в эксплоатации, но вызывают неудобства в смысле перехода с одной платформы на другую. При этом условия эксплоатации значительно осложняются при пересечении в разных уровнях нескольких станций метрополитенов.

За последнее время в практике метростроения отдают предпочтение станциям с островными платформами, которые способствуют наилучшему архитектурному и планировочному решению.

Ширина боковых платформ может быть от 3,5 до 6 *м*, а островных от 6 до 20 *м*. Ширина платформ в каждом отдельном случае устанавливается в соответствии с назначением данной станции и с величиной ожидаемого пассажирского потока. При этом скорость движения пассажиров по платформе

станции метрополитена для расчетов принимается от 1,5 до 1,7 *м* в секунду.

Как указывалось выше, в соответствии с типом метрополитена станции могут быть глубокого и мелкого заложения. На станциях мелкого заложения (до 10 *м*) подъем и спуск пассажиров происходят по обыкновенным лестницам. При глубоком заложении станций подъем и спуск пассажиров механизированы применением лифтов и эскалаторов. Надо сказать, что от применения лифтов, которые имеют большое распространение на Лондонском метрополитене, в настоящее время отказываются и переходят исключительно на оборудование станций эскалаторами, которые обеспечивают непрерывность движения людского потока с поверхности земли на станцию и обратно.

Длина станций метрополитена устанавливается в соответствии с максимальной длиной состава поезда. В практике длина платформ бывает 120 *м* (Берлин, Париж), 160 *м* (Москва) и отдельные станции до 200 *м* (Нью-Йорк).

Максимальные уклоны путей метрополитена достигают 0,05.

Тоннели метрополитенов оборудуются искусственной вентиляцией.

Методы производства работ. Отрасль тоннельной техники метростроения является исключительно сложной и требует применения специальных методов производства работ.

При установлении метода производства работ, в основном влияющего на тип создаваемого метрополитена, необходимо учесть особенности геотехнических условий и городского режима по направлению прокладываемой трассы тоннелей. Задача заключается в том, чтобы провести тоннельные работы по сооружению метрополитена таким образом, чтобы они не влияли на условия нормальной жизни города.

Опыт метростроения за границей и в СССР дает ряд следующих систем производства тоннельных работ.

Система глубокого заложения. При этой системе все тоннели и подземные станции закладываются на глубине до 40—50 *м*, в устойчивых породах, а сам процесс тоннелирования ведется щитовым способом или существующими в мировой практике горными способами временного крепления. Фронт работ открывается из ряда шахт, заложенных в стороне от уличной магистрали, причем работы ведутся без нарушения жизни города. Такой метод получил широкое применение при сооружении мощной сети лондонских городских железных дорог (Андерграунда), где тюбы заложены на глубине до 50—60 *м* в водонепроницаемой плотной глине (London Blue Clay).

Этот же метод применялся при прокладке тоннелей трех очередей строительства Московского метрополитена и принят для строительства большого кольца 4-й очереди строительства.

Система мелкого заложения (тоннельная) При этой системе тоннели метрополитена сооружаются горным способом временного крепления, близко от поверхности мостовой. Эта система получила свое исключительное развитие в Париже, при создании обширной сети тоннелей Парижского метрополитена и общесплавной тоннельной канализации. Тоннельная система мелкого заложения требует особого уменья и высококвалифицированных кадров тоннельщиков, которые, придерживаясь принципов разработки малыми частями, не должны допускать малейших осадок поверхности.

Эта система применялась также при сооружении ряда участков тоннелей Московского метрополитена.

Открытая система работ. При открытой системе работ поверхность улицы вскрывается и тоннель устраивается в открытом котловане. В этих случаях сооружения подземного хозяйства заранее перекладываются или подвешиваются непосредственно к креплениям котлована.

Движение, при достаточной ширине улицы, отводится в сторону, а иногда пропускается по параллельной улице или по временному настилу (мосту), перекрывающему котлован. Работы по сооружению тоннелей открытым способом обычно связаны с укреплением оснований и фундаментов домов, расположенных вблизи трассы.

Открытая система работ применялась при сооружении тоннелей метрополитенов Берлина, Гамбурга, Нью-Йорка, а также при создании ряда участков тоннелей Московского метрополитена.

Траншейная система работ. Эта система, при которой стены тоннеля устраиваются в траншеях или в колодцах, применялась в Париже, Москве и Берлине главным образом при трассировании линии под домами.

Таким образом, уже при трассировании линии и создании профиля тоннеля прихо-

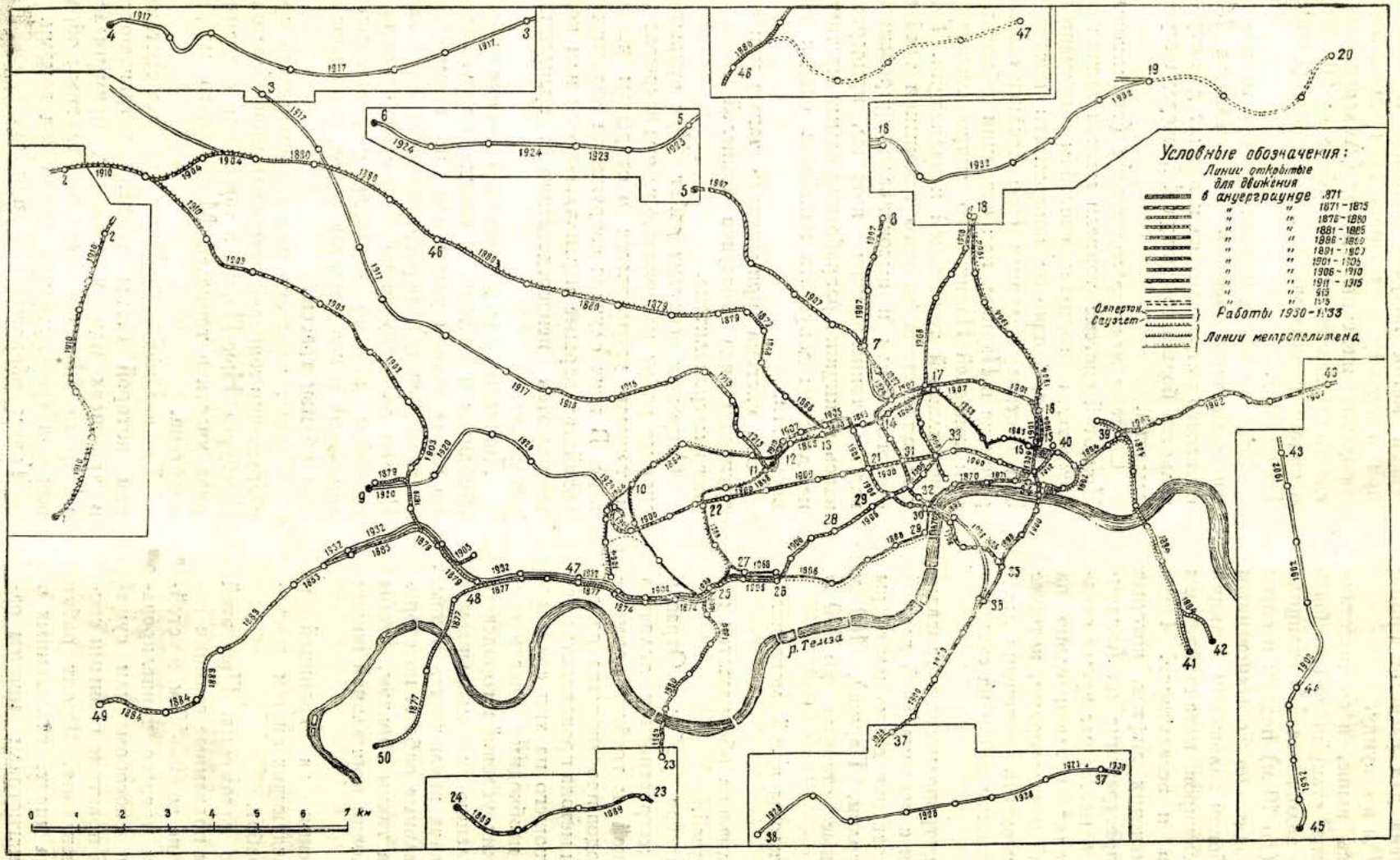


Рис. 23. Метрополитен Лондона (схема сети линий, даты их постройки и станции):

1 — Uxbridge, 2 — Easlcote, *3* — Harrow., *4* — Watford Junctuon, *5* — Golders Green, *6* — Edgware, *7* — Camden Town, *8* — Highgate, *9* — Ealing Broadway, *10* — Latimer Road, *11* — Paddington, *12* — Edgware Rd., *13* — Baker Street, *14* — Euston Sq., *15* — Moorgate, *16* — Old St., *17* — — King's Cross, *18* — Finsbury Park, *19* — Arnos Grove, *20* — Cockfosters., *21* — Oxford Circus, *22* — Notting Hill Gate, *23* — East Putney, *24* — Wimbledon, *25* — Earls Court, *26* — S. Kenginton, *27* — Gloucester, *28* — Hyde Park çorner, *29* — Westminster, *30* — Charing Cross, *31* — Leicester, *32* — Strand, *33* — Holborn, *34* — Cannot Street, *35* — Elephant and Castle, *36* — Konnington, *37* — Clapham Common, *38* — Morden, *39* — Whitechapel, *40* — Liverpool Street. *41* — New Cross Gate, *42* — New Cross, *43* — West Ham· Manor Rd., *44* — Bar-Cking, *45* — Upminster, *46* — Wembley Park, *47* — Stanmore, *48* — Chiswick Park, *49* — Hounslow, *50* — Richmond

дится ориентироваться на ту или иную систему работ, выявляя элементы целесообразности применения ее в местных условиях.

* * *

Метрополитен — Андерграунд Лондона (Англия). Схема Лондонской городской сети железных дорог не содержит элементов регулярности, что является результатом непланового строительства в течение 80 лет (рис. 23).



Рис. 23а. Метрополитен Лондона (станция Вуд Грин)

В Лондоне, вследствие обширности территории и густоты железнодорожной сети, практически непоправимые недостатки схемы выступают с особенной яркостью. Увязка пересекаемых между собою станций разных направлений приводит к невероятно сложным и причудливым решениям, которые сопряжены с большими инженерными работами по реконструкции ряда новых тоннелей, галлерей и переходов. Последние в свою очередь неизбежно вызывают ряд затруднений эксплоатационного порядка.

Лондонская подземная сеть железных дорог имеет как подземные линии глубокого (до 60 *м*) и мелкого заложения, так и открытые участки.

Линии метрополитена сравнительно мелкого заложения сооружены еще в прошлом столетии и, естественно, уступают другим европейским метрополитенам. Особенно мощным транспортным предприятием является лондонский Андерграунд с тоннелями глубокого заложения, со станциями, оборудованными крупными лифтами и эскалаторами.

На линии Финсбюри-Парк по направлению на Кокфостер, законченной постройкой в 1932 г., подземные станции полностью оборудованы эскалаторами (рис. 23а). Проведены работы по реконструкции станций, постройке вестибюлей и замене лифтов эскалаторами (станции Холборн, Лейстер-Сквер, Ченсери-Лэйн, Найтбридж, Гайд-Парк Корнер, Пикадилли — рис. 24, 25).

Проходка перегонных и станционных тоннелей ведется с помощью специальных щитов. Постройка нового тоннельного участка — удлинение Пикадилли-Лэйн от Финсбюри-Парк на протяжении 4 миль (6,4 *км*) — была проведена применением 22 щитов раз-

ных размеров. При 9 шахтах, заложенных на этом участке, была достигнута средняя скорость порядка 1 мили (1,6 *км*) в месяц готового тоннеля.

Тоннели всех размеров укреплялись тюбами из чугунных сегментов.

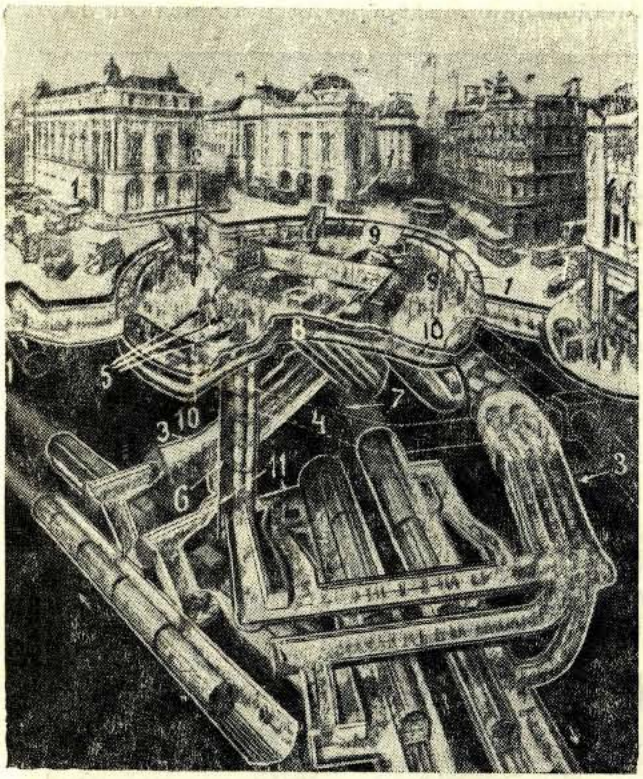


Рис. 24. Метрополитен Лондона:

1 — вход, *2* — кассовый зал, *3* — три эскалатора, *4* — тоннель для трубопроводов, *5* — автоматические кассы, *6* — винтовая лестница, *7* — пять эскалаторов, *8* — машинное отделение, *9* — витрины и киоски, *10* — подземный вестибюль, *11* — переходы

В 1935 г. было начато строительство новой линии лондонского Андерграунда — Ильфорд, между станциями Ливерпульстрит и Ньюбори Парк протяжением 15,2 *км*.

Сооружение тоннелей осуществлялось преимущественно в глинах, а на переходных участках из глубокого заложения на мелкое в условиях слабых, водоносных грунтов. В широком масштабе применялась щитовая проходка под сжатым воздухом. Химическое укрепление грунтов применялось для образования искусственной надежной кровли при проходке подводных тоннелей Андергаунда под руслом реки.

Ввиду недостатка чугуна участок тоннеля, заложенный в глине на протяжении 4,4 км по трассе, был закреплен железобетонными тюбингами.

Строительство линии было прервано войной в 1939 г., и тоннели были использованы на ряде участков в качестве бомбоубежищ. Восточный тоннельный участок линии Ильфорд был использован как подземный завод для изготовления деталей самолетов.

До настоящего времени (1947 г.) линия Ильфорд еще полностью не оборудована и не подготовлена для сдачи в эксплоатацию. Следует отметить, что при сооружении линии Ильфорд английские инженеры учли выдающуюся советскую технику проектирования и строительства лучшего в мире Московского метрополитена.

В частности, станция Гент-Хилл сооружена по одному из типов станции Московского метрополитена. Однако при сооружении этого нового типа станции английские инженеры вели работы чрезвычайно осторожно, дробными фазами, боясь одновременного раскрытия крупного трехсводчатого станционного профиля. По принятой системе разработки станционного профиля шириною в 23,0 *м* сначала были пройдены два крайних пилот-тоннеля. Далее проходили два тоннеля диаметром по 6,5 *м*, включавшие в себя опоры-колонны. В центре верхней части среднего станционного профиля был пройден третий пилот-тоннель, над которым раскрывали средний свод станции, опирая его на колонны через систему металлических балок. Последним этапом вскрывались крайние станционные тоннели, базируясь на первых двух пилот-тоннелях, образуя общий станционный профиль.

Следует указать, что советские инженеры в аналогичных случаях дают более смелые решения, раскрывая еще большие станционные профили (ширина выработки до 32 *м*) в два приема станционными сечениями по 9,5 *м*.

Большие подземные вестибюли станций (диаметром до 60 *м*) сооружаются англичанами без перерыва уличного движения. Стены возводятся в штольнях, а колонны — в колодцах, опущенных из специальных подходных галлерей. Балки несущего перекрытия вестибюля иногда укладываются подземным путем через расширенные штольни или с поверхности мостовой, для чего последняя на ночь раскрывается.

После устройства стен, колонн и несущего перекрытия, составляющих полный конструктивный скелет, производят выборку земля-

ного ядра вестибюля, вне всякой зависимости от уличного движения.

Основной принцип городских работ, предпринимаемых в Лондоне, состоит в том, чтобы не прерывать движения и не быть помехой для городской жизни. Поэтому, несмотря на то, что постройка вестибюля открытым путем может быть реализована дешевле и быстрее, англичане идут на более продолжительные и

тикуемые ими методы работ, кажущиеся вначале дорогими, в действительности, применительно к городским тоннельным условиям, оказываются наиболее дешевыми.

Лондон является пионером в области сооружения метрополитенов. В 1860 г., не имея в этой области никакого опыта, лондонские инженеры впервые приступили к разрешению столь сложной проблемы, как строительство

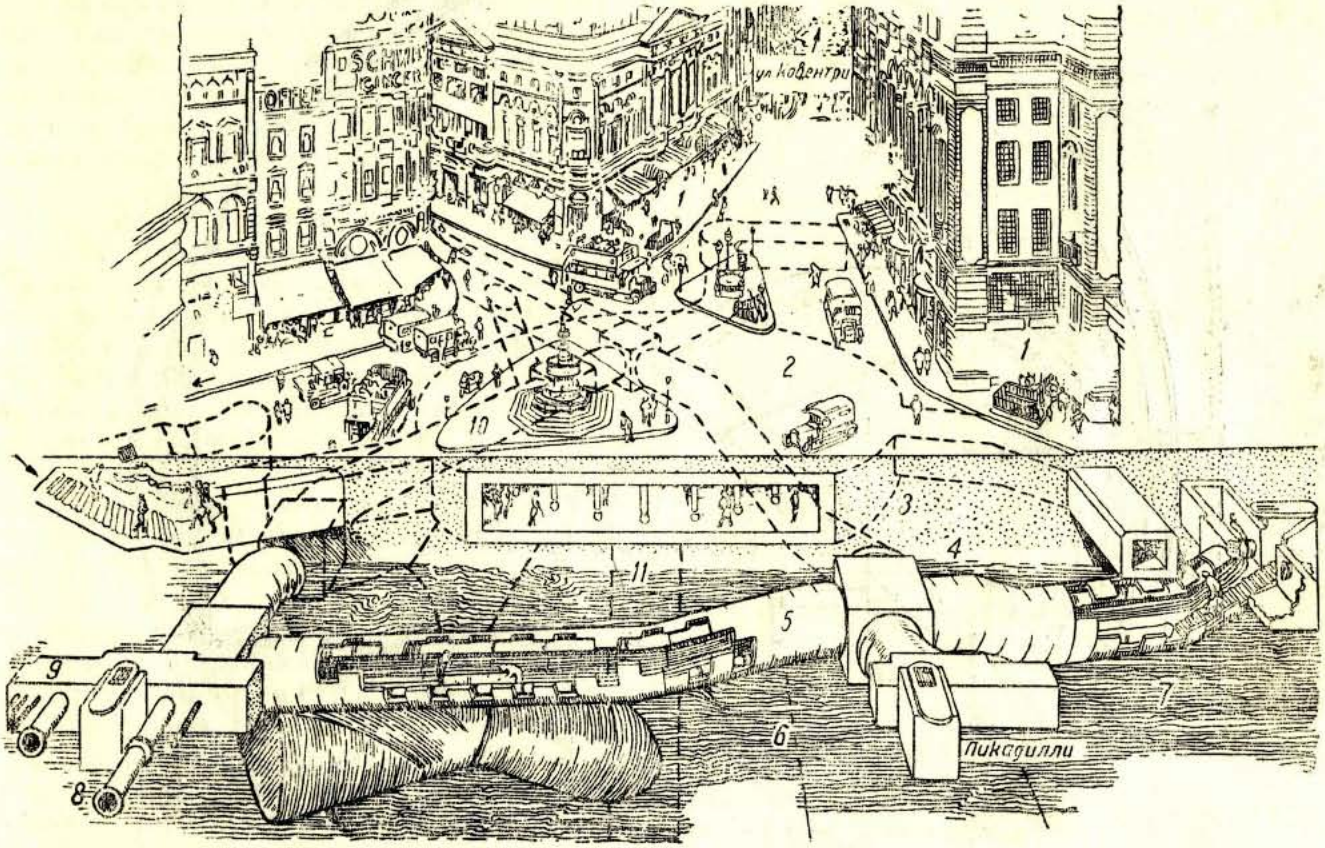


Рис. 25. Метрополитен Лондона (станция Пикадилли — схематический разрез):
1— вход в метрополитен, *2*— подземный вестибюль, *3*— гравий, *4*— глина, *5*— эскалаторные тоннели, *6*—глина, *7*— вентиляционные тоннели, *8*— водопроводная магистраль, *9*— кабели, *10*— коммунальный тоннель, *11*— запасный выход, шахта

сложные закрытые работы, непосредственно под поверхностью мостовой.

Необходимо отметить, что все элементы крепления штолен, до затяжек и марчеван включительно, применяются металлические. После постановки каждой металлической штольневой рамы в кровлю и за борта производится немедленно нагнетание цементного раствора под давлением около 3 *ат*.

Таким образом, при заполнении пустот цементом проходка ведется непосредственно под мостовой без осадок последней.

Ссылаясь на свой долголетний опыт, английские инженеры указывают, что прак-

городских подземных железнодорожных линий. Первая линия метрополитена Кингс-Кросс — Эдгар Роод длиной 3,6 *км* в 1863 г. была сдана в эксплоатацию. При постройке возникал ряд сложных вопросов, связанных с проходкой тоннелей под домами и их укреплением, с уличным движением, с сооружениями городского подземного хозяйства, с грунтовыми водами и т. п.

Вначале тоннели строились двухпутного профиля, открытым способом, с каменными стенами и перекрытиями из металлических балок, с кирпичными сводиками. По мере накопления опыта, в процессе производства ра-

бот, видоизменялся и тип основных тоннельных сооружений.

Своды устраивались в 3 кирпича, а местами в 5 кирпичей, причем толщина перекрытия доходила до 1,4 *м*.

Особый интерес в свое время представляли работы по сооружению тоннеля Канонстрит. При ширине улицы в 49 футов (14,94 *м*) требовалось, без перерыва уличного движения, произвести подводку фундаментов прилегающих домов до подошвы тоннеля. Для этого предварительно необходимо было произвести перекладку подземных сооружений и пропустить по временному настилу потоки людей и экипажей. Под защитой деревянного моста была проведена верхняя центральная галлерея, от которой засечками из поперечных штолен опускались колодцы под фундаменты и производилась подводка их. Затем отдельными участками устраивались стены тоннеля при одновременной укладке канализационных труб. По земляным кружалам устраивался несущий свод тоннельного перекрытия. При наличии законченной тоннельной конструкции среднее земляное ядро удалялось обычным путем.

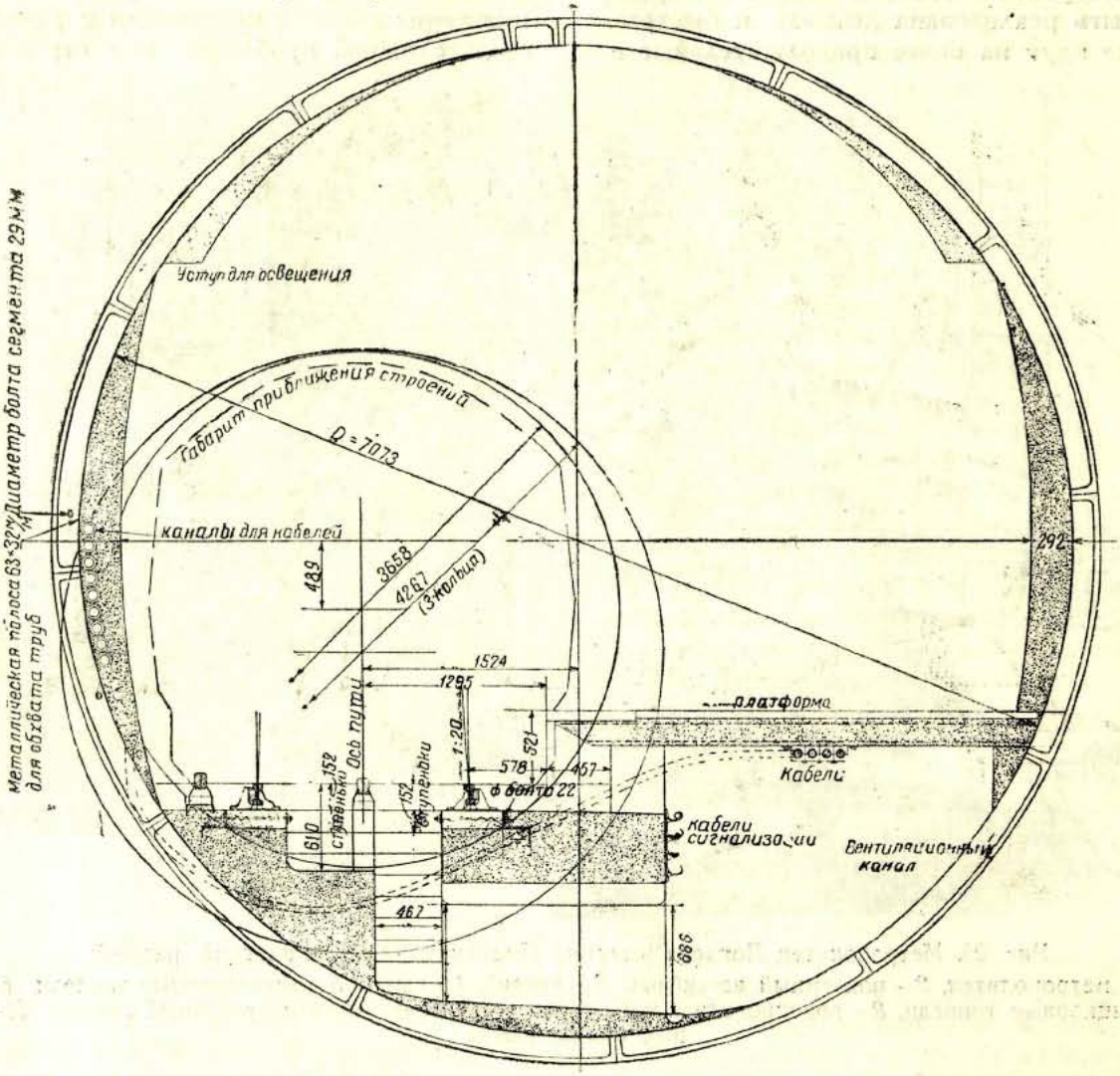


Рис. 26. Лондонский Андерграунд (станционный тоннель)

Необходимо отметить, что до 1890 г. метрополитен Лондона эксплоатировался при паровой тяге. С 1891 г., когда была введена электрическая тяга, строительство метрополитена стало усиленно развиваться. Электрическая тяга намного облегчила технические условия трассировки метрополитенных линий, уменьшила габариты, изменила величину радиуса кривых, предельных уклонов и т. д.

Отсутствие дыма и газа от паровой тяги создало лучшие условия эксплоатации. В настоящее время общая сеть лондонских электрических железных дорог (вместе с метрополитеном и Андерграундом) составляет 414 *км* путей.

Вначале работы по сооружению тоннелей в Лондоне велись с поверхности, открытым способом. Для этого необходимо было проводить сложные и дорогостоящие работы по переустройству коллекторов, подземного хозяйства, производить чрезвычайно медленные и кропотливые работы по укреплению оснований и фундаментов домов, расположенных вблизи трассы. Кроме того, парламент ставил жесткие требования о производстве работ без нарушения уличного движения. Однако, несмотря на большую осторожность в предпринимаемых работах, избежать повреждения строений не удавалось. Помимо значительной стоимости земельных участков, неимоверно возрастали расходы по компенсации убытков за повреждения частных строений в процессе производства тоннельных работ.

С целью обойти подобные осложнения, неизбежные при постройке поверхностных городских железнодорожных линий, англичане в 1884 г. начали строить подземные дороги на большой глубине. Закладкой линий на большую глубину англичане избежали больших и дорогостоящих работ по переустройству сооружения подземного хозяйства, по укреплению оснований и фундаментов домов, а главное — нарушения уличного движения. Одновременно с актом разрешения сооружения глубоких линий было введено запрещение паровой тяги для Андерграунда.

Тоннели строились однопутными; это улучшало условия вентиляции, так как поезд в таком тоннеле выполнял как бы функции поршня, способствовал передвижению воздуха.

В 1890 г. участок глубокого заложения протяжением в 5,07 *км* был сдан в эксплоатацию. В дальнейшем, с развитием сети, при трассировке и пересечении линий по новым направлениям, тоннели заглублялись до 58 *м* от поверхности земли. Этому обстоятельству благоприятствовал мощный слой водонепроницаемой лондонской глины, явившийся прекрасным грунтом для прокладки в нем тоннелей, при помощи щита системы Гредхэда. Перемещение пассажиров с поверхности на глубоко расположенные платформы станций осуществлялось лифтами вместимостью около 130 чел., а в настоящее время—эскалаторами, которых уже установлено до 120.

Минимальная глубина станций, оборудованных механизированным подъемом,—9.14 *м*, максимальная — 55,17 *м*. Среднее расстояние между станциями около 1 *км*.

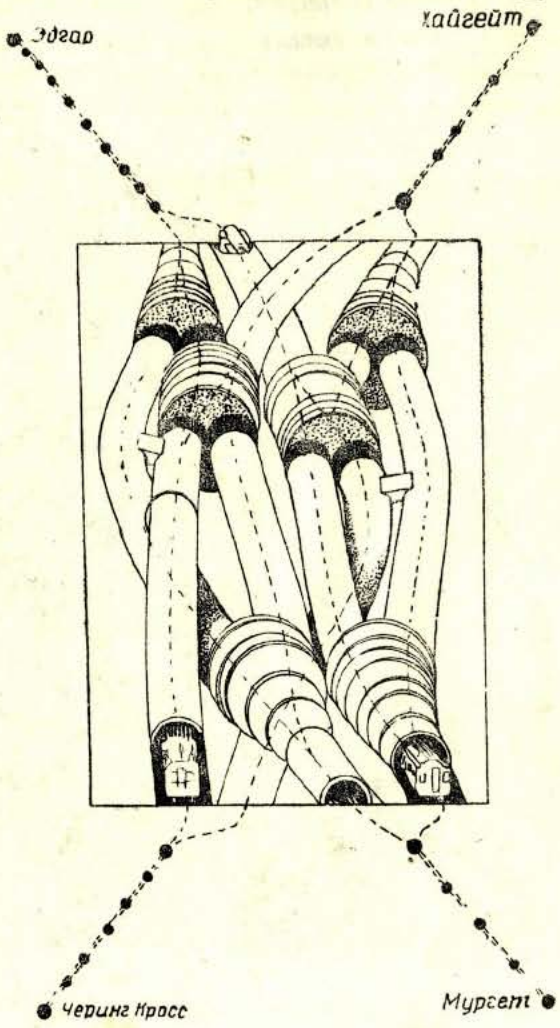


Рис. 27. Тоннельное соединение у станции Кэмдентаун (Лондон)

Перегонные и станционные тоннели — преимущественно однопутные (рис. 26 и 27). Продольный профиль тоннеля проектировался с учетом электротяговых требований.

С целью уменьшения шума при движении поездов отдельные участки лондонского Андерграунда (линии Пикадилли между Парк-Роод и Каледониан-Роод и линия Хемпстэд) с внутренней стороны покрыты (между ребрами сегментов) специальным асбестовым слоем. В качестве такого слоя применялся и особый изоляционный материал «айзоло» из морской травы, покрытой асбе-

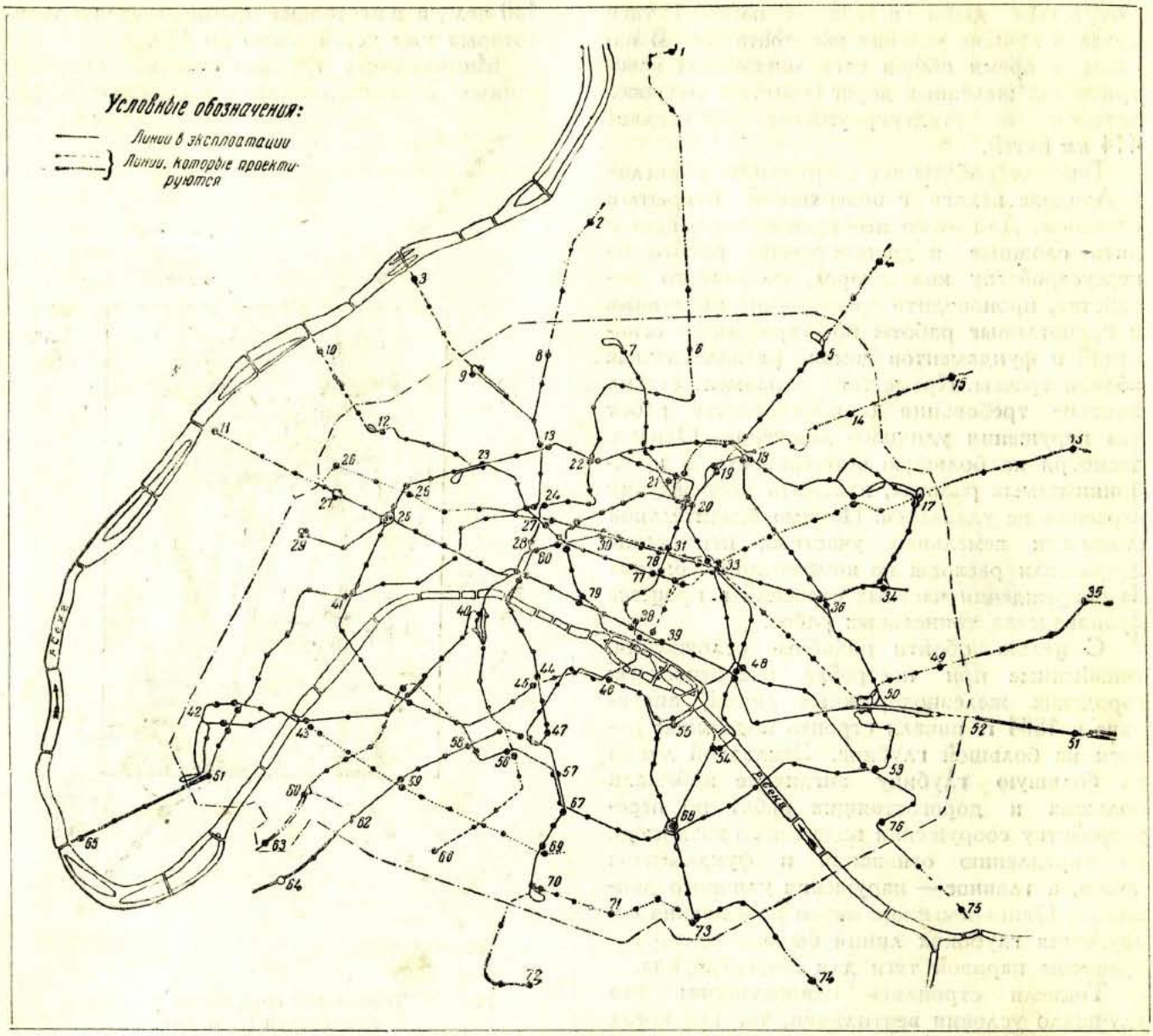


Рис. 28. Метрополитен Парижа (схема линий и станций):

1 — Boulevard Carnot, *2* — Rue du Landy, *3* — Pont de Clichy, *4* — Cimetière de Pantin, *5* — Porte de la Villette, *6* — Porte de la Chapelle, *7* — Porte de Clignancour, *8* — Porte de Stouen, *9* — Porte de Clichy, *10* — Pont de Levallois, *11* — Pont de Neuilly, *12* — Porte de Champerret, *13* — Place Clichy, *14* — Porte de Pantin, *15* — Eglise de Pantin, *16* — Place Carnot, *17* — Porte des Lilas, *18* — Avenue Jean Jaurés, *19* — Louis Blanc, *20* — Gare de L'Est, *21* — Gare du Nord, *22* — Place Pigalle, *23* — Avenue de Villiers, *24* — Gare St. Lazare, *25* — Place de Ternes, *26* — Place de l'Etoile, *27* — Gaumartin, *28* — La Madeleine, *29* — Porte Dauphine, *30* — Opera, *31* — Richelieu, *32* — St. Denis, *33* — Place de la République, *34* — Place Gambetta, *35* — Mairie de Montreuil, *36* — Père Lachaise, *37* — Arts et Metiers, *38* — Chatelet, *39* — Hôtel de Ville, *40* — Les Invalides, *41* — Place du Trocadero, *42* — Porte d'Auteuil, *43* — Quai de Javel, *44* — Sévres — Babylone, *45* — Grenelle, *46* — Odeon, *47* — Montparnasse, *48* — Place de la Bastille, *49* — Porte de Montreuil, *50* — Place de la Nation, *51* — Ghateau de Vincennes, *52* — Porte de Vincennes, *53* — Place Daumesnil, *54* — Gare d'Orleans — Austerlitz, *55* — Place Jussieu, *56* — Place du Maine, *57* — Raspail, *58* — Pasteur, *59* — Convention, *60* — Porte de Sevres, *61* — Porte de St. Cloud, *62* — Porte de Versailles, *63* — Issy les Moulineaux, *64* — Mairie d'Issy, *65* — Pout de Sevres, *66* — Porte de Vanves, *67* — Denfert-Rochereau, *68* — Place d'Italie, *69* — Avenue d'Orléans, *70* — Porte d'Orléans, *71* — Porte Gentilly, *72* — Carrefour de la Vache Noire, *73* — Porte d'Italie, *74* — Mairie d'Ivry, *75* — Mairie de Charenton, *76* — Porte de Charenton, *77* — Reamur, *78* — Sebastopol, *79* — Palais-Royal, *80* — Concorde

стом. Однако этот материал не оказался достаточно прочным и надежным, главным образом в отношении пожарной безопасности.

Проводились также опыты по уменьшению шума от самих вагонов. Это достигается уменьшением количества рельсовых стыков на 1 *км* пути и переводом некоторых участков с жесткого бетонного пути на балласт.

а также гидроизоляции. В результате в тоннелях Парижского метрополитена душно; плохой воздух неприятно отзывается на пассажирах и вредно влияет на служебный персонал, пребывающий под землей значительное время. На новых линиях метрополитена вопросам вентиляции уделяется больше внимания. Интенсивное городское движение и на-

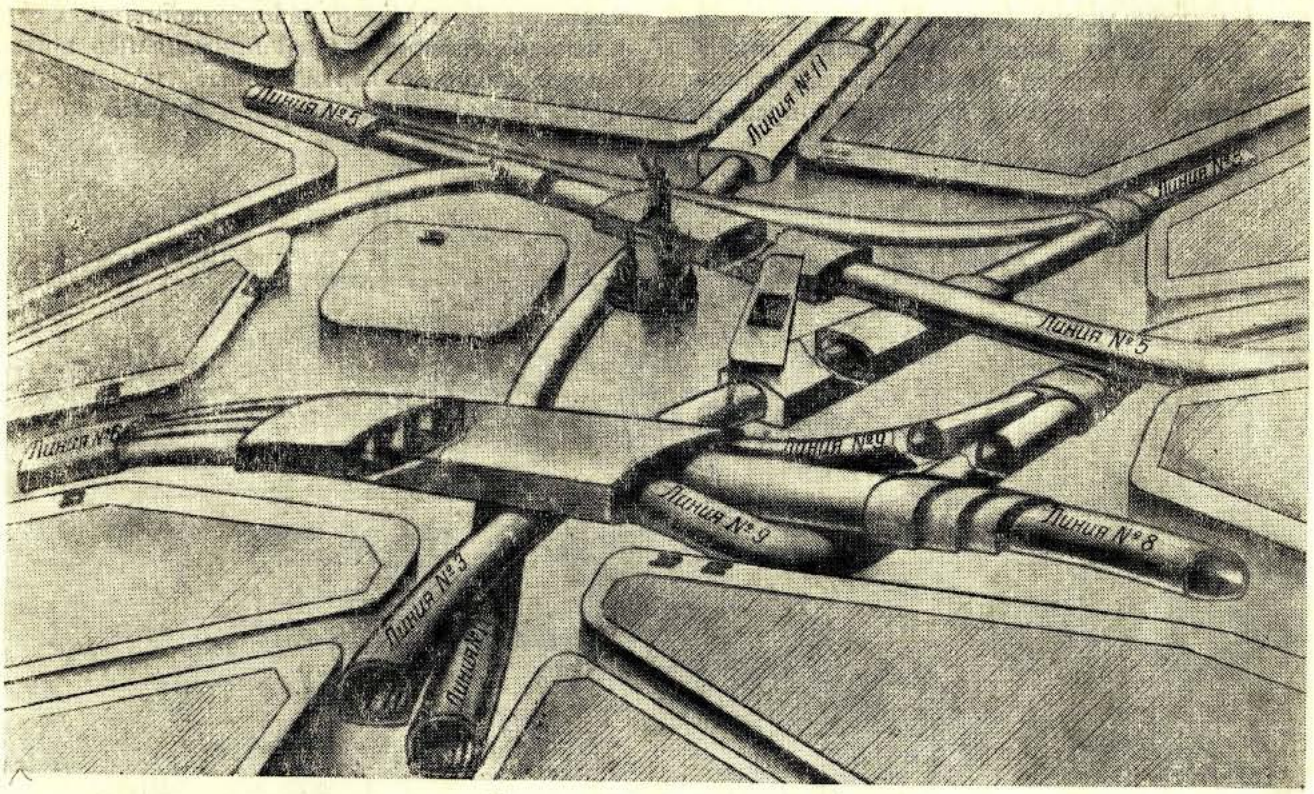


Рис. 29. Станция Площадь Республики (метрополитен Парижа) (схематический вид пересечения линий)

Борьба с вибрациями от движения поездов в тоннелях, проходящих непосредственно под домами, ведется применением айзоло.

Метрополитен Парижа (Франция). Метрополитен Парижа протяжением в 150 *км* представляет собой значительную сеть тоннельных сооружений. Схема линий метрополитена создана из отдельных, часто не увязанных между собой отрезков (рис. 28).

Пересечения линий образуют сложные станционные узлы, требующие для своей развязки длинных и кривых переходов и коридоров (до 250 *м*) с профилями, содержащими «потерянные» уклоны.

При сооружении Парижского метрополитена строителями не было уделено должного внимания вопросу вентиляции тоннелей, пряженная работа метрополитена в период эксплоатации вызывают настоятельную потребность в дальнейшем развитии существующей сети метрополитена.

Парижский муниципалитет решил в ознаменование годовщины крупнейшей победы Советской Армии у Сталинграда переименовать станцию Парижского метрополитена Обервилье в станцию Сталинград.

Созданная французами разнообразнейшая подземная сеть метрополитена имеет ряд замечательных тоннельных сооружений. Таковы, например станция Площадь Республики, объединяющая пять направлений метрополитена (рис. 29), станция Опера и др., тоннели под р. Сеной и под домами, тоннели-мосты, фундированные через подземные карьеры.

Строительство тоннелей в Париже ведется закрытым способом при мелком заложении без значительного нарушения уличного движения (рис. 30). Имеются случаи проходки тоннелей и на большой глубине. Так, например, в районе Монмартра перегонные тоннели заложены на глубине 63 *м*, станция Абесс на глубине 35 *м*, станция Ламарк Кауленкорт на глубине 25,5 *м* от поверхности до головки рельса метрополитена (рис. 31).

Строительство новых участков линий метрополитена ведется по бельгийской одноштольневой системе при деревянном креплении и каменной обделке; своды опираются непосредственно на породу.

Применявшаяся ранее система полущита подвижной металлической крепи незамкнутого контура, продвигаемой вперед при помощи гидравлических домкратов по грунту или по заранее созданным стенкам, в настоящее время отвергнута в силу того, что в процессе работ полущит претерпевал значительные деформации, поднимал мостовую и давал большие осадки. Отрицательное значение имело то обстоятельство, что первые конструкции французских полущитов были недостаточно жесткими. Существенным недостатком щита является необходимость придерживаться при проходке лишь постоянного сечения тоннельной обделки, а между тем неоднородные геотехнические условия иногда требуют изменения элементов обделки. В настоящее время при проходке под водными потоками французскими строителями применяется щит замкнутого контура.

Тоннельные работы проводятся в хороших геологических условиях — в совершенно сухих плотных мергелях и суглинках. Лишь на участке у станции Площадь Республики имеются пески с незначительным дебитом грунтовых вод. При проходке участков со слабыми грунтами в районе поймы р. Сены и непосредственно под ней применялись щиты, замораживание, вертикальные кессоны-тоннели, металлические обделки, сжатый воздух.

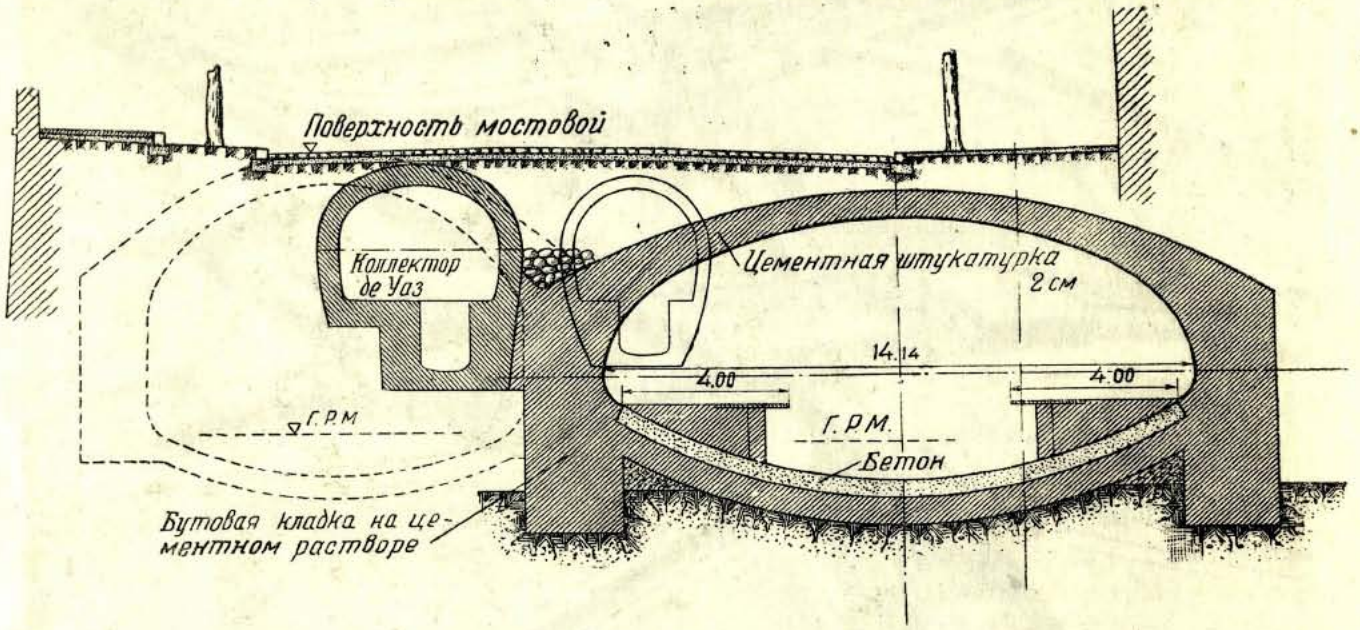


Рис. 30. Станция метрополитена Парижа

Большие и часто весьма неожиданные осложнения вносятся в строительство тоннелей метрополитена существующими в Париже подземными карьерами. Был случай, когда выложенные под улицей Де-Мейн своды, опиравшиеся на грунт, начали садиться вследствие дислокаций, происходивших в нарушенной зоне целиков между прокладываемым тоннелем и карьерами, расположенными ниже.

С целью локализации нарастающего процесса деформации тоннелей на устройство глубоких оснований под тоннелем была отпущена дополнительная сумма в 2 млн. франков. На протяжении 166 *м* приступили к закладке круглых 1,5 *м* колодцев, пересекающих карьерные пустоты; колодцы закладывались на глубину 10—12 *м* до надежного основания.

Столбы перекрывались бетонными арками на земляных кружалах под стенами и перпендикулярно оси тоннеля восьмидесятисантиметровыми железобетонными балками и железобетонной плитой. Несомненно, практика строительства Парижского метрополитена весьма многогранна. В свое время здесь нарождались новые методы работ, которые, в зависимости от их эффективности, или получали свое развитие или отвергались.

Парижская система тоннелирования отличается положительным качеством — работы минимально стесняют улицу и жизнь города.

Метрополитен Берлина (Германия). Метрополитен Берлина прорезает город поверхностными и подземными участками электрических железных дорог. Станции подземных линий сооружены преимущественно на небольшой глубине с островными платформами.

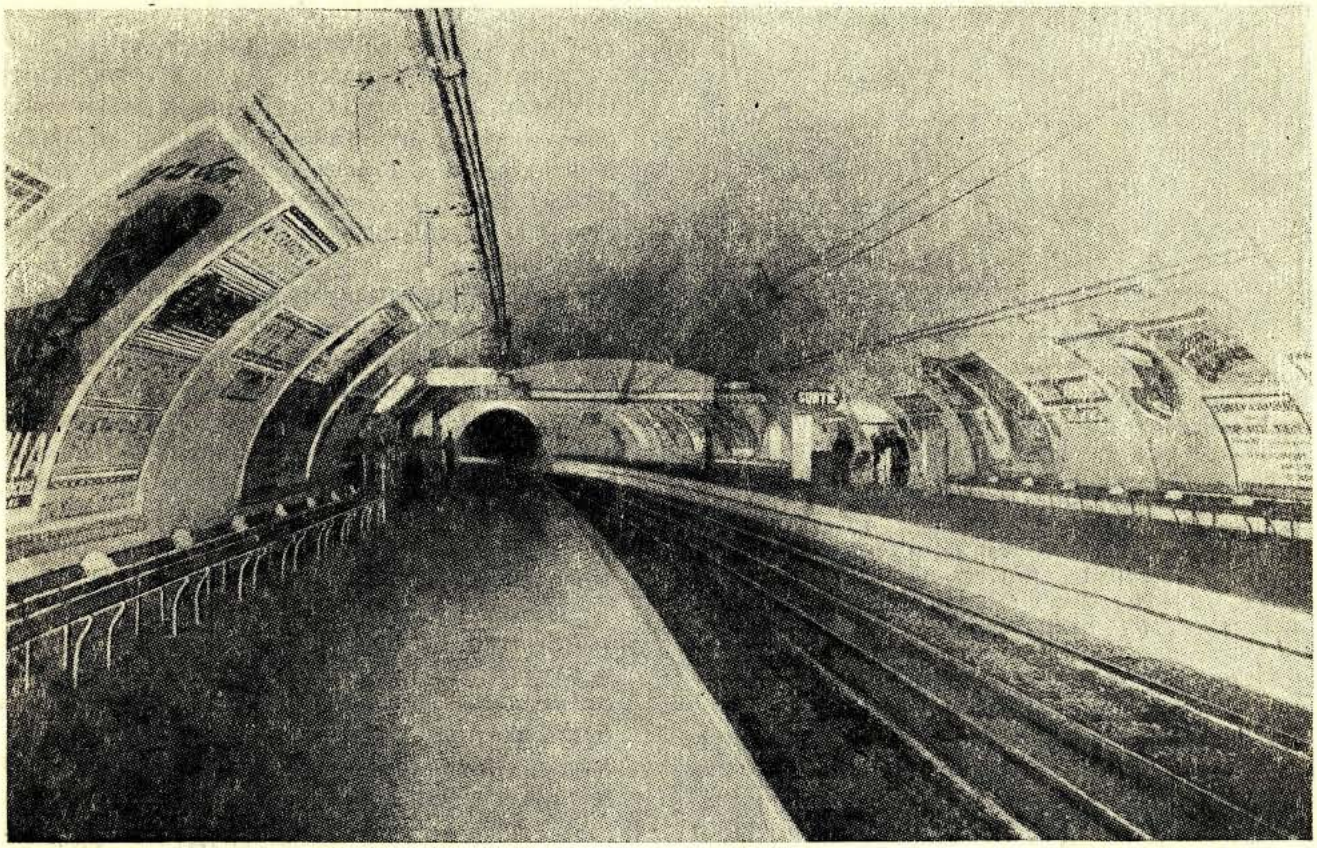


Рис. 31. Станция метрополитена Парижа

Геологические напластования Парижа весьма разнородны и представлены в виде меловых отложений, известняков, мергелей, гипсов, выклиниваний песков, суглинков и глин и т. п. Встречаются большие карьерные разработки, а также мощные насыпи до 10 *м*. В некоторых местах горизонт грунтовых вод весьма близок к поверхности земли. В некоторых районах, например в районе Бельвиль, встречаются два горизонта воды. В этих условиях работы в основном ведутся на временном деревянном креплении при постоянной каменной обделке. Водоносные слабые грунты встречаются в подходах к пойме р. Сены.

Сооружение подземных линий метрополитена проводилось главным образом открытым путем, с вскрытием мостовой. Даже устройство подводного тоннеля под р. Шпрее велось с поверхности, шпунтовым ограждением при искусственном водопонижении.

По трассе Берлинского метрополитена имеется ряд сложных сооружений в виде пересечения узловых линий разных направлений, тоннелей под домами, под рекой.

Первый участок метрополитена линии Штралауэр Тор — Зоологишер Гартен протяжением 11,2 *км* строился в течение $5^1/_2$ лет и был сдан в эксплоатацию в 1902 г. 83% дли-

ны этого участка дороги были надземными и лишь 17% — подземными.

Сеть метрополитенных линий Берлина имеет протяженность в 80,15 *км*, из них 81% — подземных, 13% — на эстакадах и 6% — в открытых выемках. Линии в этих выемках могут быть превращены в подземные.

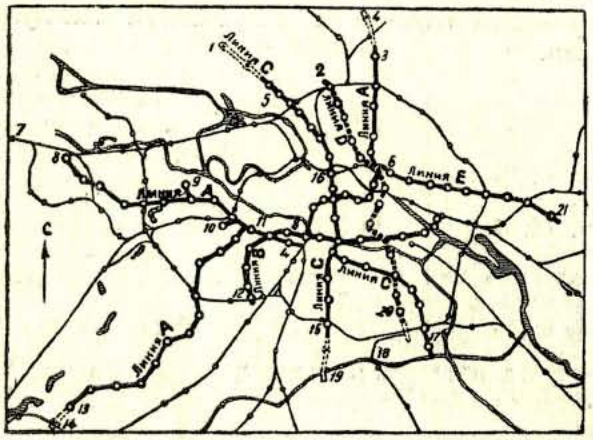


Рис. 32. Метрополитен Берлина:
а) линии A, B, C, D, E; б) станции: *1* — Scharnweber-Strasse, *2* — Gesund-brunnen, *3* — Pankow (Vinetastrasse), *4* — Breite-Strasse, *5* — Seestrasse, *6* — Alexander-Platz, *7* — Spandau, *8* — Ruhleben, *9* — Wilhelm-Platz, *10* — Uhland-Strasse, *11* — Wittenberg-Platz, *12* — Hauptstrasse, *13* — Krumme Lanke, *14* — Zellendorf-West, *15* — Tempelhof (Südring), *16* — Stadtbahn (Friedrichstrasse), *17* — Grenzallee, *18* — Hermann-Strasse (Südring), *19* — Ulbsteinstrasse, *20* — Leinestrasse, *21* — Friedrichsfelde

Сеть Берлинского метрополитена имеет пять действующих линий (рис. 32).

Штадтбан (городская железная дорога), пересекаясь со многими железнодорожными линиями, представляет глубокий ввод железных дорог в город с запада на восток. Протяжение линий Штадтбана 17 *км*. Электрифицированная в 1929 г., Штадтбан проходит главным образом по каменным виадукам, частично по металлическим эстакадам на высоте 7 *м* от поверхности мостовой.

При закладке фундаментов под опоры виадуков были встречены водоносные, песчаные грунты, несмотря на то, что величина допускаемого напряжения на грунт принималась в 3,5 *кг/см²*, фундирование обходилось все же в 20—35% от полной стоимости эстакадного сооружения.

Тоннели и станции Берлинского метрополитена мелкого заложения. Немецкой практикой выработан и усовершенствован прием сооружения тоннелей в открытых котлованах с предварительным осушением водоносных берлинских песков при помощи искусственного понижения уровня грунтовых вод.

Подъем и спуск пассажиров производятся только по простым лестницам. При пересечениях линий, например у Александерплац, где глубина заложения превышает 10 *м*, применяются механизированный спуск и подъем на эскалаторах.

В то время как станции Берлинского метрополитена, расположенные на эстакадах, имеют преимущественно боковые платформы, подземные станции оборудованы только островными платформами, длиной 110 *м*, рассчитанными на восьмивагонные составы. Предпочтение, отдаваемое островным платформам, объясняется экономией в обслуживающем персонале и удобством пересечения станций между собой. Пересечения станций в соответствии с местными условиями делают башенного типа.

Перегонные тоннели Берлинского метрополитена — двухпутные и по своей конструкции представляют бетонные стены с плоским металлическим перекрытием (рис. 33). На некоторых участках посредине этих тоннелей имеются металлические колонны. В последнее время промежуточные колонны не ставятся, так как в случае схода поезда с рельсов последний может сбить колонны, что вызовет обвал перекрытия.

Кроме того, средние колонны затрудняют устройство на перегоне стрелочного перевода в случае его необходимости. В зависимости от местных условий в берлинских тоннелях применяются железобетонные перекрытия и лотки, при слабых грунтах — конструкции в виде замкнутых железобетонных рам (рис. 34), а при сильном заглублении тоннеля — сводчатые профили (Белль Аллианс) со служебным проходом посредине.

Данные, полученные при исследовании режима берлинских грунтов в процессе производства работ и эксплоатации метрополитена, указывают на необходимость предъявления высоких требований к расчету конструкций тоннелей мелкого заложения; в условиях водоносных грунтов при расчете конструкций, кроме статических элементов, должно учитываться влияние вибраций от подвижного состава в период эксплоатации. Произведенные наблюдения и исследования влияния внешних сил дали возможность облегчить некоторые тоннельные конструкции.

Трассировка и габариты Берлинского метрополитена для новых линий установлены

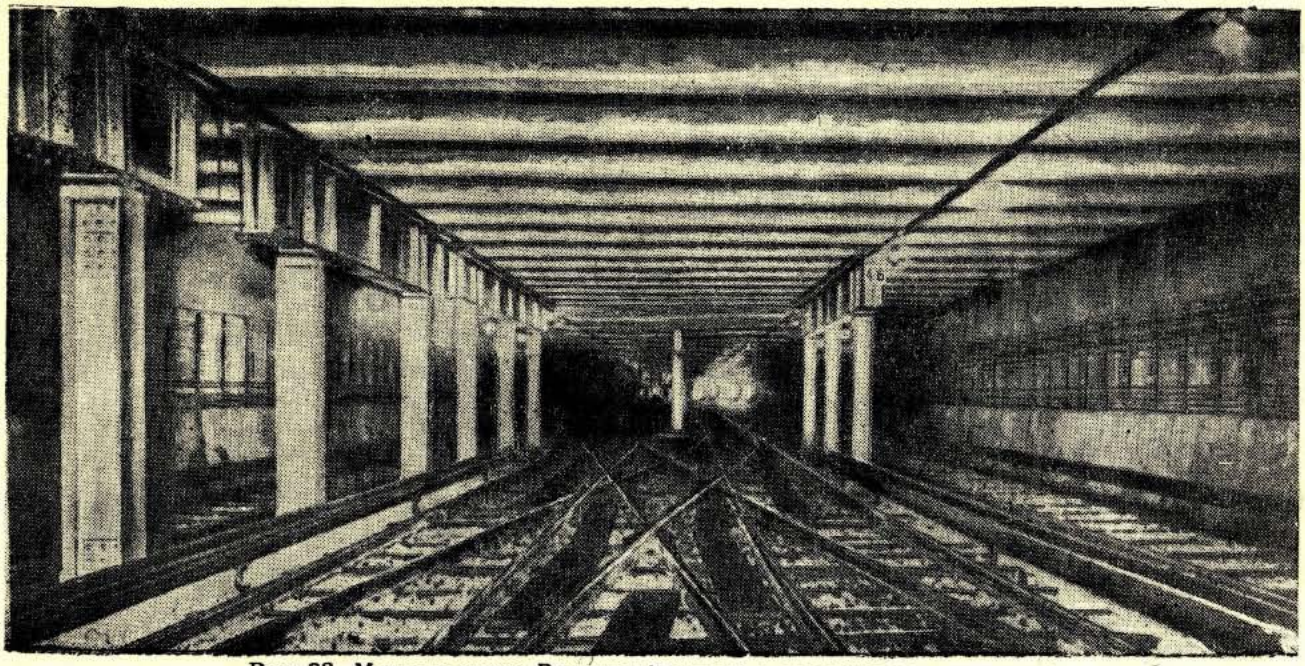


Рис. 33. Метрополитен Берлина (тоннели с плоским перекрытием)

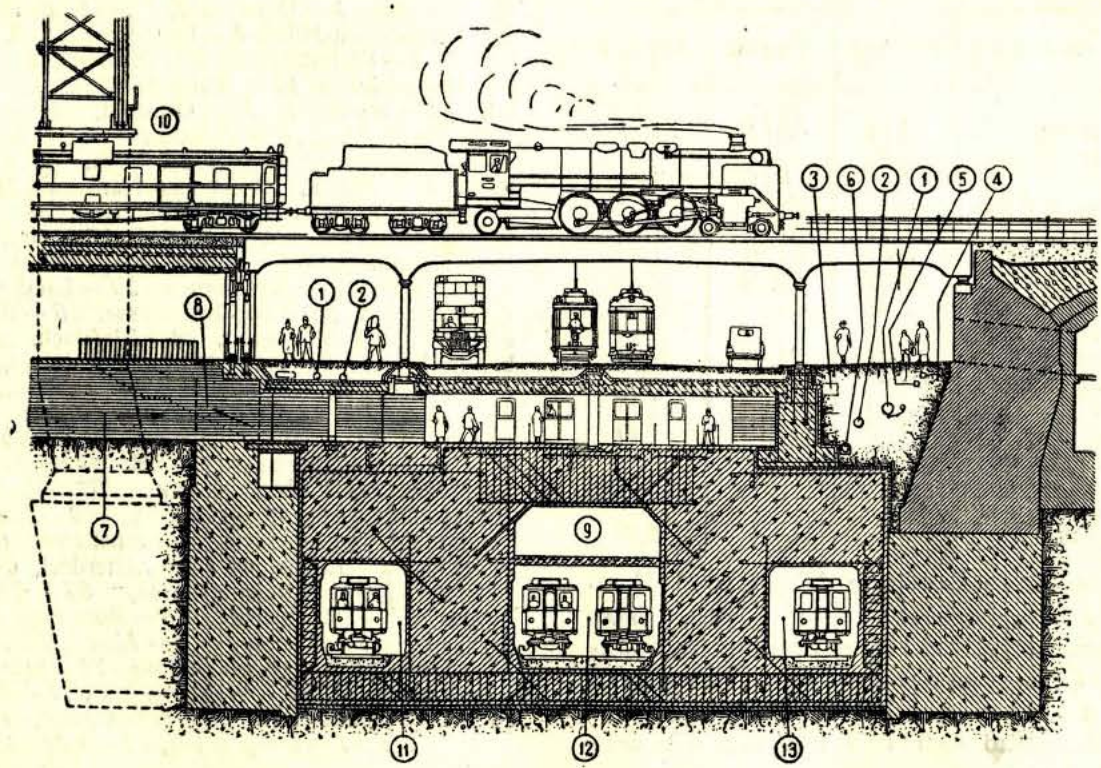


Рис. 34. Метрополитен Берлина (схематический разрез):

1 — газопровод, *2* — водопровод, *3* — кабели, *4* — почтовое отделение, *5* — пожарная сигнализация, *6* — канализация, *7* — переход из глубокого железнодорожного ввода на метрополитен, *8* — переход из метрополитена на глубокий железнодорожный ввод, *9* — кабельный канал, *10* — глубокий железнодорожный ввод, *11*, *12*, *13* — тоннели, *14* — вестибюль

по более повышенным техническим условиям, что видно из табл. 3.

Таблица 3

Сравнение габаритов тоннелей старых и новых линий Берлинского метрополитена

Наименование размеров	Новые линии	Старые линии
Ширина тоннеля в свету (в *м*)	6,90	6,24
Высота от головки рельса до низа перекрытия (в *м*)	3,60	3,30
Максимальный уклон пути (в %)	30,00	31,50
Минимальный радиус закругления (в *м*) . .	125,00	80,00
Ширина платформы (в *м*)	островная 7,00	боковые по 3—3,50
Длина платформы (в *м*) .	120,00	80,00

Сравнительные данные стоимости метрополитенов Лондона, Парижа и Берлина приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные данные стоимости (в %) метрополитенов Лондона, Парижа и Берлина[1]

Элементы стоимости	Лондон	Париж	Берлин
Тоннель вчерне . . .	33,10	35,70	34,50
Верхнее строение пути	3,80	4,40	3,90
Кабели низкого напряжения	1,20	1,00	1,10
Сигнализация . . .	0,90	1,30	1,20
Станции	28,10	29,60	27,20
Отчуждение	7,90	—	—[2]
Подвижной состав и мастерские . . .	17,60	21,40	20,00
Энергия, подстанции и кабели	2,60	3,90	2,20
Общие расходы . .	4,80	5,70	4,60
Восстановление мостовой и перекладка подземных сооружений . . .	—	—	5,30

Метрополитен Гамбурга (Германия). К сооружению метрополитена в Гамбурге было приступлено в 1906 г. Первая линия от Бланкенезе до Олсдорфа протяжением 17,5 *км* была открыта в 1912 г., а к 1915 г. было дополнительно построено еще 10,5 *км*, так что сеть

[1] Специально вопрос о стоимости метрополитенов см.: В. Л. Маковский, Сооружение тоннелей метрополитена, гл. V, М., 1935.

[2] Отчуждение при сооружении метрополитена в Берлине открытым способом составляет около 20% общей строительной стоимости.

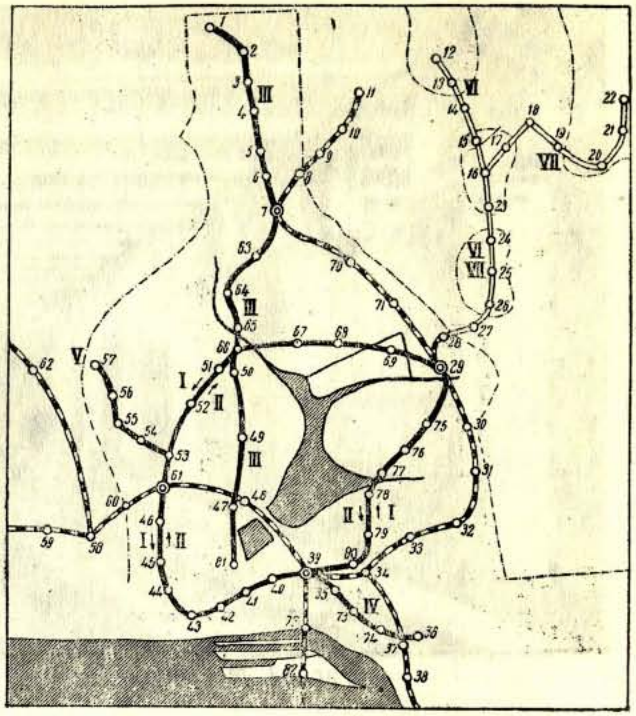


Рис. 35. Метрополитен Гамбурга

Линии метрополитена: а) I, II, III, IV, V, VI и VII; б) станции: *1* — Ochsenzoll, *2* — Langenhorn-Nord, *3* — Langenhorn-Mitte, *4* — Langenhorn-Süd, *5* — Fuhlbüttel, *6* — Klein-Borstel, *7* — Ohlsdorf, *8* — Kornweg, *9* — Hoheneichen, *10* — Wellingsbüttel, *11* — Popenbüttel, *12* — Wohldorf, *13* — Ohlstedt, *14* — Hoisbüttel, *15* — Buckhorn, *16* — Volksdorf, *17* — Buchenkamp, *18* — Ahrensburg, *19* — Hopfenbach, *20* — Schmalenbeck, *21* — Kiekut, *22* — Gross Hansdorf, *23* — Meiendorferweg, *24* — Berne, *25* — Fannsen, *26* — Trabrennbahn, *27* — Wandsbek-Gartenstadt, *28* — Hobichtstrasse, *29* — Barmbeck, *30* — Fridrichsberg, *31* — Wandsbeckerchaussee, *32* — Hasselbrook, *33* — Landwehr, *34* — Berliner Tor, *35* — Spaldingstrasse, *36* — Rothenburgsort, *37* — Rothenburgsort, *38* — Tiefstack, *39* — Hauptbahnhof, *40* — Barkhof, *41* — Rathausmarkt, *42* — Rödingsmarkt, *43* — Baumwoll, *44* — Landungsbrücken, *45* — Mitterntor, *46* — Feldstrasse, *47* — Stephanplatz, *48* — Dammtor, *49* — Hallerstrasse, *50* — Klosternstern, *51* — Eppendorferbaum, *52* — Hoheluftbrücke, *53* — Schlump, *54* — Christuskirche, *55* — Emilienstrasse, *56* — Osterstrasse, *57* — Hellkamp, *58* — Altona, *59* — Bahrenfeld, *60* — Altona Holstenstrasse, *61* — Sternschanze, *62* — Eidelstedt, *63* — Alsterdorf, *64* — Lattenkamp, *65* — Hudtwalckerstrasse, *66* — Kellinghusenstrasse, *67* — Sierichtstrasse, *68* — Borgweg, *69* — Stadtpark, *70* — Rübenkamp, *71* — Alte Wöhr-Stadtpark, *72* — Oberhafen, *73* — Süderstrasse, *74* — Brückenstrasse, *75* — Dehnhaide, *76* — Wagnerstrasse, *77* — Mundsburg, *78* — Uhlandstrasse, *79* — Lübeckerstrasse, *80* — Berliner Tor, *81* — Inngferstieg, *82* — Elbbrücke

метрополитена была доведена до 28 *км*. В дальнейшем, с 1919 г., были предприняты работы по сооружению линии Лангенорм, длиной 7,73 *км*, и Вальддерфер — 28,21 *км*. К 1926 г. общая сеть Гамбургского метро-

политена была доведена до 64,12 *км*, при этом почти на 70% сеть была надземной (на эстакадах, насыпях, в выемках), а на 30% — подземной (рис. 35).

Сооружение метрополитена в основном велось по типу Берлинского, хотя основные элементы технических условий проектирования несколько отличались. Так, например, максимальный уклон пути принят 48,3‰, минимальный радиус кривой в плане 80 *м*. Длина станций — 70 *м*. Ширина боковых платформ 3,5 *м*, а островных 6 *м*.

В дальнейшем производилась реконструкция по удлинению станций с 70 до 108 *м*, что было связано с ломкой тоннельных раструбов.

Расположение метрополитена в открытых участках выемок трассировано таким образом, что после застройки данного района пути метрополитена без особых затруднений можно заключить в тоннели, с пропуском сверху уличных потоков экипажей и пешеходов.

Грунты Гамбурга представляют собой весьма неоднородные напластования. Под культурными насыпями залегают глины, суглинки, мергели, песчано-гравелистые грунты, насыщенные водой. В районах поймы Эльбы и канала Альстер выклиниваются грунты плывунного характера, требующие специальных методов при сооружении тоннелей.

Интересным в техническом отношении представляется сооружение линий метрополитена от Каллингхузештрассе до Юнгфернштик, начатое в 1926 г.

Эти работы велись преимущественно открытым путем. В зависимости от местных городских условий улица или закрывалась для движения, которое переводилось на параллельную улицу, или котлован перекрывался временными мостами для пропуска автомобилей, трамваев и пешеходов.

Только участок метрополитена длиною в 62 *м*, проходящий непосредственно под железнодорожными путями Даммтор, строился закрытым тоннельным способом.

Раскрытие котлованов производилось обычным берлинским способом, с забивкой двутавровых свай и с применением в случае необходимости искусственного водопонижения.

Разработка котлована производилась с забоя при непосредственном очередном следовании бетонных и изоляционных работ. Выемка грунта производилась грейфером емкостью 0,8 — 1,25 $м^3$, который перемещался по крановой балке, имевшей рельсовые пути, уложенные по бровкам котлована. Грейфер передавал породу на транспортеры, а последние — в поезда, перемещаемые электровозом. Емкость каждого вагона около 5 $м^3$. При такой организации производства земляных работ стоимость выемки 1 $м^3$ грунта удалось снизить в 5 раз.

Все строительные механизмы, применяемые при сооружении тоннелей, работали на электрической энергии, благодаря чему значительно снижался шум при производстве тоннельных работ, что в условиях города имеет большое значение.

Темпы производства работ открытым способом выражаются в следующих цифрах: северный участок метрополитена Колоннад протяжением 160 *м* построен в течение 60 дней. Южный участок протяжением 190 *м* построен в течение 50 дней. Работы на этих участках производились при полном закрытии уличного движения, которое было перенесено на параллельную улицу. Темпы работ значительно снизились при сооружении мостов, как это имело место на участке постройки подземной станции метрополитена Стефанплац.

Заслуживает внимания сооружение тоннеля метрополитена между многоэтажными домами и насыпью путей окружной железной дороги. В данном случае нужно было провести работы без перерыва железнодорожного движения. С этой целью в одном отсеке трассы забивались сваи и устраивалось временное перекрытие для железнодорожных путей, под которыми производились основные земляные и бетонные работы по постройке двухпутного тоннеля с плоским перекрытием. В другом отсеке (предварительно в траншее) возводилась бетонная стенка обделки, которая одновременно была использована как фундамент для подкосов, поддерживающих вертикальную стену раскрытой насыпи.

Метрополитен Нью-Йорка (США). Сеть метрополитена Нью-Йорка охватывает только 4 района города, а именно: Менхеттен, Бруклин, Бронкс, Квинс; район Ричмонд линиями метрополитена не охвачен (рис. 36).

Первая линия метрополитена надземного типа (на эстакадах) была открыта для эксплоатации в 1871 г. в районе Менхеттена. Движение поездов производилось при паровой тяге. В 1902 г. при переходе на электротягу приступили к строительству подземных линий.

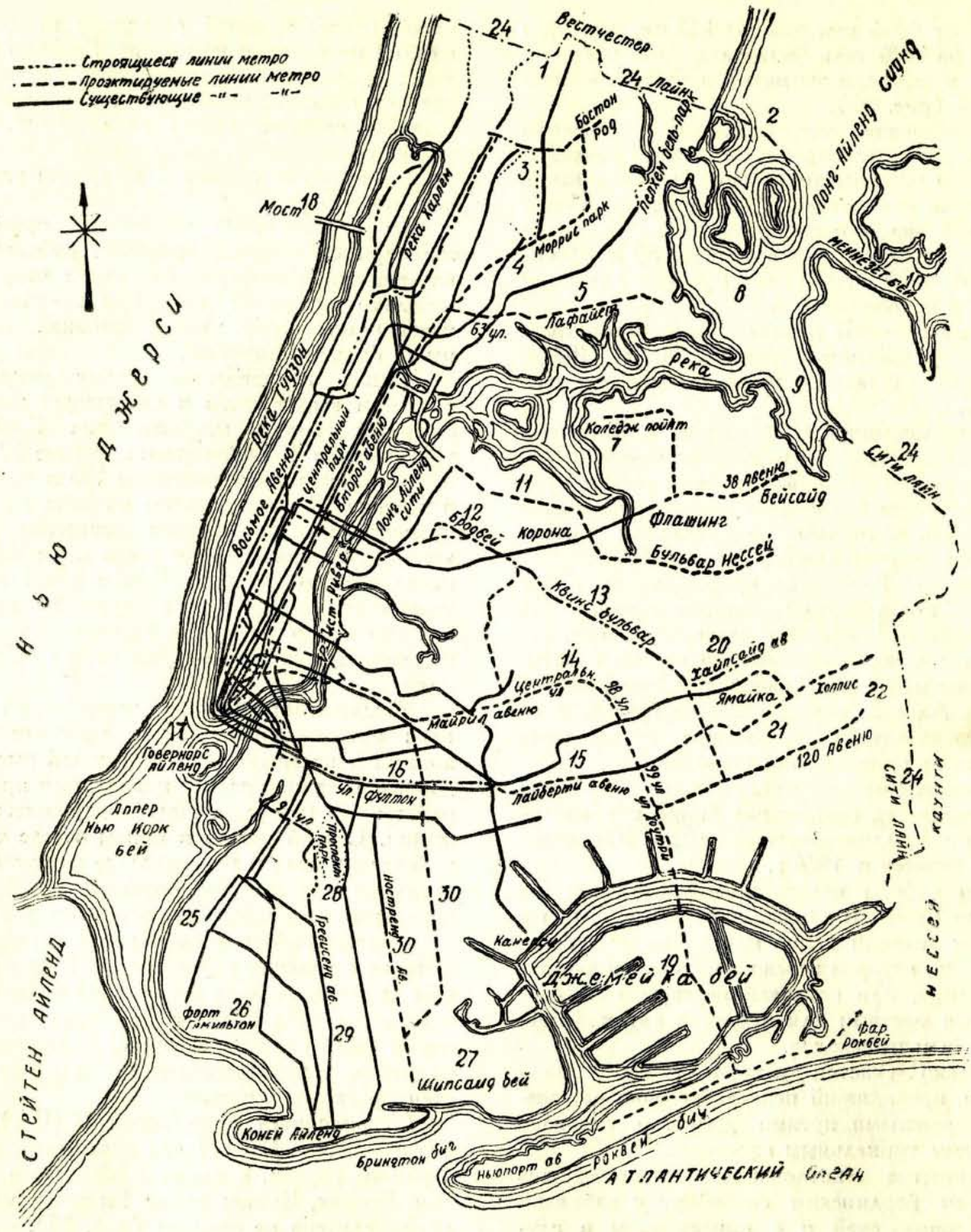


Рис. 36. Метрополитен Нью-Йорка (схема сети линий):

1 — Van Cortland Park, *2* — Hunter Island, *3* — Bronx Park, *4* — Morris Park Avenue, *5* — Lafayette Avenue, *6* — East River, *7* — College Point, *8* — Longi Island sound, *9* — Little Neck Bay, *10* — Manhasset Bay, *11* — Astoria Avenue, *12* — Broadway, *13* — Queens Boulevard, *14* — Central Avenue, *15* — Liberty Avenue, *16* — Fulton Street, *17* — Governor's Island, *18* — Hudson River Bridge, *19* — Iamaika Bay, *20* — Hillside Avenue, *21* — Brinkerhoff Avenue, *22* — Hollis, *23* — Tri-Borough Bridge, *24* — City line, *25* — Bayridge, *26* — Fort Hamilton, *27* — Sheepshead Bay, *28* — Prospect Park, *29* — Gravesend Avenue, *30* — Nostrand Avenue, *31* — Utica Avenue, *32* — Coney Island

В соответствии с топографическими и эксплоатационными условиями Нью-Йорка типы метрополитена чрезвычайно разнообразны: имеются виадуки, тоннели мелкого и глубокого заложения, подводные тоннели и участки в открытых выемках (рис. 37).

В большинстве случаев тоннели Нью-Йоркского метрополитена имеют двухпутный или четырехпутный профиль. Тоннели четырехпутного профиля предназначаются для пропуска поездов местного сообщения и экспрессов. В соответствии с этим устраиваются двухплатформенные станции, где в середине между островными платформами пропускаются экспрессы, а сбоку—поезда местного сообщения.

Нью-Йоркский метрополитен строился как открытым методом, при плоском перекрытии тоннелей, так и тоннельным закрытым способом, в зависимости от топографических условий. Тоннели с плоским перекрытием устраивались из металлических конструкций (рис. 38), а при глубоком заложении — из бетона или железобетона сводчатой формы.

Станции метрополитена в Нью-Йорке рассчитаны на десятивагонные составы для экспрессов и на шестивагонные составы для местного сообщения. Длина платформ на некоторых станциях доходит до 200 *м*; эти станции в часы пик могут принимать даже четырнадцативагонные составы.

Станции метрополитена расположены преимущественно на прямой, но имеются случаи расположения станций и на кривой радиусом 600 *м*. Уклоны по продольному профилю в среднем 0,03, но при проходе подводными тоннелями уклоны достигают 0,053. Рельсовые пути уложены на жестком бетонном основании.

Гидроизоляция осуществляется применением гудронированной мягкой оклеечной изоляции по внешнему контуру конструкции тоннеля.

В зависимости от топографических условий четырехпутные тоннели метрополитена устраиваются в виде одного тоннеля с плоским перекрытием, при котором все четыре пути находятся в одном уровне, или в виде двухэтажного тоннеля, при котором пути располагаются попарно, в два яруса. Имеются участки подземных линий, расположенные и в три этажа (рис. 39).

Во время строительства линий Нью-Йоркского метрополитена проходка велась непосредственно под домами; в связи с этим строительством выявился ряд специальных тоннельных конструкций. При сооружении тоннелей открытым способом применялись временные мосты, обеспечивающие непрерывность уличного движения в период производства работ.

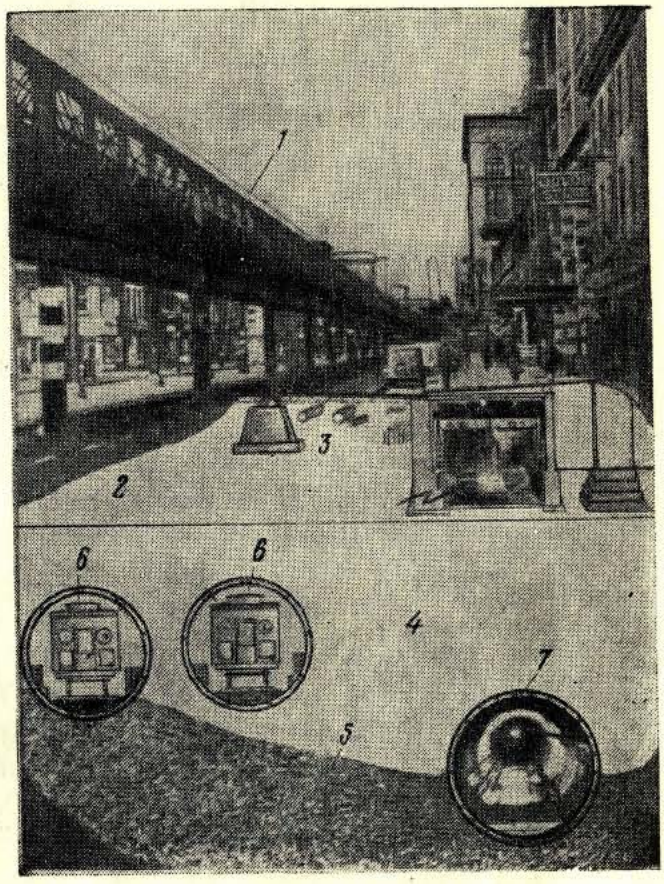


Рис. 37. Метрополитен Нью-Йорка (схематический разрез по сооружениям метрополитена):
1 — эстакада надземного метрополитена, *2* — уровень грунтовых вод, *3* — котельная дома, *4* — песок и гравий, *5* — скала, *6* и *7* — тоннели метрополитена

Сеть метрополитена Нью-Йорка, включая надземные и подземные линии, составляет 1 085 *км* путей (из них 422 *км* подземных путей) и является самой мощной в мире. В 1925 г. в связи с ростом города приступили к строительству новой сети 6 подземных линий метрополитена протяжением 90 *км* в Менхеттене, Бруклине, Бронксе и Квинсе независимо от старой сети подземных дорог (рис. 40 и 40а, б).

Метрополитен Бостона (США). Бостонский метрополитен является городской железной дорогой, построенной одной из первых в США. Протяжение линий 2,89 *км*. Метро-

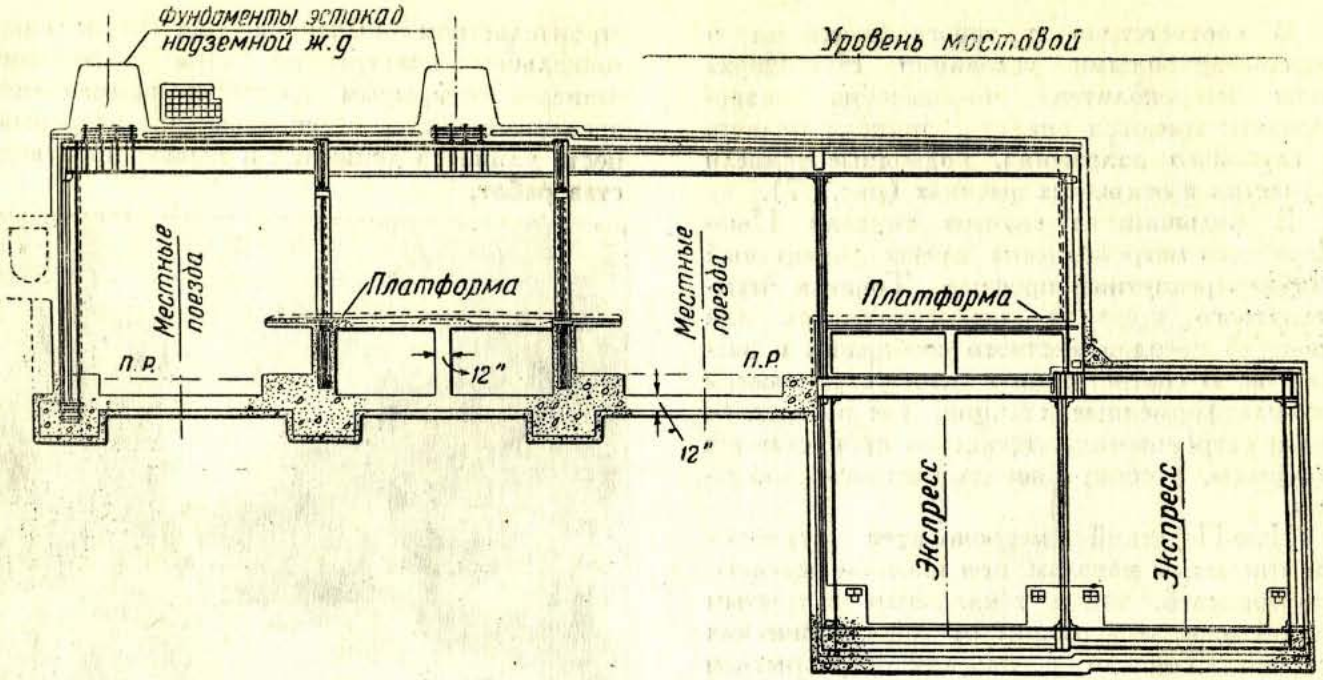


Рис. 38. Метрополитен Нью-Йорка (объединенная конструкция тоннелей,

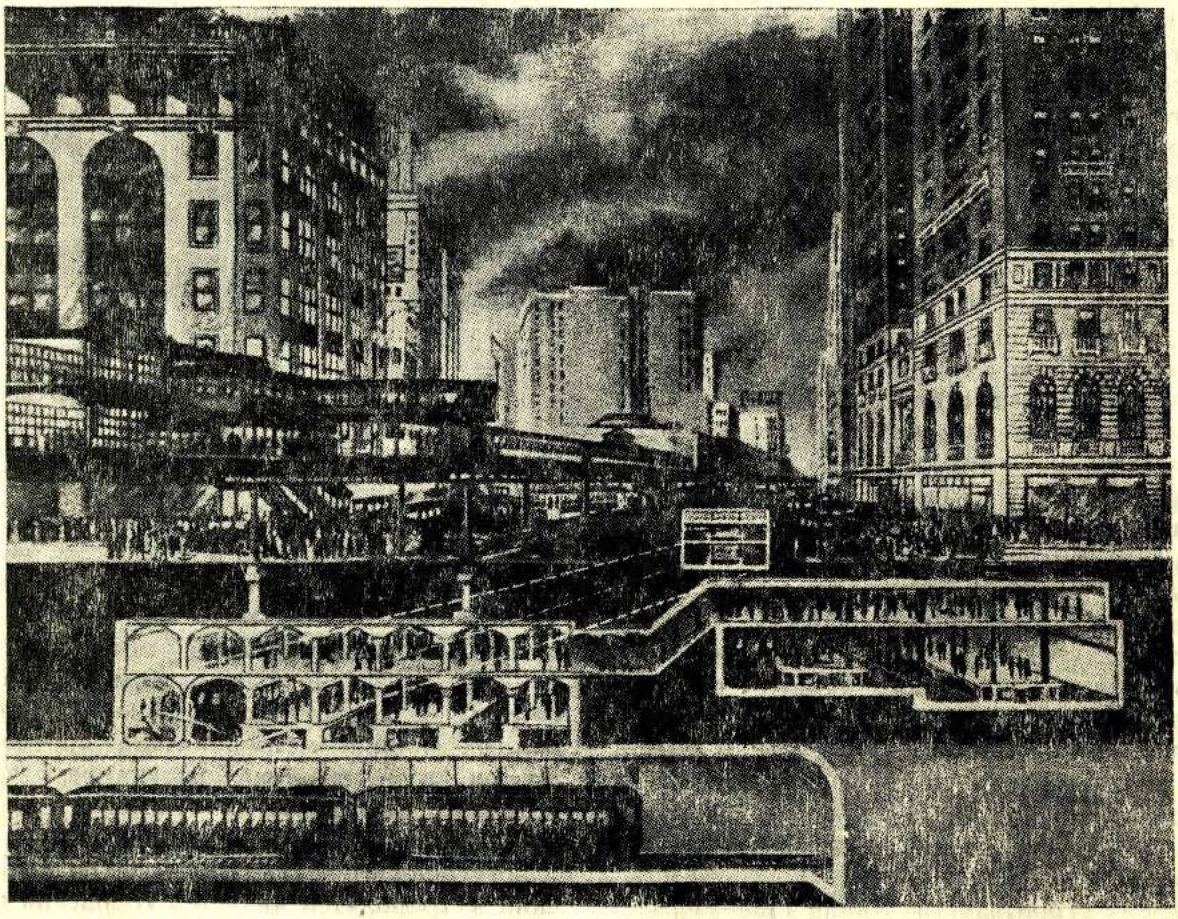


Рис. 39 Схематический вид надземного и подземного транспорта на Шестой авеню в Нью-Йорке

политен Бостона имеет тоннели с плоским перекрытием в виде металлических балок и колонн со сводиками между последними и тон-



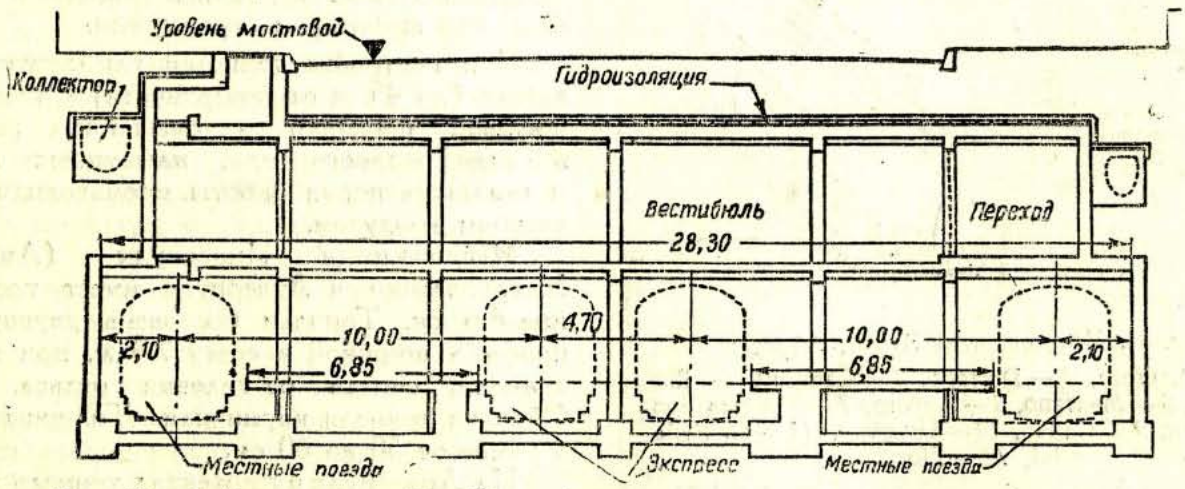


Рис. 40 а, б. Метрополитен Нью-Йорка (трасса и конструкция тоннелей новой линии)

нели сводчатого типа с бетонной обделкой. На трассе имеются тоннели двухпутного профиля шириной 7,3 *м* и четырехпутного профиля шириной 14,6 *м*. Высота тоннелей от 4,3 до 4,6 *м*. Метрополитен Бостона сооружен при мелком заложении тоннелей и проходит под улицами Бойлстон, Вашингтон и Тремонт. На линии Бостонского метрополитена имеется 5 станций, расположенных на взаимном расстоянии от 200 до 500 *м*.

Учитывая исключительно неблагоприятные

грунтовые условия (пески, мелкий гравий с водой), при сооружении Бостонского метрополитена, помимо открытого способа работ, были применены щиты, а также полущиты, которые продвигались по готовым стенам, выложенным в предварительно пройденных боковых штольнях.

Метрополитен Филадельфии (США). В период 1903 — 1907 гг. в Филадельфии была построена линия метрополитена протяжением в 3,6 *км*. Одна половина этой линии была четырехпутного профиля, а другая — двухпутного профиля. Конструкция тоннеля с плоским перекрытием при средних металлических колоннах. Изоляция тоннеля по внешнему контуру асфальтовая. Внешние два пути при четырехпутном профиле были предназначены для железнодорожных поездов, а внутренние — для метрополитена. Тоннели двухпутного профиля предназначены только для поездов метрополитена. В 1924 г. было начато строительство четырехпутной городской железной дороги от Сити Холл до Олпей Авеню длиной 10,4 *км*, сданной в эксплоатацию в 1928 г. При проходке тон-

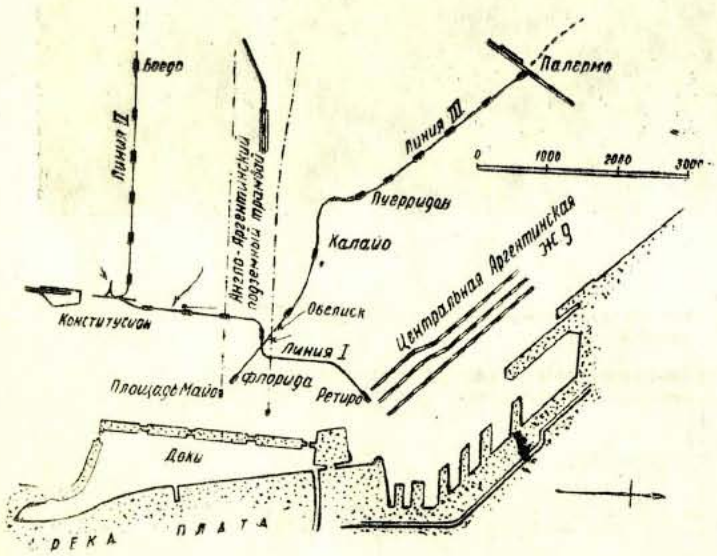


Рис. 41. Метрополитен Буэнос-Айреса:

1 — T-ca Lacroze, *2* — Dorrego, *3* — Canning, *4* — Rio-de-Tanier, *5* — Medrano, *6* — Aquëro, *7* — Pueyrra don, *8* — Pasteur, *9* — Callao, *10* — Uryguay, *11* — C. Pellegrini, *12* — Florida

нелей были встречены преимущественно гравелистые грунты.

Метрополитен имеет 16 станций, которые расположены на расстоянии от 0,5 до 1 *км* друг от друга. Все платформы островного типа, шириной до 6,5 *м* и длиной до 170 *м*. Ширина четырехпутного тоннеля 17,5 *м*. Ширина станций достигает 35 *м*.

Метрополитен Буэнос-Айреса (Аргентина). Метрополитен в Буэнос-Айресе был начат постройкой в 1911 г., причем в 1913 г. была открыта для движения 1-я линия протяжением 8,74 *км*. Тоннели мелкого заложения с плоским перекрытием (рис. 41). Сеть метрополитена состоит из трех линий:

Флорида — Палермо длиной 6,2 *км*;
Конститусион — Ретиро длиной 4,5 *км*;
Конститусион — Боэдо длиной 4 *км*.

Общее протяжение линий составляет 14,7 *км*. Линии метрополитена пересекают наиболее плотно застроенную часть территории Буэнос-Айреса и соединяют крупные железнодорожные вокзалы.

Там, где грунтовые условия были исключительно благоприятными, применялся сводчатый тип конструкций, причем работы производились обычным тоннельным способом, на временном деревянном креплении.

Максимальный уклон пути метрополитена в Буэнос-Айресе составляет 45‰; минимальный радиус кривой —85 *м*. Станции метрополитена имеют боковые платформы шириной 5 *м*, длиной 100 *м*. Расстояние между станциями до 500 *м*.

Метрополитен Глазго (Англия). Метрополитен в Глазго был сооружен в 1897 г. Общее протяжение его—10,2 *км*, из них 6,5 *км* подземных линий. Тоннели, преимущественно сводчатого типа, строились открытым способом при шпунтовом ограждении.

При постройке тоннелей глубокого заложения (до 45 *м* от поверхности) с помощью щитовой проходки в смешанных породах в виде жидкого ила, плывунных песков и скальных пород работы производили под сжатым воздухом.

Метрополитен Ливерпуля (Англия). Метрополитен в Ливерпуле имеет протяжение 6,6 *км*. Тоннели построены двухпутного профиля шириной в свету 7,9 *м*, при высоте тоннеля, считая от головки рельса, 5,8 *м*. Обделка тоннеля кирпичная. Толщина свода в замке от 50 до 60 *см*.

Из Ливерпуля в Биркенхэд тоннель метрополитена проходит под р. Мерси; гидростатическое давление воды доходит до 35,5 *м*. В подводной части у тоннелей, пересекающих слабые грунты, толщина свода в замке доходит до 1 *м*.

Метрополитен Будапешта (Венгрия). Метрополитен Будапешта представляет собой городскую электрическую железную дорогу длиной в 3,7 *км*, которая была построена в 1894—1896 гг.

Тоннель мелкого заложения, двухпутного профиля, при ширине колеи 1 435 *мм*. Минимальный радиус кривой 100 *м*. В отдельных местах имеются кривые радиусом 40 *м*; максимальный уклон пути 2%.

Конструкция тоннеля с плоским перекрытием при бетонных стенах и лотке. Перекрытие из металлических балок имеет среднюю опору в виде металлических колонн. Гидроизоляция тоннеля внешняя, оклеечная, из гудронированного толя на горячей клебемассе. Сооружение тоннеля велось открытым способом.

Станции метрополитена расположены на расстоянии от 250 до 500 *м*. Ширина платформ колеблется от 3 до 8 *м*; длина станций от 25 до 35 *м*. Ширина перегонного тоннеля в свету 6 *м*, высота 2,75 *м*. Метрополитен Будапешта является одной из старейших подземных электрических городских дорог мира.

Метрополитен Мадрида (Испания). Первая линия Мадридского метрополитена была открыта для эксплоатации в 1919 г. К 1926 г. было построено до 14,8 *км* линий, а к 1933 г. до 20,5 *км* (рис. 42).

Метрополитен Мадрида является полностью подземным. Тоннели двухпутного профиля построены обычным горным способом по типу сводчатых тоннелей Парижского метрополитена. Только на коротком участке (170 *м*) под улицей Сибиллы имеются тоннели с плоским металлическим перекрытием, опирающимся на металлических колоннах посредине и на бетонных стенах. Размеры поперечного сечения двухпутных тоннелей в свету 6,7 × 4,3 *м*. Максимальный уклон 50‰, минимальный радиус закругления 80 *м*. Станции тоннеля односводчатые, длина боковых платформ 60 *м*, ширина 3 *м* (рис. 43). Расстояние между станциями в центре 400—500 *м*, на периферии до 1 *км*. Все линии метрополитена вместо третьего рельса имеют верхний провод. Во время фашистской бомбардировки Мадрида (1938 г.) ряд участков метрополитена был разрушен.

Метрополитен Барселоны (Испания). Метрополитен Барселоны построен с расчетом пропуска в ночное время железнодорожных поездов (ширина испанской железнодорожной колеи 1670 *мм*) (рис. 44).

Тоннели двухпутного профиля сводчатого типа построены горным способом с бетонной обделкой. Глубина заложения тоннеля — около 4 *м*. Станции также преимущественно сводчатого типа. Только станция Площадь Каталонии имеет плоское перекрытие, одну островную и две боковые платформы. Эта станция включает 4 пути: два средних пути предназначены для железнодорожного движения и обслуживаются островной платформой длиной 250 *м*; два крайних пути обслуживаются боковыми платформами, имеющими длину 100 *м*. Максимальный уклон пути 12‰. Минимальный радиус закругления 250 *м*.

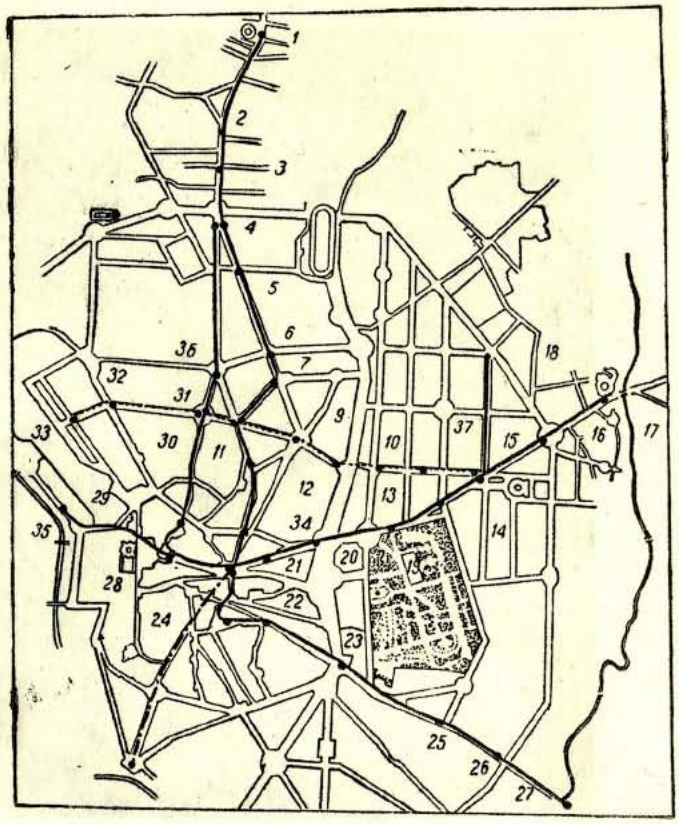


Рис. 42. Метрополитен Мадрида:

1 — Tetuan, *2* — Estrecho, *3* — Alvarado, *4* — Cuatro Caminos, *5* — Rios Rosas, *6* — Iglesio, *7* — Chamberi, *8* — Bilbao, *9* — A. Martinez, *10* — Serrano, *11* — Tribunal, *12* — Castellana, *13* — M. Balboa, *14* — P. Vergara, *15* — Goya, *16* — M. Becerra, *17* — Ventas, *18* — Odeon, *19* — Retiro, *20* — Banco, *21* — Sevilla, *22* — A. Martin, *23* — Atocha, *24* — Progreso, *25* — Pelayo, *26* — Pacifico, *27* — Vallecas, *28* — Sabel II, *29* — S. Domingo, *30* — Noviciado, *31* — S. Bernardo, *32* — Princesa, *33* — Ferraz, *34* — Gran Via, *35* — Norte, *36* — Quevedo, *37* — Lista

Метрополитен Афин (Греция). Метрополитен в Афинах, начатый строительством

в 1927 г., имеет протяжение 2,4 *км*. Он соединяет площадь Омониа с вокзалом Аттика Пирей-Афинской железной дороги (рис. 45).

платформы. Длина островной платформы 100 *м*, ширина до 12 *м*. Боковые платформы имеют ширину до 4,5 *м*.

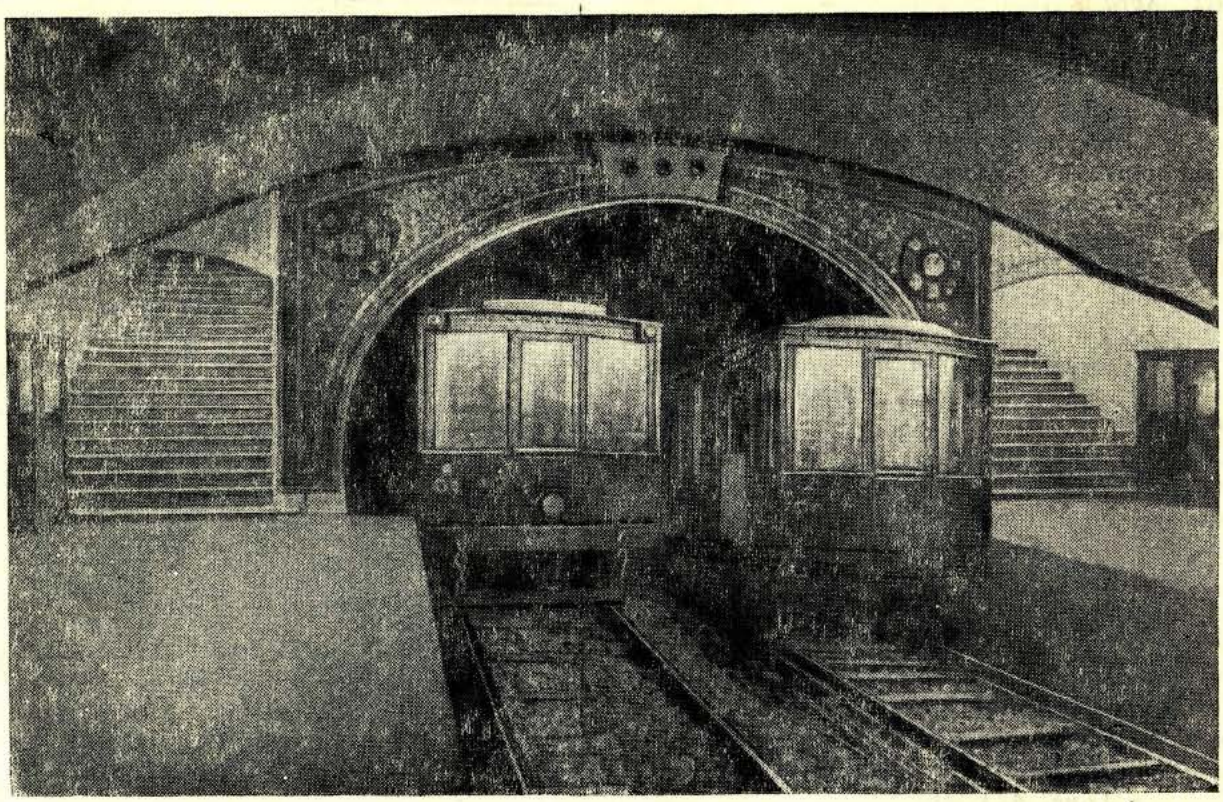


Рис. 43. Метрополитен Мадрида (станция)

Линия метрополитена мелкого заложения имеет максимальный уклон пути 28‰. Тоннели из железобетонных конструкций прямоугольного очертания (рис. 46). Станция Омониа имеет одну островную и две боковые



Рис. 44. Метрополитен Барселоны:

1 — Casco Anticoo, *2* — E. Francib, *3* — Gracia, *4* — Lerida, *5* — A. Granollers, *6* — San-Martin, *7* — Matard, *8* — Casa, *9* — Anrunes, *10* — Villanuer, *11* — A. Tarragona, *12* — Madrid, *13* — Sans, *14* — Paralelo, *15* — S. Gervasio, *16* — C. Cortes

Станция Площадь Виктории, расположенная примерно посредине трассы, построена в виде железобетонного замкнутого контура конструкции с внешней оклеечной изоляцией. При ширине станции 16,38 *м* имеется две боковые платформы шириной по 4 *м*, длиною 100 *м*.

При проектировании тоннельных сооружений метрополитена в Афинах особое внимание обращалось на расчет конструкций в отношении их устойчивости против сейсмических толчков при землетрясении. Учитывались также дополнительные напряжения при проявлении горизонтального ускорения порядка 250 *мм/сек*^{2}.

Железная дорога Сиднея (Австралийский Союз). Городскую железную дорогу в Сиднее следует считать дорогой глубокого ввода, а не метрополитеном, поскольку она обслуживает главным образом пригородное сообщение. Линия протяжением 5,8 *км* двухпутного профиля открыта для эксплоатации в конце 1926 г. В соответствии с топографическими

условиями железнодорожные линии проходят по эстакадам, насыпям, в открытых выемках и в тоннелях. Станции имеют боковые платформы шириной 3,8 *м* и длиной 160 *м* (рис. 47).

Метрополитен Токио (Япония). Первая

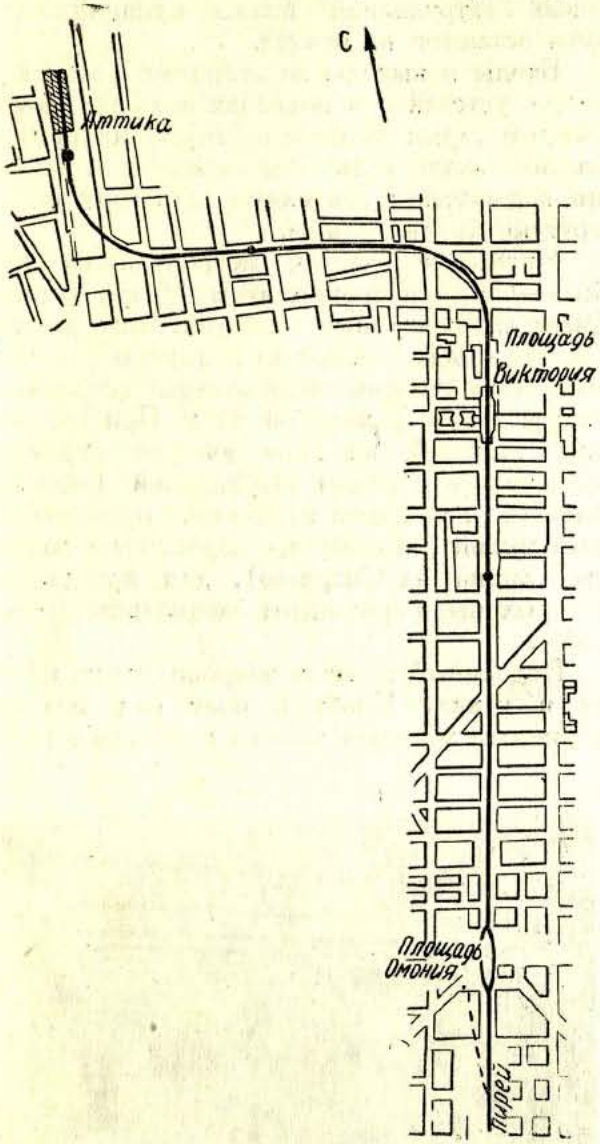


Рис. 45. Метрополитен Афин (схема линий)

линия метрополитена Токио протяжением 2,16 км между Асакуса и Иено открыта для эксплоатации в 1927 г. Общая сеть линии Токийского метрополитена намечена в 80 *км*. Тоннели метрополитена строятся при мелком заложении, прямоугольного сечения, замкнутого контура, железобетонной конструкции. Максимальный уклон пути 40‰, минимальный радиус закругления—90 *м*. Ширина колеи Токийского метрополитена — 1 067 *мм* (нормальная ширина колеи японских железных дорог 1 435 *мм*). В ночное время некоторые линии метрополитена используются для грузового движения (рис. 48).

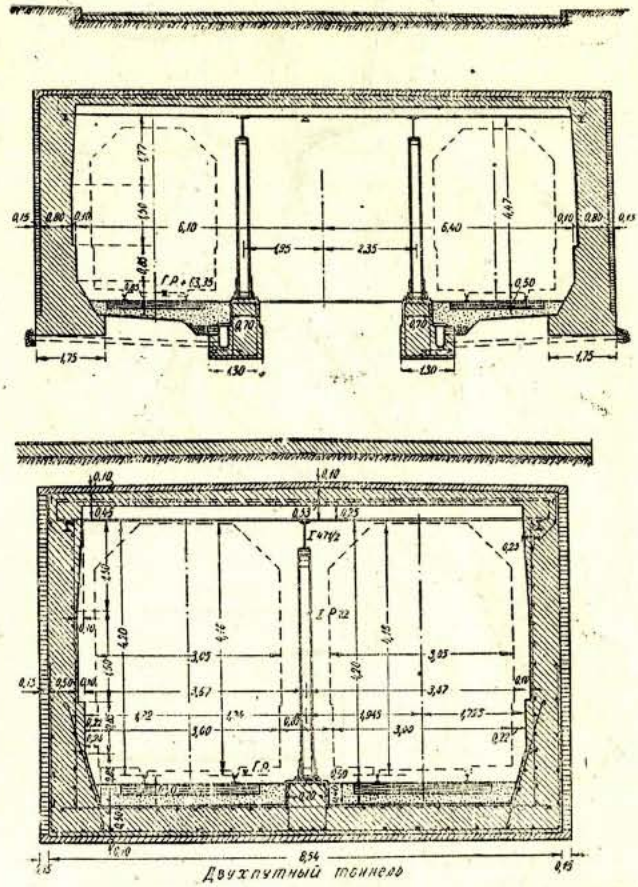


Рис. 46. Метрополитен Афин (конструкции тоннельных сооружений)

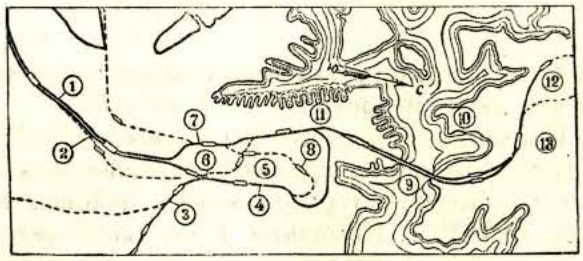


Рис. 47. Глубокий железнодорожный ввод в Сиднее:
1 — Redeern, *2* — Central, *3* — Liverpool, *4* — St. James, *5* — Market, *6* — Museum, *7* — Town Hall, *8* — Hunter, *9* — Poyt Iackso, *10* — Milsons Point, *11* — Wynyard, *12* — Bayroad, *13* — North Sydney

Сооружение тоннелей Токийского метрополитена проводится аналогично строительству Берлинского метрополитена — открытым способом при искусственном водопонижении. Геологические условия Токио характеризуют-

ся мощным слоем водоносных песков. В особых случаях работы ведутся специальными методами. Исключительный интерес представляют конструкции узловых станций метрополитена двух- и трехъярусного типа.

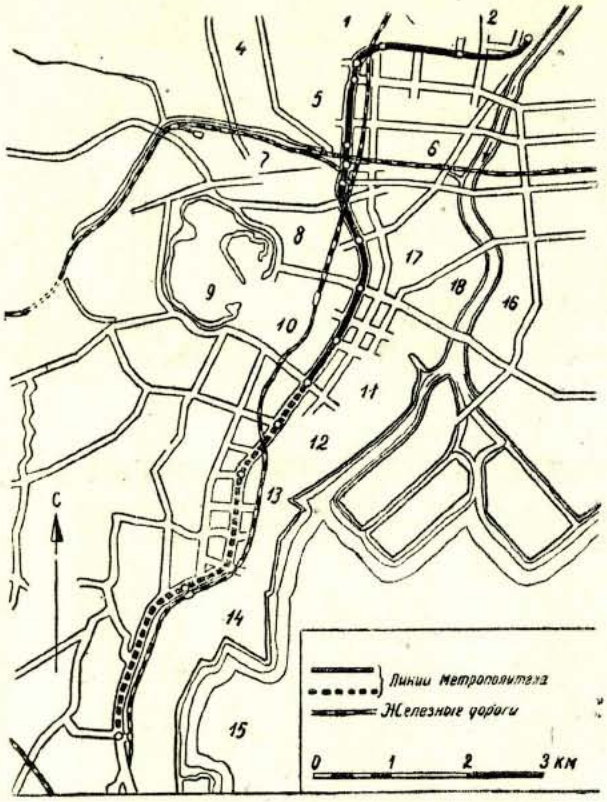


Рис. 48. Метрополитен Токио:

1 — Ueno-Ekimae, *2* — Asakusa, *3* — Kikuyabashi, *4* — Uenokoen Mae, *5* — Uenohiroko, *6* — Hatagocho, *7* — Manse-Bashi, *8* — Sudacho, *9* — Tokio Main St., *10* — Kyobachi, *11* — Ginza, *12* — Shimbashi, *13* — Udagawacho, *14* — Tamachi, *15* — Shinagawa, *16* — R. Sumida, *17* — Honkokucho, *18* — Nihon-Bashi

После сентябрьского землетрясения 1923 г. в Токио были предприняты большие работы по восстановлению разрушенных районов города. В 1925 г. Компания Токийского метрополитена приступила к строительству подземной дороги. В 1932 г. линия метрополитена от парка Асакуса (на севере Токио) до центра города была продлена на 6,4 *км* до перекрестка Киобаси.

В марте 1933 г. через каждые 1,5 мин. начал курсировать поезд из двух вагонов до станции Гинза Овари-хо. В августе этого же года была открыта станция Симбаси (рис. 49). В настоящее время подземный путь в Токио проложен на протяжении 8 *км*, связывая 12 станций. У Симбаси метрополитен доходит до надземной окружной дороги.

Постройку части этого пути взяла на себя Компания Токийского метрополитена, а другую часть предполагал строить токийский муниципалитет. Однако ввиду финансовых затруднений планы муниципалитета пока остаются на бумаге.

Входы и выходы на станциях Токийского метро устроены в подвалах больших домов На некоторых людных перекрестках удобные боковые входы и выходы служат в то же время подземными тоннелями для перехода на другую сторону улицы.

Интересен участок метрополитена Киобаси—Симбаси протяжением 1,6 *км*, который имеет две подземные станции: одну на перекрестке Гинза Овари-хо и другую — у Симбаси. Обе станции оборудованы островными платформами длиной по 90 *м*. При сооружении тоннелей на этом участке строители столкнулись с рядом затруднений (проходка тоннеля под двумя каналами, проходка под магазинами у Симбаси, пересечение подземных линий на Овари-хо), для преодоления которых были применены специальные методы работ.

Подземный тоннель метрополитена, подходя к каналу Киобаси, идет под железнодорожным арочным мостом пролетом в 16,5 *м*.

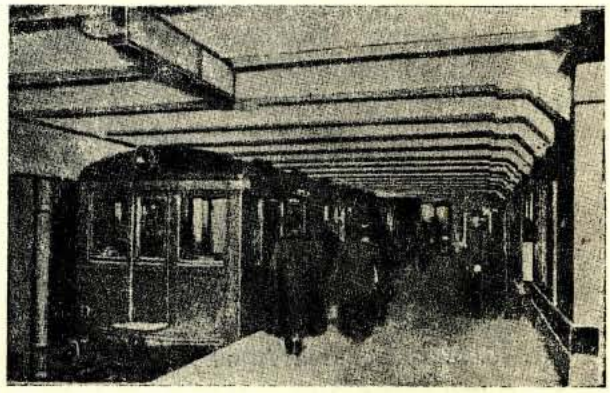


Рис. 49. Метрополитен Токио (вид станции)

Для сооружения двухпутного тоннеля метрополитена открытым способом канал с обеих сторон оградили перемычками, было забито два ряда металлических шпунтов и сделано деревянное перекрытие. После окончания выемки грунта был построен железобетонный тоннель со средней стенкой. Мостовые опоры

поставлены непосредственно на перекрытие тоннеля. Длина тоннеля под каналом Киобаси — 57 *м*.

Тоннель метрополитена при подходе к каналу Симбаси проходит под тротуарами моста. Мост бетонной конструкции, арочного типа, имеет пролет в свету 24 *м*. Для сооружения тоннеля был построен временный деревянный пешеходный мост. Проезжая часть постоянного моста вместе с опорами была удалена. На время сооружения тоннеля метрополитена канал был огражден перемычками. Стальные шпунты были загнаны по обеим сторонам тоннеля, и выемка грунта проводилась открытым методом.

Здесь был построен двухпутный тоннель железобетонной конструкции длиной 56 *м*. После окончания основных работ над перекрытием тоннеля были восстановлены удаленные ранее элементы моста.

В том месте, где трасса линии включает кривые малых радиусов, между мостом Симбаси и станцией Симбаси, тоннель проходит под землей, задевая три магазина. Здесь, где перекрытие тоннеля находится на 6,9 *м* от поверхности земли, были забиты через каждый метр два ряда металлических двутавровых балок. Один ряд идет вдоль обреза тоннеля, а другой — вертикально вдоль трех магазинов.

Грунт между балками удерживался деревянными затяжками, заведенными за полки свай. После удаления грунта под временным деревянным настилом до отметки, соответствовавшей перекрытию тоннеля, специальные стальные балки были загнаны горизонтально гидравлическими домкратами. Один конец этих балок был прикреплен к стальной конструкции, уложенной параллельно зданиям магазинов.

После окончания земляных работ под настилом для пропуска уличного движения были установлены через каждые 1,5 *м* 17 стальных опор. Затем был уложен бетон несущей конструкции двухпутного тоннеля метрополитена со средними металлическими колоннами.

Принимая во внимание исключительно слабые грунты песчаных отложений, работы возле домов были произведены исключительно тщательно, чтобы в будущем без особых осложнений можно было вблизи этих тоннелей воздвигнуть восьмиэтажные здания.

Особое внимание было уделено вопросу влияния землетрясения на элементы сооружения, в частности на водонепроницаемость тоннелей. При этих условиях невозможно добиться водонепроницаемости добавкой химических реактивов к цементу, так как твердая штукатурка не обеспечивает водонепроницаемости в случае появления трещин и щелей от перемещения грунта.

Для обеспечения водонепроницаемости тоннеля употреблялась оклеечная изоляция из джутового полотна на смеси горячего клея с асфальтом. Перекрытие тоннеля оклеено в три слоя; стены и лоток имеют двухслойную изоляцию, покрытую защитным слоем цементного раствора.

Линия Токийского метрополитена протяжением в 8 *км* строилась в продолжение девяти лет.

Железная дорога Кобэ—Осака (Япония). Линия подземной электрической железной дороги Осака—Кобэ имеет протяжение 3 *км*. Строительство этой дороги началось в 1931 г. Тоннели прямоугольного сечения, железобетонной рамной конструкции. Изоляция — внешняя, оклеечная, из гудронированного толя на горячей клебемассе.

Работы велись открытым способом. В тех местах, где по трассе пересекались слабые, плывунные грунты, производилось шпунтовое ограждение котлована.

Особые затруднения в работах были вызваны в тех местах, где трасса проходила непосредственно под оживленной частью города и крупными зданиями.

Размеры двухпутного тоннеля прямоугольного сечения 6,3 × 9,1 *м*.

Метрополитен Осло (Норвегия). Метрополитен в Осло открыт для движения в 1928 г. Протяжение линии метрополитена 1,96 *км*. Тоннели метрополитена преимущественно глубокого заложения и прорезают коренные скальные породы, потребовавшие применения взрывных работ. Тоннели однопутного профиля, бетонные, сводчатого типа, пройдены горным способом. Размеры тоннеля в свету 4,2 × 5,2 *м*. Тоннели расположены параллельно, на расстоянии между осями в 10 *м*. В начале трассы тоннели мелкого заложения пройдены в слабых, водоносных грунтах, с применением шпунтового ограждения.

Открытым способом строилась станция Шлосспарк. Станция Валкириплац сооружена односводчатой, при бетонной обделке, по типу станций Парижского метрополитена.

Метрополитен Чикаго (США). Метрополитен Чикаго является преимущественно над-

земным и имеет в настоящее время до 367 км линий на эстакадах. Линии подземного типа проложены для грузового метрополитена; протяженность их 120 км. Тоннели Чикагского грузового метрополитена заложены на глубине 12 м от поверхности.

Линии грузового метрополитена соединены непосредственно с различными железнодорожными товарными станциями и пристанями, с угольными и товарными складами и

Для характеристики работы грузового метрополитена следует указать, что в течение одного года он может перевезти около 1 000 000 т грузов.

Подвижной состав грузового метрополитена—150 троллейных электровозов и 3 300 вагонов. В 1939 г. приступили к постройке подземного пассажирского метрополитена.

Из общей сети новых подземных линий Чикагского метрополитена в 80 км в 1942 г.

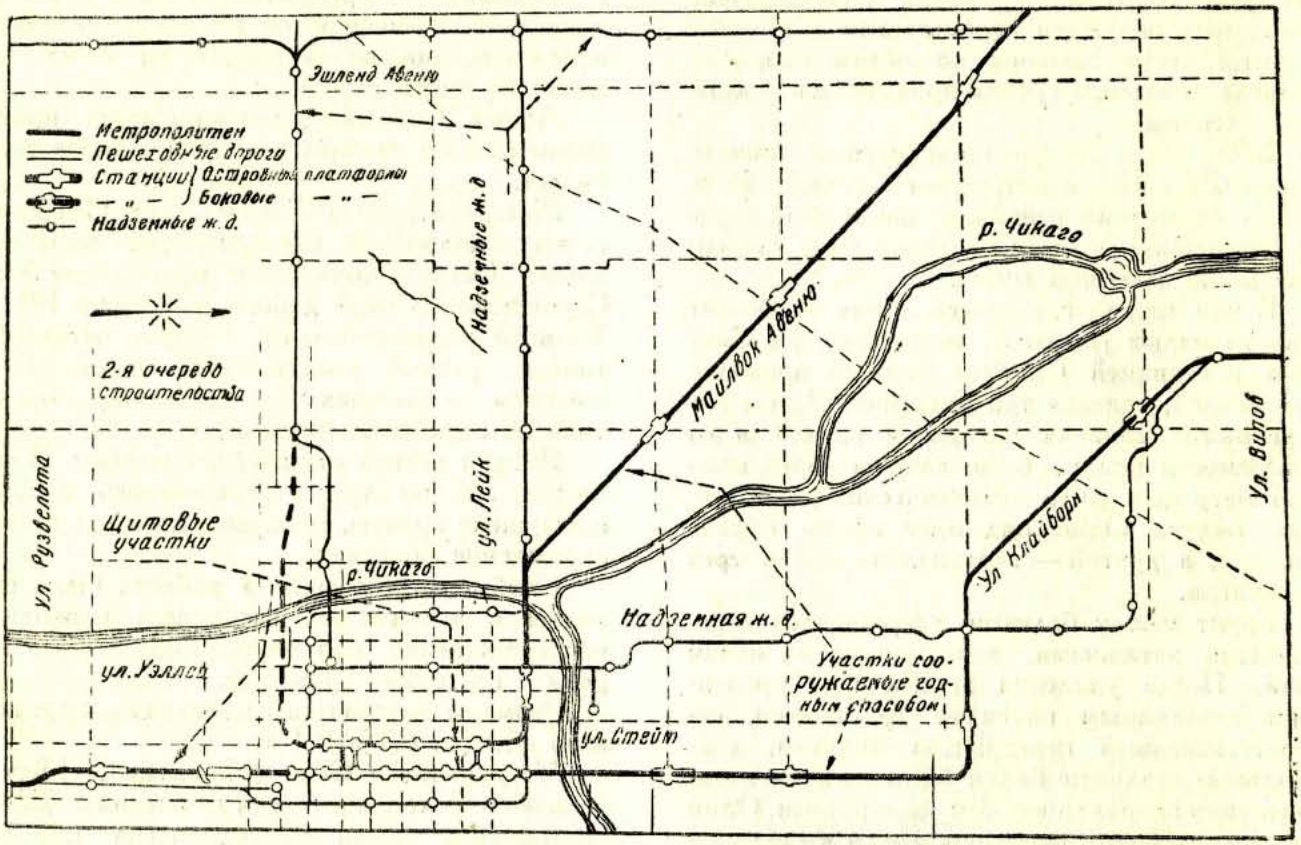


Рис. 50. Метрополитен Чикаго (схема линий)

разными промышленными предприятиями, обладающими большим складским хозяйством. Пути грузовсго метрополитена подходят непосредственно к шахтам, оборудованным клетями для подъема и спуска вагонов. К сооружению грузового метрополитена было приступлено в 1901 г. Следует отметить, что сначала тоннели проектировались для обслуживания почтовых передач.

Типовой тоннель Чикагского грузового метрополитена имеет размер 3,4 × 3,8 м при ширине колеи 60 см. Тоннели заложены в мощном слое плотной голубой глины, имея обделку из бетона толщиной в 30 см. Тоннель оборудован искусственной вентиляцией.

сданы в эксплоатацию две первоочередные линии метрополитена длиною в 12 км (рис. 50).

Новая линия соединяет существующую сеть надземных эстакадных линий метрополитена, проходя под улицами Стейт, Клайборн, Майлвок, Лейк и Дирбон (рис. 51).

Трасса линии пересекает дважды р. Чикаго. Глубина заложения тоннелей в среднем около 13 м от поверхности.

Конструкции тоннельных обделок в условиях залегания голубой пластичной глины сооружены преимущественно из железобетона при горном способе работ на временном металлическом креплении. Последнее состоит

из стальных кружал (⌶ № 18) и штампованных стальных плит размерами 600 *мм* по ширине. Сечение тоннеля в свету 4,5 × 5,1 *м*.

В зависимости от местных условий тоннели сооружены однопутными, двухпутными и по типу тоннеля-бинокля — спаренного сечения. Подводные тоннели сооружались методом заводных секций, заготовленных в сухом доке. При этом стыкование секций совмещалось с устройством опор для городского моста, в шпунтовых перемычках.

На протяжении 6,1 *км* проходка тоннелей в слабых грунтах осуществлена щитовым способом, под сжатым воздухом.

Наружный диаметр сечения тоннелей как станции, так и перегонов составлял 7,6 *м*.

Станции сооружались методом реконструкции сближенных перегонных тоннелей при устройстве среднего свода в сочетании с металлической конструкцией балок и прогонов. При этом временное крепление применялось в виде металлических стоек с 75-тонными домкратами. Подземные вестибюли станции сооружались на глубине 5,5 *м* от поверхности.

В процессе проходки встречались старые бетонные тоннели грузового метрополитена диаметром 2,6 *м*.

Разработка грунта голубой чикагской глины велась пневматическими лопатами, механическими резцами и ручными Ω-образными ножами. Порода отвозилась к шахте на улице Кинзи, где производилась погрузка на баржи для транспортировки к оз. Мичиган.

Бетонные работы на 80% были механизированы; применялись бетононасосы системы Рокс производительностью в 24 и 40 $м^3$ в час. Бетон в тоннель подавался через буровые скважины, расположенные по трассе через 150—250 *м*. Средняя скорость проходки тоннеля достигала 7,5 *м* в сутки, а максимальная 9,8 *м* в сутки.

Проект метрополитена Рима (Италия). Проект метрополитена в Риме (длина сети 55,6 *км*) предусматривает связь центра города с периферией. Проектом намечено сооружение метрополитена преимущественно при глубоком заложении, при мелком заложении — периферийных участков трассы (рис. 52).

Там, где тоннели прорезают коренные устойчивые породы мергелей и глин, был намечен обычный горный способ работ. В местах напластований слабых водоносных пород, например в пойме и непосредственно под р. Тибр, предусмотрен щитовой метод проходки тоннелей, при обделке чугунными тюбингами.

Максимальный уклон пути 38‰; минимальный радиус закругления 75 *м*. Станции метрополитена проектировались с боковыми платформами длиною по 80 *м*. Среднее расстояние между станциями 550 *м*.

В 1940 г. была начата строительством





Рис. 51. Метрополитен Чикаго (станции новой линии)

1-я линия метрополитена длиною в 11,32 *км* с 6 станциями. Линия начинается от станции Термини, расположенной под площадью центрального вокзала, и проходит между Колизеем и Аркой Константина — сооружениями древних римлян — и далее через Большой Цирк заканчивается на территории выставки.

Линия метрополитена на протяжении 6,08 *км* запроектирована подземной при глубине заложения тоннелей 8—11 *м* ниже поверхности мостовой. На протяжении 5,24 *км* линия метрополитена надземная. Конструкции перегонных тоннелей преимущественно двухпутного сводчатого профиля, запроектированы из каменной кладки. Конструкции станции метрополитена, как с плоским железобетонным перекрытием, так

и односводчатого профиля, пролетом до 16,2 *м* в свету. Тоннели часто прорезают пласты туфа, залегая выше горизонта грунтовых вод. Лишь на небольшом отрезке трассы тоннели пересекают водоносные песчаные грунты.

Наличие древних римских подземных ходов и густой сети канализационных коллек-

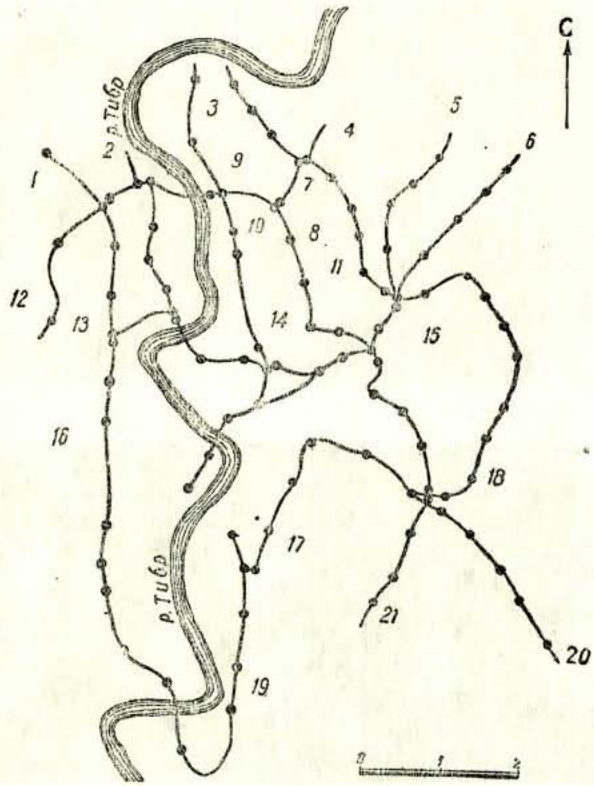


Рис. 52. Метрополитен Рима (проект):
1 — V. Marrini, *2* — P. Banzirra, *3* — Plaminia, *4* — P. Parioli, *5* — P. Verbano, *6* — S. Aynese, *7* — Valla, *8* — Guina, *9* — V. Belle, *10* — Arti, *11* — P. Pia, *12* — V. Candia, *13* — S. Pietro, *14* — Apastoli, *15* — St. Termini, *16* — Gianicolo, *17* — St. Ostia, *18* — P. S. Giovani, *19* — I. Paolo, *20* — V. Appia Nuova, *21* — P. S. Sebastiana

торов, при необходимости вести сложные и кропотливые работы по подводке фундаментов зданий в водоносных грунтах, создали неблагоприятные условия для сооружения тоннелей Римского метрополитена.

Метрополитен Стокгольма (Швеция). Подземная электрическая дорога метрополитенного типа, первая для Стокгольма, сдана в эксплоатацию в октябре 1933 г. К строительным работам по сооружению этой дороги общей длиной 1 370 *м* приступили в конце 1931 г. На протяжении 400 *м* тоннели при глубоком заложении пересекают горный массив. Проходка тоннелей велась взрывным способом. Поскольку порода имеет высокий коэфициент крепости и отсутствует фактор выветриваемости, тоннель по всей длине оставлен без обделки, за исключением припортальных частей, где применена бетонная облицовка.

Остальной участок дороги длиной около 970 *м* пройден при мелком заложении, открытым способом. На участках трассы мелкого заложения пришлось работать в условиях слабых грунтов; при этом тоннели фундировались на сплошной плите и на свайном основании. Конструкции применялись металлические и железобетонные. При применении плоского перекрытия с колоннами в статическом расчете учитывалась устойчивость перекрытия в случае сбития колонн при сходе поезда с рельсов.

Для изоляции тоннелей от сырости и блуждающих токов применялся патентованный водонепроницаемый бетон, который, кроме того, покрывался асфальтовой изоляцией, защищавшей тело обделки в местах трещин, появляющихся от усадочных и осадочных явлений.

Максимальный уклон дороги на перегоне 40‰, на станции 2,5‰, минимальный радиус кривой 200 *м*; ширина профиля тоннеля 7,4 *м*; ширина вагона 2,36 *м*; высота по габариту 5,5 *м* (расчет на контактный провод, а не на третий рельс); ширина платформы (островного типа) 7 *м*, длина 60—100 *м*.

Проект метрополитена Праги (Чехословакия). В связи с ростом городского движения в Праге, которое не удовлетворялось существующими видами городского транспорта — автобусами и трамваями, был составлен проект сооружения городской электрической железной дороги — метрополитена.

Линии метрополитена трассированы под оживленными улицами и площадями. В основном метрополитен Праги запроектирован мелкого заложения, но по условиям профиля местности тоннели заглубляются до 16 *м* (в местах проходки под старым городом и под набережными). Под рекой Влтава проектировался подводный тоннель (рис. 53).

Сеть линий метрополитена проектировалась протяжением в 21,3 *км*. При этом была установлена следующая очередность строительства: линия 1-й очереди длиной 9,3 *км*, оборудованная 14 станциями; линия 2-й очереди длиной 6 *км*, оборудованная 12 станциями; линия 3-й очереди длиной 6 *км*.

Проект метрополитена Варшавы (Польша). Сеть метрополитена Варшавы по составленному проекту имеет 7 линий общим протяжением 46 *км*, из них 26 *км* подземных линий в тоннелях и 20 *км* надземных линий на эстакадах. Тоннели двухпутного профиля с поперечным сечением 7×9 *м*. Глубина заложения тоннелей доходит до 30 *м*. Станции имеют пролеты в свету 20 *м* и оборудованы боковыми платформами длиной 120 *м*, шириной по 4—5 *м*.

При глубине заложения станций более 10 *м* предполагалось устроить механизированный подъем и спуск пассажиров к платформе эскалаторами. Первоочередная линия имела протяжение 6,3 *км*.

Московский метрополитен (СССР). Сеть линий Московского метрополитена запроектирована в тесной увязке с архитектурной планировкой и сталинским планом социалистической реконструкции столицы. При этом учитывался исторически сложившийся план города, с его радиально-кольцевой системой планировки. Линии метрополитена направляются по наиболее напряженным в транспортном отношении уличным магистралям, обеспечивают взаимную связь вокзалов между собой и обслуживают крупнейшие заводы и предприятия. Линии метрополитена выводятся за пределы существующей городской территории, и при развитии большой Москвы перспективная сеть Московского метрополитена охватит обширную городскую территорию в 60 000 *га* при общей протяженности линий в 240 *км*.

Генеральная сеть линии Московского метрополитена им. Л. М. Кагановича состоит в основном из 6 диаметров, проходящих через центр города, и кольцевой линии (рис. 54).

Линии Московского метрополитена:

Кировско-Фрунзенский диаметр, Арбатско-Покровский диаметр, Горьковско-Замоскворецкий диаметр, Краснопресненско-Рогожский диаметр, Дзержинско-Калужский диаметр, Тимирязевско-Таганский диаметр и Кольцевая линия метрополитена.

Вопросы эксплоатации и строительства метрополитена разрешаются в неразрывном комплексе всей перспективной сети, с установлением очередности и непрерывности строительства в плановом порядке. Особое внимание уделяется вопросам развязки узловых пунктов, пересечения линий, пересадочных станций в соответствии с глубоким заложением тоннелей и станций.

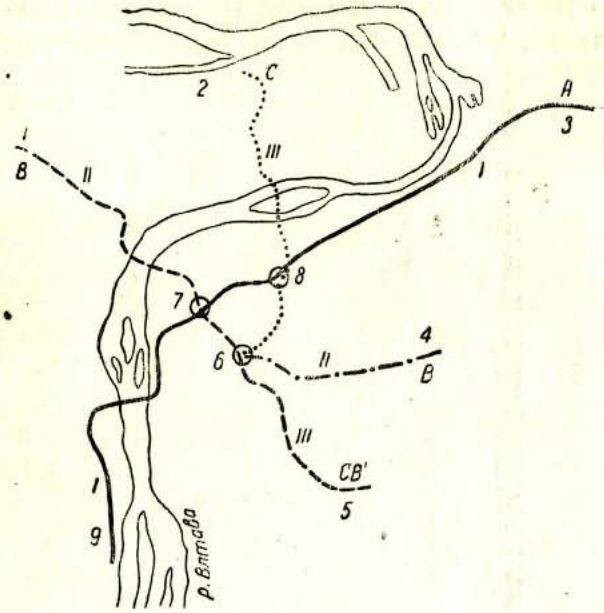


Рис. 53. Метрополитен Праги (проект):

1 — Na Růžku, *2* — Kr. Obora, *3* — Liben Gare, *4* — Flora, *5* — Nucle Vršovice Gare, *6* — Museum, *7* — Můslek, *8* — Masarykovo Gare, *9* — Smichov Gare; I, II, III — намеченные очереди строительства

В силу особых топографических, геологических и гидрогеологических условий линии Московского метрополитена прокладываются преимущественно при глубоком заложении в 30—50 *м*. Расстояния между станциями 1,0—2,2 *км*. Минимальные радиусы закругления по трассе 400 *м*. Максимальный уклон в профиле 33‰.

Сооружению советского метрополитена сопутствует ряд основных положений, ставящих его в истории мировой тоннельной техники на передовые позиции. Это выражается прежде всего в том, что впервые в истории создание метрополитена базируется на социалистических принципах, максимальной обеспеченности техники безопасности, стремлении создать наибольшие удобства пассажирам.

Советский метрополитен сооружается в период существования метрополитена мировых столиц, отличаясь при этом выгодно тем, что в процессе его создания может и должен быть использован весь богатейший опыт мирового метростроения. Опыт сооружения и эксплоатации метрополитенов за границей обнаруживает ряд промахов и строительных ошибок, допущенных при их строительстве. Эти ошибки планового и строительного по-

рядка особенно дают о себе знать в период эксплоатации метрополитена, когда исправление их связано с чрезвычайно высокими затратами, не дающими иногда необходимого эффекта.

При сооружении метрополитена в густо населенных и застроенных городах с интенсивным уличным движением в значительной степени приходится считаться с факторами, регулирующими жизнь столицы. Обеспечение

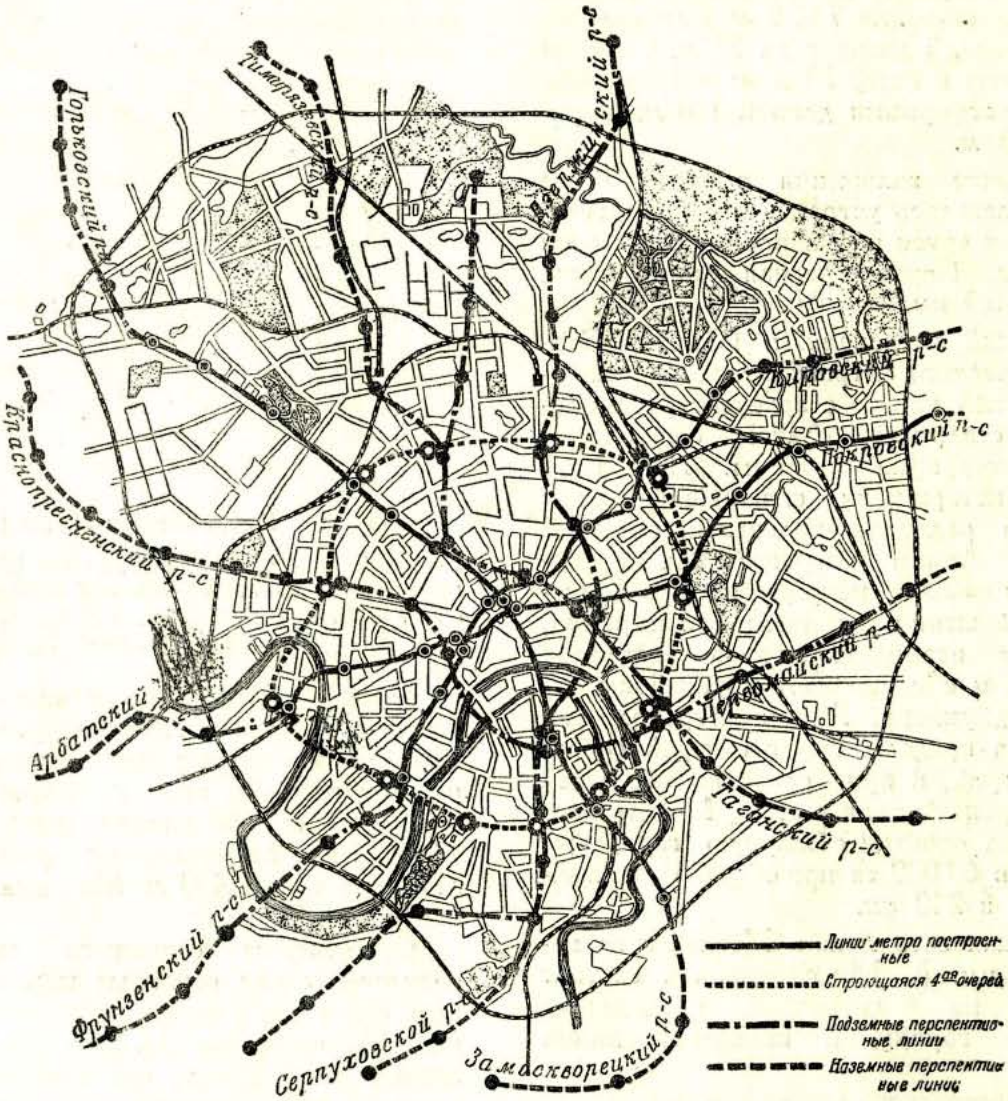


Рис. 51. Метрополитен Москвы (схема линий)

Это особенно наглядно иллюстрируется схемами сетей метрополитенов, где отдельные артерии сети зачастую не увязаны между собой.

В условиях социалистического строительства фактор плановости является ведущим, и поэтому схема линий советского метрополитена создается не только в свете разрешения транспортной проблемы и увязки в ее отдельных элементах, но и согласуется с перспективной городской планировкой советской столицы.

нормальных условий городской жизни на время сооружения тоннелей приобретает иногда решающее значение, предопределяя тип самого метрополитена. В части строительной огромное влияние оказывают геология, гидрогеологический режим и физико-механические свойства грунтов, залегающих по трассе создаваемого метрополитена. Это указывает на то, что при разрешении проблемы метрополитена приходится считаться с весьма сложным и многогранным комплексом геотех-

нических, городских и эксплоатационных условий.

Комплекс сооружений советского метрополитена создается так, чтобы сделать перемещение пассажиров не только быстрым, но и удобным. Обеспечивается надлежащая изоляция и вентиляция тоннелей в процессе их строительства. Станции, вестибюли, входы и выходы метрополитена получают богатое архитектурное оформление.

Сооружение тоннелей, проходящее в сложнейшем геологическом режиме, производится совершеннейшими тоннельно-строительными методами, темпами, невиданными в истории тоннельного дела, причем жизнь города в основном не нарушается.

Метрополитен Москвы, являющийся сложнейшим комплексом тоннельных сооружений, представляет собой рекордное произведение модернизированной советской техники, которая превзошла зарубежную технику метростроения (рис. 55).

Сравнивая Московский метрополитен с зарубежными, следует констатировать, что советский метрополитен, блестяще построенный под непосредственным руководством Лазаря Моисеевича Кагановича, значительно превосходит в строительном, эксплоатационном и архитектурном отношении существующие метрополитены зарубежных стран.

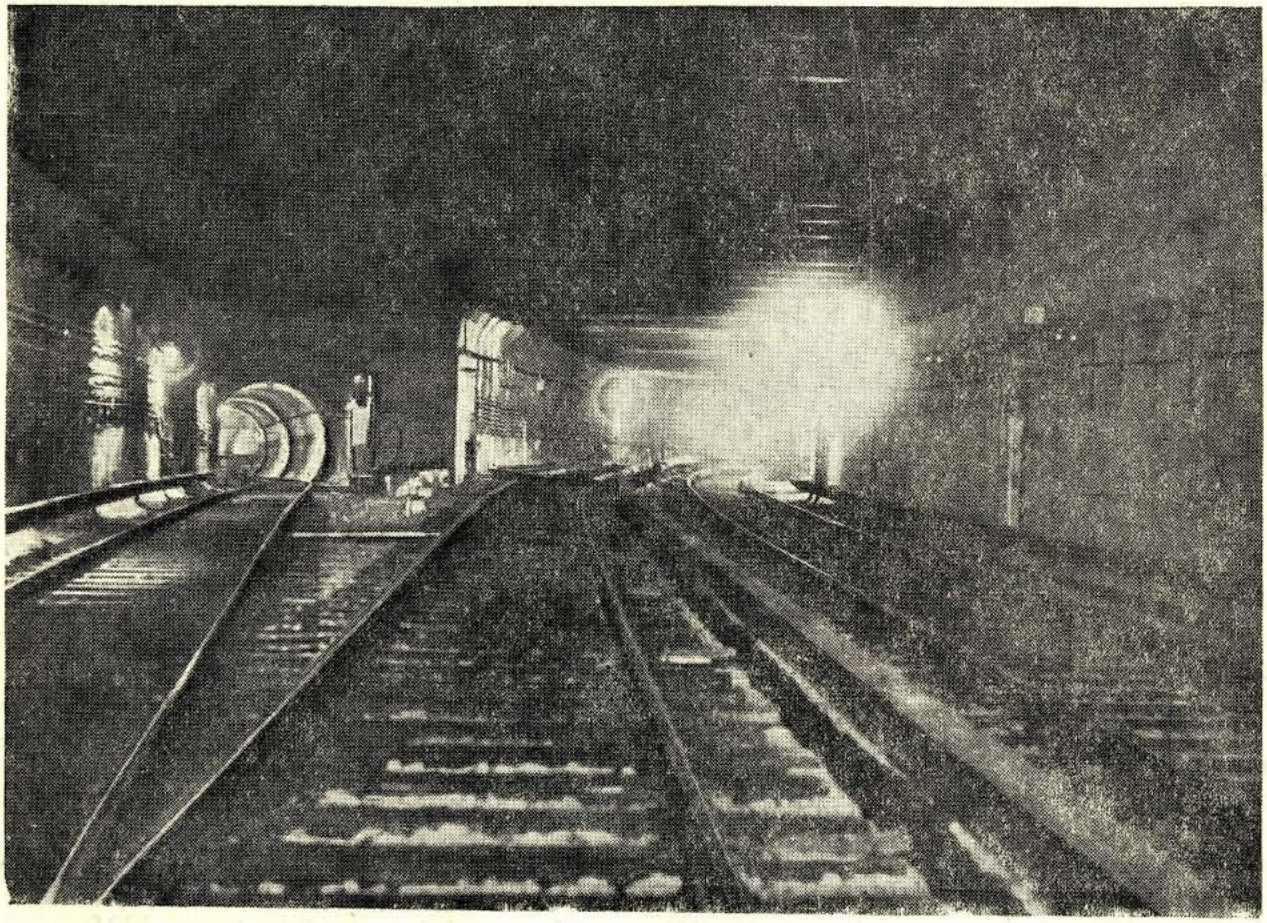


Рис. 55. Метрополитен Москвы (тоннели)

Наш метрополитен как электрическая железная дорога отличается своими качествами в связи с повышенными техническими условиями, которые были предъявлены при трассировке линии и проектировке профиля. В данном случае имеются в виду нормальные уклоны и радиусы кривых в плане, от величины которых зависит спокойное перемещение пассажиров в поезде метрополитена. При больших уклонах, малых радиусах и обратных кривых пути пассажиры в поезде обычно переживают неприятные минуты, их бросает в сторону. Это явление наблюдается на некоторых участках Парижского метрополи-

тена, где уклоны доходят до 45‰, а радиусы кривых в плане 75 *м*. Московский метрополитен имеет максимальный уклон 33‰, а минимальный радиус кривой в плане 400 *м*.

Метрополитен Москвы обладает обширными, архитектурно прекрасно оформленными подземными станциями-дворцами. Обрамленные мрамором колонны и стены станции и художественно обработанные плафоны при отраженном свете создают композицию, при которой пассажир совершенно не чувствует подземелья, что обычно испытывается во время пребывания на станциях метрополитена за границей.

На станциях Московского метрополитена ширина островных платформ от 8 до 15 *м* (станция Дворец Советов) и даже до 22 *м* (станция Охотный Ряд), тогда как ширина платформ станций Парижа и Лондона обычно бокового типа составляет лишь 4, максимум 5 *м*. Наш метрополитен отличается и длиной своих станций, которая доходит до 155 *м*. Между тем станции Берлина, Парижа, Лондона имеют максимальную длину 110 *м*, а обычно около 90 *м*.

Метрополитен Москвы имеет все станции расположенными на прямой, за исключением одной станции Калинина. Между тем в метрополитенах Берлина, Парижа и Лондона огромное количество станций трассировано по кривым. Например, в Париже имеются станции на кривой в 75 *м*, что у нас не допускается и для перегонного тоннеля. В этом случае у дверей между полом вагона и платформой образуется порядочная щель, куда неосторожный пассажир может провалиться. Кроме того, дежурный по станции, отправляющий поезда, не видит всех дверей состава поезда, что мешает ему предотвращать несчастные случаи.

Метрополитен Москвы обладает глубокими станциями, оборудованными одним или двумя эскалаторными ходами, обеспечивающими максимум удобств для пассажиров, при этом некоторые глубокие станции оборудованы пассажирскими одномаршевыми эскалаторами, самыми большими в мире. В Лондоне станции метрополитена имеют не более одного эскалаторного хода.

Метрополитен Москвы отличается разнообразием архитектурного оформления и конструктивных особенностей станций, разнообразием условий глубины залегания и методов производства работ по их сооружению, в то время как в Париже и Лондоне станции похожи одна на другую.

Московский метрополитен включает сеть тоннельных сооружений, изолированных от воды. Вопросам изоляции и сухости тоннелей, находящихся под большим гидростатическим напором, было уделено исключительное внимание.

В парижских тоннелях при разрешении вопроса изоляции ограничивались лишь цементной штукатуркой, в лучшем случае торкретом. Тоннели Московского метрополитена имеют специальную оклеечную битуминозную изоляцию и защитные железобетонные рубашки, рассчитанные на полное гидростатическое давление, изолированные в стыках свинцом чугунные тюбинги и водозащитные «зонты».

Московский метрополитен оборудован на всем протяжении мощной искусственной вентиляцией. Даже станции мелкого заложения, которые за границей обычно вентилируются естественным путем, у нас обеспечены искусственной вентиляцией. В тоннелях и на станциях метрополитена свежий, озонированный воздух. Метрополитен Москвы имеет сплошной путь без стыков, рельсы сварены на всем протяжении. Это обеспечивает плавность хода поездов, без толчков и ударов. Таких путей нет ни на одном метрополитене мира.

Советский метрополитен построен темпами, невиданными в истории тоннельной техники, — фактически первая линия метро протяжением 11,5 *км* построена в течение одного 1934 г. Достаточно указать, что в 1934 г., когда были развернуты работы по всему фронту, земляных работ выполнено 84,7% из общего объема в 2 500 000 $м^3$, бетонных работ 91,1% из общего объема 800 000 $м^3$. За границей такой объем тоннельных работ осваивается обычно в течение 4—5-летнего периода.

Московский метрополитен строится по плановой схеме, увязанной с перспективным развитием линий и архитектурной планировкой большой Москвы. Этим самым обеспечивается увязка линий и пересадочных станций, чего нет ни в одной сети метрополитенов за рубежом. Московский метрополитен оборудован вестибюлями и станциями, богато архитектурно оформленными. Между тем не следует забывать и того, что этот первенец социалистических метрополитенов создавался в труднейших природных условиях.

При строительстве первоочередной линии Московского метрополитена протяжением

в 11,5 *км* (Сокольники — Крымская площадь длиной 8,9 *км* и станция Калинина — Смоленская площадь — 2,6 *км*) советские строители столкнулись с чрезвычайно сложными природными условиями. Разнообразные напластования слабых, неустойчивых плывунных грунтов, спорадически залегающих юрских и карбонных отложений, эродированных подземными староречьями, создавали такие положения, при которых от советских строителей требовалась исключительная культурно-техническая вооруженность. Кроме того, работы осложнялись еще тем, что трасса залегала по наиболее оживленным и застроенным частям города.

На строительстве метрополитена были применены наиболее современные способы проходки тоннелей, в значительной части усовершенствованные советскими инженерами.

При пересечении слабых, неустойчивых пород работы велись под сжатым воздухом по специальной системе, запроектированной советскими инженерами. Для преодоления мощных плывунов в пойме подземного староречья р. Ольховки опускались большие железобетонные тоннели-кессоны; дальнейшая проходка тоннелей велась при замораживании плывунов и под сжатым воздухом.

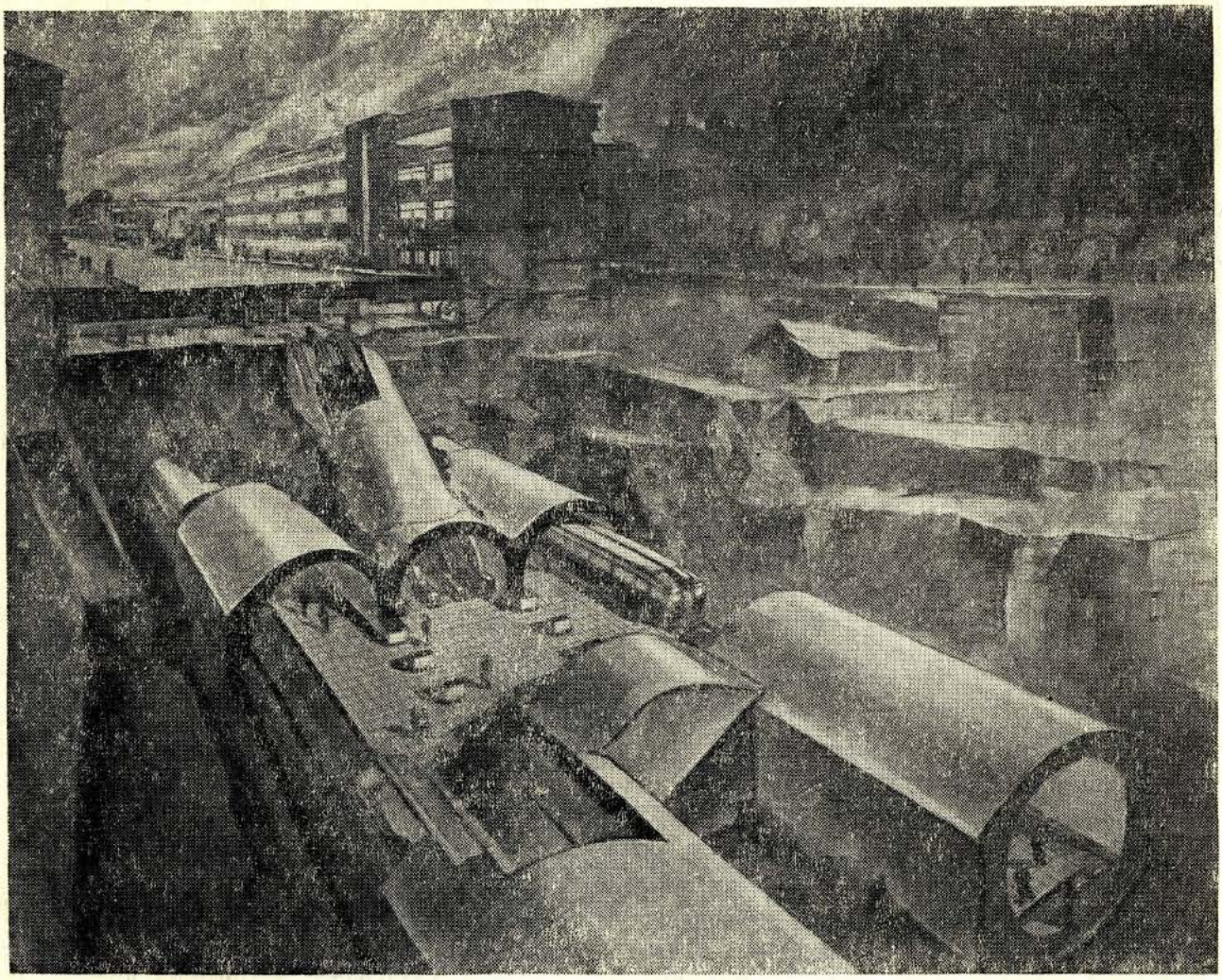


Рис. 56. Станция глубокого заложения (схематический разрез)

Тоннели и станции шириной до 32 *м*, заложенные на большой глубине от поверхности под двадцатиметровой толщей плывунов, проходились в коренных породах юрского происхождения и карбонного комплекса, горным способом, на временном деревянном креплении при каменной обделке (рис. 56).

В зависимости от давления пород и поперечного профиля тоннеля применялись разнообразнейшие системы проходок: многоштоль-

невая бельгийская система, система опорного ядра, метод летучей арки, комбинированные приемы и т. д. В некоторых местах проходка велась непосредственно под многоэтажными домами. При проходке шахт на этих участках пришлось преодолевать мощные плывуны до 15 *м*.

При пересечении тоннелем подземного староречья Неглинки проходка велась двумя щитами (частью при нормальном давлении) и главным образом под сжатым воздухом, при обделке из железобетонных блоков.

Сложные узлы тоннельных конструкций переходных камер и передаточных ветвей с одного радиуса на другой построены разнообразными методами временного деревянного крепления, частично под сжатым воздухом и с применением силикатизации — химического закрепления слабых грунтов, замораживания и т. д.

При проходке наклонных эскалаторных тоннелей глубоких станций через мощные плывуны применялся метод замораживания и обделка тоннелей металлическими тюбингами.

Таким образом, на трассе 1-й очереди Московского метрополитена применялись разнообразные приемы тоннелирования: сжатый воздух, замораживание, водопонижение, химическое укрепление грунтов, щиты, тюбинги, кессоны-тоннели.

Линии метрополитена 2-й очереди имеют общую протяженность в 14,9 *км*, из них Горьковский радиус (Площадь Свердлова — Площадь Маяковского — Белорусский вокзал — Стадион Динамо — Аэропорт — Сокол) протяжением 9,7 *км*; Покровский радиус (Площадь Революции — Курский вокзал) — 3,5 *км*; Арбатский радиус (Смоленская площадь — Киевский вокзал) — 1,7 *км*.

В основу составленного проекта положен руководящий принцип, что процесс сооружения тоннелей метрополитена не должен влиять на нормальные условия жизни города. Сооружение линии было запроектировано и проводилось, как правило, при глубоком заложении тоннелей.

На 2-й очереди строительства Метрострое была принята щитовая техника тоннелирования, которая отражает наиболее совершенную механизацию производственных процессов. Из общего протяжения линий 2-й очереди в 14,9 *км* тоннельными приемами построено 10,4 *км*. В основном тоннели сооружены при глубоком заложении в коренных породах — юрская глина, известняки, карбонный комплекс — щитовым способом. Щит представляет собой мощную металлическую крепь, продвигаемую в голове сооружаемого тоннеля при помощи системы гидравлических домкратов. В хвосте щита при помощи специального механического крана (эректора) ведется монтаж тюбингов, составляющих конструкцию тоннельной обделки. В щите имеются вертикальные и горизонтальные диафрагмы, образующие отдельные ячейки, через которые производится атака лба забоя, под защитой выступающего козырька — аванбека, ограждающего от обвалов породы. Применением щитов представляется возможность сооружать тоннели постоянного сечения как перегонов, так и станции метрополитена.

Всего на советских заводах было изготовлено 30 перегонных и 12 станционных щитов.

Исключительный размах щитовых работ, принятый на 2-й очереди строительства, еще не имеет прецедентов в мировой тоннельной практике. Известен случай одновременной работы 22 щитов на последней линии Финсбюри-Парк — Кокфостер Лондонского метрополитена. На второй очереди нашего метрополитена для периода максимального развития фронта работ был создан мощный щитовой парк в 42 щита. Наряду с применением щитов тоннели как перегонного, так и станционного профиля закреплялись чугунными тюбингами.

Разработка грунта в забое щита в юрских и карбонных глинах и известняках незначительной крепости велась в основном пневматическими и отбойными инструментами. При выклинивании известняков с повышенным коэфициентом крепости прибегали к взрывным работам. При наличии сквозных штолен по трассе, в основном выполнявших функцию транспортных, разрабатываемая впереди щита порода сбрасывалась вниз, за подошву передовой штольни, откуда при помощи скреперного грузчика (0,3—0,5 $м^3$) типа «Свет шахтера» грузилась в вагонетки подземной откатки. В зависимости от местных условий эксплоатировалась бесконечная канатная откатка и откатка с хвостовым и головным канатами. В условиях крепких известняков, где не требовалось специального крепления, тоннельные работы при тюбинговом креплении велись лишь одним эректором без щита.

При работе щитом в коренных устойчивых породах работы велись с водоотливом. Дебит подземных вод доходил на некоторых шахтах до 300—350 $м^3$ в час.

При пересечении щитами слабых, неустойчивых пород приходилось прибегать к специальным искусственным мероприятиям (в виде сжатого воздуха). Перегонные щиты шахты № 51, проходя под застроенной центральной оживленной частью города под сплошной сетью подземных сооружений и коллектором р. Неглинки, прорезали в кровле неустойчивые породы и работали с применением сжатого воздуха.

Исключительно сложным участком для проходки перегонных тоннелей в плывунных грунтах представляется участок шахты № 86, где тоннели проходили под 20‰ уклоном. Для освоения этого плывунного участка примерно в середине его было опущено два грандиозных железобетонных кессона-тоннеля размерами в плане 32 × 9 *м* вместе с собранными в них 4 щитами и эректорами.

Вес каждого кессона с 2 щитами 3 000 *т*. Подобный прием опускания шахт вместе со щитами введен в тоннельную практику впервые советскими инженерами. Четыре щита были выпущены из кессонов и работали под сжатым воздухом в плывунах при мощности компрессорных установок до 800 $м^3$ в минуту. При этом требовалось особое умение, искусство и тщательность при ведении щитов в неустойчивой среде, по требуемой проектной трассе.



Рис. 57. Метрополитен Москвы (станция Площадь Маяковского)

Особенно большой технико-производственный эффект дал щитовой метод проходки при сооружении крупных профилей станций метрополитена. При размерах поперечного профиля 32 × 12 *м* станции на первой очереди создавались горным способом, раздробленными фазами штолен, фурнелей, калотт и т. д., при огромном расходе лесных материалов и рабочей силы.

Применением станционных щитов диаметром по 9,6 *м* удалось построить трехсводчатую станцию на полный профиль, при обделке из чугунных тюбингов. Станционными щитами созданы станции Курский вокзал, Площадь

Революции, Площадь Свердлова и Динамо. Особыми приемами создавалась станция Площадь Маяковского, представляющая собой металлическую конструкцию, позволяющую максимально механизировать процесс тоннелирования (рис. 57).

Вышеназванные станции глубокого заложения 2-й очереди (за исключением станции Площадь Маяковского) представляют по своей конструкции трехсводчатый профиль, образованный тремя параллельными станционными тюбами диаметром по 9,5 *м*. Крайние станционные тюбы включают в себя платформы и железнодорожные пути на протяжении до 160 *м* и соединены между собой по среднему станционному тоннелю рядом проемов.

Применением мощных и разнообразнейших механизированных приемов тоннельных работ, преимущественно щитовой проходки, была обеспечена возможность преодоления трудностей строительства линий 2-й очереди Московского метрополитена (рис. 58).

В период Великой Отечественной войны Метрострое проведена грандиозная созидательная работа — завершено строительство многогранного комплекса тоннельных сооружений Замоскворецкого и Покровского радиусов 3-й очереди Московского метрополитена им. Л. М. Кагановича — крупного оборонного сооружения столицы.

Многообразный комплекс специальных сооружений метрополитена охватывает сферу вопросов тоннелестроения, архитектуры, электроснабжения, санитарной техники, эксплоатации и т. д.

Замоскворецкий радиус, как продолжение эксплоатируемой линии метрополитена Горьковского радиуса, соединяет все станции последнего и непосредственно станцию Площадь Свердлова через Замоскворечье с новой станцией Завод им. Сталина, образуя Горьковско-Замоскворецкий диаметр протяжением 16,2 *км* с конечными станциями Сокол и Завод им. Сталина.

На Замоскворецком радиусе протяжением 6,5 *км* построено три новые станции: Новокузнецкая, Павелецкая и Завод им. Сталина.

С открытием Покровского радиуса, являющегося продолжением действующей линии метрополитена станция Киевская — станция Курская, установлено нормальное пассажирское движение на Арбатско-Покровском диаметре с конечными станциями Киевская — Измайловский парк культуры и отдыха им. Сталина.

На Покровском радиусе протяжением 6,8 *км* построено четыре новые станции: Бауманская, Электрозаводская (рис. 58а), Сталинская и Измайловский парк культуры и отдыха им. Сталина.

Общая длина трассы 3-й очереди строительства составляет 13,3 *км*.

Метрострой решил многогранный комплекс практических задач тоннелестроения, осложненный условиями военного времени. Для осуществления этой задачи потребовалась проектно-творческая работа по перестройке существующих методов сооружения и систем конструкций, с тем чтобы иметь возможность создавать высококачественные тоннельные сооружения быстрыми темпами и применять минимум дефицитных материалов и оборудования.

В условиях Великой Отечественной войны процесс проектирования и строительства проводился в аспекте необходимости быстрейшего ввода тоннельных сооружений и оборудования метрополитена в эксплоатацию.

Тоннельные сооружения Замоскворецкого радиуса метрополитена заложены в исключительно тяжелых геологических и гидрогеологических условиях. Залегая преимущественно на большой глубине от поверхности, тоннели прорезают массивы устойчивых пород юрского и карбонного комплекса, а также напластования слабых, неустойчивых пород плывунного характера, заполняющих подземные староречья и размывы коренных пород. Строителям при прокладке тоннелей пришлось вести борьбу с природными трудностями в виде значительного проявления горного и гидростатического давления, при обильном дебите подземных вод, доходившем на отдельных участках трассы до 1 200 $м^3/час$.

Впервые в истории техники советского метростроения на Замоскворецком радиусе проложено четыре подводных тоннеля под Москвой-рекой.

Особенностью строительства Замоскворецкого и Покровского радиусов 3-й очереди являются мощное оборудование и приемы современной техники тоннелестроения, которые метростроевцы применили при производстве подземных работ.

В условиях сложной геотехнической обстановки строителями применялись разнообразнейшие методы организации и производства работ при высоком качестве тяжелой и легкой механизации производственных процессов.

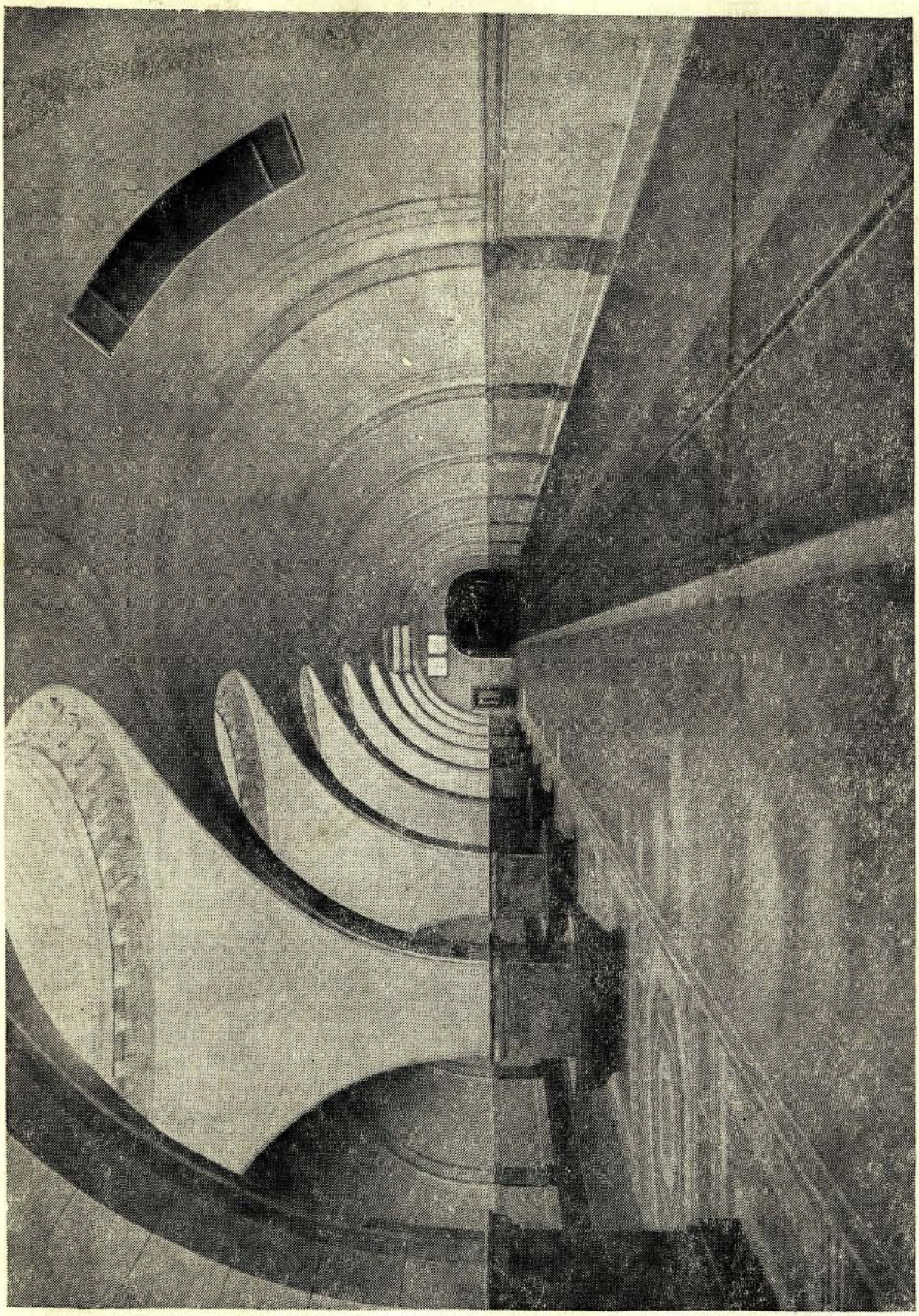


Рис. 58. Метрополитен г. Москвы (станция Сокол)

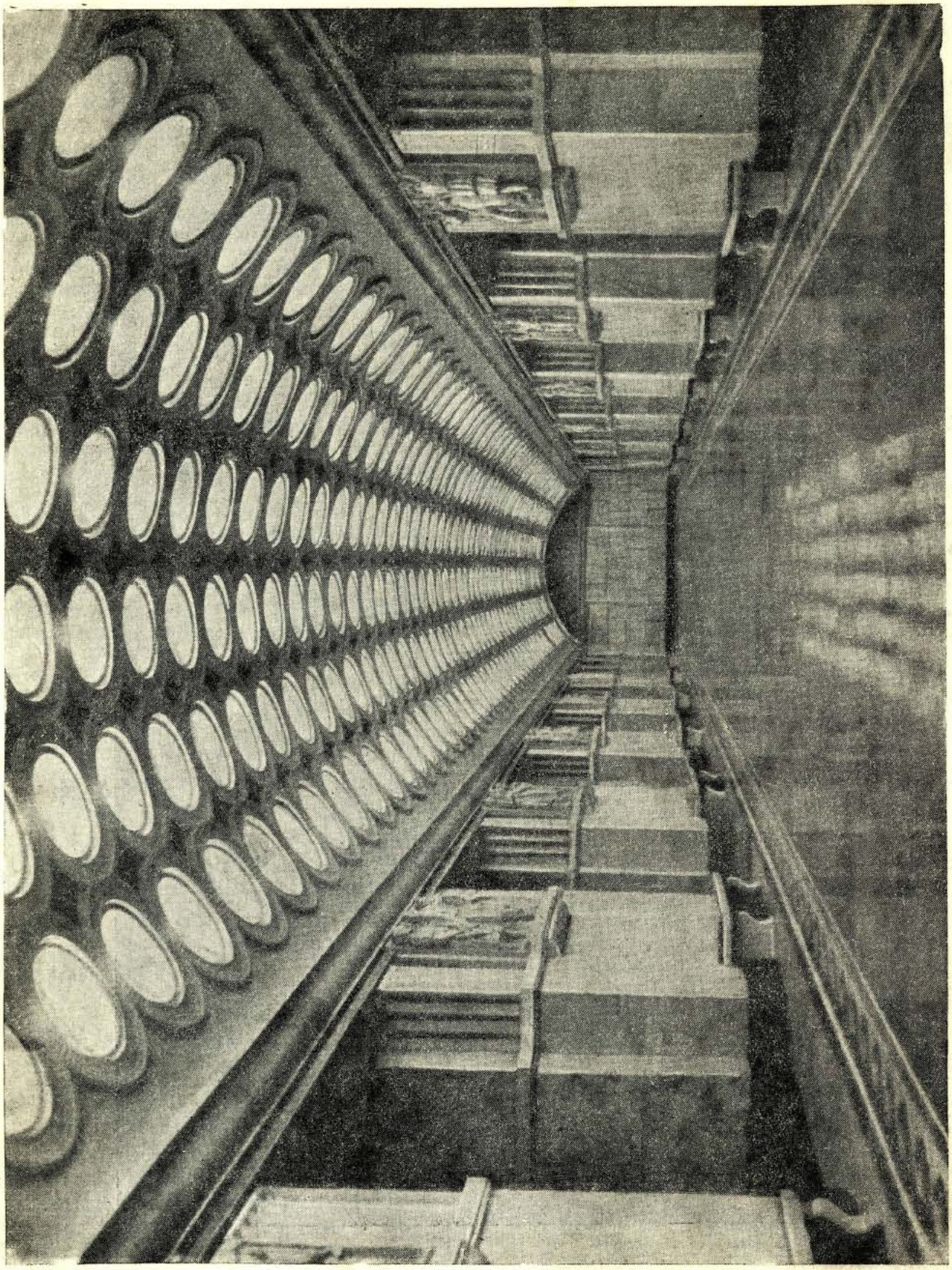


Рис. 58а. Метрополитен г. Москвы (станция Электрозаводская)

Преимущественным методом проходки был модернизированный щитовой метод работ как перегонных, так и станционных тоннелей, при конструкции обделок из чугунных тюбингов. Механизация шахтного подъема, мощного водоотлива, вентиляции, погрузочных работ в забое, внутритоннельного, электровозного и конвейерного транспорта была применена в широком масштабе.

В процессе проходки применялись сжатый воздух, искусственное замораживание грунтов, водопонижение и другие необходимые мероприятия.

Щитовые работы проводились на базе цикличности, с учетом стахановских методов работ, при этом на ряде участков была применена комплексная механизация работ, дававшая возможность вслед за разработкой забоя монтажом тюбингов, нагнетанием, перебалчиванием и расчеканкой непосредственно укладывать жесткое основание пути метрополитена и получать готовый тоннель.

В январе 1944 г. приступили к сооружению кольцевой линии Московского метрополитена, которая, проходя по районам города с плотной застройкой, пересекает крупнейшие городские магистрали и площади, связывая между собою основные железнодорожные вокзалы. Линия подземного кольца метрополитена трассируется от Курского вокзала через Таганскую площадь к Павелецкому вокзалу и далее через Серпуховскую и Калужскую площади к Крымской площади. Затем линия направляется через Киевский вокзал на Красную Пресню, к Белорусскому вокзалу через Новослободскую улицу и Ботанический сад, Комсомольскую площадь к Курскому вокзалу.

С сооружением 4-й очереди сеть Московского метрополитена будет состоять из трех диаметров и большого кольца общим протяжением 59,6 *км*.

Длина трассы большого кольца 19,2 *км*. На нем размещаются 12 подземных станций глубокого заложения, из них 6 станций являются пересадочными и расположены в месте пересечения с существующими диаметральными линиями метрополитена. Кольцевая линия четыре раза пересекает Москву-реку подводными тоннелями.

Линия метрополитена рассчитана на пропускную способность тридцати четырех пар восьмивагонных составов в час, что обеспечит провозную способность до 60 000 пассажиров в час в каждом направлении.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ ТОННЕЛИ

В горных условиях сильно пересеченной местности применение открытой безнапорной деривации (подача воды открытым каналом) бывает сопряжено с необходимостью создания по трассе ряда сложных инженерных сооружений в виде акведуков, подпорных стен, глубоких выемок, дюкеров, дамб и т. п., при этом обусловливается необходимость в определенных случаях в период эксплоатации вести борьбу с оползневыми явлениями. В зависимости от топографических, геологических и гидрогеологических условий применение варианта трассы тоннельной деривации может оказаться более целесоответствующим, поскольку она исключает приведенные выше осложняющие моменты, с которыми сопряжена трасса открытой деривации. При этом прибегают к постройке гидротехнических тоннелей.

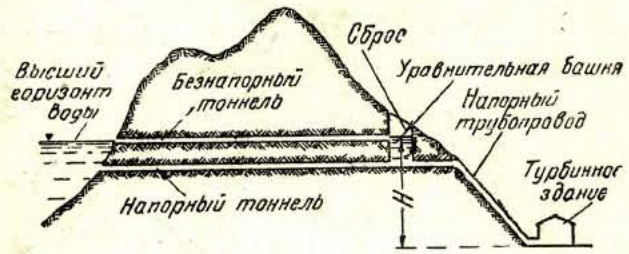


Рис. 59. Схема тоннельных дериваций гидроэлектрических установок

В современной практике сооружения гидротехнических тоннелей различаются следующие основные виды тоннелей:

утилизационные тоннели, служащие для целей подвода воды к гидроэлектроустановке, а равно для отвода воды от последней;

ирригационные тоннели, подводящие воду для нужд орошения;

водосбросные тоннели, имеющие назначение отвести избыточный расход воды из верхнего бьефа;

строительные тоннели, служащие для временного отвода реки на период постройки гидротехнического сооружения.

Указанные тоннели подразделяются, таким образом, по своему назначению на деривационные, или подводящие, и на отводящие тоннели.

По характеру движения воды в тоннеле различают безнапорные и напорные тоннели (рис. 59).

Безнапорные тоннели применяются преимущественно при незначительных колебаниях горизонта водоснабжающего источника верхнего бьефа, когда забор воды производится из верхних слоев.

Напорные тоннели применяются при наличии значительных колебаний горизонта водохранилища, когда забор воды приходится производить с больших глубин. Выбор системы напорного или безнапорного тоннеля

ными методами, применяемыми в практике строительства железнодорожных и автомобильных тоннелей через горные хребты.

Основное отличие гидротехнического тоннеля (особенно напорного) заключается в том, что, помимо расчета конструкции тоннельной обделки на горное давление, она должна выдержать и внутреннее давление воды. При этом должна быть исключена возможность утечки воды из тоннеля в окружающую

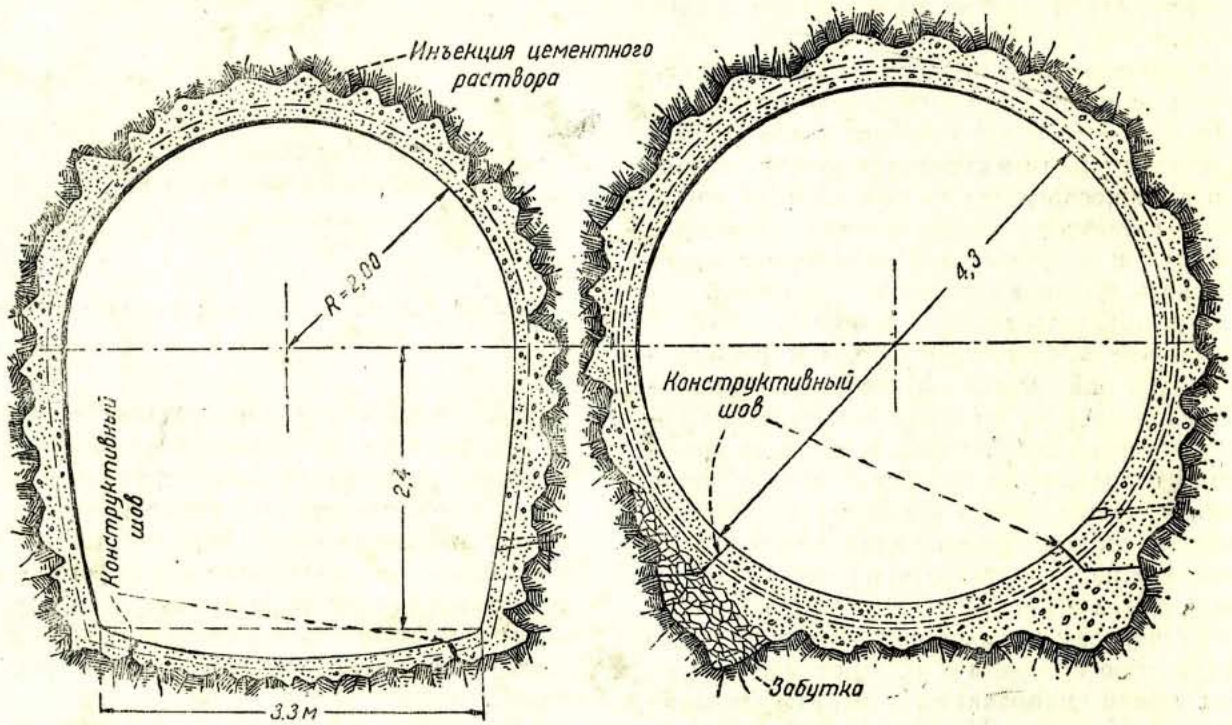


Рис. 60. Гидротехнические тоннели (поперечные сечения)

решается в каждом конкретном случае в зависимости от топографических и геотехнических условий и от схемы регулирования.

Если работа конструкции безнапорного тоннеля практически мало отличается от работы обычного горного тоннеля транспортного назначения, то работа конструкции напорного тоннеля является отличной. Наличие внутреннего напора значительной величины (3—8 *ат*) требует применения специальной конструкции обделки, а главное — наличия достаточно прочных пород горного массива, прорезаемого тоннелем. В условиях нарушенных слабых пород создание напорного гидротехнического тоннеля представляется инженерной задачей исключительной трудности.

Сооружение гидротехнических тоннелей в горных условиях производится аналогич-

породу. Обычно при прокладке гидротехнических тоннелей в скальных породах устраивают бетонную обделку, при нагнетании цементного раствора за нее, «заставляют» работать вместе с обделкой прорезаемый горный массив на внутренний напор воды (рис. 60).

В том случае, если обделка тоннеля окружена слабыми породами, ее следует усиливать применением железобетонной, а иногда и металлической обделки.

Считаясь с тем обстоятельством, что бетон является водопроницаемым материалом, приходится прибегать к специальным мероприятиям против утечки воды из тоннеля — к применению торкретной штукатурки, торкрета по сетке или к устройству мягкой изоляции из гудронированного толя на горячей клебемассе при внутренней железобетонной

рубашке. При больших напорах воды применяют металлическую обделку тоннеля.

Из существующих гидротехнических тоннелей наибольший интерес представляют тоннели Штрубклям, Ахензее, Сенишиа, Боулдер, Дзорагэс, Ладожский, Пиотино и тоннели для целей водоснабжения Нью-Йорка.

Тоннель Штрубклям. При строительстве гидроэлектроустановки Штрубклям (Австрия) был сооружен напорный тоннель диаметром 2,07 *м*. В соответствии с крепостью пересекаемых пород и величиной напора толщина обделки из железобетона колеблется от 15 до 20 *см* при давлении воды от 1,5 до 4 *ат*. В нормальных условиях применялась бетонная тоннельная обделка толщиной в 25 *см*. Внутренняя поверхность обделки торкретировалась. В местах, где тоннель пересекал выклинивания слабых грунтов, применялась местная специальная конструкция обделки усиленного типа.

Тоннель гидростанции Штрубклям рассчитан на расход 9,3 $м^3/сек$ при скорости движения воды 2,8 *м/сек*. Длина тоннеля — 2 430 *м*.

Тоннель Ахензее. При сооружении гидростанции Ахензее (Австрия) был сооружен тоннель диаметром 2,85 *м* и протяжением 4 650 *м*. Тоннель пересекал трещиноватые скальные породы и был рассчитан на пропуск воды 25 $м^3/сек$ при напоре до 3 *ат*. В таких условиях применялась обделка из бетонного кольца толщиной до 35 *см*, причем внутренняя поверхность обделки была покрыта торкретом по металлической сетке. В местах, где тоннель пересекал зону разрушенных пород, проявлявших усиленное горное давление, применялась обделка из тридцатисантиметровых бетонных блоков, при внутреннем бетонном кольце в 20 *см*, покрытом торкретом по металлической сетке. В тех местах, где пересекались исключительно слабые, плывунные породы, сооружение тоннельного участка производилось методом опускных кессонов специальной конструкции.

Тоннель Сенишиа. При строительстве гидроустановки Сенишиа (Италия) были сооружены два тоннеля диаметром 1,9 *м* в свету. Один из тоннелей имеет протяжение 1 860 *м*, а другой 5 250 *м*. Тоннели в основном пересекают скальные породы. Они имеют бетонную обделку толщиной 20 *см* при торкретном слое в 3 *см*. В тех местах, где тоннели пересекают слабые породы, они, помимо бетонной обделки, имеют еще внутреннее железобетонное кольцо. Тоннели рассчитаны на внутренний напор воды в 2,7 *ат*. На участках с весьма слабыми грунтами применялась усиленная обделка в виде железобетонного кольца толщиной 45 *см*.

Тоннель Боулдер. При сооружении гидроэлектроустановки Боулдер на р. Колорадо (Северная Америка) было построено 4 тоннеля диаметром 15,24 *м* и длиной в 1,2 *км* каждый. Эти тоннели были использованы для отвода воды реки в период строительных работ и впоследствии для целей эксплоатации. По размерам своего поперечного сечения (229 $м^2$) подобные тоннели не имеют прецедентов в мировой практике строительства гидротехнических тоннелей. Последние, пройденные в скальных породах, имеют толщину бетонной обделки (круглого сечения) до 90 *см* и рассчитаны на максимальный расход воды в 5650 $м^3/сек$.

Проходка в скальных породах с высоким коэфициентом крепости производилась при высоком качестве механизации буровзрывных и бетонных работ.

Тоннель Дзорагэс. При сооружении гидроустановки Дзорагэс (СССР) тоннелем был пересечен горный массив. Длина тоннеля 2 485 *м*, диаметр его 3,2 *м*. Тоннель рассчитан на пропуск воды с максимальной скоростью 3,5 *м* в секунду при максимальном напоре в 3 *ат*. Обделка тоннеля бетонная, толщиной 40 *см*, при восьмисантиметровом слое торкрета по металлической сетке. Проходка тоннеля велась методом подсводного разреза.

Ладожский тоннель. Для целей водоснабжения Ленинграда запроектировано сооружение Ладожского водопровода, в связи с чем предстоит прокладка тоннеля протяжением около 3 *км* под дном Ладожского озера, в исключительно тяжелом геологическом и гидрогеологическом режиме. Тоннель будет проходить в условиях большого гидростатического напора воды озера. Тоннель пересечет плывунные грунты. Тоннельные работы будут вестись в условиях газового режима.

Тоннель гидроцентрали Пиотино. При сооружении гидроустановки в Пиотино (Италия) был проложен тоннель через горный массив на протяжении 0,9 *км*. Тоннель пересекает преимущественно слюдяные сланцы. Напорный тоннель имеет внутреннее поперечное сечение 3 *м*, обделка железобетонная, толщиной 15 *см*. Внутренний напор воды доходит до 4,5 *ат*.

Тоннели для водоснабжения Нью-Йорка. При прокладке водопроводов в Нью-Йорке были проведены большие тоннельные работы.

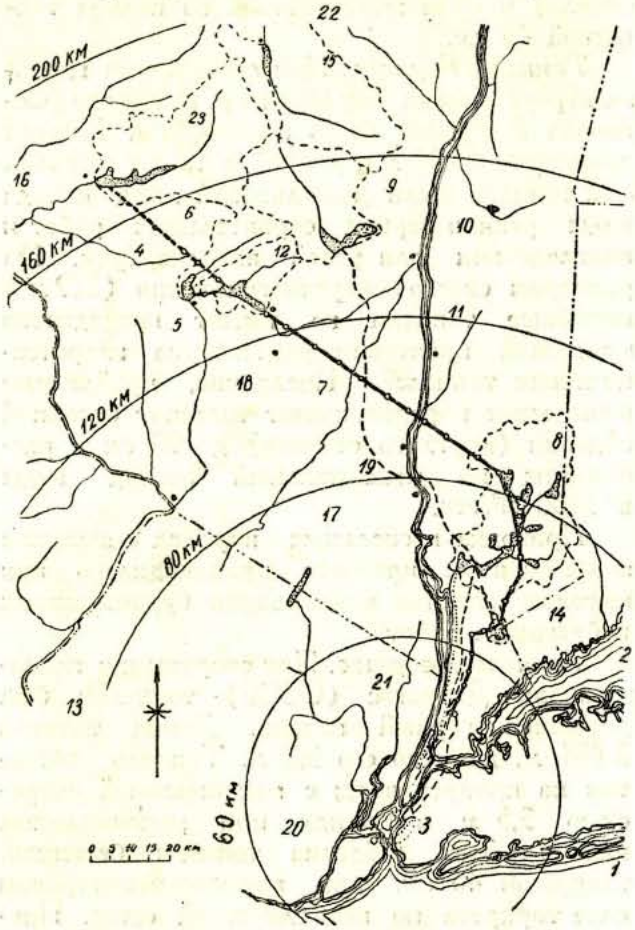


Рис. 61. Трасса гидротехнического тоннеля Делэйер (крупнейшего в мире):

1 — Atlantic Ocean, *2* — Long island sound, *3* — New-York City, *4* — Neversink reservoir, *5* — Neversink, *6* — Future extension, *7* — Delaware Aqueduct, *8* — West Brauch reservoir, *9* — Ashokan reservoir, *10* — Kingston, *11* — Poughkeepsie, *12* — Rondout reservoir, *13* — Delaware Water Gap, *14* — Kensicores, *15* — Schoharie reservoir, *16* — Downsville, *17* — West-Point, *18* — Ellenville, *19* — Castkill Aqueduct, *20* — Silver Lake reservoir, *21* — Hillview reservoir, *22* — Gilboa, *23* — East Delaware reservoir

Напорные тоннели диаметром 3,1 *м*, длиной 11 *км* были пройдены в скальных породах на глубине до 46 *м*. Напор воды в тоннелях достигал 4 *ат* (иногда до 13,3 *ат*).

При постройке *Котскильского водопровода* было проложено до 50 *км* тоннелей диаметром 4,3 *м*, обеспечивающих пропуск воды до 26 $м^3/сек$, причем внутренний напор воды доходил до 22,5 *ат*. В последнем случае обделка тоннеля была оснащена дополнительным металлическим чехлом. При этом учитывалось разгружающее внешнее давление грунтовых вод. Там, где трасса водопроводного тоннеля проходила под р. Гудсон, внутренний напор воды в тоннеле доходил до 46 *ат* при наружном уравновешивающем давлении воды в 34 *ат*.

Построенный в 1934 г. *тоннель Кост-Рэнж* для целей водоснабжения Сан-Франциско, имеющий круглое сечение 3,2 *м* и протяжение 43 *км*, является самым длинным гидротехническим тоннелем мира.

Однако в постройке уже находится *тоннель Делэйер* для водоснабжения Нью-Йорка, который будет иметь значительно большую длину, чем тоннель Кост-Рэнж, а именно — 78 *км*, при этом для открытия фронта тоннельных работ будет заложена шахта глубиной до 0,5 *км* (рис. 61).

В Советском Союзе построено более 35 *км* тоннелей для гидростанций (Аджарис-Цхальская ГЭС, Гизель-Донская, Дзорагэс, Рионгэс, Баксанская, Канакирская, Ульбинская ГЭС). С завершением в IV пятилетке строительства гидростанций Храмгэс, Озерной, Сухумской, ГЭС Нива III, Гюмушской ГЭС, Эзминской, Самгорского Каскада сеть деривационных тоннелей в СССР составит до 85 *км*.

СУДОХОДНЫЕ ТОННЕЛИ

При сооружении каналов для судоходного движения встречающиеся естественные препятствия в виде горных хребтов проходятся тоннелями-каналами. В зависимости от интенсивности судоходства по каналу тоннели сооружаются для однопутного и двухпутного движения судов.

Один из первых тоннелей-каналов был сооружен в 1679 г. Этот тоннель-канал — Мальпа (Франция) — имел длину 160 *м* и сечение в свету 8,3 × 6,8 *м*. Затем в течение XVIII и XIX столетий был построен ряд больших тоннелей-каналов. К началу XX века во Франции было построено до 35 тоннелей-каналов. В 1886 г. был открыт для эксплоатации тоннель-канал Де-Конд (на канале Марна—Рона) для двухпутного движения. Ширина тоннеля-канала в свету 16 *м*.

В Англии имеется около 50 тоннелей-каналов общим протяжением до 80 *км*. Ряд судоходных тоннелей-каналов имеется и в странах Америки.

Одним из крупнейших современных тоннелей-каналов является тоннель-канал Де-Ров

(на канале Марсель—Рона) протяжением 7 118 *м*, открытый для эксплоатации в 1927 г. (рис. 62 и 63).

Поперечное сечение тоннеля-канала: ширина 22 *м*, высота 15,4 *м* в свету. Такие размеры дают возможность передвижения судов в обоих направлениях при глубине воды в 4 *м*. Площадь поперечного сечения



Рис. 62. Ровский тоннель-канал (Франция)

300—320 $м^2$. Грандиозность работ характеризуется следующими данными:

объем выданной породы 2,3 млн. $м^3$, объем каменной кладки 500 000 $м^3$, объем бетонной кладки нижней части тоннеля 47 000 $м^3$ и расход динамита 1 300 г.

КОММУНАЛЬНЫЕ ТОННЕЛИ

При развитии сети городских подземных сооружений в крупных столичных городах Западной Европы и Америки, а за последнее время в Советском Союзе и Японии приступили к прокладке специальных коммунальных тоннелей. В том случае, когда в тоннеле располагается в определенном порядке целый ряд подземных сооружений, всегда доступных для осмотра и ремонта, без вскрытия поверхности мостовой уличных проездов, такой тоннель может иметь комплексное назначение.

Коммунальные тоннели могут иметь и строго индивидуальное, специализированное назначение: например, тоннельный коллектор для канализации, для водостока, почты, теплофикации.

Размеры поперечного сечения коммунальных тоннелей чрезвычайно разнообразны и колеблются по внутреннему диаметру от 1,2—3,5—4 до 6 *м*.

Сеть сооружений подземного хозяйства столичного города охватывает канализацию, водопровод, водостоки, телеграф, сигнализацию, электрокабели, теплофикационные маги-

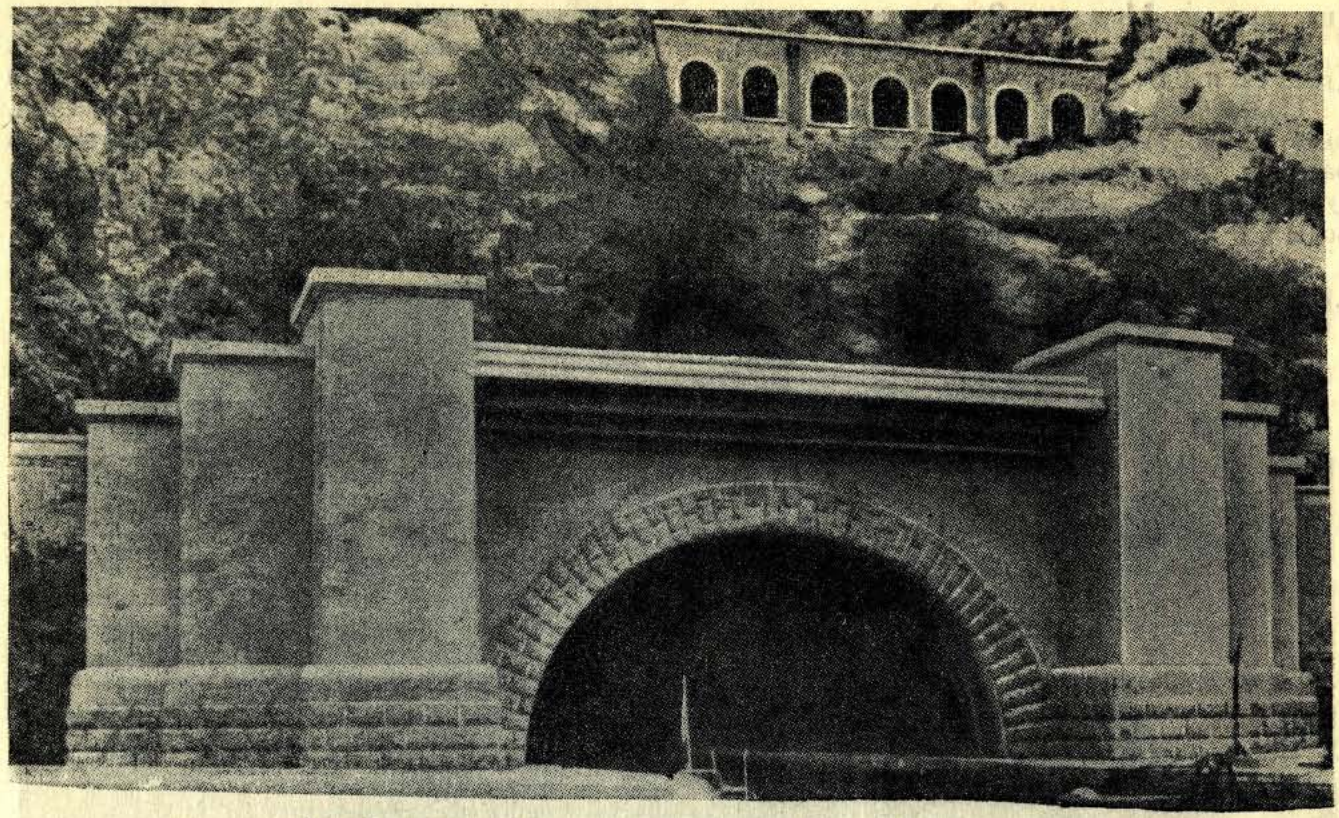


Рис. 63. Ровский тоннель-канал (южный портал) (Франция)

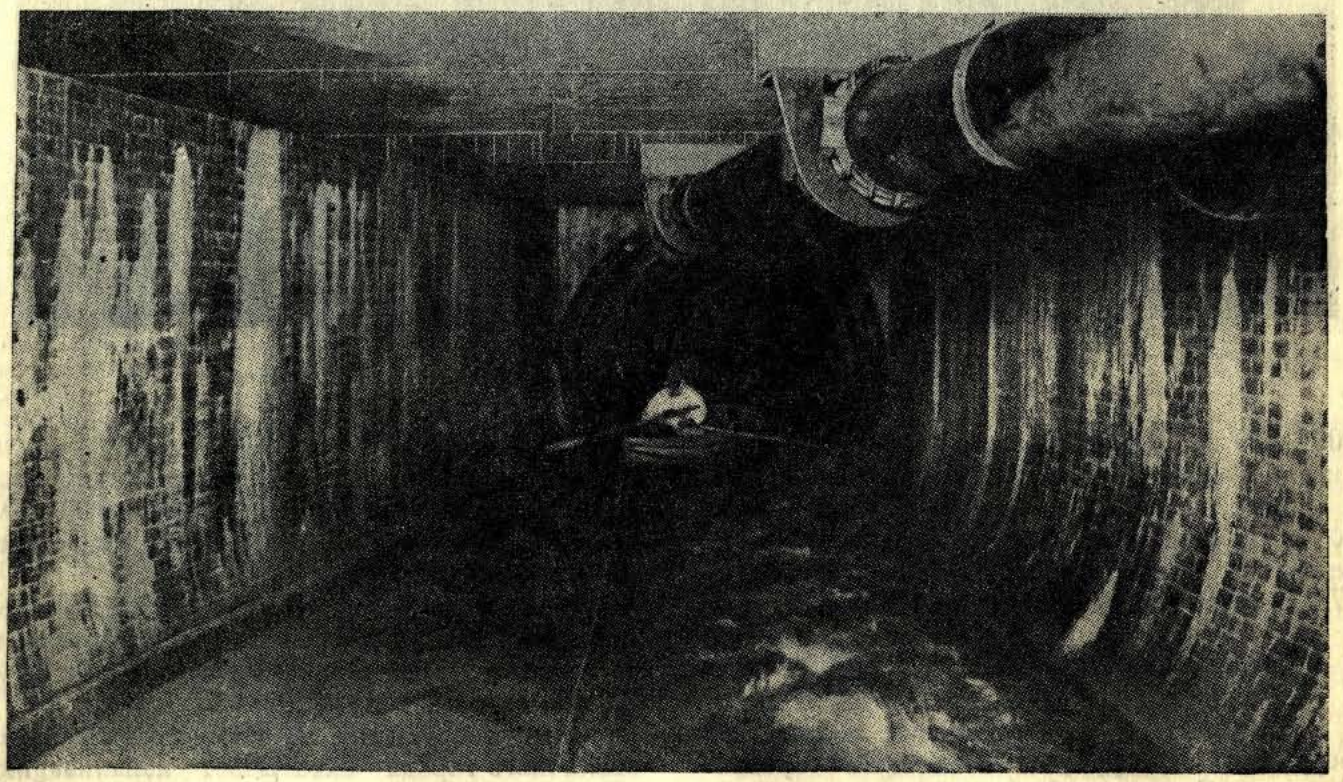


Рис. 64. Тоннельный коллектор

страли, газопроводы, нефтепроводы и т. д. Для примера следует сказать, что сеть тоннельных коллекторов в Париже доходит до

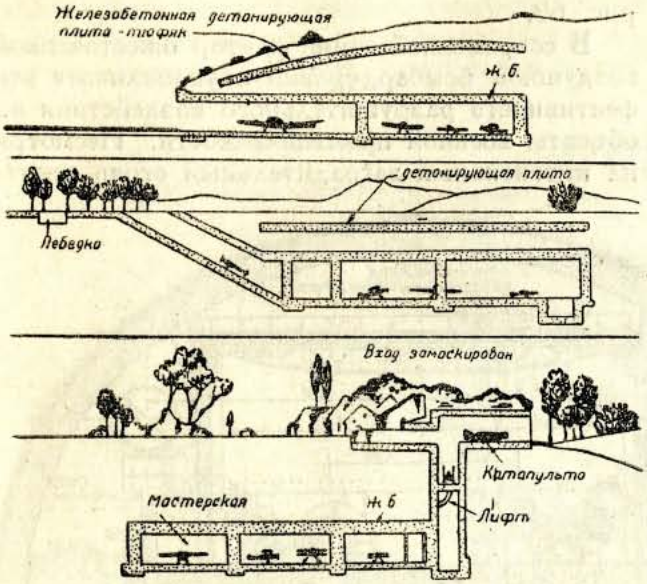


Рис. 65. Подземные ангары (схема)

109 *км*, причем в нее входят коллекторы общесплавной канализации. Размеры поперечного сечения каналов доходят до 5,9 × 7,2 *м* (Клиши). Обслуживающий персонал перемещается в лодках. В Лондоне прокладываются отдельные тоннели для канализации и водостоков и отдельные коллекторы для других видов подземного хозяйства (рис. 64).

Глубина заложения тоннелей-коллекторов, в зависимости от геологических условий и топографии местности, доходит до 10—15 *м*.

По генеральному плану реконструкции Москвы сооружение тоннельных коллекторов для подземного хозяйства проводится в больших масштабах. Прокладка канализационных коллекторов проводится щитовым способом, при обделке бетонными блоками. На работах 1-й очереди было пущено в работу до 16 щитов. Работы велись без нарушения уличного движения и без вскрытия поверхности мостовой.

Обделка из бетонных блоков применяется прямоугольной, сотовой и трапецоидальной формы; применяются также и чугунные тюбинги. При бетонных блоках исключительное внимание уделяется вопросам изоляции в местах сопряжения блоков между собой; для этой цели применяется специальная битуминозная мастика.

Борьба с агрессивным влиянием газов на внутреннюю поверхность канализационных коллекторов ведется применением специальных керамиковых плиток, неразрывно связанных с телом бетонных блоков, или применением специального торкретного покрытия эмульсией.

ТОННЕЛИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К тоннелям специального назначения относятся подземные сооружения оборонного характера: подземные гаражи, ангары (рис. 65), электростанции, бомбо- и газоубежища, базы для подводного флота, подземные госпитали, подземные казармы, склады (рис. 66).

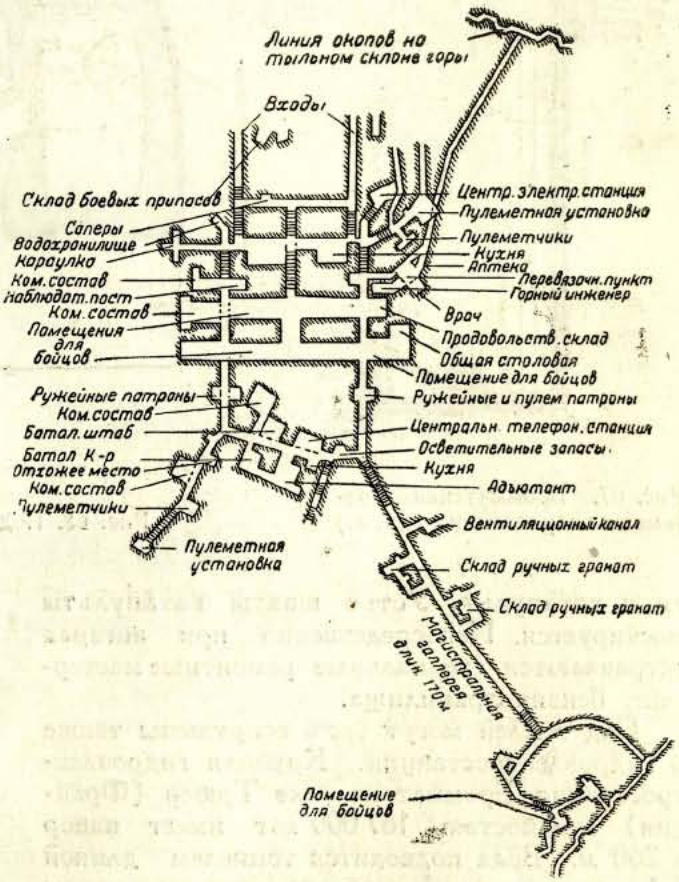


Рис. 66. Подземная казарма (1917 г.)

Значение подземных сооружений оборонного характера было осознано военными специалистами еще в период мировой войны 1914—1918 гг. и особенно в период Великой Отечественной войны.

Такие сооружения могут использоваться как защитное средство обороны. Подземные сооружения должны иметь достаточную защитную кровлю, обеспечивающую их неуязвимость от действий бомбардировочной авиации, а в нужных случаях и от сухопутной и морской артиллерии.

Так, например, по английским данным, подземные ангары могут быть построены как мелкого, так и глубокого заложения. При глубоком заложении ангаров устраиваются специальные шахты, откуда самолеты поднимаются лифтами. Взлет самолетов производится с катапульт. Устье шахты катапульты маскируется. Непосредственно при ангарах устраиваются специальные ремонтные мастерские, бензинохранилища.

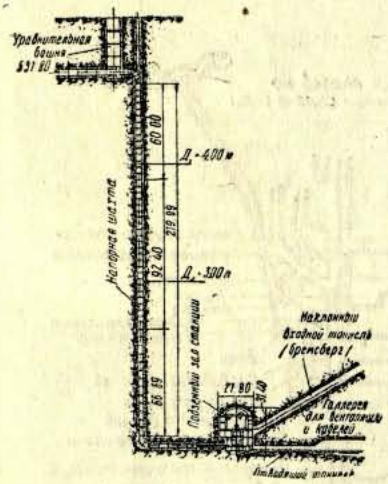


Рис. 67. Бромматская подземная гидростанция (схема)

Под землей могут быть сооружены также и гидроэлектростанции. Крупная гидроэлектростанция Бромматна реке Трюер (Франция) мощностью 167 000 *квт* имеет напор в 260 *м*. Вода подводится тоннелем длиной 7,2 *км*, рассчитанным на пропуск воды 64 $м^3/сек$. Из тоннеля вода попадает через две напорные слепые шахты непосредственно на турбины подземной станции, имеющей размеры поперечного сечения 31,4 × 21,8 *м*. Длина машинного зала 75 *м*. Толщина замка свода обделки станции 0,8 *м*. Из турбины вода отводится по специальному тоннелю. Сообщение станции с дневной поверхностью осуществляется через бремсберг (рис. 67, 68). Схема подземной электростанции, защищенной от воздушного нападения, приведена на рис. 69.

В современной войне фактор ожесточенной воздушной бомбардировки обусловливает эффективность разрушительного воздействия на объекты военной промышленности. Несмотря на интенсивный заградительный огонь зенитной артиллерии, полностью обеспечить неуязвимость от воздушных атак заводов и фабрик, готовящих продукцию для фронта, не представляется возможным. Обеспечить сохранность и бесперебойную работу предприятия возможно лишь при закладке сооружения на большую глубину от поверхности земли (см. главу IX).

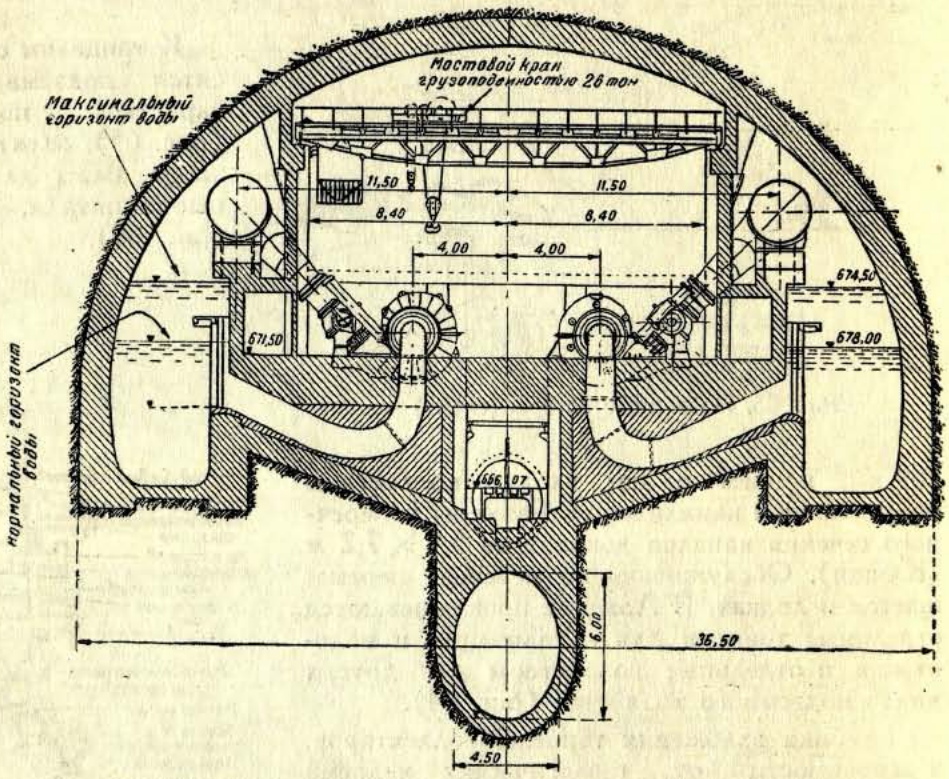


Рис. 68. Подземная гидростанция (поперечный разрез)

В Англии особо важные заводы авиационной промышленности созданы под землей.

Тоннели и станции ряда метрополитенов мира в период второй мировой войны широко использовались как массовые бомбо- и газоубежища для населения столиц. На рис. 70 показана станция лондонского Андерграунда Элефант, использованная под бомбоубежище в период воздушного нападения в 1940 г.

ТОННЕЛИ КОМПЛЕКСНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

За последнее время в практике тоннельного строительства получила развитие система тоннелей комплексного назначения. В данном случае имеется в виду сооружение таких тоннелей, поперечное сечение которых по своим габаритам обеспечивает пропуск различного вида транспорта, канализации и т. д. Кроме того, такие тоннели могут быть и оборонного назначения.

Тоннель под р. Мерси. Подводные тоннели комплексного назначения имеются за границей. Так, например, подводный тоннель под р. Мерси между Ливерпулем и Биркенхэдом (Англия) имеет поперечное сечение в свету 13,4 *м*. В нем размещены четыре пути для автомобильного движения, из которых два средних — для движения на больших скоростях и два крайних — для движения на малых скоростях. Под проезжей частью железобетонной конструкции устроены стены, ограждающие пространство, предусмотренное для будущего развития движения. Однако есть основание предполагать, что это пространство предназначено для бомбо- и газоубежища на случай воздушной атаки протизника.

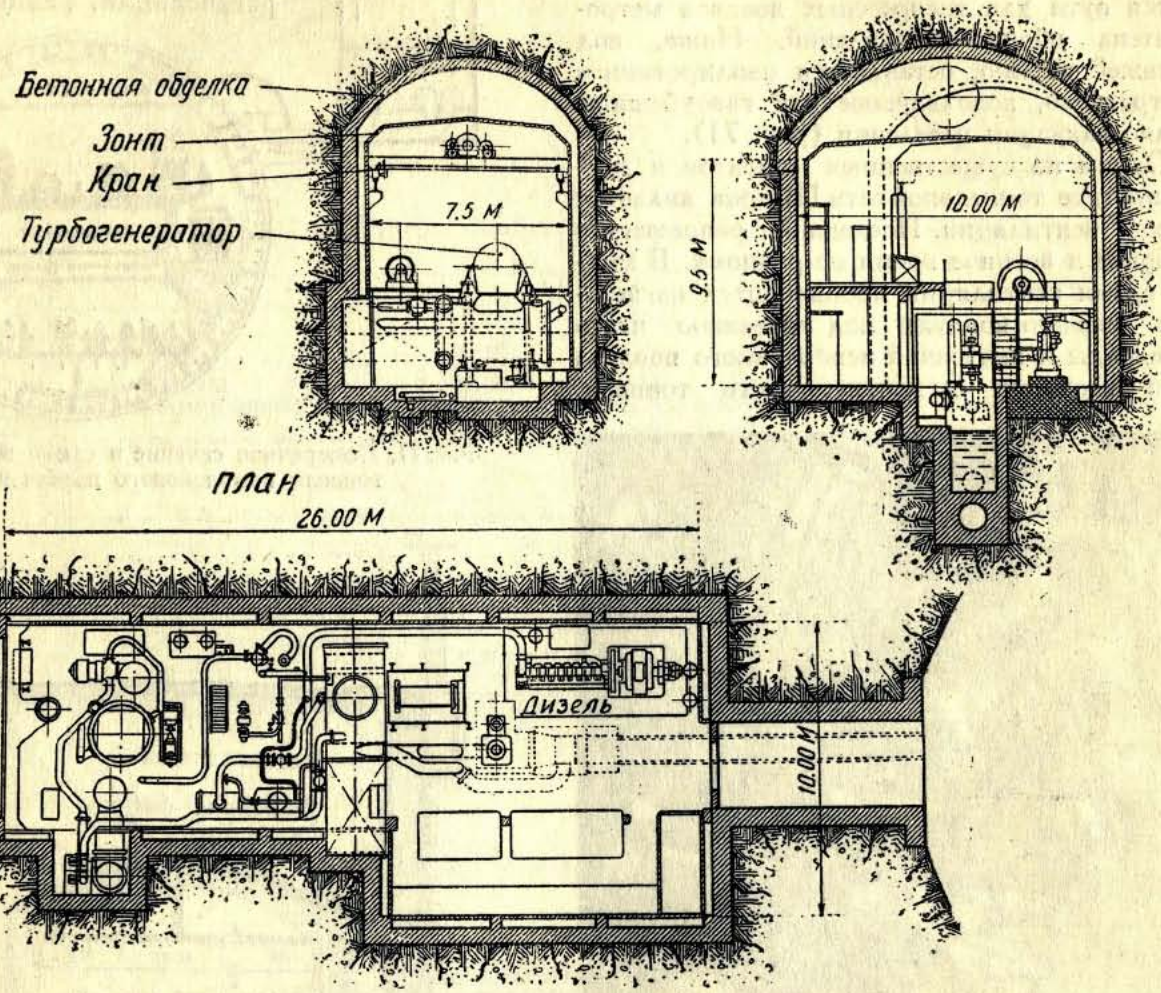


Рис. 69. Подземная электростанция, защищенная от воздушного нападения

Тоннели под Парижем. Заслуживает также внимания проект специальной тоннельной сети под Парижем, заложенной на большой глубине. Проектом предусматривается, что тоннели в мирное время предназначены для автомобильного движения и пропуска экспрессных линий метрополитена и сооружений городского подземного хозяйства. В военное время тоннели используются как газоубежища и для защиты и эвакуации населения за пределы города. Поперечное сечение тоннелей круглое, диаметром 20 *м*, обделка металлическая, из отдельных сегментов. Проходка тоннелей предполагается щито-

вым способом. Внутри тоннеля несколько выше горизонтального диаметра будут расположены автострада (обеспечивающая пропуск 4 000 машин в 1 час) для четырехпутного движения автобусов и автомобилей и два тротуара для пешеходов. По бокам, несколько ниже горизонтального диаметра, располагаются пути для экспрессных поездов метрополитена обоих направлений. Ниже, под проезжей частью, оставляется изолированное пространство, используемое как газоубежище и для эвакуации населения (рис. 71).

Одним из существенных моментов в данном проекте тоннельной сети Парижа является вопрос вентиляции. Последний разрешается в мирное и военное время по-разному. В мирное время вентиляция производится нагнетанием свежего воздуха под проезжую часть автострады и вытяжкой испорченного воздуха через верхнюю сегментную часть тоннеля.



Рис. 70. Лондонский Андерграунд (станция Элефант энд Кэстль, приспособленная под бомбоубежище в 1940 г.)

Вентиляционные станции располагаются примерно через 1 *км*. В военное время, в момент воздушной атаки, система вентиляции немедленно переключается. По автостраде разрешается проезд только для специальных целей в противогазовых масках. В изолированном и газонепроницаемом пространстве тоннеля для эвакуации населения осуществляется циркуляция воздуха, основанная на принципе регенерации. Таким образом,



Рис. 71. Поперечное сечение и схема вентиляции тоннеля комплексного назначения

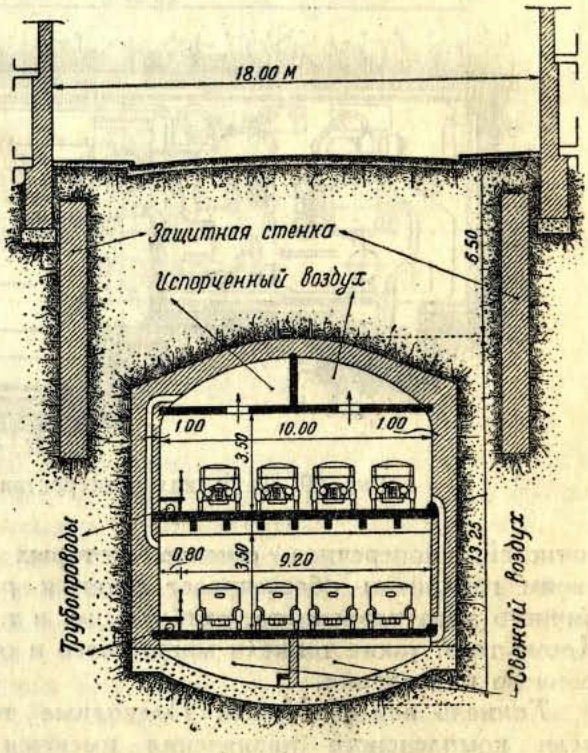


Рис 72. Проект тоннеля городской магистрали в Париже

нижнее тоннельное пространство совершенно изолируется от наружного воздуха, который может быть насыщен отравляющими веществами (ОВ).

Вход в тоннель через рампы производится без шлюзования. В портальной части запроектированы завесы, обеспечивающие тоннель от проникновения в него отравленного наружного воздуха. Первая завеса — из наклонных струй сжатого воздуха, вторая и третья — из струй воды. Для эвакуации населения из тоннеля запроектированы выходы к железным дорогам и к р. Сене.

Согласно проекту, тоннели предполагается пройти с помощью щитов при двадцатиметровой обделке металлическими тюбингами.

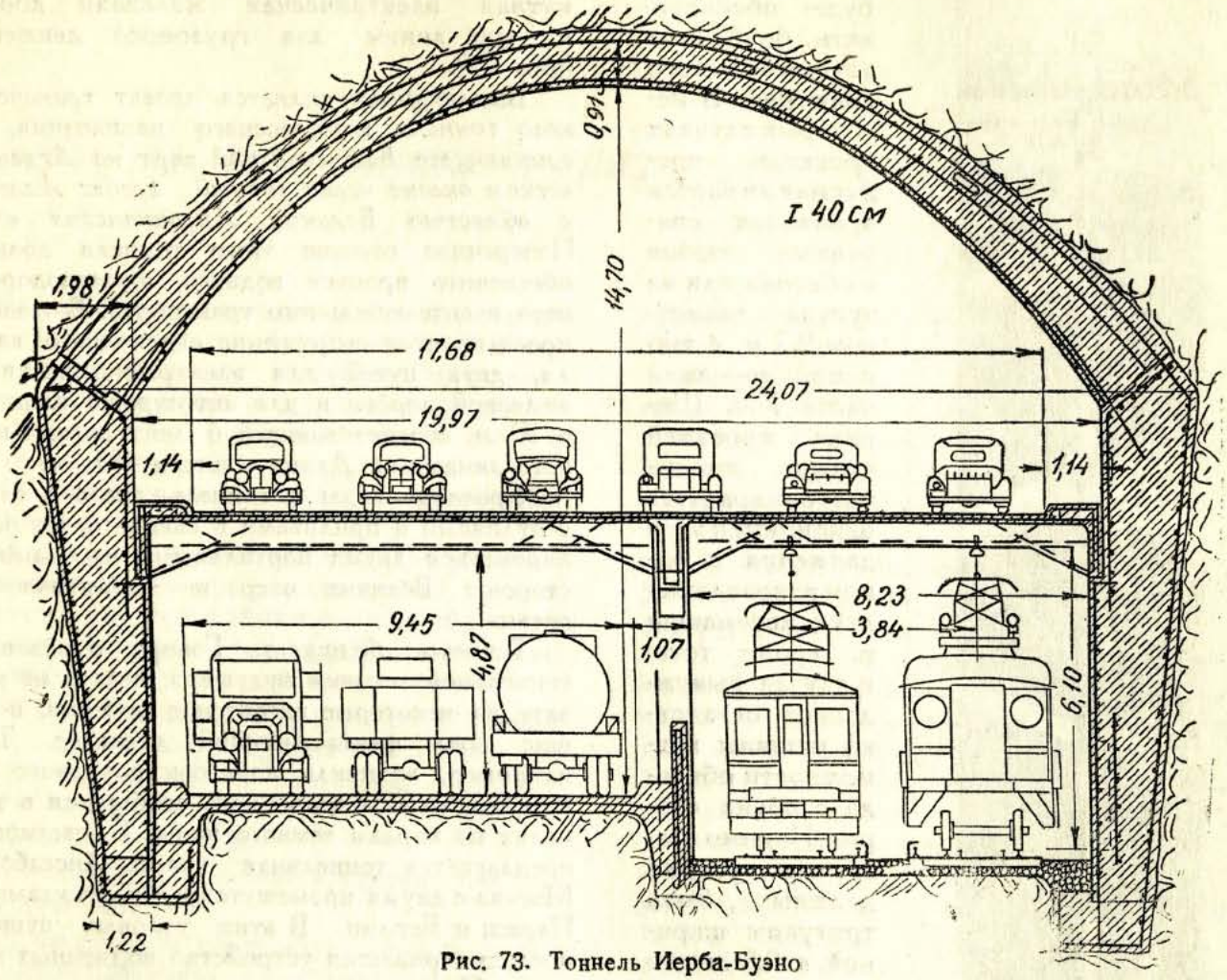


Рис. 73. Тоннель Иерба-Буэно



Рис. 74. Проект тоннеля сверхскоростной железной дороги Лиссабон—Москва

Стоимость 1 *пог. км* тоннеля (по проекту) составит 150 000 000 франков.

В связи со все усиливающимся автодвижением по улицам Парижа в последнее время был составлен проект двухъярусного тоннеля для автомобильного движения (рис. 72).

Тоннель должен пройти на большой глубине, в условиях устойчивых горных пород, размером 13×10 *м* и будет обеспечивать 6—8 лент автомобильного движения. В некоторых случаях проектом предусматривается прокладка спаренных тюбов из бетона или из чугуна диаметром 9,7 *м*, с шириной проезжей части 7 *м*. Ширина проезжей части принимается из расчета одновременного движения в одном направлении двух автомашин, кроме того, в случае вынужденной остановки машины возможности объезда с обеих сторон. Помимо этого, в тоннеле должны быть тротуары шириной в 0,8 *м* для служебных целей и каналы для вентиляции.

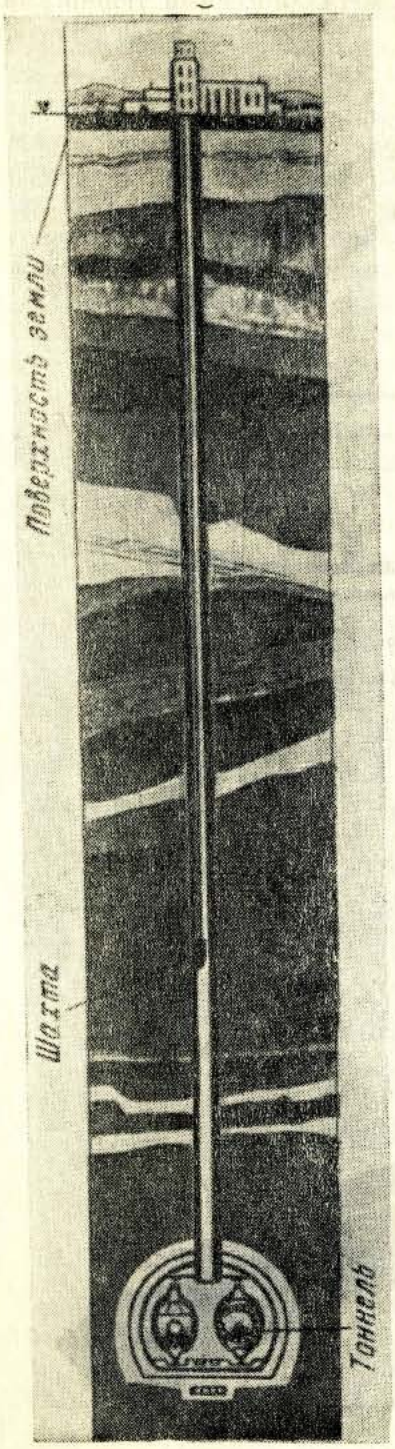


Рис. 75. Проект тоннеля сверхскоростной железной дороги Лиссабон—Москва

Тоннель Иерба-Буэно (США). Крупным тоннелем для автомобильного и железнодорожного движения является тоннель Иерба-Буэно, сопряженный с двухъярусным мостом через бухту Сан-Франциско. Тоннель протяжением 165 *м* имеет два яруса и поперечное сечение 15,5×24 *м*. В верхнем ярусе размещена автострада шириной до 17,68 *м* с двумя тротуарами по 1,14 *м* каждый; в нижнем ярусе размещены двухпутная электрическая железная дорога и три ленты для грузового движения (рис. 73).

Выдающимся является *проект транспортного тоннеля* комплексного назначения, *соединяющего Балтиморский порт на Атлантическом океане через горный хребет Аллеган с областью Великих Американских озер*. Поперечное сечение этого тоннеля должно обеспечить пропуск водного, железнодорожного и автомобильного транспорта. В тоннеле проектируется сооружение судоходного канала, двух путей для электрифицированной железной дороги и для автострады шириной в 30 *м*, обеспечивающей 6 лент автомобильного движения. Длина тоннеля 485 *км*.

Уровень воды в тоннеле-канале в связи с отливами и приливами в океане будет регулироваться двумя портальными шлюзами со стороны Великих озер и Атлантического океана.

Тоннели будущего. Говоря о развитии тоннельной техники будущего, нельзя не указать на некоторые гигантские проекты, носящие пока фантастический характер. Так, например, возникла идея быстроходного железнодорожного подземного сообщения в тоннелях по хордам земного шара. В частности, предлагается тоннельная трасса Лиссабон—Москва с двумя промежуточными пунктами — Париж и Берлин. В этих узловых пунктах предусматривается устройство подземных вокзалов. По трассе запроектирован ряд вентиляционных шахт. Подвижной состав предполагается из вагонов обтекаемой формы с герметически закрытыми окнами и дверями при искусственной вентиляции, основанной на принципе регенерации воздуха. Скорость движения поездов доходит до 400 *км/час* (рис. 74, 75).

Предполагается, что в процессе производства работ по прокладке тоннелей на больших глубинах будут вскрыты огромные минеральные богатства, которые вызовут к жизни ряд горно-промышленных предприятий. Эксплоатация этих природных богатств будет вестись параллельно с работами по сооружению тоннелей. Несмотря на всю фантастичность этого проекта, никто не может поручиться, что в будущем он не претворится в действительность.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭЛЕМЕНТЫ ГЕОТЕХНИКИ В СВЯЗИ С ПРОХОДКОЙ ТОННЕЛЕЙ

Инженерно-геологические исследования для постройки тоннеля обычно проводятся в условиях сложного геотехнического комплекса, включающего следующие факторы:

а) топографию — рельеф местности по трассе тоннеля;

б) характер и условия напластований залегающих пород;

в) физико-механические свойства пород;

г) характер нарушенности пород, трещиноватость их, метаморфическое влияние тектонических процессов, сдвиги, сбросы, оползневые явления, дислокация горных пород;

д) режим подземных вод, их дебит, гидростатический напор, гидравлический градиент; степень агрессивности подземных вод, возможность прорыва вод из активных карстов;

е) подземные газы;

ж) характер, величину и направление горного давления;

з) ожидаемую температуру горных пород, характер изогеотерм для пересекаемого массива;

и) режим пересекаемого тоннелем горного массива в условиях вечной мерзлоты.

Если по условиям геологического и гидрогеологического прогноза в период начального проектирования будет установлено, что при проходке встретится зона неустойчивых пород, которая может значительно осложнить работы, то ее по возможности следует обойти. В крайнем случае, сообразуясь с общими технико-экономическими, производственными и эксплоатационными соображениями, протяженность тоннеля в зоне неустойчивых пород необходимо довести до минимума. Однако разнообразнейшие природные условия иногда вынуждают строителей вести проходку через зону неустойчивых, слабых пород. В таких случаях приходится разрешать целый комплекс сложных технических задач, требующих обширных специальных знаний и опыта тоннельного дела.

Академик Ф. П. Саваренский в своем труде «Инженерная геология» указывает на следующее основное положение: «Для возведения инженерного сооружения не столько опасны неблагоприятные геологические условия, сколько опасно недостаточное знание этих геологических условий и неумение оценить их с точки зрения того или иного инженерного мероприятия».

Основная задача заключается в том, чтобы на основе геотехнического прогноза для данного тоннеля выбрать наиболее целесообразный метод производства тоннельных работ и провести его в жизнь с применением модернизованного тоннельного оборудования, машин и научно-технических средств.

В результате геотехнического обследования горного массива, через который предполагается провести прокладку тоннеля, выявляются строение исследуемого массива, геологические и гидрологические условия, виды напластований горных пород. Обследования ведутся путем осмотра горных пород по обнажениям и геологическими разведками (зондированием, бурением, шурфованием, проходкой рекогносцировочных штолен).

При геотехническом обследовании горного массива обращается внимание на склоны рек и оврагов, устанавливается характер перемещения горных масс, выявляются оползни, обвалы горных пород, выход водоносных горизонтов, наличие водоемов, озер, пустот, карстовых образований.

Инженеры-геологи на основе геологических и гидрогеологических изысканий, петрографических и других исследований должны дать ответы на ряд вопросов о внутреннем строении горного массива, об его стратиграфическом и литологическом характере, об условиях залегания горных пород, а также о тектонике,

степени разрушенности пересекаемых пород (рис. 76).

При этом весьма важно установить глубину залегания, режим и качество подземных вод. Необходимо выяснить наличие подземных каверн и карстов, температуру пород и притекающих подземных вод на уровне проектируемого тоннеля и степень насыщенности пород водой. Особо следует решать вопрос о характере, величине и направлении ожидаемого горного давления.

При изучении горного массива в инженерном отношении тоннельщикам приходится сталкиваться с многообразными явлениями природы, которые в конечном счете оказывают влияние на выбор методов тоннелирования.

Так, например, может быть установлено, что породы залегают горизонтальными или наклонными пластами. Породы могут быть ненарушенными, когда они залегают в условиях первоначального их образования, и нарушенными. Тектонические процессы вызывают перемещение земной коры, и действующие в горизонтальном направлении силы создают сдвиги и складки. Силы, действующие в вертикальном направлении, образуют сбросы. Сбросы бывают косые, диагональные, продольные и поперечные, в зависимости от общего направления перемещения пластов, которое может происходить с разрывом отдельных частей.

Сброс является формой дислокации, которая очень часто встречается в практике. Сброс может находиться в группе небольших по величине побочных сбросов, идущих параллельно и образующих в совокупности зону разрушения. Установив при проходке направляющего штольневого хода зону разрушения, ее следует по возможности обходить даже за счет изменения трассы тоннеля.

Зона разрушения содержит обильное количество подземных вод, которые могут устремиться в штольневые разработки и вызвать затопление работ. Проходка в условиях нарушенных пород протекает с большими трудностями, и скорость продвижения забоя значительно понижается. При производстве взрывных работ в нарушенных породах эффект взрыва получается весьма слабым, так как газы — продукты взрывчатых веществ — устремляются по имеющимся тектоническим трещинам, не производя требуемого разрушения.

В практике проходки горных тоннелей на больших глубинах наблюдаются явления

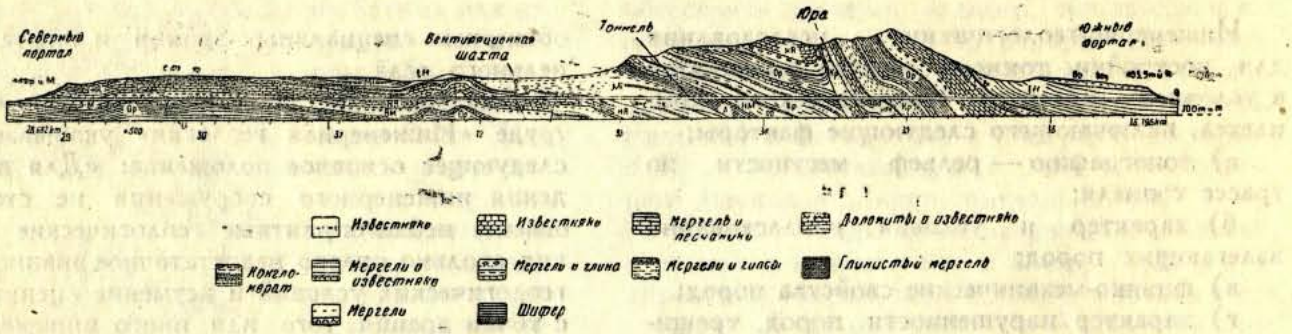


Рис. 76. Хаунштейнский тоннель (геологический разрез)

стреляния горных пород. При этом явлении, сопровождаемом грохотом и треском, наблюдаются отскакивание и отслоение тонких пластинчатых кусков породы, в большинстве случаев от боков выработок, в глубине горного массива. Так, на Тауэренском тоннеле в гранитогнейсах стреляние пород наблюдалось на глубине 1,2 *км* от поверхности на расстоянии 4 *км* от портала (рис. 77).

Явления стреляния горных пород наблюдались при проходке тоннелей Сен-Готардского (граниты, гнейсы), Караванкенского (известняки), Крабергского (песчаники) и особенно Симплонского (гнейсы); то же наблюдалось при проходке Стормкингского напорного тоннеля.

Изучение явления стреляния пород приводило к разноречивым выводам (Ротплец, Вейтгофер). В одних случаях по характеру деформации складывалось впечатление, что при стрелянии пород горный массив испытывает большие внутренние напряжения. Именно остаточные напряжения в неравномерно деформированной сфере тектонических нарушений горного массива могут проявиться в процессе проходки тоннеля в виде стреляния горных пород.

Однако обследования других мест выявили, что стреляние ограничено только наружной поверхностью выработок с отскакиванием и

отслаиванием отдельных плитообразных кусков породы при отсутствии глубинного процесса без проявления горного давления пород, в выработках остававшихся даже без временного крепления.

Устройством постоянной конструкции обделки явления стреляния пород в Симплонском и других тоннелях были полностью ликвидированы (рис. 78).

Особенно опасными для тоннельных сооружений являются сдвиги, происходящие вследствие взаимного скольжения одного пласта по другому. При сдвигах неизбежно развивается сильное боковое давление. В таких случаях приходится прибегать к устройству несимметричной тоннельной обделки усиленного типа с обратным сводом. Конфигурация несимметричной обделки устанавливается в соответствии с направлением бокового давления, вызванного сдвигом.

При пробивке тоннеля в породах, обладающих сланцеватостью, приходится вести борьбу с усиленным давлением этих пород.

Сланцеватость пород в разнообразнейших плоскостях и направлениях распространяется иногда на большие зоны.

В процессе проходки этих зон требуется усиленное крепление выработок. Кроме того, приходится вести борьбу с усиленным притоком подземных вод. Дебит этих вод в некоторых случаях является настолько большим, что может произойти аварийное затопление тоннельных работ.

Под давлением вышележащих слоев породы в определенных пластах происходят раздробление, сжатие, смятие и разрыв пород на мелкие обломки. Когда между этими обломками циркулируют подземные воды, увлекающие за собой и осаждающие различные продукты разрушения, в пустотах между этими обломками образуются так называемые дислокационные брекчии (брекчии трения), отличающиеся разнообразием своего сложения *(текстурой)*.

При производстве геотехнических изысканий особое внимание следует обращать на глубину залегания и характер напластования горных пород.

При рекогносцировочном осмотре скальных массивов и глыб часто создается ложное представление о действительном положении горных пород. Движение пород по плоскости напластований может образовать нагромождение кусков пород и обломочных отложений, При этом создается впечатление, что наблюдаемая местность состоит из коренных пород, покрытых лишь на поверхности обломочными породами. В действительности при пересечении подобных участков штольневыми разработками могут обнаружиться исключительно

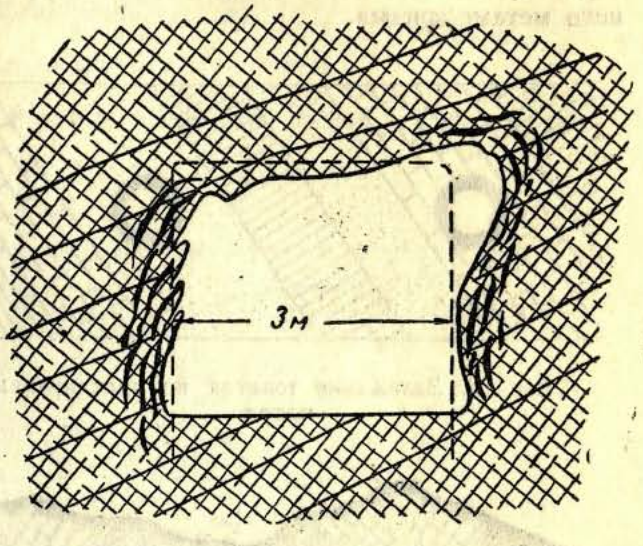


Рис. 77. Тауэренский тоннель (явление стреляния пород)

большие затруднения в отношении борьбы с горным давлением и подземными водами. Поэтому такие участки по возможности нужно обходить даже за счет значительного развития



Рис. 78. Симплонский тоннель (явление стреляния пород)

линий. Так, например, при горной проходке Лечбергского тоннеля под долиной р. Кандер был встречен участок разрушенных обломочных пород. В процессе проходки вода сильным потоком устремилась в штольневый забой, залила подземные выработки, что заставило

прекратить тоннельные работы и повести трассу тоннеля в обход.

Таким образом, в каждом отдельном случае зоны нарушенных пород должны быть изучены с точки зрения происходивших горнообразовательных процессов и глубинного метаморфизма.

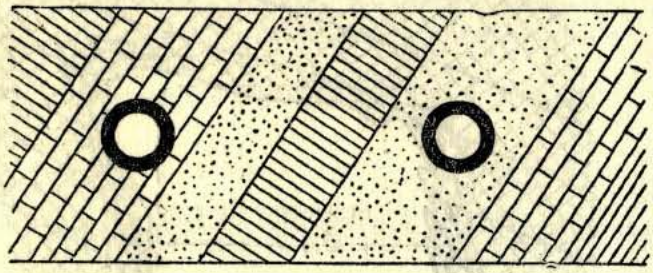


Рис. 79. Заложение тоннеля по простиранию пород

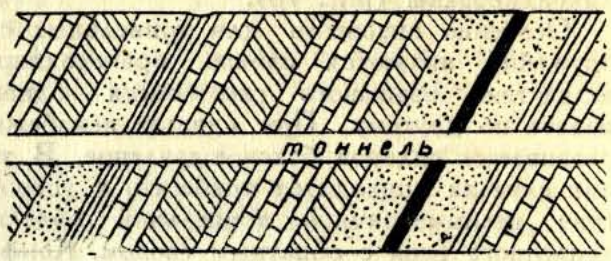


Рис. 80. Заложение тоннеля вкрест простирания пород

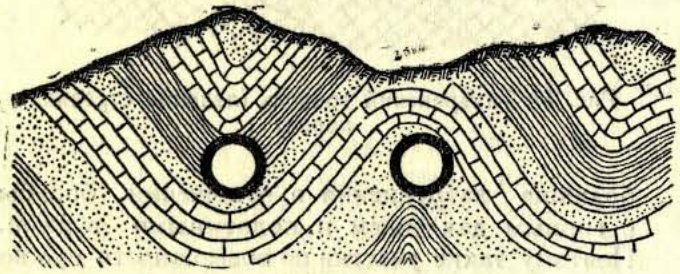


Рис. 81. Расположение тоннелей в ядре синклинали и ядре антиклинали

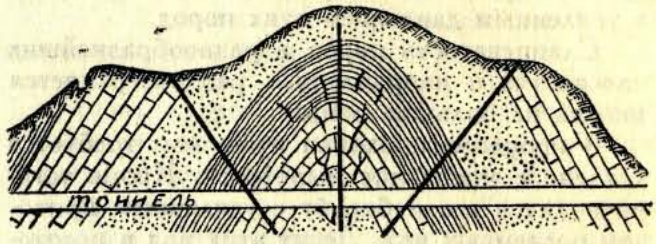


Рис. 82. Расположение тоннеля в круто падающей антиклинали

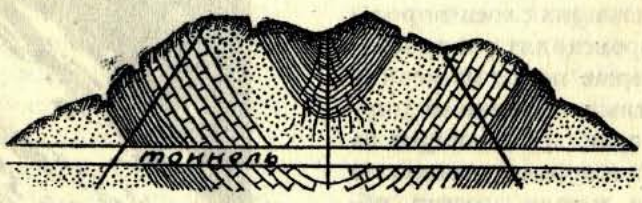


Рис. 83. Расположение тоннеля в круто падающей синклинали

При трассировании тоннеля и установлении глубины его заложения необходимо особо изучить расположение тоннеля по отношению к напластованиям пород (рис. 79, 80, 81, 82, 83).

Так, направляя тоннельный ход вкрест простиранию горных пород, при вертикальном падении слоев можно ожидать благоприятных условий проходки.

Направляя тоннель по простиранию пород, надлежит стремиться располагать последний в гребне антиклинали, где можно ожидать в связи с образованием разгружающего свода проявления значительно меньших размеров горного давления, чем при расположении тоннеля в синклинали.

В процессе сооружения тоннеля в синклинали водоносного горного массива можно ожидать более значительного притока подземных напорных вод, чем при проходке в гребне антиклинали.

Особо неблагоприятным следует считать заложение тоннелей по простиранию круто падающих водоносных пластов, где можно ожидать их взаимного сдвига.

Ведя тоннель по простиранию в условиях горизонтальных или слабо наклонных пластов, необходимо установить глубину заложения тоннеля (если это не противоречит основным условиям эксплоатации сооружения) с таким расчетом, чтобы проходка осуществлялась

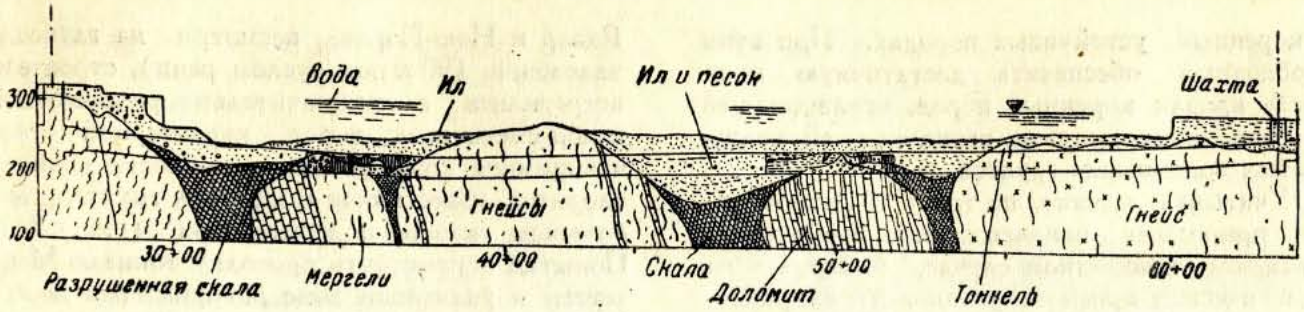


Рис. 84. Подводный тоннель под р. Ист-Ривер (геологический разрез)

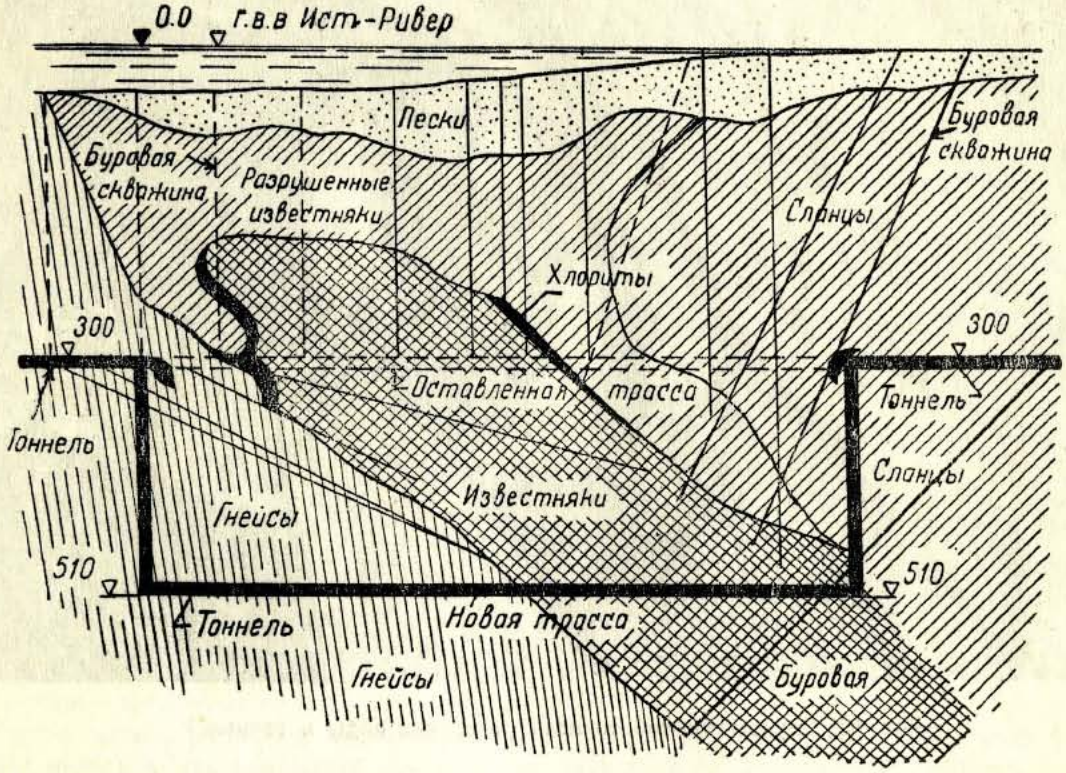


Рис. 85. Тоннель Менхеттен (геологический разрез с показанием положений оставленного и осуществленного тоннеля)

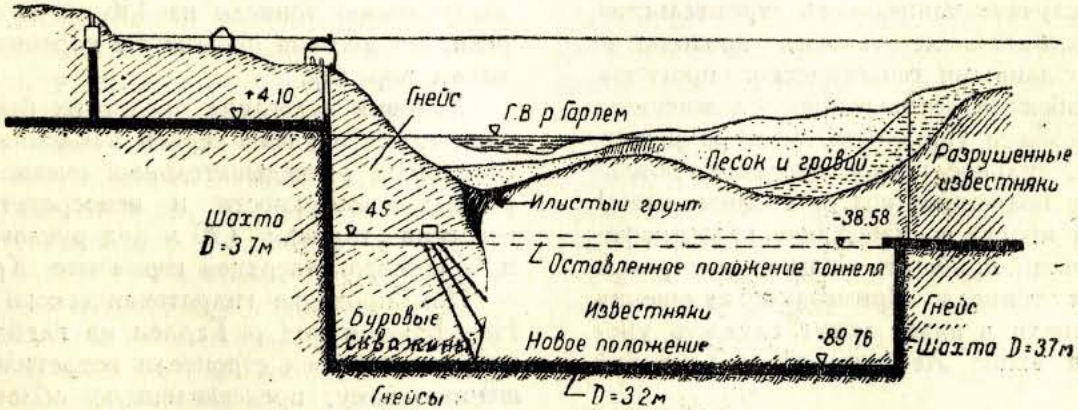


Рис. 86. Тоннель Нью-Кротон (геологический разрез с показанием положения первоначального и осуществленного тоннеля)

в коренных устойчивых породах. При этом необходимо обеспечить достаточную мощность кровли коренных пород, ограждающей от возможного прорыва вышележащей толщи слабых водоносных грунтов.

Учитывая, однако, пестроту и разнообразие природных напластований, необходимо в каждом конкретном случае, базируясь на геологическом прогнозе, установить направление тоннельного хода, наиболее благоприятное, с геотехнической точки зрения, для правильной ориентировки при проектировании трассы тоннеля.

В тех случаях тоннельного строительства, когда действительные условия проходки не совпадают с данными геологического прогноза, с целью избежать чрезвычайно осложненного режима проходки (например, зона разрушенных пород, сильное горное давление, обильный приток подземных вод, подземные газы) приходится иногда во избежание катастрофических явлений прибегать к изменению трассы и профиля тоннеля. Примерами изменения трассы тоннеля в плане могут служить упоминавшиеся выше Лечбергский и Таннский тоннели.

При сооружении напорного гидротехнического тоннеля диаметром 2,7 *м* под р. Ист-Ривер в Нью-Йорке, несмотря на глубокое заложение (90 *м* под руслом реки), строители встретились с исключительно разрушенной зоной смешанных пород, характерной отличающимися коэфициентами крепости сланцев хлоритов, известняков и илистых грунтов, при большом напоре и дебите вод (рис. 84). Попытки осуществить проходку тоннеля Менхеттен в указанной зоне разрушенных пород были сопряжены с огромной затратой

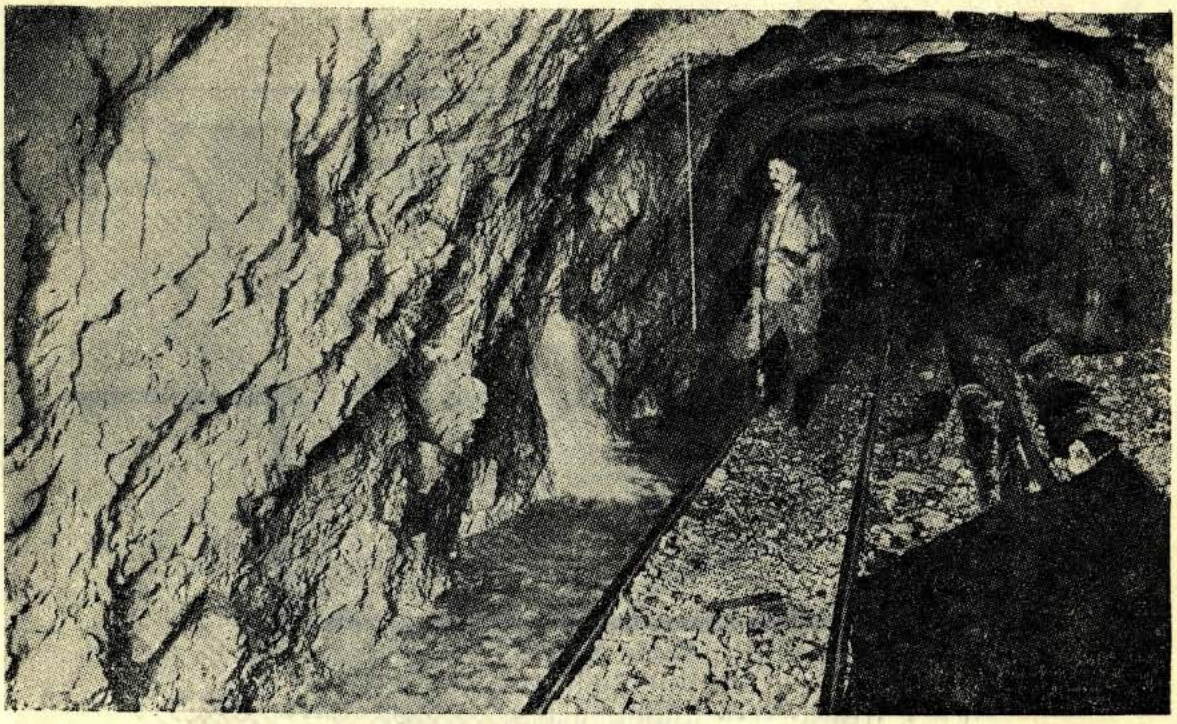


Рис. 87. Хаунштейнский тоннель (источник воды в тоннеле)

средств. Примененный для укрепления пород метод цементации полностью не разрешил задачи. В результате пришлось прибегнуть к заглублению тоннеля на 156 *м* под руслом реки, осуществив проходку в коренных устойчивых породах.

Условия залегания последних были предварительно изучены серией наклонных и вертикальных разведывательных скважин, забуренных с поверхности и непосредственно из участков тоннеля (90 *м* под руслом реки), пройденного в верхнем горизонте (рис. 85).

При проходке гидротехнического тоннеля Нью-Кротон под р. Гарлем на глубине 40 *м* под руслом реки строители встретили разрушенную зону, представленную обломочными породами, перемешанными с илистыми грунтами, при обильном притоке подземных вод.

Осложнения при проходке указанной зоны вынудили строителей заглубить тоннель еще на 50 *м* и осуществить проходку в коренных устойчивых породах в виде гнейсов и известняков (рис. 86).

При проектировании трассы тоннеля следует по возможности обходить напластования пород, включающие каверны, карсты. пещеры, так как последние неминуемо приводят к большим осложнениям в производстве работ, что сопряжено с чрезвычайным увеличением строительных расходов. Обычно при пересечении подземных пещер тоннелем происходят обвалы кровли.

В тоннельной практике при проходке встречаются пещеры, содержащие большое количество воды, которая стремительно затапливает подземные выработки (рис. 87, 88).

Подземные пещеры и каверны встречаются довольно часто в тоннельной практике и могут быть обнаружены геологическими обследованиями, которые базируются на применении новейших методов геологоразведочного дела. В частности, имеется в виду опытное применение теневых методов радиоволн. По мере усовершенствования этих методов они безусловно найдут широкое применение в тоннельном деле.

Пестрота и разнообразие природных условий залегания пород в горном массиве не дают возможности строго установить математические размеры сил горного давления пород, вскрытых выработкой. При определении величины горного давления в каждом отдельном случае требуется особый подход. На современном этапе развития тоннельной техники уже имеются определенные данные для строгого критерия и суждения о доминирующих факторах горного давления.

Эти факторы оказывают реальную помощь при установлении типа тоннельной конструкции и метода производства работ.

На величину горного давления оказывает влияние присутствие подземных вод. В зависимости от физико-механических свойств пород вода может явиться фактором, разрушающим горные породы, вызывающим явления пучения, выплывов, скольжения и перемещения пластов. Большие затруднения возникают при пересечении тоннелем глинистых грунтов. При этом могут быть явления пучения и поддувания под действием воды. Эти явления Терцаги объясняет наличием сил поверхностного натяжения и действием отрицательного гидростатического давления, проявляющегося в глинистом пласте. При величине поверхностного натяжения, равной нулю, когда вода полностью покрывает поверхность глинистого материала, и в присутствии отрицательного гидростатического давления внутри



Рис. 88. Симплонский тоннель (источник воды, прорвавшейся в штольню после взрыва)

грунта последний поглощает воду (при определенной величине разности указанных давлений),— глина начинает «дышать».

Присутствие воды может создать такое положение, которое граничит с потерей условий равновесия грунтового массива, причем горное давление чрезмерно повышается. В этом случае настоятельно требуется наличие специальной технической вооруженности строителя [1].

С большой осторожностью должны вестись тоннельные работы при указании на возможность встречи с подземными газами: гремучий газ, метан (CH_4), углекислота (CO_2), окись углерода (CO), сернистый газ (SO_2), сероводород (H_2S) и др. Необходимо точно установить химический состав газов, процентное их содержание в воздухе в забоях

[1] Вопрос о горном давлении специально рассматривается в главе XXI.

и степень вредного влияния на рабочих и на условия безопасности ведения тоннельных работ. «Газовые мешки», прорезанные при проходке Апеннинского тоннеля в Италии, явились причиной пожара с большими человеческими жертвами. В процессе проходки должны быть поставлены тщательные наблюдения и проведены необходимые исследования проб воздуха из рабочих забоев с учетом специфичности работ в условиях газового режима. С целью предупреждения случаев отравления рабочих, взрывов и подземных пожаров должна быть установлена надлежащая искусственная вентиляция, сигнализация и приняты необходимые технические меры предосторожности, обеспечивающие полную безопасность ведения тоннельных работ в обстановке выхода подземных газов.

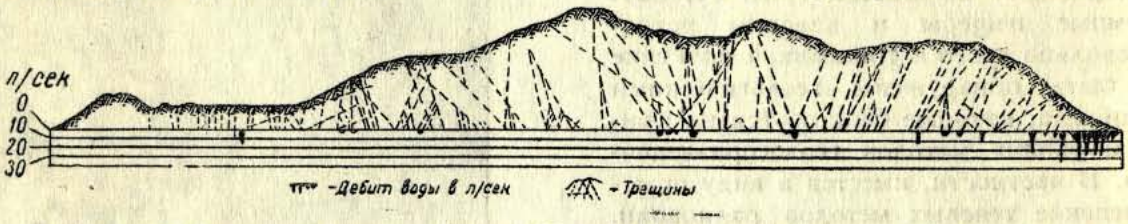


Рис. 89. Сен-Готардский тоннель (схема Штапфа с показанием трещин и притока воды по трассе тоннеля)

При проектировании тоннеля для установления типа конструкции обделки и метода проходки является совершенно необходимым знание литологического состава горных пород, пересекаемых тоннелем. Для этого при проведении инженерно-геологических исследований необходимо всесторонне изучить основные физико-механические свойства пород.

Надлежит выявить крепость, пористость, размягчаемость и пластичность пород. При этом учитывается степень выветриваемости и трещиноватости пород.

Характеристика структуры и физико-механических свойств горных пород устанавливается, базируясь на специальных данных Терцаги (механика грунтов), Аттерберга, Преклина, Протодьяконова, Розиваля, Риннэ, Суханова.

Крепость породы в зависимости от структуры устанавливается по шкале Протодьяконова, по величинам сопротивления пород механическому воздействию сжатия, изгиба и растяжения.

Крепость породы характеризуется также по буримости (Суханов), выявлением степени сопротивления породы при выбуривании из нее образца (скорость бурения). О твердости породы можно судить по шкале Мооса или по Розивалю в процентах твердости корунда. Так, например, твердость гранитов составляет от 30 до 70% твердости корунда, а базальтов 20—35%.

Вопрос об определении коэфициента крепости породы является кардинальным параметром для проекта, от правильности определения которого во многом зависят основные элементы организации, производства и механизации работ. Величина коэфициента крепости определяет характер буримости, взрываемости породы и степень влияния горного давления на разработки.

Базироваться на коэфициенте крепости, установленном по временному сопротивлению кернов, взятых из буровых скважин и испытанных в лаборатории, не всегда представляется возможным. Действительные условия крепости пересекаемого массива резко разнятся от данных крепости образцов пород, испытанных в лаборатории, где не могут быть достаточно учтены природные факторы, обусловливающие характеристику крепости пород горного массива.

Наиболее правильно коэфициент крепости определяется практически, при пробивке направляющего хода.

Опыт проходки в известняках тоннелей Московского метрополитена доказал, что крепость породы в пределах вскрытого забоя разнится более чем на 300%.

Так, например, при крепости пласта в 300 *кг/см*^{2} имеются включения известняка с временным сопротивлением до 1 000 *кг/см*^{2}.

Пористость пород (учитывая наличие в них пор и трещин) устанавливается как отношение объема пустот к полному объему породы.

Трещиноватость пород, обусловливающая устойчивость и водопроницаемость пластов горного массива, характеризуется по Гарлею при подразделении на 5 групп, по взаимному расположению трещин (от 50 до 1 200 *мм*) по поверхности образца породы. Для установле-

ния степени трещиноватости пород и дебита вод по трассе тоннеля составляются специальные диаграммы и схемы трещиноватости (Штапф) (рис. 89). Пластичность пород, как указывает Аттерберг, определяется по пределам пластичной консистенции.

Размягченность пород устанавливается по Преклину как отношение величин сопротивления образцов пород, насыщенных водой, сжатию, растяжению и скалыванию к подобным величинам сопротивления высушенных образцов пород.

Обычно коэфициент размягчаемости меньше единицы и находится в зависимости от того, насколько от пребывания образца в воде понижаются величины сопротивления породы механическому воздействию.

Особое внимание надлежит уделить характеру ожидаемого явления выветривания горных пород вследствие химического и механического воздействия атмосферных агентов. Это обстоятельство имеет первостепенное значение при установлении прогноза, возможно ли оставить тоннельную выработку без искусственной одежды.

ГЕОТЕРМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОД В ЗОНЕ ЗАЛОЖЕНИЯ ТОННЕЛЯ

Одним из сложных вопросов, возникающих при прокладке горных тоннелей, является установление величины максимальной температуры горных пород, которая ожидается в процессе проходки. При даче такого прогноза приходится учитывать весьма осложненные соотношения разнообразнейших природных факторов (условия залегания и характер строения горного массива, теплопроводность пород, величина нисходящих и восходящих подземных вод и источников, наличие пустот, вулканических образований и другие местные особенности пересекаемого горного массива).

В тоннельной практике установилось много гипотез, объясняющих первопричины возрастания температуры земли по мере углубления в ее недра. Все эти гипотезы, однако, являются пока весьма проблематичными.

На практике увеличение температуры в глубь земляного массива измеряется так называемым геотермическим градиентом, выражающим глубину в *пог. м*, при которой обнаруживается увеличение температуры на 1°. В тоннельной практике руководствуются иногда и геотермической ступенью, которая выражает увеличение температуры в градусах при углублении на 100 *м*. Размеры геотермического градиента находятся в зависимости от топографии местности, условий залегания пород, водоносности и особенно от теплопроводности пород, пересекаемых тоннельной выработкой. Коэфициенты теплопроводности некоторых пород приведены в табл. 5.

Таблица 5

Коэфициенты теплопроводности пород

Горные породы	Коэфициент теплопроводности
Базальт	0,0032—0,0067
Сланцы глинистые	0,0019—0,0030
Гранит	0,0004—0,0097
Песок кварцевый	0,0003—0,0013
Песчаник	0,0024—0,0307
Порфир	0,0083

Породы, насыщенные водой, обычно увеличивают размеры геотермического градиента. Геотермический градиент понижается в рыхлых, мерзлых и сухих породах, которые являются относительно плохими проводниками тепла. Понижение геотермического градиента наблюдается также в случае «прохождения» в породах химических процессов. Зависимость между водоносностью горных пород и температурой установлена Геллером (при сооружении Караванкенского тоннеля). Наличие подземных газов, в частности метана (CH_4), значительно повысило температуру в Риккенском тоннеле (до 66,5° С).

Опыт постройки ряда альпийских тоннелей показал, что в случае обнаружения в разведывательной штольне резкого понижения температуры следует ожидать прорыва подземных вод. В таких случаях необходимо провести соответствующую подготовку и ряд технических мероприятий для предупреждения и локализации всех осложнений, которые могут быть связаны с этим прорывом.

На величину геотермического градиента в значительной степени влияет также и характер напластований пород. Кенигсбергер дает следующие величины геотермического градиента для слоистых пород в зависимости от положения пластов:

сланцы, при крутом падении пласта	24—27
сланцы, при падении под углом 45°	28—29
гнейсы, при крутом падении пласта	35—37
гнейсы, при падении под углом 45°	30

В период изысканий температура пород может быть определена при помощи термометров различных систем, опускаемых непосредственно в буровые скважины. Для определения геотермического градиента пород горного массива, пересекаемого тоннелем, над последним необходимо установить ряд термостанций.

При определении ожидаемой в тоннеле температуры следует учитывать среднюю годовую температуру на поверхности (над тоннелем), абсолютную высоту местности, а главное, величину геотермического градиента. Величины максимальной температуры, обнаруженной в процессе сооружения крупных горных тоннелей, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Максимальная температура горных пород, обнаруженная при строительстве тоннелей

Элементы	Тоннели						
	Мон-Сени	Сен-Готардский	Симплонский	Арльбергский	Лечбергский	Сурамский	Апеннинский
Протяжение тоннеля (в *км*)	12,84	14,98	19,73	10,24	14,53	3,99	18,50
Максимальная температура (в градусах С)	29,50	30,80	55,70	18,50	34,20	20,50	63,00
Толща горного массива над тоннелем (в *м*)	1654,00	1700,00	2140,00	720,00	1560,00	510,00	2000,00

Температура почвы воздушной части тоннеля определяется на основании температуры воздуха данной местности, учитывая аэротермический градиент.

Для перехода от температуры воздуха к температуре почвы воздушной части тоннеля в зависимости от его высоты над уровнем моря Кенигсбергер, основываясь на опыте строительства ряда альпийских тоннелей, дает специальную таблицу поправок (табл. 7).

Таблица 7

Поправки к температуре воздуха в зависимости от высоты над уровнем моря (по Кенигсбергеру)

Высота над уровнем моря (в *м*)	Поправки к температуре воздуха (в градусах С)
0	0,80
500	1,00
1 000	1,30
1 500	2,10
2 000	2,30
3 000	3,00

Геотермический градиент для ряда горных массивов установлен в следующих величинах (в *м*):

Симплон (Альпы) 43,50
Сен-Готард (Альпы) 44,00
Сурам (Кавказ) 44,73
Архотский перевал (Кавказ) . . . 45,00
Мон-Сени (Альпы) 50,00

Имея для данной местности величину геотермического градиента T, среднюю годовую температуру воздуха $t_в$ и зная глубину слоя постоянной температуры C, представляется возможным предварительно определить ожидаемую температуру пород τ на данную глубину h заложения тоннеля:

$$\tau_h = t_в + \frac{h - C}{T}.$$

Для определения ожидаемой температуры пород на требуемой глубине применяется также эмпирическая формула Штапфа, базирующаяся на параметрах, установленных при исследовании этого вопроса в период сооружения Сен-Готардского тоннеля:

$$\tau_h = \sqrt{41{,}6593 - 0{,}1517\,h + 0{,}0001195\,h^2} + 6{,}45 + 0{,}0106\,h + t_в \pm 2{,}5.$$

Величина температур пород, залегающих в горном массиве, может быть изображена графически, путем построения геоизотерм. Кенигсбергер на основании своего опыта рекомендует порядок построения этих кривых равных, постоянных температур (рис. 90 и 91).

По оси трассы прокладываемого тоннеля выделяется полоса шириной в 4 *км* (по 2 *км* в обе стороны от оси). Размеры этой полосы в каждом отдельном случае зависят от рельефа местности. Через каждые полкилометра по трассе тоннеля составляются поперечные профили, и вычисленные средние ординаты откладываются на продольном тон-

нельном профиле. Соединением отложенных ординат получается корректированное очертание продольного разреза по тоннелю. Затем, исходя из величины аэротермического градиента, средней температуры воздуха и пользуясь таблицей Кенигсбергера, вычисляют температуру почвы воздушной части тоннеля. После этого устанавливаются размеры геотермического градиента для данного сечения

Габасский тоннель железнодорожной линии Дак-Пьюс, тоннель под Уфалейским хребтом Московско-Казанской железной дороги, Граммонский тоннель и другие. Помимо осушения водообильных массивов дренажем, иногда имеется возможность прорезать водоносный пласт, осушить его и тем предотвратить внезапный прорыв при ведении тоннельных работ по основной трассе. Ярким примером,

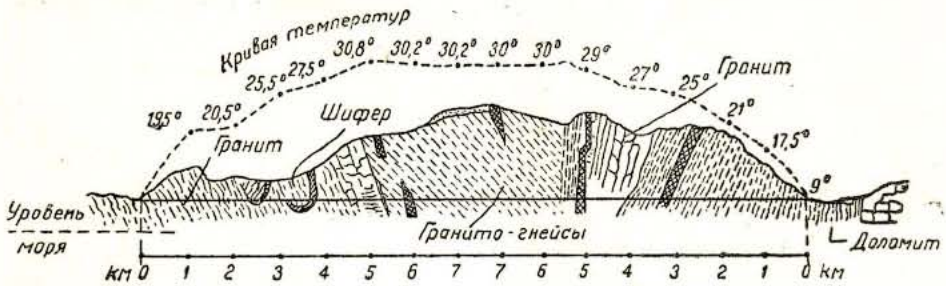


Рис. 90. Сен-Готардский тоннель (геологический разрез и кривая температур)

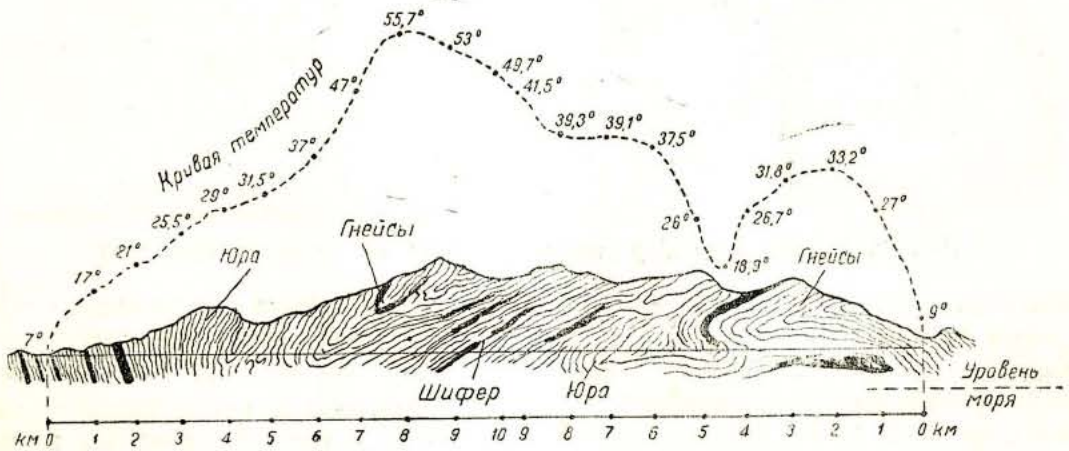


Рис. 91. Симплонский тоннель (геологический разрез и кривая температур)

горного массива и строится сеть изогеотерм, характеризующих распределение температур горного массива, пересекаемого тоннелем.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

Вопрос о режиме подземных вод по трассе прокладываемого тоннеля имеет первостепенную важность. В зависимости от водосбильности пересекаемого массива иногда до начала основных тоннельных работ выявляется необходимость прорезать породы по трассе системой дренажных галлерей для перехвата и отвода вод. Примерами могут служить

характеризующим возможность встречи с водоносными пластами громадной мощности, является проходка тоннеля Кильсби в Великобритании, на Бирмингамской железной дороге. При удалении забоя на 160 *м* от западного портала был встречен водоносный пласт, из которого стремительно прорвалась вода под большим напором и заставила приостановить строительные работы на 10 месяцев. Расход воды достигал 6 000 *л/сек*, причем до момента начала работ было удалено до 3 500 000 $м^3$ воды. При сооружении Гренхенбергского тоннеля из подземных пещер в течение четырех месяцев было выкачано до 6 000 000 $м^3$ воды.

На рис. 92 показана схема подземной пещеры, встреченной при проходке двухпутного железнодорожного тоннеля. Буквенная разметка на схеме дана для пояснения характера и конфигурации пещеры.



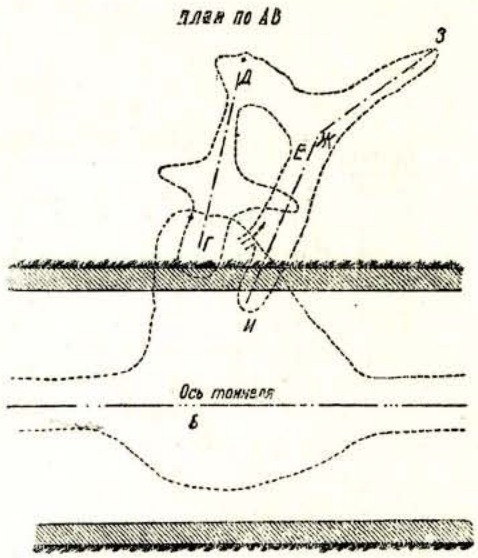


Рис. 92. Тоннель Мон д'ор (карст, пересеченный во время проходки)

Во французской тоннельной практике известен исключительный случай уничтожения части железнодорожной линии вместе с тоннелем у форта Эклюз. Катастрофа произошла в результате поднятия воды в подземном озере: вода под напором пришла в тоннель через трещину, которая до прокладки тоннеля была совершенно сухой (рис. 93).

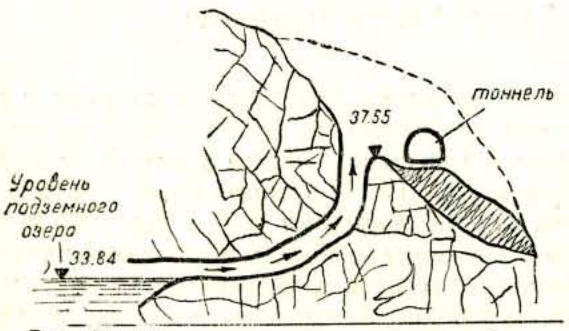


Рис. 93. Подземное озеро у тоннеля форта Эклюз

Подземные воды, прорывающиеся под напором, лучше всего удалять через систему галлерей («вассерштолен») или через специальные канавы в выработке. В отдельных случаях может быть устроено заграждение, преграждающее выход вод. Некоторые подземные источники иногда «глушатся» цементом или другими материалами, причем необходимо учитывать степень водопроницаемости окружающих пород. Дело в том, что вода, задержанная в одном месте, может найти выход в другом направлении и произвести неожиданное затопление работ.

При пересечении водоносных грунтов, представленных крупнозернистыми песками, гравием и галькой, которые не могут быть увлечены потоком подземных вод под действием водоотлива, опасаться каких-либо особых осложнений в производстве работ не приходится. Весь вопрос в этом случае сводится к установлению фильтров и водоотливных, насосных агрегатов соответствующей мощности. По Терцаги, правильный процесс обезвоживания грунтового массива крупнозернистых песков не вызывает никаких перемещений и осадок поверхности, если в процессе водоотлива не происходит выноса взвешенных и илистых частиц. Поэтому в данном случае при правильном ведении работ не приходится опасаться за целость и сохранность поверхностных сооружений, а также и за крепление тоннельных выработок. При выносе же частиц породы создается реальная угроза аварийных явлений

с сооружениями на поверхности и обрушения крепей. Последнее имеет прямое отношение к плывунным грунтам, у которых тонкозернистые частицы, коллоидно связанные с водой, обладают большой водоудерживающей способностью и свойствами значительной подвижности и текучести (Терцаги, Аттерберг).

Установлено, что опасность прорыва тем больше, чем мощнее пласт прорезаемого плывуна.

Давление плывунных грунтов на крепи поддается вполне определенному расчету гидростатики. Характеристика плывуна, вернее точное его определение, до сих пор дается рядом специалистов по-разному (Джилит, Кеглер, Винклер, Терцаги). По Терцаги, песок-плывун — разжиженный, тонкозернистый грунт — не подчиняется законам теории давления земли, не держит откоса, а расплывается, как кашицеобразная масса. Песок-плывун обладает значительной подвижностью и, будучи насыщен напорной водой, подвержен действию выпирания. Плывун обладает практически ничтожной степенью водоотдачи. Таким образом, приведенные свойства плывуна в сумме представляют условия, вызывающие особые затруднения для строителей. При значительной мощности плывуна обычные методы тоннелирования становятся безнадежными, и приходится вводить специальные приемы (например, замораживание, сжатый воздух, химическое укрепление), которые в определенных случаях меняют коренным образом структуру и физико-механические свойства плывуна и создают благоприятную обстановку для успешного тоннелирования.

Как указывалось выше, при пересечении сильно водоносных массивов прибегают к специальным дренажным работам подземного характера еще до начала основных тоннельных работ. В зависимости от условий напластований водоносных пород и градиента подземных вод пробивают систему дренажных галлерей, которые иногда могут заполняться камнем. Таким образом, созданием в массиве ряда дренажных трактов удается перехватить подземные воды и вести основные тоннельные работы по трассе без значительного притока вод.

Дренажные галлереи, если это представляется возможным в местных условиях, лучше всего не закладывать камнем, так как со временем камни затягиваются илистыми частицами и не дают впоследствии требуемого дренажного эффекта. Дренажные галлереи применимы при тоннельных работах в условиях крупнозернистых песков, легко отдающих воду.

Помимо борьбы с подземными водами, которую приходится вести во время проходки тоннелей, необходимо учитывать также влияние воды на конструкцию и изоляцию тоннельной обделки в период эксплоатации. Этот вопрос разрешается применением для обделки чугуна, бетона, кирпича, а для изоляции — свинца, «раста», битуминозных веществ.

В то время как при сооружении городских тоннелей, например метрополитенов, стремятся к полной изоляции тоннеля от проникания воды, в практике сооружения горных тоннелей очень часто встречаются такие конструкции каменных тоннельных обделок (с дренажными окнами), когда вода непрерывно поступает из окружающего массива непосредственно в тоннель и удаляется по уклону водоотводным лотком или через водоотливные установки. В зависимости от характера окружающих пород подобное дренирование как будто не вызывает особых осложнений, однако изучение повреждений ряда эксплоатируемых горных тоннелей показало, что вода, проходя через дренажные окна, нарушает окружающий горный массив. Тоннель является как бы «зияющей раной» в горном массиве. В зависимости от физико-механических свойств горных пород, слагающих данный массив, происходит непрерывный процесс перемещений, изменяющих режим горного давления. В некоторых случаях подземная вода, протекая в тоннель, вымывает горные породы, что приводит к образованию «куполов» над тоннелем. В результате этого возможно «проявление» динамических ударов вследствие обрушения пород над конструкцией тоннеля. Тоннельная обделка, не рассчитанная на такие удары, может быть повреждена (вплоть до ее обвала). В связи с этим в настоящее время советские и иностранные специалисты относятся отрицательно к сооружению тоннелей с дренажными окнами и указывают на необходимость применения герметических (замкнутого контура) тоннельных обделок, не допускающих проникновения воды непосредственно в тоннель. Особо решается сооружение тех участков тоннелей, которые пересекают большие подземные потоки, требующие своего специального отвода с целью снятия гидростатического напора с конструкций тоннельной обделки, которая не должна работать в качестве подземной плотины.

Особая осторожность должна быть принята при подходе к местам, содержащим подземные активные карсты, где возможен местный внезапный большой прорыв подземных вод под напором.

При постройке Монд'орского тоннеля были встречены большие пещеры и карсты, которые давали дебит вод до 10 000 *л/сек*. В Симплонском тоннеле было встречено до 237 водных источников, как холодных (до + 10° С), так и горячих (до + 48° С) под большим давлением; при этом дебит вод доходит до 1 200 *л/сек*. В Холливелском тоннеле (Англия), который автор изучал во время заграничной командировки в 1933 г., дебит вод в период проходки достигал 67 000 *л/мин*. На отдельных шахтах по трассе подземного кольца 4-й очереди строительства Московского метрополитена приток подземных вод в тоннельные выработки достиг 2 500 *м*³/*час* (рис. 94) . Приходится также опасаться и больших каменных глыб, которые могут в связи с нарушением равновесия неустойчивых пород перемещаться и оказывать значительное сосредоточенное местное давление на конструкцию тоннельной крепи. После появления обвала должно быть произведено немедленно тщательное ограждение места катастрофы и приняты самые срочные технические меры против возможного распространения зоны обрушения путем усиления соответствующих тоннельных креплений, постановки ряда перемычек, подпорных стен и столбов, вплоть до заполнения сечения тоннельной обделки каменной кладкой или «кострами».

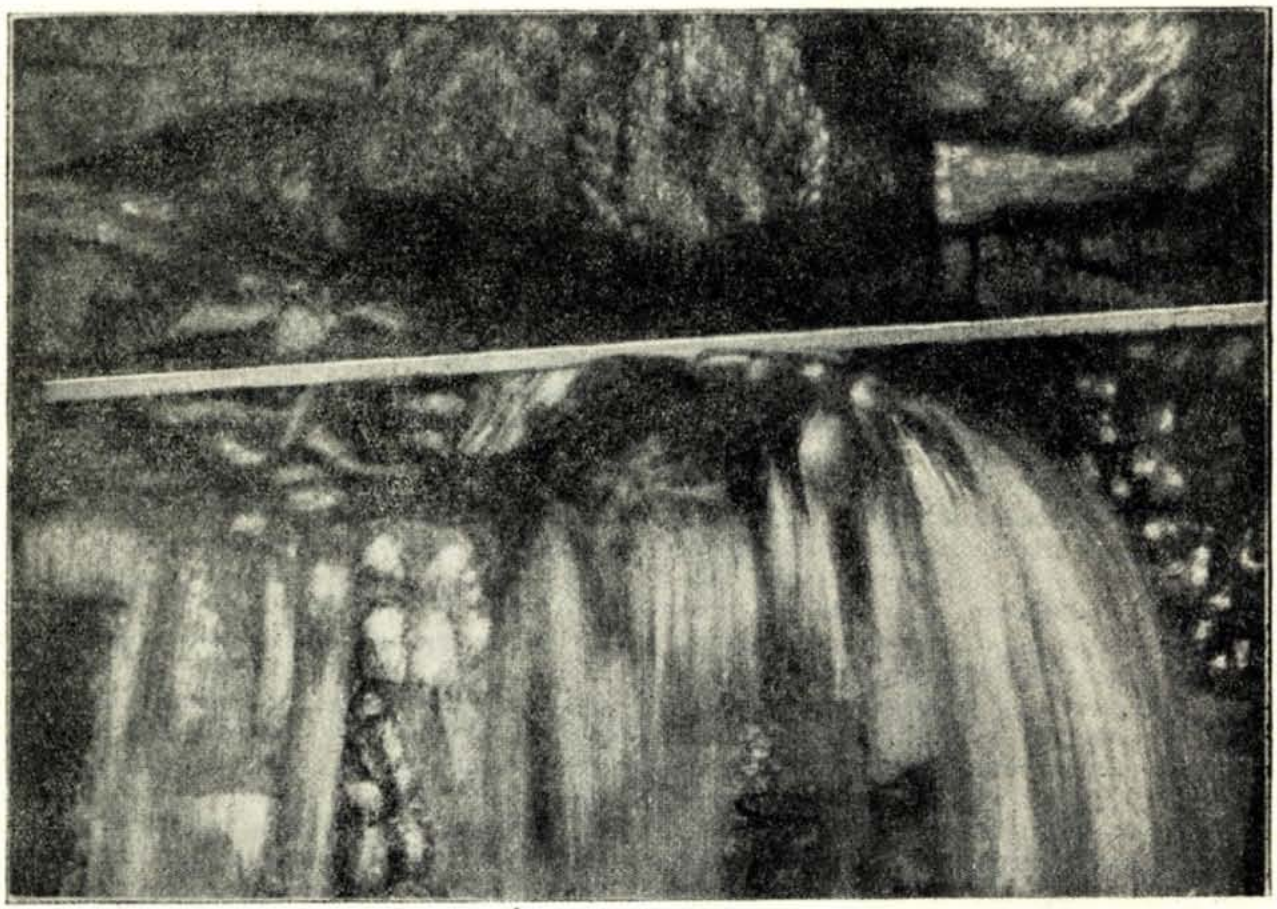


Рис. 94. Вода в забое при проходке

Обвал и деформации тоннельных обделок могут произойти как по причинам изменения режима горного массива, в котором заложен тоннель, так и от качества тоннельной обделки. Конструкция обделки сооружения под влиянием внешних агрессивных факторов может претерпеть со временем ряд деформаций и повреждений.

В тех случаях, когда приток подземных вод, дренируемый за сводом, может выносить и выщелачивать окружающую породу, за тоннельной обделкой неминуемо образуются пустоты и происходит общий сдвиг грунтовых масс. Под действием неравномерного горного давления может произойти значительная деформация тоннельной обделки. Весьма часто под влиянием установившегося тока подземных вод окружающие тоннель ранее твердые породы могут превратиться в разжиженные, проявляющие усиленное горное давление, на которое обделка не рассчитана. Так, например, в тоннельной практике имели место случаи, когда порфиры и сланцы под действием вод и химических факторов превращались в глинистую мягкую массу.

Повреждения тоннельной обделки очень часто происходят под влиянием агрессивного действия вод, разъедающих цементный раствор в кладке и значительно ослабляющих тело тоннельной обделки.

В существующих обделках горных тоннелей устроены дренажи, забутка из сухого камня и дренажные трубы. Но эти дренажи спустя некоторое время засоряются. Вода, не находя выхода, производит гидростатическое давление на каменную обделку и, просачиваясь через нее, вымывает раствор каменной кладки, что значительно ослабляет несущую способность тоннельной обделки. В результате интенсивного действия подземных вод образуются значительные пустоты и полые пространства за тоннельной обделкой, приводящие к обвалам.

Для оздоровления тела кладки тоннельной обделки применяют каптаж подземных вод и отвод их по специальным трубам, уложенным в стенах тоннеля (при прокладке специальных галлерей позади стен тоннельной обделки, доступных для осмотра). Однако этот способ требует дорогостоящих работ и не всегда оправдывает себя на практике.

Указанное мероприятие по прокладке дренажных галлерей может носить временный характер. По мере засорения, закупорки дренажей вода находит себе совершенно другой выход, новые тракты и минует, таким образом, дренажные сооружения, на которые произведены определенные капитальные затраты, ничем, следовательно, не оправданные. Прокладка дренажных галлерей может иногда привести и к отрицательным результатам. Так, продольная галлерея, проложенная в тоннеле Кантей на линии Париж — Страсбург с внешней стороны свода тоннеля, каптировала воды из вышележащих источников горного массива. В результате пробивки этой дренажной галлереи значительно увеличился приток поступающей в тоннель воды по сравнению с дебитом воды, поступавшей в тоннель до пробивки дренажной галлереи.

В некоторых случаях одним из лучших мероприятий является устройство поверхностного дренажа, расположенного непосредственно над тоннелем. Это достигает цели в том случае, когда имеется непосредственное соединение поверхностных вод с подземными.

Наиболее эффективным техническим мероприятием, принятым в последнее время в СССР и за границей, является полная изоляция тоннеля от воды путем нагнетания цементного раствора за обделку. Нагнетанием цемента в значительной степени укрепляется тело тоннельной обделки (в особенности когда качество каменной обделки является неудовлетворительным) и заполняются пустоты, образуемые в период производства работ и в период действия подземных вод.

* * *

При производстве инженерно-геологических изысканий выявляются все основные данные геологии и гидрогеологии, служащие базой для дальнейших геотехнических обобщений. От правильности последних зависит успех проектирования и предстоящего строительства тоннеля. Неправильность оценки геотехнических условий приводит не только к излишним капитальным затратам на работы по реконструкции, но иногда связана с авариями и обвалами тоннеля. В зависимости от местных топографических и геологических условий пересекаемого массива, протяженности и глубины залегания проектируемого тоннеля изыскания проводятся различными приемами: бурением, шурфованием и наблюдением обнажений пород. Наиболее ценные данные получаются при проходке шахт и опытных штолен разведывательного порядка.

За последнее время наблюдается тенденция к применению геофизических методов разведки для тоннельно-строительных целей. Эти методы включают:

а) метод электроразведки, при котором разновидности пород определяются по степени их электропроводности;

б) магнитометрический метод, при котором характеристика залегающих пород дается на

основании наблюдений над аномалиями магнитной стрелки;

в) гравитационный метод, основанный на изучении изменения силы тяжести в соответствии с изменением характера залегающих пород;

г) сейсмометрический метод, основанный на наблюдениях за упругими колебаниями горной среды под влиянием действия искусственного сотрясения.

Каждый из этих методов может дать до некоторой степени общее освещение физических свойств залегающих пород, степени их разрушенности, а также указать на подземные пещеры, активные карсты. В частности, наиболее распространенные за последнее время геофизические методы электроразведки, выявляющие характер горных пород, их водоносность, являются дополнением к методам бурения и поверхностного обследования.

Горные породы в сухом состоянии являются плохим проводником электричества; при водоносных породах наблюдается хорошая электропроводимость.

Так, не нарушенные трещинами породы — граниты, мраморы и гнейсы — содержат незначительный процент влаги и обладают сопротивляемостью, выражаемой 200—2 000 Ω в то время как нарушенные трещинами известняки и мергели отличаются значительной электропроводимостью, обладая сопротивляемостью в 10—30 Ω.

Метод электроразведки дал вполне удовлетворительные результаты при изысканиях тоннеля Бридж — Ривер на Тихоокеанской железной дороге (США).

Следует отметить, что приведенные выше геофизические методы разведки пока еще далеки от совершенства, но они имеют все данные для своего развития.

При проведении инженерно-геологических изысканий в связи с сооружением тоннелей приходится считаться с характером пересеченности местности, с горным рельефом, наличием ледников, вечных снегов, осыпей, глубоких ущелий, учитывая глубину заложения (вершинного или базисного) тоннеля. При глубине заложения более 0,5 *км*, как это имеет место в трансальпийских тоннелях, ограничиваются геологической съемкой и геофизическими изысканиями, выявляя определенный геологический прогноз для целей проектирования и постройки тоннеля.

При глубоком заложении тоннеля, от 100 *м* до 0,5 *км*, при доступности горного района возможно, кроме геофизических методов разведки, применить бурение вертикальных и наклонных разведочных скважин. Так, например, геологические условия проходки Таннского тоннеля (Япония) выявлены на основе данных четырех буровых скважин. Скважины глубиною более 200 *м* каждая пройдены преимущественно через андезито-базальты алмазным бурением.

При сооружении тоннелей, заложенных на глубину менее 100 *м*, и в частности городских тоннелей (метрополитены и коммунальные тоннели) применяются разведочное бурение, шурфы, штольни, дающие в результате инженерно-геологических исследований совершенно исчерпывающие данные, необходимые при проектировании и постройке тоннелей.

Особо высокие требования предъявляются к инженерно-геологическим и гидрогеологическим изысканиям при сооружении подводных тоннелей.

Наиболее ценные данные, необходимые для корректировки изыскательских и проектных материалов, получаются при надлежащей постановке и проведении исследовательских работ в разведывательной галлерее. На основании этих данных в геологический профиль вносятся коррективы в части характера напластований пород, местоположения контактных зон; производится уточнение физико-механических свойств пород, пересекаемых штольней; изучается режим подземных вод, которые иногда особенно сильно осложняют работы и оказывают решающее влияние на успешность проходки; производится химический анализ воды на предмет выявления степени ее влияния на материалы обделки. При наблюдении за поведением крепления разведывательной штольни дается заключение об ожидаемом горном давлении.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОННЕЛЕЙ В ПЛАНЕ И ПРОФИЛЕ

Трассирование линии должно вестись с таким расчетом, чтобы проектируемое тоннельное сооружение (горный или подводный тоннель) было построено в максимально благоприятных геотехнических условиях, при минимальных затратах на строительство, с учетом условий будущей эксплоатации.

Следует отметить, что отказ от строительства тоннеля в горной местности часто приводит к созданию трассы, обреченной на весьма тяжелые условия эксплоатации, содержащей кривые малого радиуса и большие подъемы.

Проектирование продольного профиля тоннеля ведется в соответствии с топографическими и геотехническими условиями. Необходимо стремиться к заложению тоннеля в устойчивых породах при надежной кровле

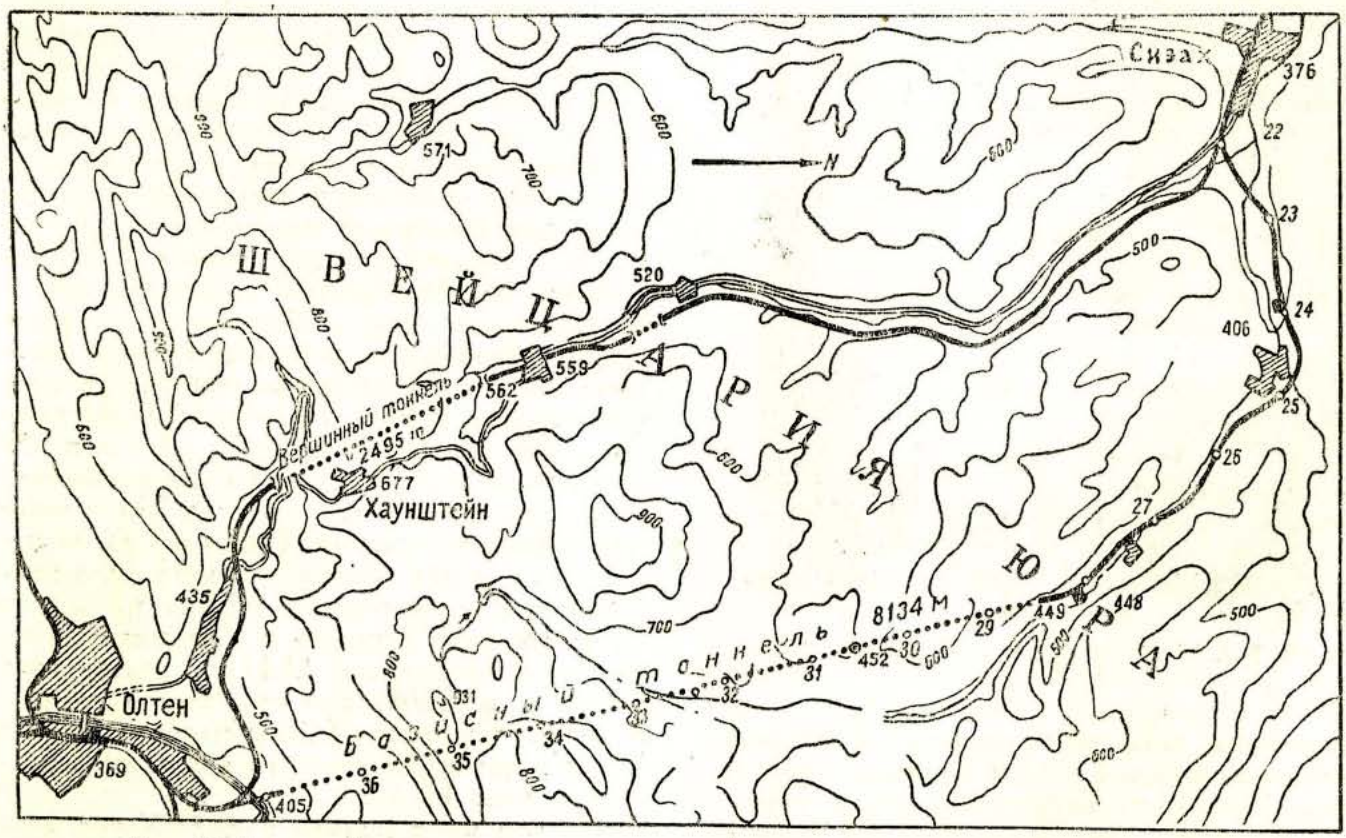


Рис. 95. Хауншгейнские тоннели (план расположения вершинного и базисного тоннелей)

Проектирование продольного профиля тоннеля ведется в соответствии с топографическими и геотехническими условиями. Необходимо стремиться к заложению тоннеля в устойчивых породах при надежной кровле выработок, при минимальном горном давлении.

На перевальных участках трассы с целью сокращения развития железнодорожной линии при подходе к вершинной части перевала прибегают к сооружению тоннеля вершинного типа.

При наличии неустойчивых пород, слагающих горный массив (при подходе к вершинной части хребта), предпочтительно сооружать тоннель в основании горного перевала базисного типа (рис. 95).

В зависимости от топографических и геологических условий прокладка тоннеля



Рис. 96. Лавина на горной дороге

вершинного типа обусловливает проведение весьма осложненной трассы железнодорожной линии (особенно в районе подходов к тоннелю). Имеется в виду пересечение крутых косогоров, ущелий, оползневых зон, постройка высоких подпорных стен, виадуков, глубоких выемок. Несмотря на устройство защиты железнодорожной линии от снежных обвалов, лавин, осыпей созданием целой серии защитных галлерей, полутоннелей, эксплоатация линии обычно сопряжена с осложнениями (рис. 96). Неизбежно к тому же применение кривых малых радиусов и крутых уклонов при двойной и тройной тяге. Несмотря на то, что при вершинном варианте трассы главный тоннель обычно получается короткого протяжения, во многих случаях прибегают к сооружению базисного тоннеля. Последний требует преодоления в период строительства больших природных трудностей и больших капитальных затрат при значительной длине тоннеля. Однако это компенсируется высокими качествами условий эксплоатации горной железнодорожной линии в целом. Вопрос о сооружении тоннеля вершинного или базисного типа решается в каждом отдельном случае в зависимости от комплекса местных топографических, геотехнических, технико-экономических и эксплоатационных условий.

Последнее условие требует содержания в исправности горных участков железнодорожного пути и обеспечения безопасности следования поездов по трассе.

В районах, подверженных землетрясению, необходимо учитывать и вопросы сейсмичности, в связи с постройкой тоннеля и прилегающих искусственных сооружений по трассе.

Практика строительства и эксплоатации горных железных дорог последнего двадцатипятилетия показывает стремление к закладке главным образом базисных тоннелей. В Италии на железнодорожной линии Болонья — Флоренция трассу, пересекавшую горный кряж с вершинным тоннелем Пракиа (Prachia) длиной 2,7 *км*, из-за тяжелых условий эксплоатации в 1931 г. заменили новой трассой, содержащей Большой Апеннинский двухпутный тоннель длиною 18,5 *км* базисного типа. Последний расположен на 295 *м* ниже существующего тоннеля. При этом длина новой трассы была сокращена на 35 *км*, а максимальный уклон смягчен с 24 на 5,7‰.

То же можно сказать и о втором Каскадном тоннеле длиною 12,4 *км*, построенном в 1929 г. в США, при пересечении горного перевала Стивенса (Скалистые горы) на 154 *м* ниже существующего вершинного тоннеля длиной 4,2 *км*.

По тем же причинам новый Хауншейнский базисный тоннель длиной 8,1 *км* заменил вершинный тоннель длиной 2,5 *км* (рис. 95, 97).

План и продольный профиль тоннеля должны проектироваться в полной увязке с трассой железнодорожной линии, включающей данный тоннель. В плане железнодорожные тоннели проектируются на прямых и кривых участках пути. В большинстве случаев

при пробивке тоннелей большого протяжения стремятся к прокладке этих линий по прямой. Следует отметить, что прокладка тоннелей по прямой в плане не всегда дает наиболее правильное технико-экономическое и геотехническое разрешение вопроса. В некоторых случаях тоннели на кривой и даже петлеобразные тоннели могут дать наиболее правильное решение в определенных условиях горной местности.

Петлевые кривые линии образуют двойные и тройные петли (серпантины) с включением петлевых тоннелей.

Петлевые тоннели сооружены на линии Армавир-Туапсинской железной дороги.

На перевальной железной дороге через Кавказский хребет в районе Думацхо на протяжении 10,5 *км* трассы (по изысканиям 1936 г.) запроектировано 5 петлевых тоннелей общим протяжением 2,5 *км*.

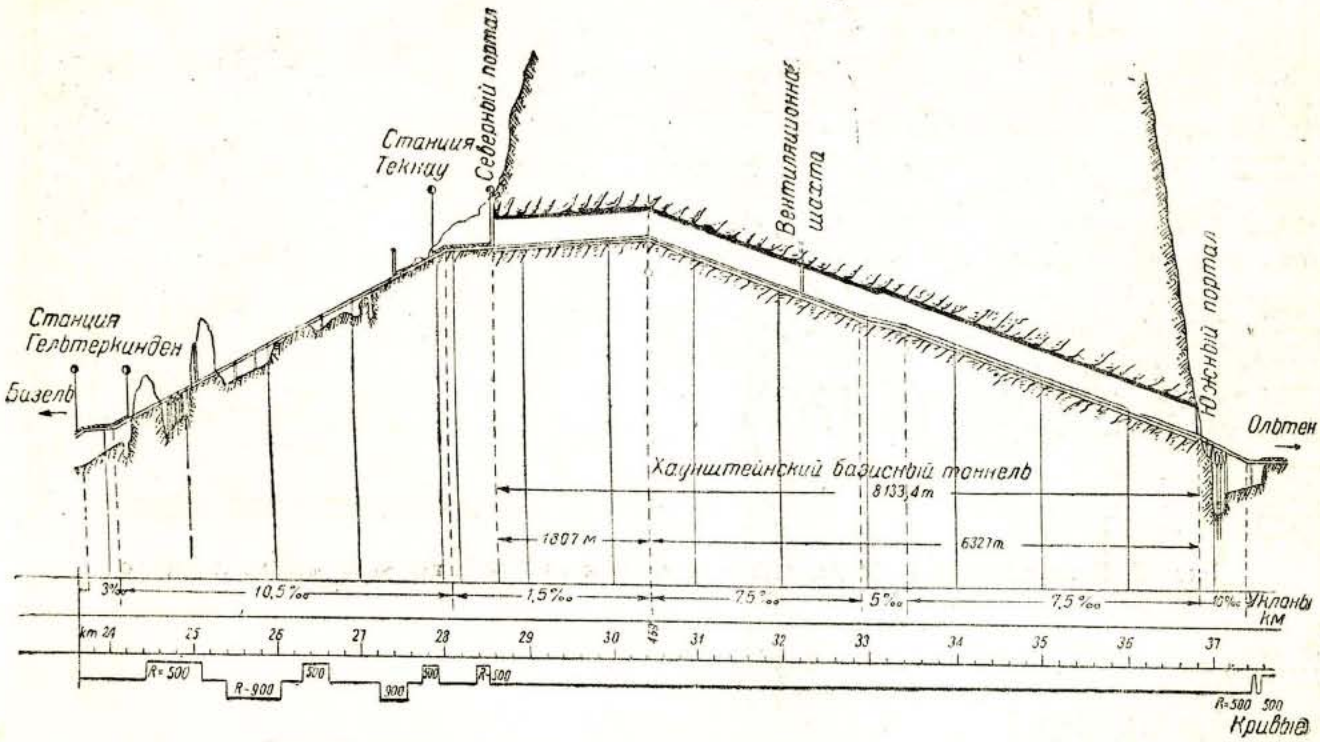


Рис. 97. Хауншштейнский базисный тоннель (продольный профиль)

Тоннели, расположенные на прямой в плане, в значительной степени облегчают условия производства работ в процессе разбивки трассы, разработки и крепления тоннеля.

Условия вентиляции тоннеля, расположенного на прямой в плане, в период проходки и эксплоатации значительно облегчаются по сравнению с тоннелями, расположенными на кривой.

Несмотря на стремление инженеров располагать по возможности тоннель на прямой, комплекс геотехнических, топографических, эксплоатационных и технико-экономических условий диктует во многих случаях расположение тоннеля в плане на кривой.

В зависимости от топографии горной местности выявляется необходимость в петлеобразном или зигзагообразном развитии железнодорожной линии на склонах косогора.

На Сен-Готардской железной дороге у Вазена расположено два сопрягающихся с небольшим открытым участком петлевых тоннеля — Ваттингенский и Леггиштейнский, каждый длиною в 1 *км* (рис. 98).

В особо тяжелых условиях топографии горной местности при круговом развитии линии внутри горного массива прибегают к устройству спиральных тоннелей. При этом линия делает полный поворот на кривой, пересекая себя, но на другом горизонте. Большое число спиральных тоннелей имеется в Швейцарии (рис. 99).

На линии Альбульской железной дороги спиральный тоннель разбит в плане по кривым радиусам $R = 120$ и 300 *м*.

Ряд тоннелей расположен на спиральном развитии участка Кучилло Тихоокеанской железной дороги в Америке (рис. 100).

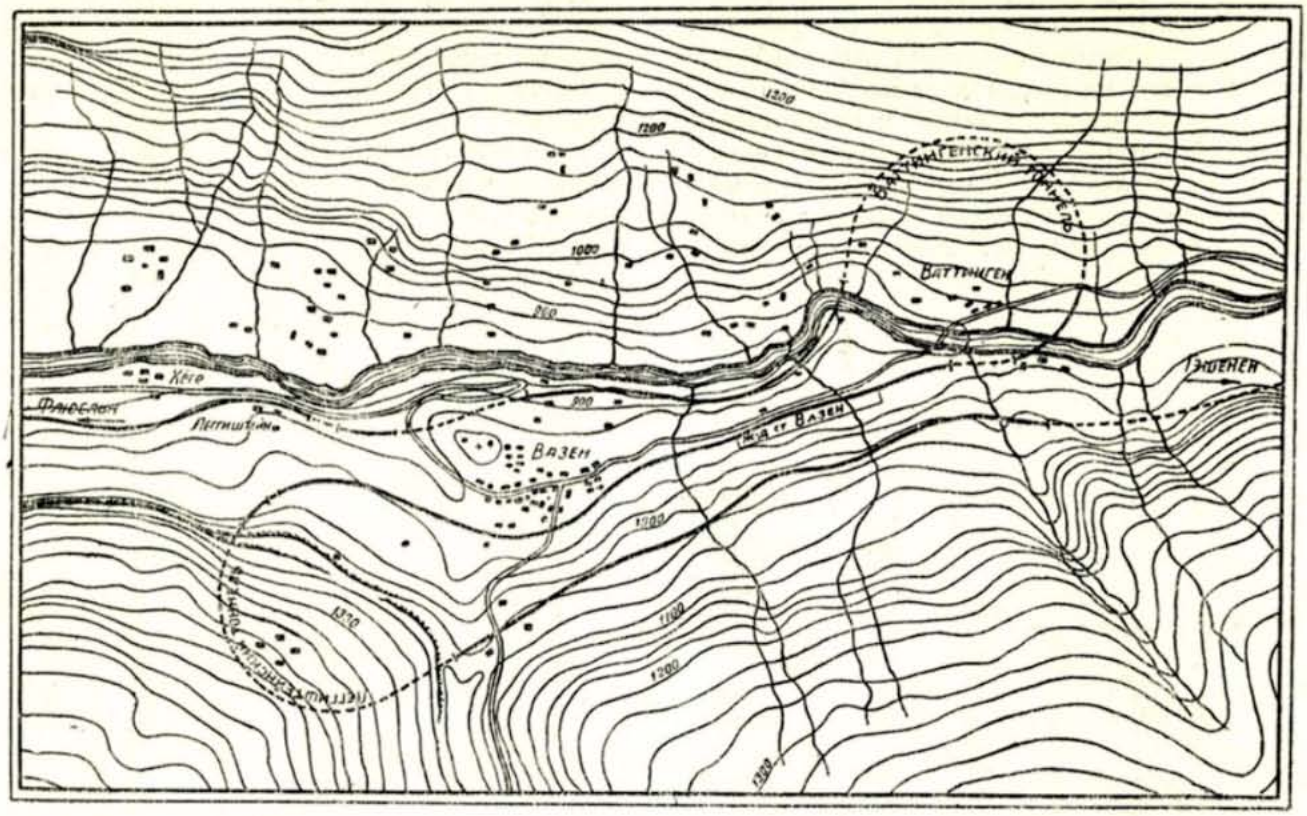


Рис. 98. Ваттингенский и Леггиштейнский тоннели на Сен-Готардской железной дороге

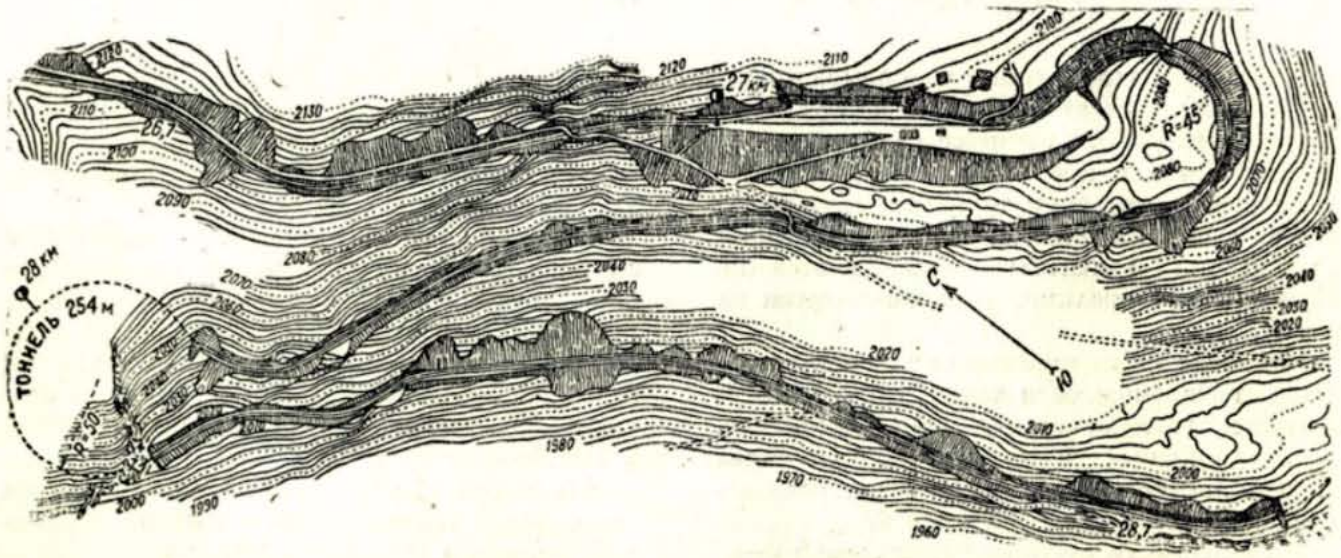


Рис. 99. Петлевые тоннели Альпгрюн на Бернской железной дороге

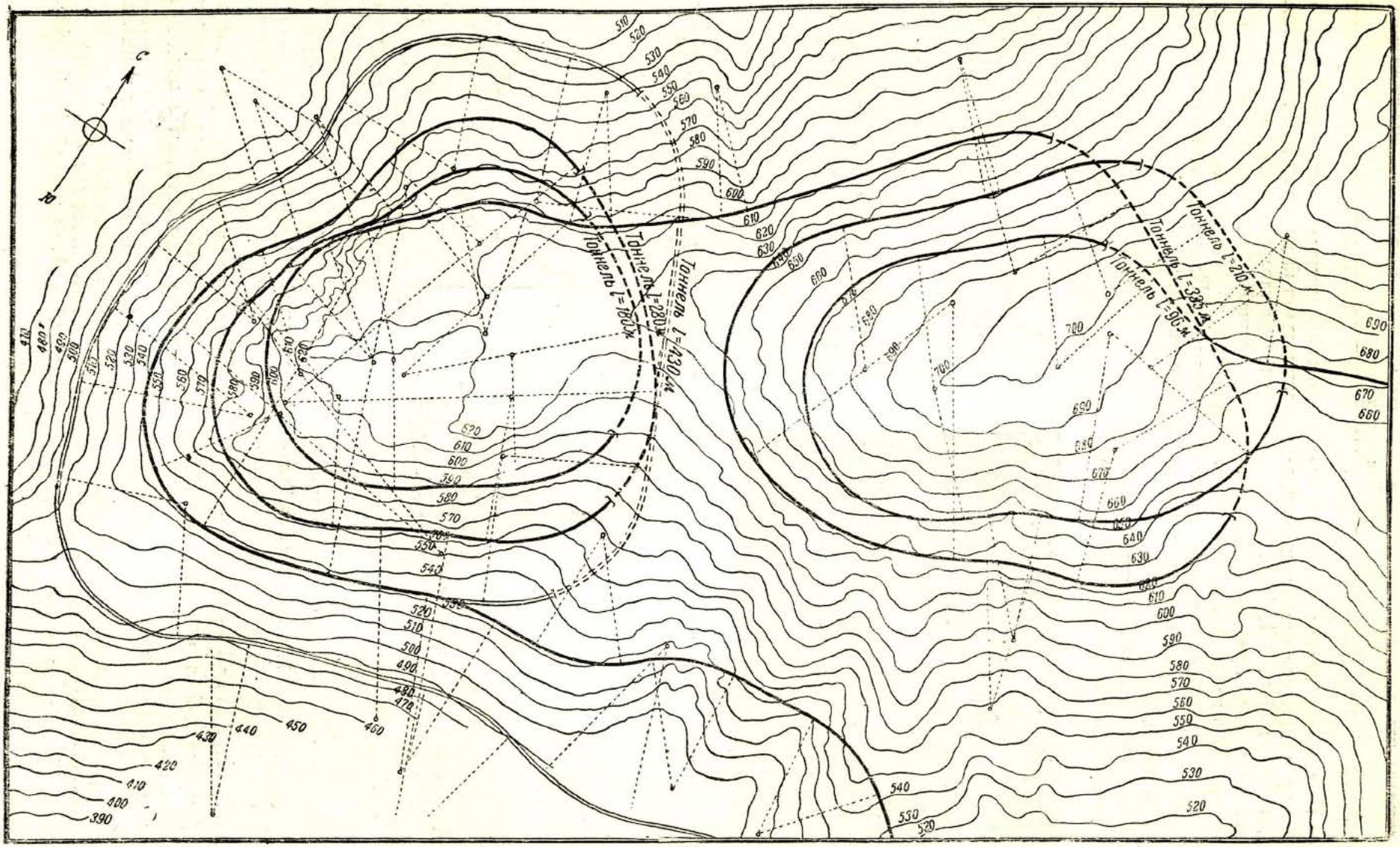


Рис. 100. Петлевые тоннели Кучилло на Тихоокеанской железной дороге (США)

На Сен-Готардской железной дороге сооружено 7 спиральных тоннелей общим протяжением до 9,8 *км* (рис. 101, 102).

В наших условиях при проектировании тоннелей на кривой в плане для горных дорог магистрального типа допускают радиус кривой $R = 250$ *м*, а для горных дорог местного значения $R = 200$ *м*.

В практике строительства транспортных тоннелей различают тоннели двускатного профиля с уклонами от обоих порталов и разделительной площадкой в середине тоннеля и односкатного профиля, когда имеется сплошной уклон от одного портала к другому (рис. 103).

Наличие уклонов необходимо для отвода воды в период строительства и при эксплоатации тоннеля. Поэтому надо избегать расположения тоннелей на площадках, а давать минимальный уклон от 0,002 до 0,003. Исключение составляют тоннели-каналы.

Тоннели большого протяжения рекомендуется проектировать преимущественно двускатными. Короткие тоннели можно сооружать односкатными.

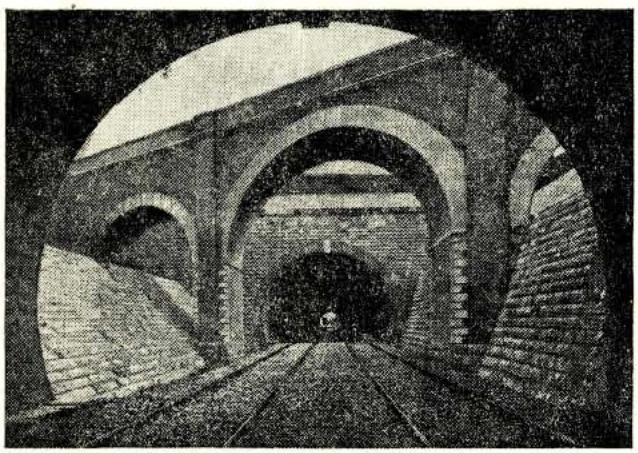


Рис. 101. Пересечения железных дорог у тоннельных порталов

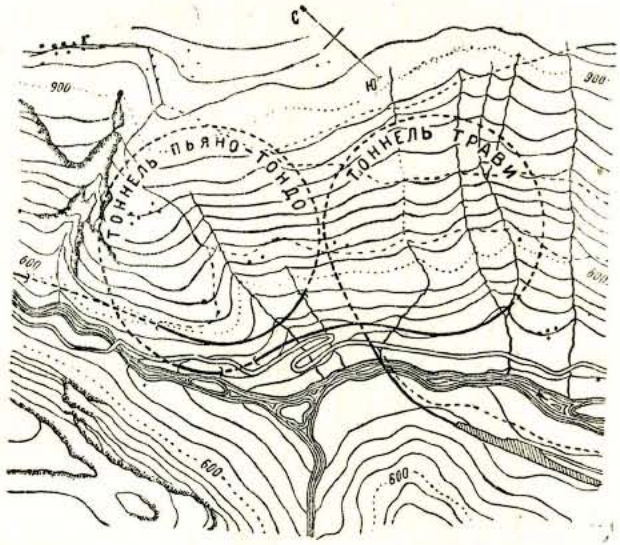


Рис. 102. Спиральные тоннели Пьяно-Тондо и Трави на Сен-Готардской железной дороге

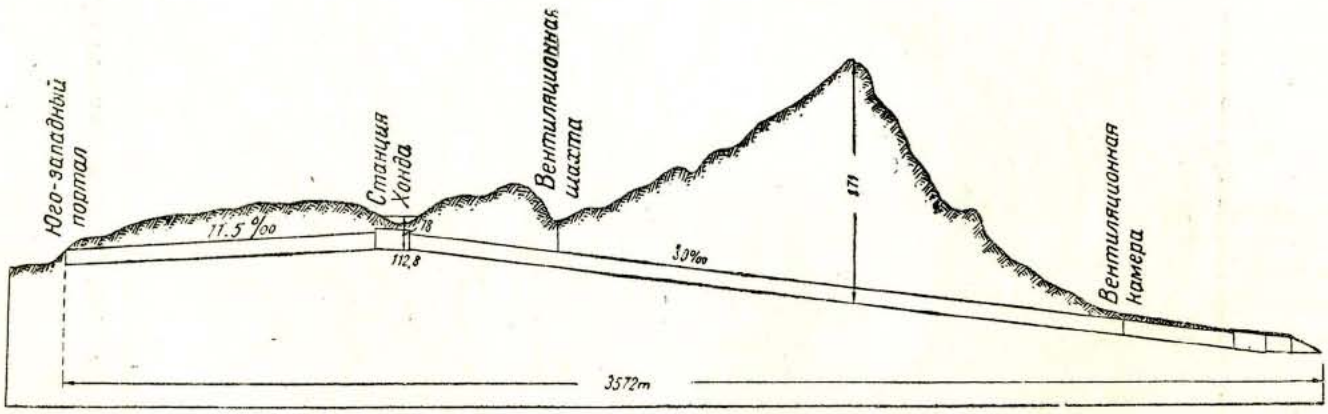


Рис. 103. Тоннель Твин-Пик (продольный профиль)

Тоннели петлевые и спиральные по характеру трассирования линии обусловливают их сооружение односкатными в продольном профиле.

Наиболее длинные в мире тоннели — Симплонский и Лечбергский (максимальный уклон продольного профиля $i = 0{,}007$) и Сен-Готардский и Апеннинский (i=0,0058)—имеют

двускатный профиль. Следует, однако, заметить, что тоннели Ронго, Гренхебергский и Риккен (длиной до 8,6 *км*) односкатного продольного профиля.

Хинганский тоннель расположен на уклоне 1,2‰.

В каждом отдельном случае при проектировании продольного профиля тоннеля приходится считаться с характером местности, условиями топографии, с геотехническими факторами и с руководящим уклоном пути для определенной трассы.

При проектировании продольного профиля железнодорожного тоннеля базисного или вершинного типа необходимо сообразоваться с уклонами, принятыми на данной дороге, участком которой является тоннель. В зависимости от водообильности пересекаемого массива, вида материала и изоляции тоннельной обделки, а также вентиляции уклон в тоннеле обычно снижается по сравнению с уклонами, допускаемыми на данной дороге по поверхности, при определенной тяге. Практика железнодорожных тоннелей показывает, что коэфициент сцепления подвижного состава в тоннеле значительно уменьшается по сравнению с коэфициентом сцепления на открытом участке.

При установлении уклона тоннеля однопутного профиля следует также учитывать сопротивление воздуха при движении подвижного состава. Это сопротивление эквивалентно принимается в 0,004—0,006.

Таким образом, необходимо иметь в виду, что максимальный уклон в тоннеле должен быть всегда меньше максимального уклона, допускаемого на открытых участках железнодорожного пути, учитывая величину дополнительного сопротивления движению. Так, например, при прокладке Хауэнштейнского базисного тоннеля максимальный уклон в нем достигал 7,5‰, в то время как максимальный уклон на открытых участках железнодорожного пути был 10‰. Максимальный уклон на железнодорожной линии в Пиренеях на открытых участках достигал 43‰, а в тоннелях допускался лишь в 34‰.

За границей снижение максимального уклона железнодорожного пути в тоннелях по сравнению с открытыми участками производится на основании данных, приведенных в табл. 8.

Поскольку вопрос о смягчении уклона в тоннелях до сих пор не может считаться окончательно разрешенным, временно можно

Таблица 8

Снижение максимального уклона железнодорожного пути в тоннелях по сравнению с открытыми участками

Максимальный уклон ‰ Δi		Величина снижения уклона (Δi)
на открытых участках (i_o)	в тоннелях (i_m)	
10	7,4	2,6
15	11,4	3,6
20	15,4	4,6
25	19,4	5,6
30	23,4	6,6
35	27,4	7,6
40	31,4	8,6

допустить, что максимальный уклон в тоннеле i_m на магистральных железных дорогах не должен превышать 0,75 руководящего уклона i_p, принятого на данной дороге, на открытых участках пути.

$$i_m \leqslant 0{,}75\ i_p .$$

Однако проектирование продольного профиля железнодорожного тоннеля должно вестись в соответствии с существующими техническими условиями на изыскание, проектирование и сооружение железных дорог МПС СССР.

При проектировании плана и продольного профиля горного тоннеля весьма важно установление местоположения порталов, определяющих длину тоннеля.

Если по геологическим условиям нельзя ожидать оползания или выветривания откосов подходных выемок, то вопрос местоположения портала решается по экономическим соображениям, исходя из общепринятого в тоннельной практике условия равноценности работ по сооружению выемки и тоннеля.

При данных геологических условиях и учитывая откосы выемки, возможно установить оптимальную глубину ее. Дальнейшее углубление выемки уже становится экономически нецелесообразным, более выгодной является постройка тоннеля. Это обусловливает искомое поперечное сечение по оси пути — местоположение портала тоннеля.

Ориентировочное местоположение портала горного тоннеля возможно установить по нижеприведенной формуле, где H — высота выемки; $к$ — ширина выемки понизу; $1 : x$ — откос косогора; $1 : y$ — откос выемки; S — площадь выемки (рис. 104).

Площадь подходной выемки:

$$S = \frac{H_1}{2} \cdot (\kappa_1 + \kappa_2) - \frac{h\kappa}{2}; \qquad (1)$$

$$l_1 = \kappa_1 x; \quad \kappa_1 = \frac{H_1 + l_1}{y};$$

$$l_2 = \kappa_2 x; \quad \kappa_2 = \frac{H_1 - l_2}{y};$$

откуда:

$$\kappa_1 = \frac{H_1}{y - x}; \quad \kappa_2 = \frac{H_1}{y + x};$$

$$h = \frac{\kappa y}{2}; \quad H_1 = H + \frac{\kappa y}{2}.$$

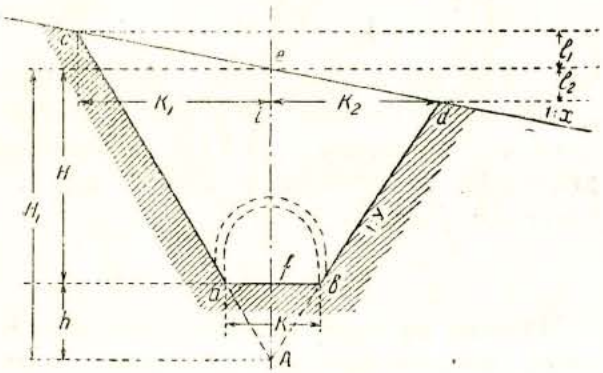


Рис. 104

Произведя подстановку в формулу (1), имеем:

$$S = \frac{H_1^2}{2}\left(\frac{1}{y-x} + \frac{1}{y+x}\right) - \frac{\kappa^2 y}{4} = \frac{H_1^2 y}{y^2 - x^2} - \frac{\kappa^2 y}{4} = \frac{\left(H + \frac{\kappa y}{2}\right)^2 y}{y^4 - x^2} - \frac{\kappa^2 y}{4}.$$

Оптимальная глубина выемки:

$$H = \sqrt{\left(S + \frac{\kappa^2 y}{4}\right)\left(\frac{y^2 - x^2}{y}\right)} - \frac{\kappa y}{2}. \qquad (2)$$

Для определения по данной формуле глубины подходной выемки, равноценной тоннелю, надлежит вместо величины S подставить площадь поперечного сечения тоннеля, умноженную на отношение стоимостей 1 $м^3$ тоннельной разработки и 1 $м^3$ подходной выемки. Однако следует подчеркнуть, что приведенная формула является несовершенной, поскольку она не предусматривает ряда природных факторов. Вместе с тем результаты ее применения могут служить критерием для предварительного суждения о максимальной глубине подходной к тоннелю выемки. В практике постройки железнодорожных тоннелей порталы назначают при максимальной глубине выемки от 16 до 25 *м*. При наличии оползневых явлений во избежание осложнений при эксплоатации выемок, когда можно ожидать постоянного оползания откосов и завалов железнодорожных путей, не следует производить глубокие подходные выемки. В этом случае, наоборот, может оказаться более целесообразным искусственное удлинение тоннеля посредством устройства конструкции обделки открытым способом с последующей засыпкой защитного слоя. Возможно, в зависимости от местных условий, создать и систему защитных галлерей — полутоннелей (рис. 105, 106).

Так, в Канаде при пересечении Тихоокеанской железнодорожной линией горного кряжа Сиерра-Невада сооружена защитная от снежных обвалов галлерея на протяжении до 48 *км*.

* * *

При проектировании плана и продольного профиля подводных тоннелей необходимо особо считаться с геологическими и гидрогеологическими условиями пересекаемого под руслом реки грунтового массива.

Учитывая возможность производства дноуглубительных работ в связи с развитием судоходства, устанавливают минимальную глубину заложения тоннеля с учетом защиты конструкции от повреждения в период эксплоатации. Глубина заложения тоннеля находится в зависимости от принятого в данных условиях метода подводного тоннелирования. Так, при открытом способе работ при методе опускания кессонов-тоннелей или заводных секций глубина заложения конструкции подводного тоннеля устанавливается минимальной. При щитовом способе, сопряженном обычно с проходкой под сжатым воздухом, кровля грунта над тоннелем в подрусловой части устанавливается в зависимости от физико-механических свойств грунтов, чтобы обеспечить безопасность производства работ от прорыва воздуха в забое, при аварийном затоплении тоннеля грунтом и водой из реки.

Требование естественной грунтовой защитной толщи вызывает иногда затруднения при проектировании продольного профиля тоннеля с точки зрения эксплоатационных условий. Имеются в виду осложнения при проектировании подходов к тоннелю, которые получаются с чрезмерными уклонами пути.

В этом случае возможно допустить профиль тоннеля с расчетом создания на период

производства работ искусственной защитной толщи в виде глиняного тюфяка. Этот прием широко применяется в американской практике при сооружении подводных тоннелей под реками Гудсон, Ист-Ривер, Гарлем.

Подводные тоннели, как правило, имеют продольный вогнутый профиль («яма»). Подходы к тоннелю подрусловой части в виде открытых рамп проектируются обычно на крутых уклонах по обоим берегам реки.



Рис. 105. Трасса горной железнодорожной линии с расположением защитных тоннельных галлерей

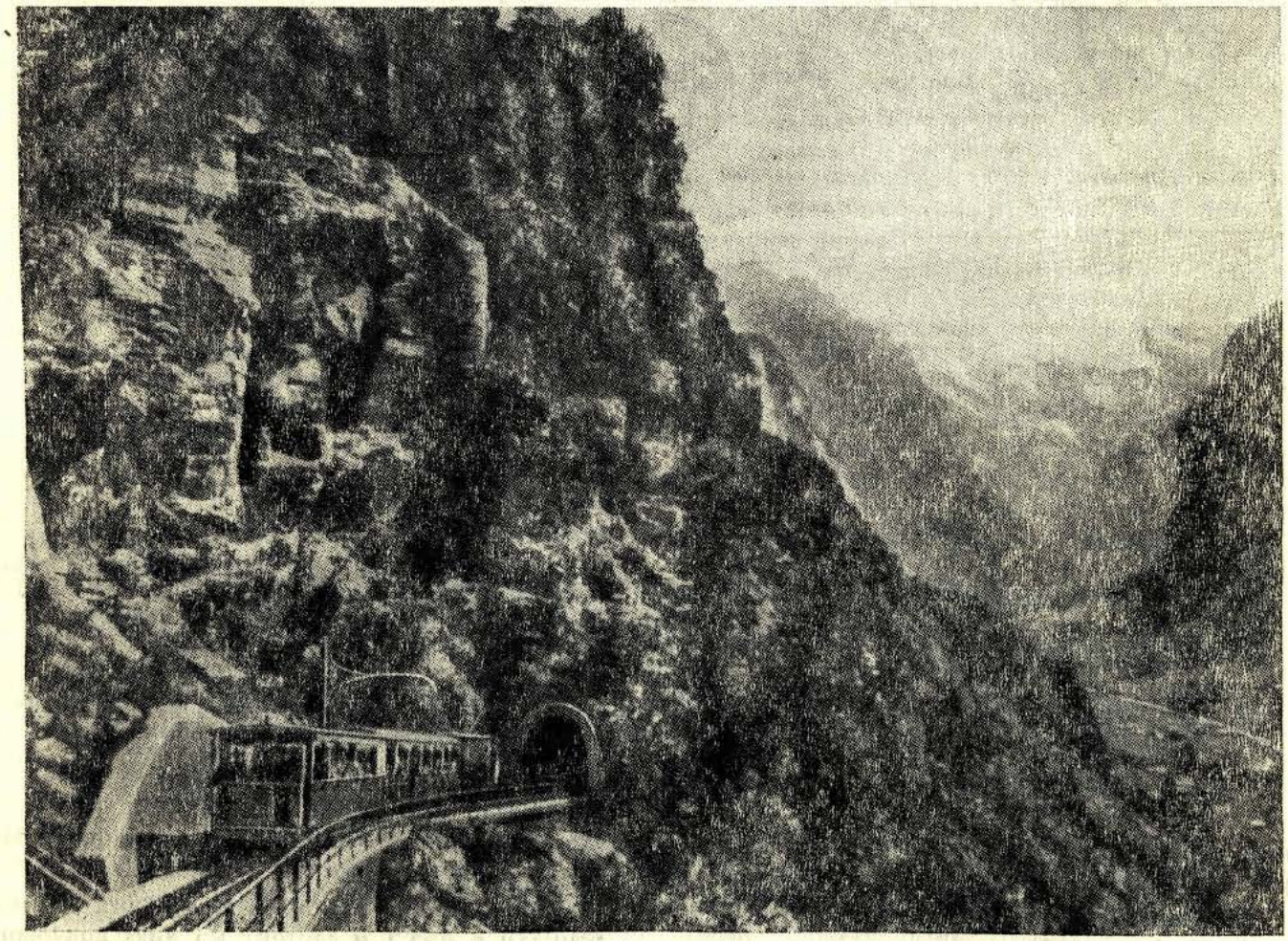


Рис. 106. Подход к горному тоннелю (Лаутербрунен, Швейцария)

Характер продольного вогнутого профиля подводного тоннеля обусловливает необходимость устройства специальных дренажных установок для откачки воды из пониженной

точки профиля тоннеля в период эксплоатации. Американские подводные тоннели под обыкновенную дорогу: Линкольн, Холланд, под р. Гудсон, а равно Антверпенский тон-

в торцевых частях у берегов вертикальные шахты диаметром в свету 22 *м*, оборудованные лифтами грузоподъемностью в 6 и 10 *т* для подъема и спуска в тоннель грузовых и легко-

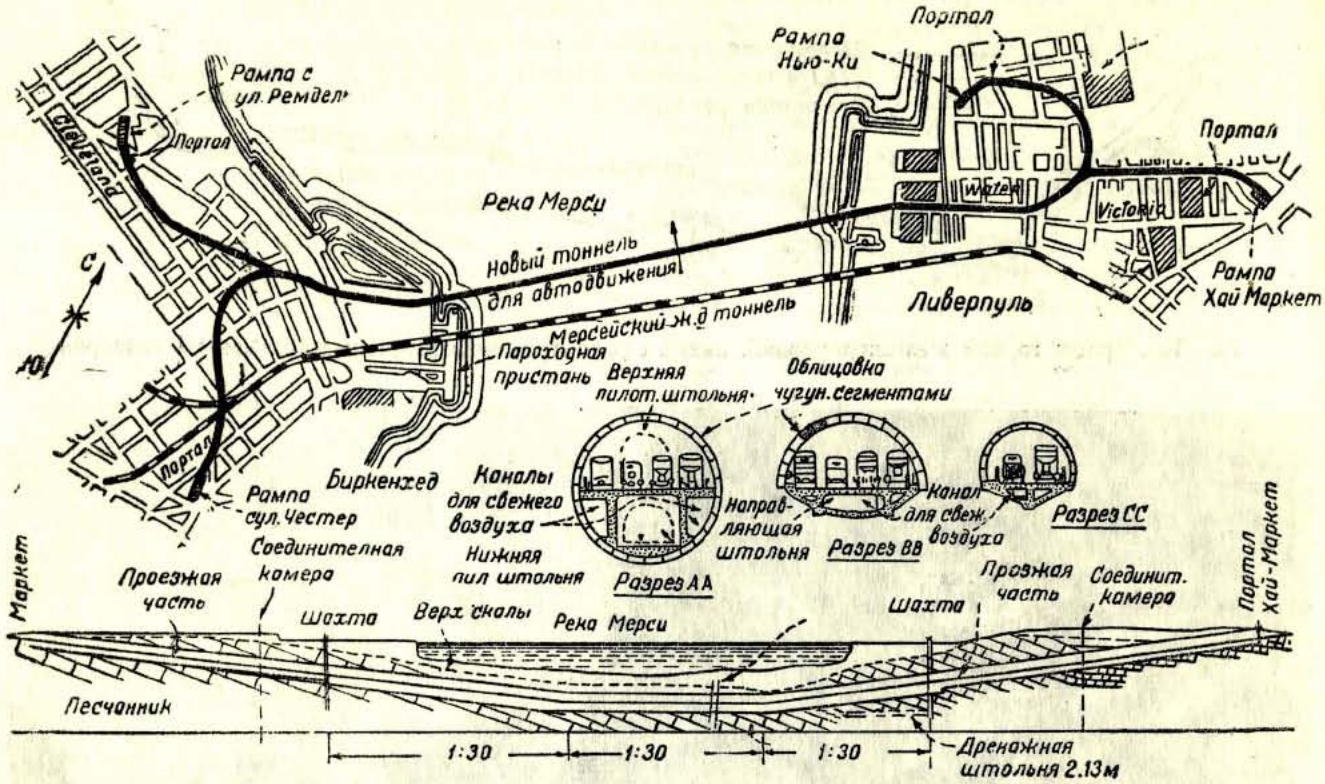


Рис. 107. Тоннель под р. Мерси (планы и разрезы подводного тоннеля)

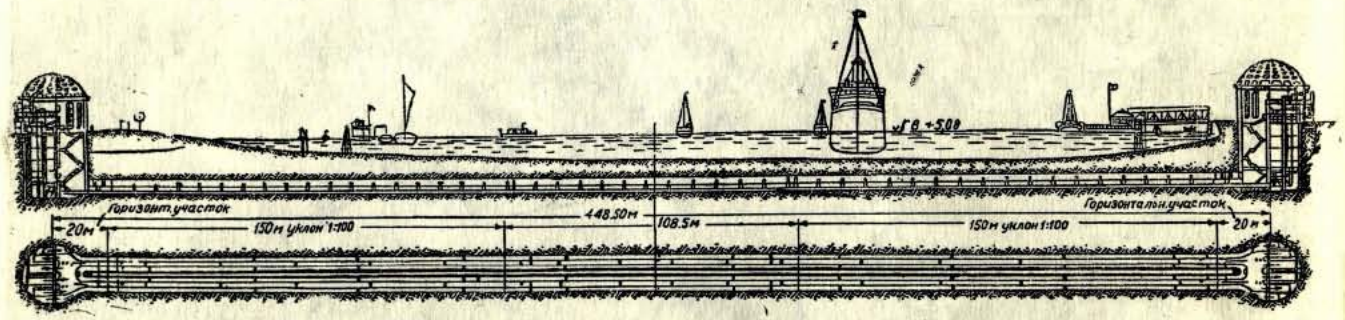


Рис. 108. Тоннель под р. Эльбой в Гамбурге (план и разрез подводного тоннеля)

нель под Шельдой имеют максимальный уклон продольного профиля $i_{max} = 1:28$.

В Мерсийском подводном тоннеле $i_{max} = 1:30$ (рис. 107).

Исключение представляет продольный профиль подводного тоннеля под Эльбой в Гамбурге, не имеющий нормального входа через открытые рампы. Этот тоннель, состоящий из двух труб диаметром 6 *м*, расположенных на взаимном расстоянии 8 *м*, имеет

вых автомобилей, при возможности одновременно обслужить до 450 человек.

Продольный профиль при общей длине тоннеля в 448,5 *м* состоит из двух подходов к шахтам по 150 *м* с уклоном 0,04, соединенных разделительной площадкой в 108,5 *м* (рис. 108).

В середине русла реки кровля грунта над шелыгой свода составляет 6 *м* при глубине воды около 10 *м*. Глубина заложения подошвы

тоннеля, считая от максимального горизонта воды в Эльбе, равна 22 *м*.

* * *

При проектировании в плане и профиле линий городских внеуличных электрических железных дорог (метрополитена) исходят из общей генеральной эксплоатационной схемы всей сети линий с учетом перспективной вертикальной и горизонтальной городской планировки. Особое внимание уделяется развязке транспортных узлов, переходов и станционных пересечений линий общей сети метрополитена.

Трассируя линии по густо населенной и застроенной территории города, с развитым городским подземным хозяйством, с интенсивным уличным движением, необходимо считаться с жизнью города. Требования обеспечения нормальных условий городской жизни на время сооружения тоннелей приобретают иногда решающее значение, предопределяя тип самого метрополитена.

Огромное значение имеют геология, гидрогеология и физико-механические свойства грунтов, залегающих по трассе создаваемого метрополитена. Пересечение линий метрополитена как между собой, так и с другими видами транспорта должно быть осуществлено в разных уровнях, исключая возможность их пересечения в одном горизонте.

Принятый для данной трассы тип метрополитена глубокого (до 60 *м* от поверхности) или мелкого заложения (до 10 *м* от поверхности) существенно влияет на проектирование плана и профиля линии. Так, линия глубокого заложения должна проектироваться по кратчайшему направлению между соседними станциями метрополитена. На Московском метрополитене минимальный радиус закругления перегонных тоннелей допускается в 400 *м*. На Парижском метрополитене минимальный радиус закругления принят в 75 *м*. Станции Московского метрополитена располагаются на прямой. Переход в плане от двух однопутных тоннелей на один двухпутный осуществляется в раструбах или переходных камерах.

При проектировании продольного профиля для линии глубокого заложения учитывают геологические и гидрогеологические условия, стремясь заложить тоннели в устойчивые коренные породы при наличии достаточной мощности кровли этих пород, позволяющих вести тоннельные работы без применения искусственных приемов в виде сжатого воздуха, замораживания.

Особое внимание придается эксплоатационным требованиям и вопросам механизированного подъема и спуска пассажиров на станции метрополитена при помощи эскалаторов одномаршевого или двухмаршевого типа.

При мелком заложении тоннелей стремятся поднять тоннель возможно ближе к поверхности, учитывая при этом требование пропуска сооружений подземного городского хозяйства.



Рис. 109. Лондонский метрополитен (продольный профиль между двумя станциями)

Станции метрополитена и тупики, как правило, располагаются на уклоне 0,003 для обеспечения отвода воды в период эксплоатации.

Максимальный уклон перегонных тоннелей для Московского метрополитена, принимаемый в наиболее трудных участках профиля (например, при пересечении подземных стариц, размывов, подводных тоннелей, при переходе от глубокого заложения на мелкое), установлен в 33‰. На Парижском метрополитене максимальный уклон пути принят 45‰.

В Лондоне продольный профиль тоннелей Андерграунда однопутного профиля глубокого заложения проектируют, учитывая требования электротяги поездов. Даже при расположении соседних станций на одном уровне перегонный тоннель в соответствии с направлением движения поездов имеет уклон от станции в 1 : 30 на протяжении 90 *м* и подъем к станции в 1 : 60 на протяжении 180 *м*. Такой профиль обеспечивает разгон поезда при отправлении и естественное торможение при подходе к станции (рис. 109). Благодаря такому профилю пути одновременно с экономией электроэнергии и возможностью ее рекуперации уменьшается износ тормозных устройств и путевых рельсов. Этому вопросу уделяется особое внимание при проектировании продольного профиля новых линий метрополитена в Москве, Ленинграде и Киеве. В Лондоне тоннели сооружаются однопутными на некотором расстоянии друг от друга, обусловливаемом удобным подходом к станциям с островными пассажирскими платформами. Однако в некоторых местах, где тоннели проходят под улицами

небольшой ширины (до 4 *м*), они расположены один под другим, так как по английским законам домовладельцы владеют землей по своему контуру до «центра земли», что значительно осложняет проектирование линий метрополитена в плане и профиле.

Проект автора[1]

ПРОЕКТ ПРАВИЛ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОННЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ НОРМАЛЬНОЙ КОЛЕИ

§ 1. Тоннели устраиваются:

а) при пересечении горных массивов и возвышенных водоразделов (горные тоннели);

б) при пересечении рек и морских проливов (подводные тоннели);

в) при трассировании железных дорог под застроенной городской территорией (городские тоннели).

§ 2. Проект тоннеля должен быть разработан на основе подробных топографических, геологических и гидрогеологических изысканий.

Типы тоннельной обделки и методы производства работ должны быть выбраны в соответствии с геотехническими особенностями пересекаемого тоннелем грунтового массива.

§ 3. Выбор между горным тоннелем базисного или вершинного типа решается в каждом отдельном случае в зависимости от местных геотехнических и топографических условий, причем особо учитываются при этом эксплоатационные соображения прокладываемой дороги в целом.

§ 4. При пересечении водного потока вопрос о выборе между мостовым переходом и подводным тоннелем решается на основании результатов технико-экономических расчетов.

§ 5. При проектировании и постройке городских тоннелей надлежит обеспечить устойчивость расположенных над ними зданий и сооружений, а равно сетей городского подземного хозяйства.

§ 6. Горные тоннели устраиваются односкатными при коротком протяжении и двускатными при значительной длине их. В последнем случае устраивается разделительная площадка между двумя подъемами, идущими от порталов внутрь тоннеля.

Расположение тоннеля на площадке не разрешается.

Минимальный уклон тоннеля допускается не менее 3‰.

Максимальный уклон в тоннеле не должен превышать 0,75 максимального уклона на открытых участках железной дороги.

При проектировании продольного профиля подводного тоннеля необходимо предусмотреть заложение шелыги свода с учетом максимального углубления фарватера водного потока. Кроме того, надлежит учесть скорость движения воды в реке, могущей вызвать смыв

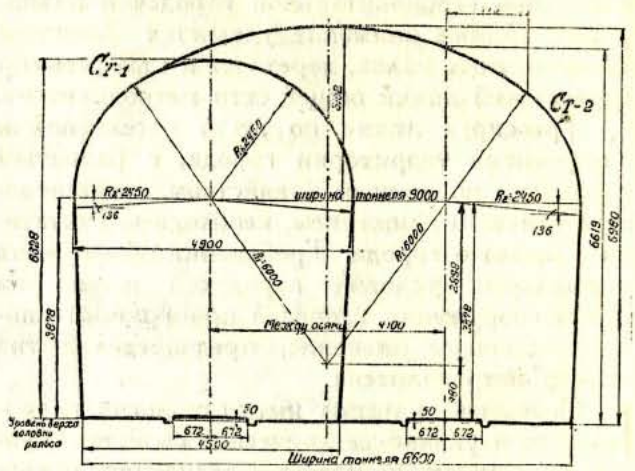


Рис. 109а. Габариты приближения строений (ОСТ 6435)

земляной кровли с обделки подводного тоннеля. Во избежание этого должны быть приняты технические меры, обеспечивающие нормальную службу сооружаемого подводного тоннеля.

§ 7. Поперечное сечение тоннеля проектируется в соответствии с установленными габаритами подвижного состава.

Поперечное сечение однопутного тоннеля принимается по габариту «СТ-1», а двухпутного тоннеля — по габариту «СТ-2» (ОСТ 6435) (рис. 109а).

Вопрос о числе путей в тоннелях и о выборе между одним двухпутным или двумя однопутными тоннелями должен быть решен на основании результатов технико-экономических расчетов.

Если горный тоннель предназначен перспективным проектом под два пути, а дорога устраивается в первое время однопутною, то свод тоннельной обделки должен быть сооружен на два пути с оставлением части штроссного профиля под второй путь неразработанной, при непременном условии безопасного положения пят свода.

Тоннели, расположенные на кривой, должны иметь уширение поперечного профиля

[1] Отредактировал проект проф. В. Л. Николаи.

в соответствии с повышением наружного рельса.

§ 8. Материалами для обделок железнодорожных тоннелей, в зависимости от местных условий, могут служить камень, бетон, железобетон, чугун и сталь.

Применение дерева для постоянной тоннельной обделки не допускается.

Материалы тоннельных обделок должны быть защищены от вредного действия дыма и агрессивных вод.

§ 9. Расчет элементов тоннельной обделки должен быть произведен на основе общих положений теории сооружений на внешнюю нагрузку в соответствии с геологическими и гидрогеологическими свойствами пересекаемых пород. При этом должна быть обеспечена полная надежность несущей способности обделки при проявлении давления пород.

Допускаемые напряжения на материалы должны приниматься по действующим нормам для сооружений 1-го класса.

При расчете тоннельных обделок должны быть учтены следующие силы горного давления:

а) вертикальное горное давление,
б) боковое давление,
в) давление, направленное снизу вверх,
г) давление вдоль оси тоннеля.

Последнее проявляется преимущественно в портальных участках.

В сейсмических зонах должны быть учтены тангенциальные силы ускорения. При этом портальные участки тоннелей, являющиеся наиболее уязвимыми при землетрясении, должны быть надлежащим образом армированы, согласно расчету, как антисейсмические конструкции.

§ 10. При установлении наиболее целесообразного типа тоннельной обделки надлежит считаться не только с габаритами подвижного состава, но и с характером, величиной и направлением горного давления, как с факторами, могущими существенно повлиять на очертание поперечного сечения тоннельной обделки.

В зависимости от геологических условий и действующего на обделку горного давления принимаются следующие типы тоннельных профилей:

а) профиль без искусственной облицовки, при полном отсутствии горного давления, а равно явления выветривания пород;

б) профиль с легкой обделкой, защищающей от выветривания пород, при отсутствии горного давления;

в) профиль тоннельной обделки при нормальном горном давлении;

г) профиль тоннельной обделки при сильном вертикальном горном давлении;

д) профиль тоннельной обделки при двустороннем боковом давлении;

е) профиль тоннельной обделки несимметричного типа при одностороннем боковом давлении (расположение тоннеля на косогоре, в оползневой зоне).

При пересечении карстов и пещер должны быть применены специальные типы тоннельных обделок, при особых методах заложения их.

Минимальная толщина элемента обделки из бетона или бутовой кладки устанавливается 0,5 *м*.

§ 11. Устья тоннелей должны иметь специальные укрепления в виде порталов, в сопряжении с подпорными стенками, во избежание оползней боковых и лобового откосов подходных выемок.

При наличии крепких, не выветривающихся пород в устьях тоннеля в устройстве специальных портальных укреплений нет необходимости. Тоннельные порталы в зависимости от значения и расположения тоннеля подвергаются архитектурной обработке.

В случае, когда имеются опасения в отношении возможности осыпания камней и снежных лавин на путь с верхней части выемки, портальный участок тоннеля несколько удлиняют или прибегают к устройству специальной конструкции защитных галлерей (полутоннелей).

§ 12. В горном тоннеле длиной больше 250 *м* устраиваются в шахматном порядке ниши для укрытия обслуживающего персонала дороги на время прохода поезда по тоннелю через каждые 50 *м*, считая по одной стороне его. Размеры ниш: высота 2,2 *м*, ширина 2 *м*, глубина 1 *м*.

Через каждые 300 *м*, считая по одной стороне тоннеля, устраиваются в шахматном порядке камеры для укрытия путевой вагонетки или рабочей платформы. Размеры камер: высота 2,8 *м*, ширина 4 *м*, глубина 4 *м*.

В подводных тоннелях круглого сечения на уровне пола вагона устраивается тротуар шириною не менее 0,7 *м*.

§ 13. При пересечении водообильных горных массивов должны быть приняты меры по

осушению окружающих тоннелей пород путем устройства специальной системы дренажей.

В тех тоннелях, где могут образовываться наледи, должны быть приняты технические меры, обеспечивающие недопущение воды в тоннель.

Обделки подводных и городских тоннелей должны быть водонепроницаемы.

§ 14. При проектировании и постройке тоннелей в условиях вечной мерзлоты должны быть приняты особые технические меры, обеспечивающие долговечность тоннеля и его бесперебойную эксплоатацию.

§ 15. Балласт в пределах тоннеля должен быть щебеночный; допускается укладка пути и на жестком бетонном основании.

§ 16. В горных тоннелях необходимость устройства вентиляции и выбор ее системы (естественная или с побуждением) зависят от длины, продольного профиля, плана тоннеля и подходов к нему, а равно от расположения тоннеля по отношению к направлению господствующих ветров.

В городских и подводных тоннелях устройство вентиляции является обязательным.

§ 17. Тоннели длиною свыше 300 *м* должны быть оборудованы, как правило, электроосвещением и в необходимых случаях устройствами связи и сигнализации.

При проектировании однопутных железнодорожных тоннелей следует руководствоваться Техническими Условиями проектирования однопутных железных дорог с паровой тягой, утвержденными Министром Путей Сообщения 21 августа 1946 года.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЭЛЕМЕНТЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКО-МАРКШЕЙДЕРСКИХ РАБОТ ПРИ ПОСТРОЙКЕ ТОННЕЛЕЙ

Одним из ответственных моментов тоннельного строительства является закрепление на дневной поверхности оси прокладываемого тоннеля как в плане, так и по высоте и перенесение направления оси тоннеля и его отметки с дневной поверхности геодезическо-маркшейдерскими приемами под землю. Таким образом, при трассировке тоннеля имеется в виду закрепление оси его на поверхности, а при разбивке — перенесение оси тоннеля непосредственно под землю. Ошибки в производстве геодезических работ могут привести к чрезвычайно серьезным осложнениям, почему этому специальному виду работ, точности и тщательности их проведения всегда уделяется особое внимание.

В практике при трассировке и разбивке тоннеля различают: в профиле — односкатные и двускатные тоннели, а в плане — тоннели, расположенные на прямой, на кривой, в виде петли или спирали. Несмотря на то, что в большинстве случаев стремятся располагать тоннель на прямой, все же следует учесть, что, в зависимости от местных топографических и геологических условий, при расположении тоннеля на кривой имеется возможность значительно укоротить тоннель и тем самым снизить стоимость строительства. В таких случаях применяются особые приемы геодезических работ, связанные с точностью трассировки и разбивки тоннеля на кривых, в значительной степени более сложные, чем приемы разбивки тоннелей на прямых участках трассы.

После закрепления оси тоннеля непосредственно на поверхности, когда полностью вычислены углы триангуляционной системы, ось тоннеля при помощи визирных марок закрепляется на месте. Визирные марки представляют собой белые щиты размерами 2 × × 2 *м* с двумя взаимно-перпендикулярными черными линиями (крест) толщиной в 2 *см*. Расположение визирных марок должно быть осуществлено с таким расчетом, чтобы они были видны непосредственно из направляющей штольни, так как по ним вскрывается портал тоннеля. При этом теодолит ставится на обсервационный пункт, с которого точка пересечения (крест) нитей теодолита центрируется по точке пересечения линии на щите марки, после чего дается точка места вскрытия портала. При разбивке оси в штольне ночью визирные точки освещаются специальными фонарями. Ось тоннеля может быть перенесена с поверхности под землю как с порталов, так и через шахты.

Перенос оси тоннеля через шахту размерами поперечного сечения 3,5—5 *м* производится с помощью двух отвесов. Отвесы из латунной проволоки, толщиной в 1 *мм*, с подвешанной гирей спускаются через ствол шахты. Отвесы должны находиться в створе оси выработки, подлежащей разбивке. Во избежание колебаний они погружаются в воду, масло или нефть. В штольне устанавливается теодолит, и по створу двух отвесов производится дальнейшая разбивка оси штольни.

Геодезическо-маркшейдерские работы по проверке оси прокладываемого тоннеля производятся, как правило, в ночное время, с прекращением подземных работ.

Трассировка и разбивка оси тоннеля должна производиться с исключительной тщательностью и точностью во избежание ошибок, приводящих к значительному осложнению работ, ухудшению эксплоатационных условий тоннельного сооружения в связи с устройством ряда кривых, а также к излишним расходам по реконструкции тоннельных колец. Трудности в разбивке тоннеля усугубляются часто естественными условиями топографии и рельефа местности.

Если по топографическим условиям местности не представляется возможным произвести разбивку тоннеля обычным способом увязки порталов тоннеля между собой, применяют метод триангуляции (рис. 110). В этом случае направление оси тоннеля и триангуляционных ходов фиксируется на месте постоянными точками в виде кирпичных или бетонных столбов (рис. 111 и 112). Некоторые из столбов следует центрировать и приспособить для установки на них геодезических инструментов. Особым знаком отмечается положение порталов тоннеля. Высотное положение отметки тоннеля должно быть

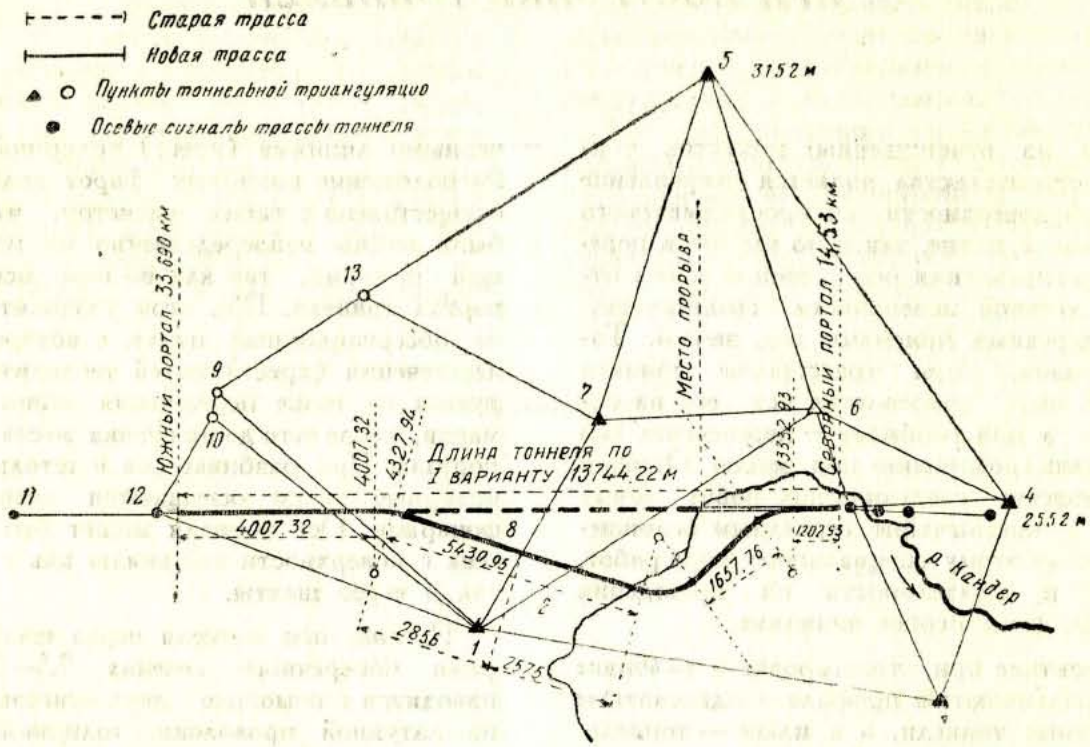


Рис. 110. Лечбергский тоннель (триангуляционная сеть при разбивке оси на поверхности)

Таблица 8а

Результаты производства геодезическо-маркшейдерских работ при разбивке осей горных тоннелей

Данные	Тоннели							
	Симплонский	Сен-Готардский	Лечбергский	Тауэренский	Хауэнштейнский	Караванкенский	Сурамский	Вассерфлютский
Протяжение тоннеля (в *км*)	19,73	14,98	14,53	8,55	8,13	7,93	3,99	3,56
Величина отклонения оси тоннеля при сбойке встречных штольневых ходов: в плане (в *мм*)	202	250	257	550	50	20	130	50
Величина отклонения оси тоннеля при сбойке встречных штольневых ходов: в профиле (в *мм*)	87	100	102	56	10	—	40	10
Вычисленная вероятная невязка по длине тоннеля (в *мм*)	560 макс. 1680	—	360 макс. 1080	—	—	—	—	—
Фактическая невязка по длине тоннеля в натуре (в *мм*)	790	360	410	293	500	450	—	—

определено тщательной повторной нивеллировкой. При производстве геодезических работ окончательная разбивка оси тоннеля осуществляется с учетом и увязкой всех погрешностей в измерениях. В процессе тоннельных работ проверка оси тоннеля должна производиться периодически как в отношении промера оси тоннеля, так и нивеллировки.

штольни, направленные по касательной к кривым. Погрешность в измерении углов триангуляционной сети доходила до 1′9″.

При пробивке Сен-Готардского тоннеля длиной в 14,98 *км* разница между длиной оси, вычисленной по триангуляционной системе и в натуре, была равна 360 *мм*; отклонение штолен в плане 250 *мм*, по высоте 100 *мм*.

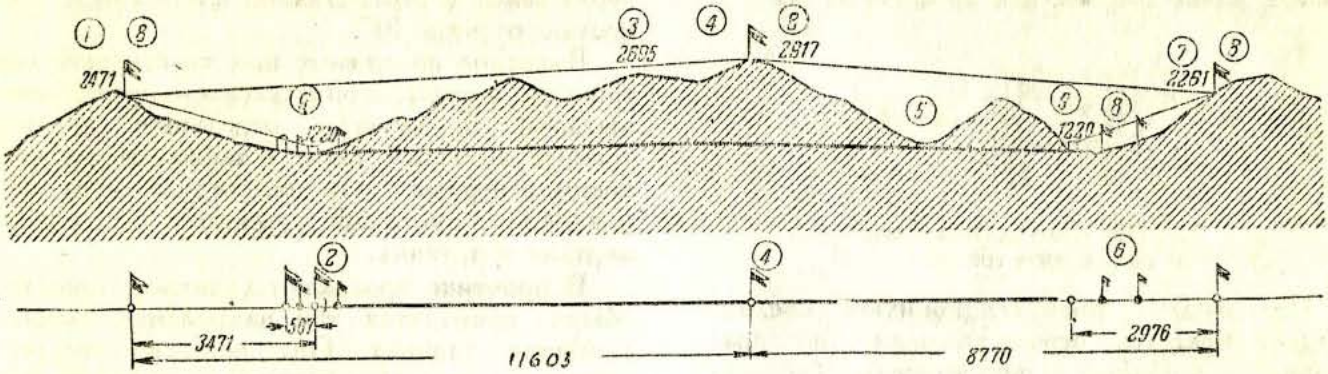


Рис. 111. Лечбергский тоннель (продольный профиль)

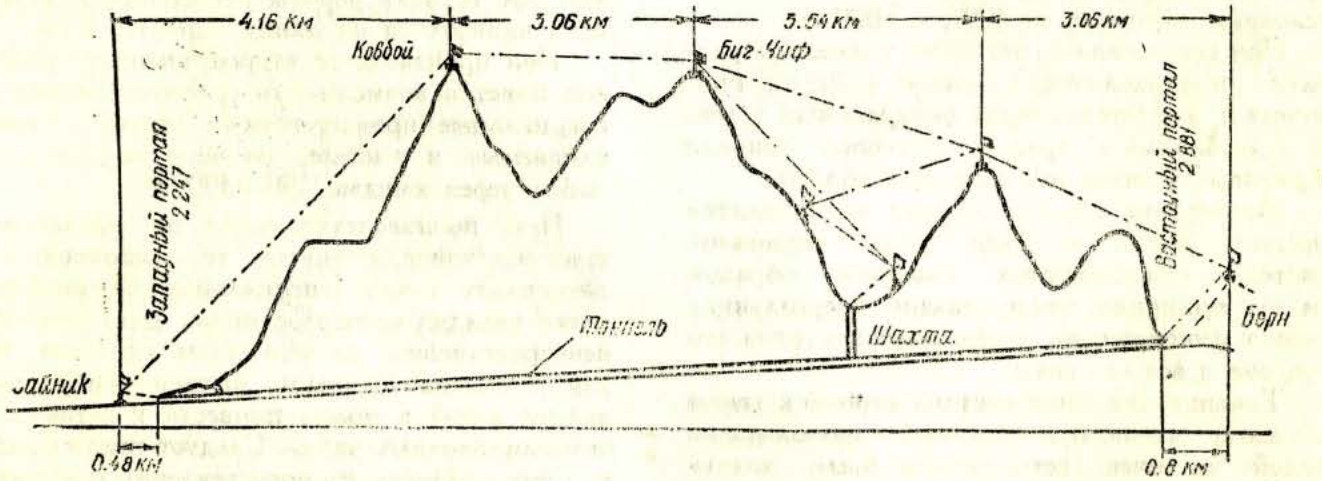


Рис. 112. Тоннель Каскад-Рендж (продольный профиль)

В связи с осложненными топографическими условиями местности разбивка оси Сен-Готардского тоннеля производилась при триангуляционной сети, состоящей из 11 треугольников, примыкающих к базису, имеющему длину 3 *км*. Каждый из треугольников измерялся до 24 раз, а каждый из углов сети измерялся до 20 раз. При этом независимо от разбитой триангуляционной системы была составлена другая триангуляционная система. Оказалось, что при сравнении этих двух съемок по оси тоннеля имелось расхождение порядка 40 *мм*. В связи с имевшими место закруглениями тоннелей в портальных участках устраивались специальные визирные

В таблице 8а приводятся данные, характеризующие точность производства геодезическо-маркшейдерских работ при разбивке осей горных тоннелей.

При пробивке Хинганского тоннеля, кроме триангуляционной системы, использованной для установления направления оси тоннеля, с поверхности были пробурены специальные визирные скважины.

На строительстве Симплонского тоннеля была осуществлена триангуляционная сеть, охватившая 11 пунктов. После ряда измерений выявилась неувязка всей триангуляционной системы в силу отклонения отвеса под влиянием притяжения горных массивов. Лишь

после того, как приняли во внимание поправки на отклонение отвеса, триангуляционная сеть была увязана, причем были установлены два специальных пункта непосредственно по оси прокладываемого тоннеля. Триангуляционные съемки производились неоднократно; при длине проектируемого тоннеля в 19,73 *км* погрешность в отклонении оси тоннеля составила в плане 202 *мм*, а в профиле 87 *мм*.

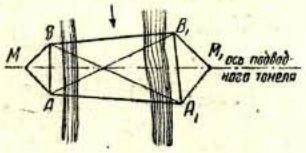


Рис. 113. План разбивки оси подводного тоннеля

Производя триангуляционную съемку, следует обращать особое внимание на правильность разбивки базиса тоннеля (обычно его располагают в равнинной местности). Длину базиса, в зависимости от местных условий, выбирают от 300 до 3000 *м*.

При сооружении петлевых тоннелей разбивка производится с учетом радиуса кривизны и соответствующих центральных углов. Так разбивалась трасса петлевого тоннеля Армавир-Туапсинской железной дороги.

Закрепление базиса тоннеля производится щитами 2×2 *м*. При триангуляционной системе основываются главным образом на том принципе, что положение треугольника строго фиксировано, когда известна одна его сторона и все его углы.

Триангуляционная система строится таким образом, чтобы при установке теодолита на одной из точек сети можно было видеть минимум две другие точки триангуляционной сети. После измерения одной из сторон триангуляционной сети, являющейся основным базисом, и после определения всех углов представляется возможным точно определить положение вершин остальных треугольников.

При тоннельных работах производится триангуляционная съемка третьего класса, когда длина сторон не превышает 3 *км*; при этом все треугольники считаются с достаточной практической точностью плоскими, а не сферическими.

На некоторых тоннелях производится триангуляционная съемка четвертого класса, когда длина сторон треугольников не превышает 1 *км*.

Обычно в тоннельной практике стараются строить триангуляционную систему, избегая слишком острых или тупых углов. Кроме того, стремятся к тому, чтобы триангуляционная система состояла по возможности из равносторонних треугольников.

Для производства триангуляции применяются специальные повторительные теодолиты Керна и Шпренгера, переводящиеся через зенит в вертикальной плоскости, с точностью отсчета 10″.

Высотное положение при трассировке оси тоннеля, в связи с определением продольного профиля и отметок отдельных пунктов триангуляционной сети, а также места установки реперных пунктов, определяется специальной повторной съемкой от одного портала к другому.

В практике прокладки длинных тоннелей обычно проводится так называемая главная разбивка тоннеля. Она ведется непосредственно от обсерваторий, размещаемых у порталов тоннелей. При главном провешивании оси тоннеля работы прерываются, и тоннель визируется на длину порядка 1 *км*.

При производстве второстепенных разбивок имеется возможность ориентироваться на специальные промежуточные знаки, устанавливаемые в тоннеле, по мере продвижения забоя через каждые 100—300 *м*.

При производстве работ по провешиванию оси тоннеля внутри его рекомендуется закреплять точки (специальные маркшейдерские гвозди с отверстиями для отвесов) непосредственно по верхнякам штольни, так как подошва штольни бывает загрязнена, залита водой и может привести к неточности нивеллировочных работ. Следует иметь в виду, что под влиянием горного давления и возмож-

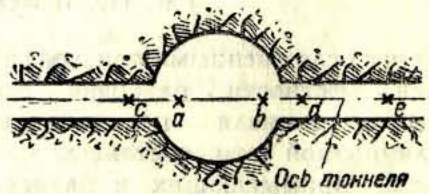


Рис. 114. План разбивки оси тоннеля через шахту по оси трассы

ных деформаций крепей визирные точки могут быть смещены от зафиксированного положения. В тех случаях, когда проявляется сильное горное давление и происходит перемещение крепей, основываются исключительно на реперах, находящихся вне зоны проявления горного давления, иногда вне пределов тоннеля

Реперы устанавливаются по мере продвижения забоя, через каждые 50 *м* внутри направляющего хода, как постоянные знаки, в виде бетонных столбов, заложенных в подошве штольневой выработки.

Точность нивеллировки должна находиться в пределах $0{,}0063\ \sqrt{N}$, где N — число километров, проверенное нивеллировкой. Максимальная ошибка в нивеллировочных работах не должна превышать 18 *мм* на 1 *км*.

При прокладке подводных тоннелей разбивка оси производится методом триангуляции. На обоих берегах измеряются базисы AB и A_1B_1. Каждая из точек M и M_1, лежащих на оси тоннеля, должна быть видна с противоположного берега, а точки AB и A_1B_1 должны быть взаимно видны с обоих берегов (рис. 113).

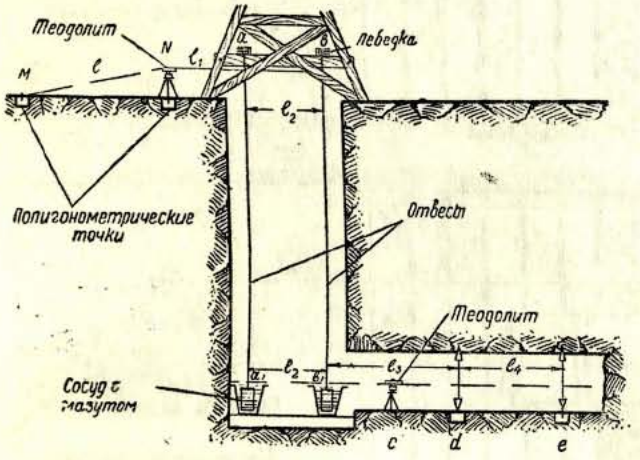


Рис. 115. Разбивка оси от тоннеля через шахту

Имея углы, образующие внутреннюю трапецию AA_1, BB_1, можно вычислить расстояния AA_1 и BB_1. Образуется триангуляционная сеть, дающая возможность произвести необходимые геодезические измерения по трассировке линии на поверхности и установить длину по оси тоннеля MM_1. В городских условиях (застроенность береговой территории) сеть триангуляции значительно усложняется в связи с тем, что приходится давать ряд промежуточных точек и стоянок

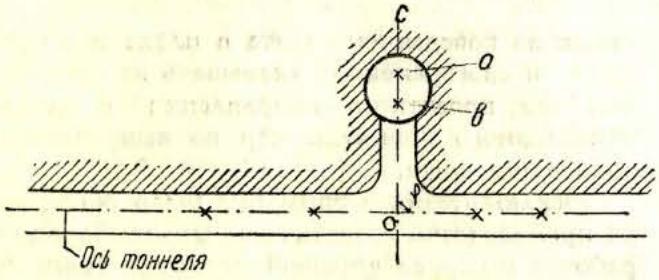


Рис. 116. План разбивки оси тоннеля через шахту, находящуюся в стороне от трассы



Рис. 117. Геодезическо-маркшейдерские работы в тоннеле

инструмента для обеспечения видимости отдельных точек триангуляционной системы.

На основании данных из практики разбивки осей подводных тоннелей можно указать, что при измерении, например, базиса длиной до 700 *м* точность измерения при пятнадцати повторных отсчетах достигает порядка 10 *мм*.

В тех случаях, когда ось тоннеля разбивается через шахту, расположенную непосредственно по оси тоннеля, применяется следующий метод разбивки оси (рис. 114, 115).

Трасса, разбитая на поверхности через ствол шахты, опускается по отвесам в точках *a* и *b*. Внизу, в точке *c*, устанавливается теодолит в створе линии *ab* и закрепляются места точек *d* и *e*, которые образуют ось тоннеля. Имея азимут линии *MNabcde* и расстояние *1*, вычисляют координаты точек *d* и *e*, фиксирующих ось тоннеля. В тех случаях, когда шахта находится не на оси тоннеля, разбивка ведется через поперечную штольню. На поверхности измеряется угол φ,

образуемый подходной штольней и основной трассой. Затем в шахту опускаются два отвеса *a* и *b*, образующие ось подходной штольни, а в точке *c* устанавливается теодолит, который дает направление линии подходной штольни. Из точки *O* дается направление оси основного тоннеля под углом φ (рис. 116 и 117).

В случаях, когда нет уверенности в правильности разбивки оси тоннеля, так как расстояние между двумя отвесами является чрезвычайно малой базой для разбивки тоннеля под землей, по оси тоннеля закладывается ряд контрольных буровых скважин (диаметром 20 *см*), в которые опускаются проволочные отвесы. Необходимо стремиться к тому, чтобы скважины были пробурены строго вертикально, причем отвес не должен касаться стенок трубы. При проходке под сжатым воздухом скважины необходимо тщательно тампонировать цементом во избежание прорыва.

Разбивка оси тоннеля при проходке в нормальных условиях не представляет особой сложности. Но при проходке под сжатым воздухом, при шлюзовой диафрагме, разбивка значительно осложняется тем обстоятельством, что приходится вести линию через воздушные шлюзовые аппараты, считаясь с наличием, с одной стороны, нормального атмосферного давления, с другой — повышенного воздушного давления (рис. 118).

Осложнения при разбивке тоннеля возрастают в условиях многоступенчатого давления в тоннеле. При щитовой проходке, помимо разбивки оси тоннеля, необходимо следить

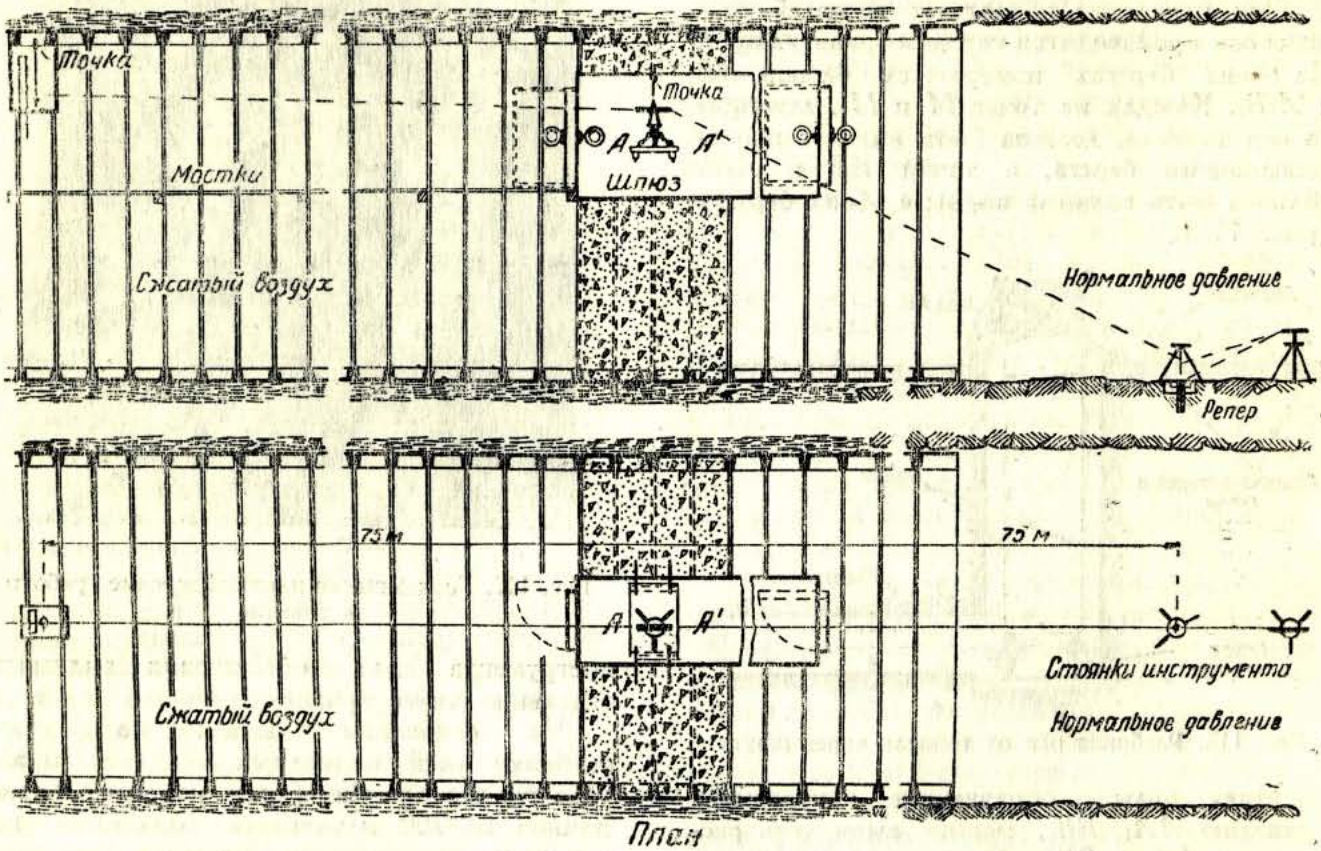


Рис. 118. Разбивка оси тоннеля через шлюз при проходке под сжатым воздухом

также за поведением щита в плане и в профиле и своевременно указывать на отклонения его проектного направления с целью немедленного принятия мер по выправлению положения щита.

Исключительное внимание было обращено на производство геодезическо-маркшейдерских работ в процессе щитовой проходки тоннелей на Метрострое (рис. 119). После каждой подвижки щита геодезическими приборами немедленно фиксировались фактическое положение щита и его отклонение в плане и профиле от проектного направления трассы. На основании маркшейдерских данных после каждой подвижки щита принималось решение о регу-

лировании щита при следующей подвижке. Если щит отклонялся от проектного направления, то регулированием щитовых домкратов и специальной выборкой породы щит выводился на проектное направление при одной



Рис. 119. Сбойка штолен

или нескольких подвижках, в зависимости от размера и характера отклонения. Положение щита в процессе его продвижения, которое продолжалось от 10 до 25 минут, выявлялось по специально установленным отвесам и боковым рейкам, прикрепленным к щиту. Боковые рейки располагались по горизонтальному диаметру тоннеля и прикреплялись с одной стороны к конструкции щита, с другой — скользили по внутренней обделке тоннеля, которая была специально размечена. По разности делений реек устанавливалась величина поступательного движения щита вперед. По отклонению отвесов, прикрепленных к щиту, определялось отклонение самого щита в вертикальном направлении. Замеры по рейкам и отвесам, а равно данные геодезических измерений давали возможность определить положение щита. В настоящее время советскими инженерами конструируются специальные приборы, позволяющие фиксировать положе-

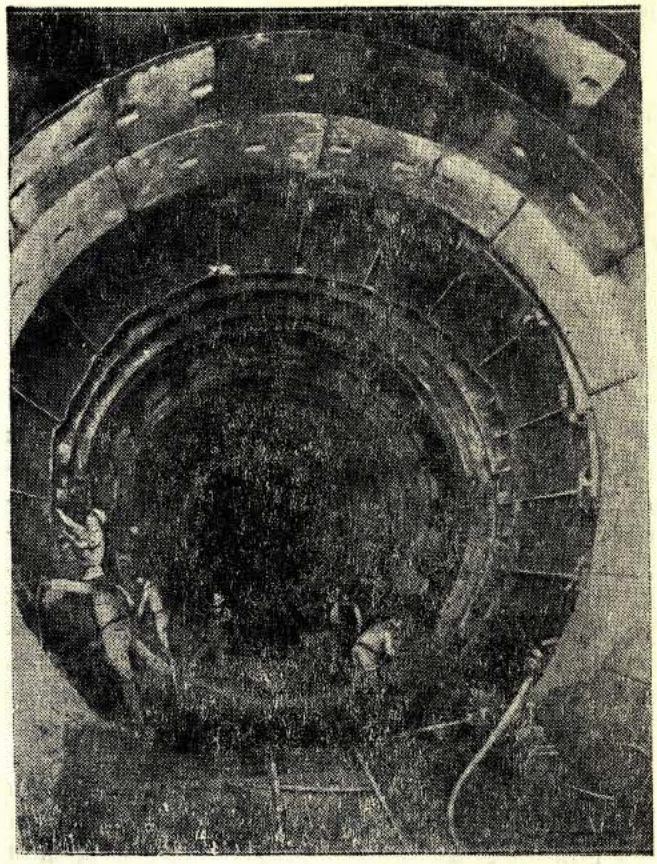


Рис. 120. Сбойка встречных щитов

ние щита в процессе проходки, учитывая, кроме того, его тенденцию к повороту вокруг своей оси.

Современная практика щитовой проходки отличается исключительным искусством ведения щитов по требуемой траектории. Так, при пуске щитов навстречу в расстоянии более 1 000 *м* друг от друга при трассе и профиле, содержащих разные кривые уклоны и подъемы, сбойка щитов осуществляется при расхождении центров сечений на величину менее 30 *мм* (рис. 120). Этому способствует правильность построения геодезической основы, созданной на поверхности, при большой точности съемки, ориентировки шахт и подземной разбивки осей тоннелей.

ГЛАВА ПЯТАЯ

КОНСТРУКЦИИ ТОННЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

НАЗНАЧЕНИЕ, МАТЕРИАЛЫ И ИЗОЛЯЦИЯ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК

Основным требованием, предъявляемым ко всем без исключения тоннельным сооружениям, является прежде всего полная надежность несущей способности обделки при проявлении давления пород, пересекаемых тоннелем. В зависимости от геотехнических и местных условий назначается строительный материал тоннельной обделки: камень, бетон, кирпич, железобетон, чугун, железо, сталь, дерево и т. д., а также сочетание различных материалов в одной системе обделки.

Многолетний опыт строительства и эксплоатации тоннелей показал, что каждый из приведенных материалов с точки зрения статики и динамики сооружений вполне пригоден для устройства обделки. Применяя тот или иной материал, нужно только правильно установить основные размеры сооружения в зависимости от проявляемых горного и гидростатического давлений.

Выбор типа обделки зависит от назначения самого тоннельного сооружения. В железнодорожных тоннелях вопрос водонепроницаемости ранее не имел решающего значения, и в обделках ряда существующих тоннелей обычно устраивались дренажные окна, откуда грунтовые воды поступают в тоннель и по лотку отводятся за порталы. В деривационных тоннелях обделка ни в коем случае не должна допускать утечки воды через тело тоннеля в окружающую породу.

Наиболее строгие требования предъявляются к тоннелю метрополитена, который по условиям эксплоатации должен быть совершенно сухим. Обделка тоннеля должна воспринимать давление [illegible] и быть абсолютно водонепроницаемой.

Помимо этого, тоннельная обделка должна быть устойчивой против возможного разъедания ее тела кислотными компонентами, содержащимися в грунтовых водах. Обделку необходимо изолировать от вредного действия блуждающих токов.

При определении поперечного сечения тоннельной обделки следует иметь в виду назначение и характер эксплоатации тоннельного сооружения, геотехнические условия, тип конструкции и вид материала тоннельной обделки. При проектировании конструкций тоннельных сооружений принимаются во внимание следующие основные требования:

конструкция тоннельного сооружения должна по своему очертанию максимально соответствовать габаритам, обеспечивающим нормальные условия эксплоатации данного сооружения;

конструкция тоннельного сооружения должна обладать необходимой прочностью и удовлетворять требованиям статических расчетов, где учитываются силы давления породы и воды, а равно временных нагрузок, связанных с условиями эксплоатации сооружения;

кроме того, материалы и конструкции тоннельного сооружения должны воспринять те усилия, которые появляются в период строительства тоннельного сооружения; сюда относятся давление щитовых домкратов, воздушное давление, вес тоннельных машин, строительных материалов и т. п.

В зависимости от своего назначения тоннели должны обладать соответствующей водонепроницаемостью. Конструкция тоннельного сооружения должна быть запроектирована таким порядком, чтобы обеспечить удобоисполняемость ее в процессе работ. При это

надлежит стремиться к созданию конструкции, обусловливающей максимальную механизацию тоннельных процессов.

Тоннельная конструкция должна быть запроектирована с таким расчетом, чтобы при заданных геотехнических условиях и предъявляемых требованиях в зависимости от назначения тоннеля она отражала наиболее экономичное решение для данных условий.

При проектировании тоннельного сооружения приходится считаться с влиянием внешних сил, а между тем последние, в зависимости от геотехнических условий, чрезвычайно неопределенны. Необходимо из существующих теорий давления горных пород выбрать наиболее целесоответствующую в данных условиях заложения тоннеля. Этот исключительный по своей сложности вопрос специально освещается в главе XXI «Теории давления горных пород в связи с расчетом обделок тоннелей». В отношении допускаемых напряжений на материал в основном ориентируются на технические условия и на единые нормы строительного проектирования. При этом тоннели относятся к первому классу инженерных сооружений.

В практике тоннельных работ применяются разнообразнейшие поперечные сечения тоннельных разработок. Наименьшим тоннельным ходом является тоннель, построенный в 1914 г. в штате Виргиния (США), имеющий размеры в свету $0{,}6 \times 1{,}5$ *м*.

Поперечные сечения выработок с меньшими размерами стесняют работы и затрудняют вентиляцию. Как правило, выработки с небольшим поперечным сечением обычно проводятся как вспомогательные на протяжении не более 15—20 *м*. В настоящее время ширина тоннельных разработок доходит до 85 *м*. Следует указать, что если по условиям эксплоатации выявится необходимость в устройстве тоннельного сооружения еще больших размеров, то современная тоннельная техника с этой задачей справится.

При определении поперечного сечения тоннеля необходимо стремиться к созданию такого очертания, чтобы вне требуемого габарита не было излишней, не вызываемой прямой необходимостью разработки. Это относится ко всем без исключения тоннельным сооружениям.

После выбора поперечного сечения тоннеля в соответствии с габаритами необходимо выявить, насколько поперечное сечение удовлетворяет геотехническим условиям, в которых тоннель будет заложен. Так, в условиях слабых, водоносных пород необходимо стремиться к круглому очертанию тоннельной обделки; в условиях сильного вертикального давления применяют параболического очертания подковообразный профиль. Окончательные размеры поперечного сечения тоннельной обделки устанавливаются поверочными статическими расчетами.

Обделка тоннельных сооружений имеет целью ограждение тоннелей от обвала и установление статического равновесия вышележащих масс горного массива, давящих на свод, стены и лоток тоннеля. Кроме того, обделка преграждает доступ подземных вод в выработку (в зависимости от назначения тоннеля) и обеспечивает долговечность сооружения.

При проходке тоннельных выработок временного назначения применяют конструкции деревянной обделки. Однако в тоннелях с поперечным сечением больших размеров, в связи с нарастанием горного давления, деревянная тоннельная крепь должна конструироваться таким образом, чтобы она не загромождала выработку. Это обстоятельство обусловливает переход к более прочным и долговечным материалам в виде кирпича, камня, бетона, металла. При проходке тоннелей горным способом на временном деревянном креплении большое распространение получила бетонная обделка. В тех случаях, когда по условиям работы тоннельного контура обделки последняя испытывает большие растягивающие напряжения, применяется железобетонная конструкция. Следует отметить, что в условиях тоннельного строительства сооружение свода из железобетона представляет исключительно трудную задачу. В связи с этим обычно прибегают к устройству так называемого «ложного» свода, под защитой которого впоследствии сооружается несущая железобетонная обделка.

Железобетонные конструкции обделок устраиваются в тех случаях, когда помимо статической имеется и динамическая нагрузка (тоннели в сейсмических зонах, подверженных землетрясениям, тоннели подземных машинных помещений, подверженные вибрациям). Так, например, опыт сооружения тоннелей в Токио показал, что во время землетрясений тоннельные железобетонные конструкции не пострадали. Разрушение было обнаружено лишь в портальных частях тоннеля.

Когда имеется опасность сотрясения и толчков, рекомендуется применять тоннельные

обделки замкнутого контура. В сейсмических зонах, где тоннели пересекают слабые, водоносные породы, конструкции должны быть сильно армированы. При сооружении тоннелей в плотных породах, где эффект распространения колебаний сказывается в меньшей степени, железобетонная конструкция тоннеля делается менее солидных размеров и с меньшим процентом армирования. В условиях сейсмических зон рекомендуется применение конструкции тоннелей в виде железобетонных замкнутых рам или обделок круглого сечения.

Металлические крепления из профилированного металла трапецоидального или овоидального очертания применяются при проходке тоннелей небольших профилей в виде штольневых выработок. В практике тоннельного строительства, особенно в метростроении и при сооружении подводных тоннелей, широко применяются металлические обделки из тюбингов. Кроме того, в некоторых случаях применяется комбинированная обделка в виде внешней деревянной и внутренней железобетонной обделки.

Обделка из водонепроницаемого материала. Применение тоннельной обделки из бетонной кладки не обеспечивает полной водонепроницаемости, так как в тощих бетонах всегда имеются пустоты, которые не заполняются цементом, ввиду чего неизбежно наличие огромного количества водопроводящих пор. Поры образуются также и в бетонах жирной консистенции вследствие испарения воды из бетона в процессе его твердения.

Для придания бетону водонепроницаемости путем заполнения пор, имеющихся в его теле, употребляются квасцы, жиры и т. п., а также целый ряд патентованных препаратов: аквобар, церезит, гидрозит, тринзол и др. Однако к приведенным добавкам следует относиться с большой осторожностью, так как они отрицательно действуют на качество самого бетона и в некоторых случаях значительно понижают его прочность.

Применение тоннельной обделки из каменной кладки также не обеспечивает водонепроницаемости, так как даже при кладке на водонепроницаемом растворе вода может устремиться между плоскостями, образуемыми раствором и камнями. Применение всякого рода цементных, глинистых, битуминозных, силикатизирующих и других растворов, нагнетаемых под давлением за обделку, не разрешает задачи, так как остается неизвестным, насколько раствор обволакивает обделку; при этом нет гарантии в действительном образовании вокруг обделки полной оболочки из нагнетаемого материала.

Необходимо отметить, что при пересечении тоннелем метрополитена водоносных грунтов насыщенное водой бетонное тело обделки представляет собой проводник электричества, дающий выход блуждающим токам, приводящим к вредному действию коррозии на окружающие подземные трубопроводы, кабели и другие сооружения сети подземного хозяйства.

Практика проходки тоннелей в водоносных грунтах вызвала распространение чугунной обделки в виде тюбов. Тюб составляется из плотно сболченных между собой отдельных ребристых сегментов, зажимающих во фланцах стыков специальные прокладки из свинца, асфальтового джута, пропитанного дерева, образуя, таким образом, абсолютно водонепроницаемую обделку. Однако наряду с исключительными преимуществами такой обделки в отношении удобства и простоты производства работ, а также водонепроницаемости необходимо указать, что жесткость тоннелей, сооруженных из чугунных косяков, не всегда является достаточной. В зависимости от характера окружающих тоннель грунтов и динамического влияния движения поездов прогибы вдоль оси тюба, особенно в слабых породах, получаются довольно значительными. Это подтверждается произведенными работами по реконструкции тоннелей под рр. Ист-Ривер и Гудсон на Пенсильванской железной дороге, где пришлось устраивать усиленные балки жесткости в продольном направлении и искусственное основание из набивных бетонных свай.

Чугун, как известно, является материалом, плохо работающим на изгиб и растяжение. Изгибающие усилия и напряжения переменного знака, возникающие при движении поездов по тоннелю, могут вызвать при слабых грунтах значительные изломы чугунной облицовки. Кроме того, чугунная обделка тоннеля подвержена ржавлению и, хотя в меньшей степени, чем другие виды железа, все же уступает по долговечности сооружениям из камня.

Преимущества конструкции чугунных тюбов перед бетонной конструкцией заключаются в том, что она обладает следующими данными:

1. Объем земляных работ ввиду уменьшения поперечного сечения выработок по срав-

нению с бетонной обделкой значительно снижается.

2. Периметр тоннельной обделки уменьшается.

3. Значительно повышается качество работ.

4. Обеспечивается полная водонепроницаемость тоннеля.

5. Металлическая обделка сразу в состоянии воспринять горное давление.

6. Отпадает надобность в кружальной тележке эректора (применяемой при обделке из бетонных блоков), так как при металлических тюбингах рычаг эректора может быть помещен на корпусе самого щита. Скорость проходки щитом при тюбингах значительно увеличивается.

Для тоннельной обделки чугун является, по данным долголетнего опыта эксплоатации метрополитена, наиболее проверенным материалом, мало подвергающимся коррозии. Это не исключает возможности применения в будущем специальных нержавеющих стальных тюбингов, которые при сварке дают абсолютно водонепроницаемый тюб.

Применение стальных сегментов в тоннельных обделках явится значительным шагом вперед, так как облегчение веса и замена болтовых соединений сваркой дают огромный технико-экономический эффект. Однако придется применять специальные стали (с добавкой меди или других металлов), не подверженные действию коррозии. Следует обратить внимание и на плавленные базальт и диабазы, которые при термической обработке дают материал, по качеству превосходящий сталь. Этот материал требует еще дальнейшего экспериментирования. Можно ожидать определенного эффекта от применения тюбингов из модифицированного чугуна (серый чугун с добавками), обладающего некоторыми свойствами стали. Имеется в виду более высокое сопротивление изгибу и разрыву. Изготовление высококачественных тюбингов из модифицированного чугуна требует проведения ряда научно-исследовательских и экспериментальных работ.

В практике тоннельного строительства применяются металлические обделки в виде клепаных железных сегментов (например, Гамбургский тоннель под р. Эльбой). Обделки защищаются снаружи бетонной коркой, образованной нагнетанием раствора под давлением, для предохранения обделки от ржавления. При постройке тоннеля из Детройта в Канаду (1929 г.) и в тоннеле под Бостонской гаванью (1931 г.) были применены обделки из сварных стальных сегментов. При условии равнопрочности чугунных и стальных сегментов вес последних на 35—50% меньше чугунных.

В заключение следует указать, что облицовка тоннелей металлом получила особо большое распространение в СССР (при сооружении Московского метрополитена), в США и Англии.

Обделка тоннеля в сочетании с внутренним изоляционным слоем. Для предотвращения просачивания воды сквозь тело бетонной обделки на внутреннюю поверхность последней наносится изолирующий слой. Наиболее удобными в отношении производства работ являются твердые изоляции — всякого рода штукатурки из жирного цементного раствора с добавлением эмульсий церезита, аквобара, тринзола и других патентованных препаратов. Особенно широкое распространение получил метод торкретирования.

Основной недостаток всех твердых изоляций заключается в том, что под действием осадок и усадок тела тоннеля в изолирующих слоях образуются трещины, через которые проникает вода.

Работа внутренней изоляции в условиях тоннелей метрополитена осложняется тем, что ей приходится воспринимать давление грунтовой воды, проникающей через водопроницаемую обделку и стремящейся оторвать внутренний изоляционный слой от тела тоннеля. Тоннели сети Парижского метрополитена изолированы главным образом твердой цементной изоляцией, нанесенной по внутренней поверхности конструкции обделки тоннельного сооружения.

Для локализации трещин торкретный слой наносится по металлической сетке, которая воспринимает развивающиеся в изолирующих слоях при осадках растягивающие напряжения.

В случае обнаружения трещины, через которую в тоннель просачивается вода, следует пробурить отверстие перфоратором, произвести нагнетание цементного раствора под давлением в 3—4 *ат* и затем проторкретировать поврежденное место.

При проходке в водоносных грунтах с большим гидростатическим давлением внутри обделки устраивают металлические чехлы для придания каменной тоннельной обделке надежной водонепроницаемости (тоннели под рр. Сеной и Детройт).

Наиболее приемлемой для тоннелей является система внутренней эластичной изоляции с защитной железобетонной оболочкой, прижимающей изоляцию к внутренней поверхности несущей конструкции обделки тоннеля.

Оклеечная изоляция состоит из нескольких (трех-четырех) слоев гудронированного картона, наклеиваемого рулонами со стыками вразбежку один на другой, с горячей клебемассой, представляющей собой смесь каменноугольных смолистых продуктов и естественного асфальта (рис. 121).



Рис. 121. Внутренняя изоляция тоннеля

Оклеечная изоляция обладает исключительными преимуществами перед твердыми изоляциями: она гибка, тягуча, эластична и тем самым способна воспринимать растягивающие напряжения, причем осадки сооружений, вызывающие трещины порядка 20 *мм*, не отражаются на целости изоляции и, следовательно, водонепроницаемость обделки не нарушается.

Основной недостаток конструкции обделки с внутренним изоляционным слоем заключается в том, что тело обделки не защищается изоляцией от внешнего агрессивного действия минерализованных грунтовых вод. Вопрос может быть в этом случае разрешен применением пуццоланового цемента. В последнее время начали прибегать к холодному способу устройства битумной изоляции из заранее заготовленных битуминозных плит, стыкуемых между собой паяльной лампой.

Обделка тоннеля в сочетании с внешним изоляционным слоем. Изолирующий слой, уложенный с внешней стороны обделки, помимо защиты тоннеля от попадания внутрь грунтовых вод, ограждает тело тоннеля от разрушительного действия минерализованных грунтовых вод.

Опыт сооружения тоннелей показал, что устройство внешней оклеечной изоляции из слоев гудронизированного картона на горячей клебемассе дает полную изоляцию тоннеля и удовлетворяет всем требованиям нормальной эксплоатации метрополитена.

Однако следует отметить, что если при

открытом способе производства работ оклеечная изоляция устраивается без особых затруднений, то при тоннельном способе работ применение этого вида изоляций связано с осложнениями строительного порядка в части свода обделки, так как кровлю калоттной выработки приходится держать на креплениях.

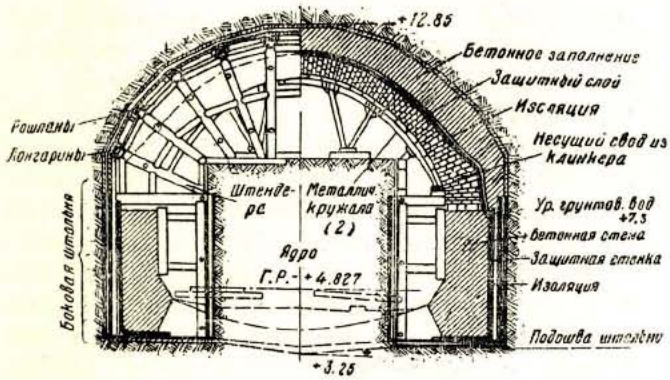


Рис. 122. Тоннель Даммтор (сооружение тоннеля с внешней оклеечной изоляцией)

Внешняя оклеечная изоляция применяется редко, так как она трудно выполнима в подземных условиях. В мировой практике известен случай применения такой изоляции при постройке тоннеля у вокзала Даммтор в Гамбурге. Фронт работ по сооружению этого тоннеля был открыт из рабочей шахты с южной стороны насыпи. Шахта была пройдена до горизонта подошвы фундаментов стен тоннеля. Горизонтальная проходка велась по трехштольневой системе опорного ядра (рис. 122). Предварительно были пройдены крайние штольни нижнего горизонта, включающие стены. Между штендерами возводилась защитная бетонная стенка, которая оклеивалась гудронированным картоном на горячей клебемассе. Затем укладывались защитный бетонный слой и основные бетонные стены тоннельной обделки. Далее проходилась верхняя центральная штольня. После продвижения лба забоя штольни на 30 *м* раскрывалась калотта.

Для устройства внешней оклеечной изоляции свода, которую весьма трудно осуществить при обычных приемах тоннелирования, был принят метод раскрытия калоттного профиля избыточного сечения.

После расширения калотты были установлены кружала и уложен свод из клинкера, опирающийся в пятах на возведенные в боковых штольнях стены. При избыточном профиле в 1,2 *м* представилось возможным произвести оклейку изоляцией внешней поверхности свода и заполнить тощим бетоном остающееся пространство. Следующий этап работ заключался в выборке земляного ядра и устройстве обратного свода.

Все работы производились при искусственном понижении горизонта грунтовых вод.

Если данный метод устройства изоляции оправдывается при сооружении коротких участков тоннеля, то при значительном протяжении тоннеля он становится невыгодным в технико-экономическом отношении. Так, например, участок в 62 *м* строился в течение 15 месяцев, из которых 3 месяца ушло на подготовительные работы. Помимо удорожания земляных и бетонных тоннельных работ от избыточного профиля, в условиях проявления сильного горного давления этот прием становится рискованным.

Другим типом обделки с внешней оклеечной изоляцией является система железобетонной обделки с внешней деревянной оболочкой и наружной оклеечной изоляцией.

Обделка этого типа применялась при щитовой проходке подводного тоннеля под р. Детройт и Дорчестрского тоннеля под каналом форт Пойнт в Бостоне (рис. 123). При

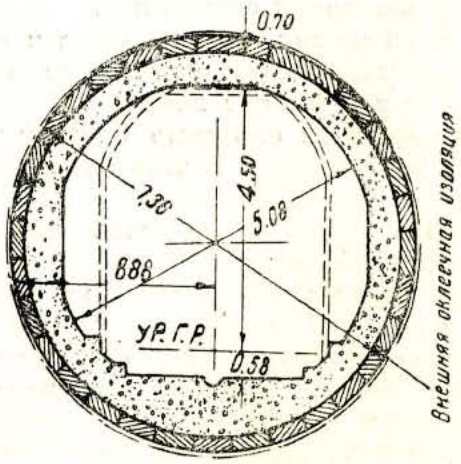


Рис. 123. Дорчестрский тоннель (железо-бетонная обделка с внешней оклеечной изоляцией)

работе щита в его хвосте собирались деревянные косяки размерами 22 × 25 × 140 *см*, которые сбалчивались между собой 12-*мм* болтами, образуя мощную деревянную оболочку, способную воспринимать давление окружающей породы как временную нагрузку. Деревянные сегменты перед постановкой на

место обертывались вокруг несколькими слоями тканей, пропитанных клебемассой. Затем готовая обделка из деревянных сегментов оклеивалась тремя-четырьмя слоями мягкой изоляции. После этого приступали к устройству основной несущей бетонной или железобетонной тоннельной облицовки. Таким образом, получалась бетонная обделка с внешней оклеечной изоляцией.

* * *

Касаясь вопроса прочности и долговечности конструкции тоннельных сооружений специально для метрополитена, следует иметь в виду обстоятельства строительного и эксплоатационного порядка, а именно:

прочность и долговечность материала конструкции тоннельных обделок;

достаточный запас прочности в расчете элементов конструкции;

защиту элементов конструкций тоннелей от коррозии и обеспечение «здоровых» условий эксплоатации сооружений.

Не приходится доказывать доминирующей важности поставленного вопроса с точки зрения долговечности подземного сооружения, требований общественной безопасности при эксплоатации метрополитена. Конструкции обделок должны обеспечить метрополитен в отношении гидро- и электроизоляций и сухости тоннельных сооружений.

С точки зрения строительства и стоимости сооружения вопрос о материале обделки также имеет решающее значение.

Диференцируя стоимость 1 *пог. м* тюбингового перегонного тоннеля строительства метрополитена, выявляем, что около 51% расходов падает на материал обделки из тюбингов и монтаж ее.

Как указывалось, ни один из применяемых в практике строительных материалов полностью не удовлетворяет комплексу высоких требований, которые предъявляются к материалам тоннельных обделок метрополитена по действующим техническим условиям.

Имеются в виду следующие требования:

а) долговечность материала (сопротивление коррозии);

б) прочность материала в условиях горного и гидростатического давления;

в) кислотоупорность в смысле стойкости против агрессивного воздействия минерализованных вод и грунтов;

г) диэлектричность (сохранность от действия блуждающих токов);

д) удобоисполнимость при производстве работ, в процессе тоннелирования;

е) экономичность обделки.

Из имеющихся в настоящее время в нашем распоряжении материалов — камня, бетона, железобетона и чугуна — каждый из них удовлетворяет только части поставленных выше требований.

Чугун как материал привлек инженеров благодаря тем огромным преимуществам которыми он обладает в части возможной максимальной механизации, вплоть до индустриализации подземных работ. Действительно, в сочетании со щитовой или эректорной проходкой чугунные тюбинги, изготовленные и обработанные заводским способом на поверхности, сводят подземные работы преимущественно к монтажу сегментов, а трудоемкий и кустарный труд, связанный с применением временного деревянного крепления, с раскрытием отдельных дробных элементов по фазам, в этом случае отпадает.

Однако нельзя односторонне базироваться лишь на технико-производственном эффекте, который является временным (только на период строительства), и недооценивать при этом главного требования, предъявляемого к материалу обделки, именно в части долговечности материала и полного обеспечения его от «старения», от разрушения, коррозии, учитывая возраст сооружения.

Именно вопросу коррозии чугунной обделки надлежит уделить особое внимание.

В этом отношении богатый материал дает американская и английская практика.

Американским Бюро Стандартов и Американским Нефтяным Институтом, по данным «American Society of Civil Engineers», накоплен большой материал о первопричинах коррозии подземных сооружений и указываются пути для установления прогноза срока службы сооружения, несмотря на то, что этот вопрос еще является недостаточно изученным и далеко не решенным.

Чугун, правда, в меньшей степени, чем сталь, подвержен коррозии, при которой происходит дезинтеграция металла (связанный углерод выделяется в виде графита) и тем самым резко снижается прочность металла, что является весьма важным обстоятельством для несущих тоннельных конструкций, находящихся под постоянным влиянием горного давления.

Крупные убытки, которые терпят американцы от коррозии подземных сооружений,

в нефтяной промышленности, на газопроводах и водопроводных магистралях (до 725 000 *км*), по данным Вейндер и Логана, составляют около 150 000 000 долларов ежегодно.

Это обстоятельство заставило в США отнестись к явлению коррозии весьма внимательно. Американское Бюро Стандартов на основе изучения вскрытых магистралей, целой серии опытов, экспериментов и наблюдений на протяжении ряда десятилетий установило, что доминирующей причиной коррозии металлических подземных сооружений являются физико-механические свойства грунтов, окружающих заложенный трубопровод.

Заложенные в грунт американским Бюро Стандартов опытные 45 пластин различных металлов дали за один год одинаковый вид коррозии поверхности. При этом установлена потеря металла до 21,8 *мг* на 1 *кв. см*. В то же время пластины из одинаковой марки металла, заложенные в разные грунтовые условия, дали резко отличающиеся виды коррозии и разные данные потерь металла, а именно: потеря металла, заложенного в глине, составляла 49,27 *мг/см*^{2}; в песке — 5,9 — 9,2 *мг/см*^{2}; в иле — 40,7 *мг/см*^{2} и в плывуне — 34,82 *мг/см*^{2}.

Это подтверждается и практикой. Наблюдались случаи, когда трубы пролежали в хороших грунтах более 60 лет, а есть случаи разрушения труб уже через 5 лет при сильном процессе коррозии.

По вскрытым металлическим трубопроводам, пролежавшим в грунтах более 40—70 лет, было усмотрено неравномерное, носящее пятнистый характер разъедание поверхности металла на отдельных участках в связи с отличающимся кислородным балансом.

Это усматривается и в теории диференциальной аэрации, подтвержденной опытами Атсона (1916 г.).

Наблюдается разница потенциалов между частицами поверхности металлических трубопроводов, соприкасающихся непосредственно с частицами грунта, к которым поступает воздух и где собственно происходит процесс коррозии, и между частицами металла и грунта, где воздуху доступа нет. Мало подтвержденная электролитическая теория коррозии, по наблюдениям за разностью потенциалов, объясняла образование коррозии глубинным процессом разрушения материала.

Водоносный грунт или вода, соприкасающаяся с поверхностью трубы, обусловливают процесс коррозии, продолжающийся до момента полного израсходования кислорода. При этом продукты коррозии и грунта образуют покрытие достаточной плотности, которое уже в дальнейшем изолирует металл или во всяком случае уменьшает степень проникновения кислорода внутрь металла. Таким образом, скорость распространения коррозии затухает через несколько лет.

Говоря о защитных мероприятиях против коррозии, приходится указать, что наличие достаточно толстых стенок трубопровода способствует удлинению срока службы его. Это доказано работающим еще до сих пор Родчестрским водопроводом (45 *км*), заложенным в 1874 г. Добавкой к стали меди от 0,58 до 1,94% возможно увеличить сопротивление металла коррозии примерно на 20—30%.

Покрытие поверхности труб изолирующими битумными слоями, мешковиной, а в тоннелях нагнетание цементного раствора все же являются паллиативом и не дают полного решения задачи. Покрытия со временем разрушаются, несмотря на то, что к изолирующим покрытиям в практике подземных сооружений предъявляются требования химической устойчивости, механической прочности и способности воспринимать растягивающие напряжения во избежание разрывов изоляции при осадках сооружения. Имеются в виду армированные битумные и цементные покрытия поверхности труб.

Среди американских специалистов имеется тенденция в некоторых случаях итти на утолщение стенок трубопровода, считаясь с возможным поверхностным разрушением стенок; при этом предполагается, что глубинный процесс коррозии остановится. Такое решение вопроса в определенных случаях практически выгоднее, чем применение покрытия из разных защитных материалов.

Говоря о свойствах грунтов, порождающих коррозию заложенных в них металлических трубопроводов, приходится обратиться к Шефарду, изучавшему активность коррозийного процесса, его вид и скорость распространения в различных грунтовых условиях.

Шефард на основе исследований и ряда химических анализов минерализованных грунтов и грунтовых вод установил, что присутствие высокого процентного содержания растворимых солей является весьма важным и даже решающим фактором, влияющим на скорость распространения коррозии и поражения трубопроводов.

Это подтверждается и данными Дениссона (Американский Нефтяной Институт).

Скорость распространения коррозии изучается в свете практической цели — выявления прогноза о сроке и службе закладываемого подземного сооружения. В этом отношении интересны работы доктора Эуинга, попытавшегося установить зависимость процесса распространения коррозии во времени от факторов физических свойств грунта (влажность, температура) и степени минерализованности его. Хотя методы определения скорости и характера распространения коррозии представляются весьма неопределенными, все же они не лишены практического интереса.

Попытки установить, что произойдет с металлическим трубопроводом через определенное число лет, выражается американцами в виде следующей формулы:

$$D = A\sqrt[3]{T},$$

где A — действительная глубина раковин, обнаруженная в металле через один год после закладки трубопровода, T — период работы подземного сооружения, D — предполагаемая глубина раковин в трубопроводах через T лет службы.

При этом допускается, что условия распространения коррозии за весь период работы сооружения являются постоянными.

Кривые, построенные на основе приведенной формулы для ряда металлов и грунтов, дают прогноз, которым американцы в определенных случаях пользуются.

В условиях метрополитена приходится, кроме того, еще изучать вопрос электролитической коррозии от блуждающих токов.

Здесь возможно ожидать возникновения электрокоррозии, разрушающей даже арматуру в железобетонных конструкциях. При этом нарушается сила сцепления железа и бетона и резко снижается прочность несущей конструкции. Вредное действие электрокоррозии сказывается особенно в сырых тоннелях, поэтому и в данном случае вопрос о достижении сухости тоннелей метрополитена является особо важным.

Анализируя конструкции тоннелей метрополитена из чугунных тюбингов, заложенных в водоносных и крайне разнообразных грунтовых условиях (пески, глины, известняки, юрские и карбонные глины, плывуны, смешанные грунты), в свете изложенных соображений о коррозии приходится, кроме того, учитывать, что ответственными элементами конструкции тюбингов в узловых соединениях замкнутого контура кольца являются железные болты, подверженные коррозии в значительно большей степени, чем чугунные тюбинги. Это относится также и к свинцовой изоляции тюбингов.

Богатейший опыт лондонских городских подземных дорог длиною более 400 *км*, где заложено около 3 000 000 *т* чугуна, говорит о том, что тоннели, сооруженные еще 70 лет назад в условиях водонепроницаемой сухой глины, находятся в удовлетворительном состоянии. Чугунные подводные тоннели под р. Ист-Ривер, под р. Гудсон в сочетании с мощной железобетонной внутренней оболочкой находится в удовлетворительном состоянии.

Учитывая огромные возможности и преимущества, которые дает чугун в области механизированного тоннелестроения, необходимо искать новые методы борьбы с коррозией для обеспечения чугунным тоннельным конструкциям долговечности.

Вместе с тем автор считает, что, не замыкаясь в рамки этого материала, следует искать новые пути, новые виды материалов (плавленый базальт, диабаз и др.), обусловливающие создание новых типов конструкций из долговечных материалов, повышающих свою прочность с возрастом сооружения и поддающихся современным модернизованным приемам индустриального подземного строительства.

ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЕЙ ГОРНОГО ТИПА

Обделки железнодорожных тоннелей. Опыт сооружения горных железнодорожных тоннелей в СССР и за границей выявил ряд типов тоннельных обделок, преимущественно подковообразного и полуциркульного очертания как замкнутого контура с обратными сводами, так и незамкнутого контура без обратных сводов. Конструкция тоннельной обделки служит для непосредственного восприятия сил горного давления и предохранения пересекаемых пород от разрушающего действия выветривания.

Следует указать, что отсутствие определенности в теоретических указаниях о характере внешних сил горного давления, действующих на тоннельную обделку, не дает возможности произвести статический расчет конструкции, а следовательно, и правильно подобрать размеры элементов поперечного

сечения обделки. Это приводит к необходимости считаться с данными практики построенных и эксплоатируемых тоннелей и подбирать соответствующие материалы

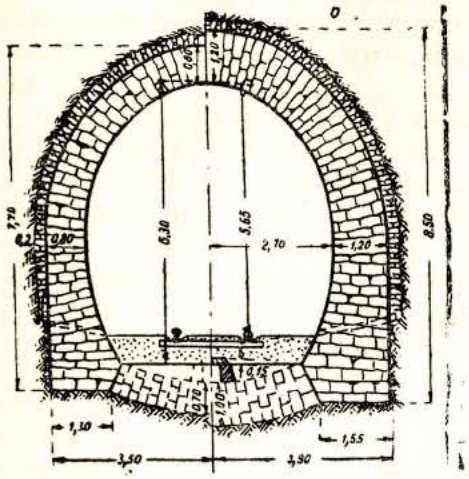


Рис. 124. Конструкция обделки тоннеля

обделки при высококачественном выполнении работ. В исключительных случаях, когда есть полная уверенность в том, что пересекаемые породы обладают высоким коэфициентом крепости, не проявляют горного давления и не подвержены действию выветривания, от устройства тоннельной обделки можно отказаться. В большинстве случаев для нормальной эксплоатации железнодорожных тоннелей устройство каменной обделки является обязательным (рис. 124). Иногда могут быть приняты промежуточные решения, когда, например, искусственная обделка устраивается только для свода тоннеля, который опирается непосредственно на породу. Если условия эксплоатации железной дороги не требуют на данном этапе своей работы двухпутного движения, можно при прокладке тоннеля устраивать свод обделки на два пути, а штроссу тоннеля разрабатывать только под один путь. В дальнейшем, когда условия эксплоатации дороги настоятельно потребуют устройства второго пути, имеется возможность без перерыва движения выбрать оставленную при постройке часть штроссы, подвести стены под уложенный свод и закончить полностью двухпутный профиль тоннеля. Так, например, при сооружении Кругобайкальской железной дороги на отдельных кольцах устраивалась тоннельная обделка в виде свода, опирающегося на породу и рассчитанного непосредственно на устройство двухпутного тоннеля. Штроссный же профиль при строительстве был выбран только на один путь (рис. 125).

При устройстве обделки в портальных участках особое внимание уделяется материалу кладки, так как в этих местах она подвержена воздействию переменных температур. В зависимости от климатических условий для обделки портальных зон необходимо применять морозоупорные материалы, причем фундаменты тоннельной обделки должны быть заложены ниже глубины промерзания. Материалами для обделки железнодорожных тоннелей могут служить бетон, бутовая кладка, бетонитовые камни, кирпич, железобетон, чугунные сегменты.

В условиях водоносных пород следует обращать внимание на морозостойкость материала тоннельной обделки в связи с возможным вредным влиянием изменения температуры на материал обделки.

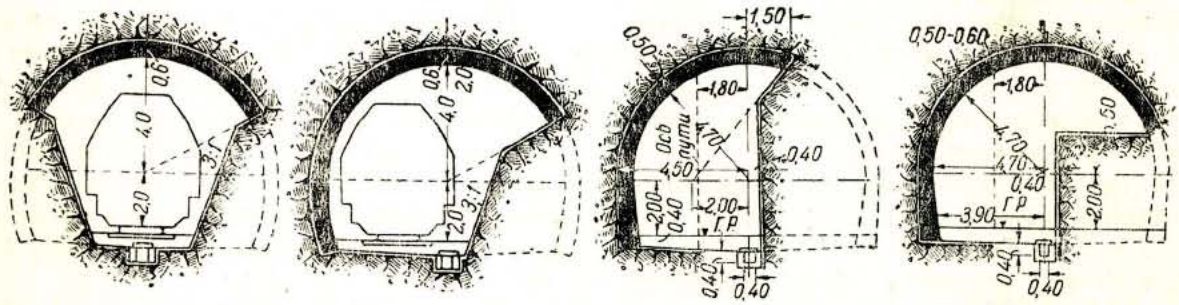


Рис. 125. Неполный профиль обделки тоннеля

Конфигурация поперечного сечения тоннельной обделки устанавливается в зависимости от целого ряда факторов, а именно: от габарита подвижного состава, требуемого условиями эксплоатации, от характера пересекаемых пород, от величины и направления ожидаемого горного давления, от вида материала тоннельной обделки, метода производства работ. Обычно при определении размеров профиля тоннельной обделки в свету к основным габаритам, предъявляемым условиями эксплоатации, должен быть дан опреде-

ленный запас в сечении — строительный зазор, рассчитанный на возможность осадок, отклонений, неточностей при производстве работ. Строительный зазор необходим в тех случаях, когда ожидается проявление сильного горного давления, которое может деформировать тоннельную обделку. Применяемая в практике строительства горных тоннелей обделка подковообразной формы (параболического очертания) в горных условиях является наиболее приемлемой для восприятия значительного давления на больших глубинах. Однако следует отметить, что параболическая форма свода является не совсем экономичной, так как она дает избыток тоннельной выломки, не вызываемой требованиями габаритов. В условиях слабых плывунных пород наиболее приемлемой является круглая тоннельная обделка. В случае проявления бокового давления форму обделки следует видоизменять за счет утолщения стен обделки, а в некоторых случаях применять обделку несимметричного типа. Несимметричные обделки применяются при прокладке тоннелей на косогорах и в оползневых зонах. При проявлении усиленного двустороннего бокового горного давления кривизна стен увеличивается при замкнутом контуре обделки. При давлении снизу вверх нужно обязательно устроить обратный свод тоннельной конструкции.

Очертание тоннельной обделки в значительной степени находится в зависимости от статического расчета обделки и корректируется данными практики уже построенных и эксплоатируемых тоннелей.

В практике строительства железнодорожных тоннелей применяются следующие размеры поперечного сечения:

а) однопутный тоннель без обратного свода — от 35 до 50 $м^2$;

б) однопутный тоннель с обратным сводом — от 45 до 60 $м^2$;

в) двухпутный тоннель без обратного свода — от 70 до 85 $м^2$;

г) двухпутный тоннель с обратным сводом — от 85 до 100 $м^2$.

При пересечении скальных пород, не подверженных действию выветривания, и при отсутствии горного давления некоторые участки тоннелей могут быть оставлены совершенно без всякой обделки. Принятие подобного решения в каждом отдельном случае подлежит специальному обоснованию во избежание осложнений в период эксплоатации, ибо устройство тоннельной обделки в период эксплоатации вызывает значительные затруднения и удорожание работ.

В некоторых случаях, когда имеются породы, подверженные незначительному действию выветривания, и массив настолько устойчив, что не проявляет признаков горного давления, можно устраивать легкие железобетонные покрытия, имеющие назначение защитить окружающий массив от действия выветривания, но не рассчитанные на восприятие сил горного давления.

Профиль обделок железнодорожных тоннелей в различных странах имеет разные габариты и размеры. Так, например, в Италии двухпутные тоннели имеют в свету 8 *м* по линии пят свода и высоту над уровнем головки рельса в свету 6 *м*. Во Франции ширина в свету от 8 до 8,2 *м* по линии пят свода, а высота над головкой рельса 5,8 — 6 *м*. В Германии тоннели в свету по горизонтальному диаметру 8,2 *м*, при высоте 6,2 *м* от головки рельса до замка свода, при полуциркульном очертании последнего. Имеются тоннели размерами в свету от 8,5 до 8,7 *м*. В Австрии ширина тоннелей 8,2 *м*, а высота над головкой рельса в свету 6,4 *м*.

Для однопутных тоннелей ширина по линии пят свода во французских тоннелях около 5 *м* (при очертании свода многоцентровыми кривыми), а в Австрии до 5,5 *м*. В Италии ширина тоннелей в свету от 4,6 до 5 *м* (и даже до 5,5 *м*). В Швейцарии Риккенский тоннель протяжением 8,6 *км* имеет ширину 5,2 *м* и высоту от уровня головки рельса до замка свода 5,8 *м* по вертикальному диаметру. При наличии кривых размеры тоннельной обделки соответственно увеличиваются в связи с повышением наружного рельса (рис. 126).

При решении вопроса о том, строить ли тоннель однопутного или двухпутного профиля, необходимо иметь в виду следующее: если вскоре после постройки одного пути условия эксплоатации железной дороги настоятельно потребуют прокладки второго пути, то следует сооружать сразу двухпутный тоннельный профиль. В этом случае не надо прибегать к предварительному устройству одной стены и свода тоннельной обделки, опирающихся непосредственно на породу, так как в дальнейшем при эксплоатации тоннеля выборка боковой части штроссы и подводка стен будут затруднительны и могут обойтись в определенных случаях гораздо дороже, чем постройка тоннеля сразу на полный профиль.

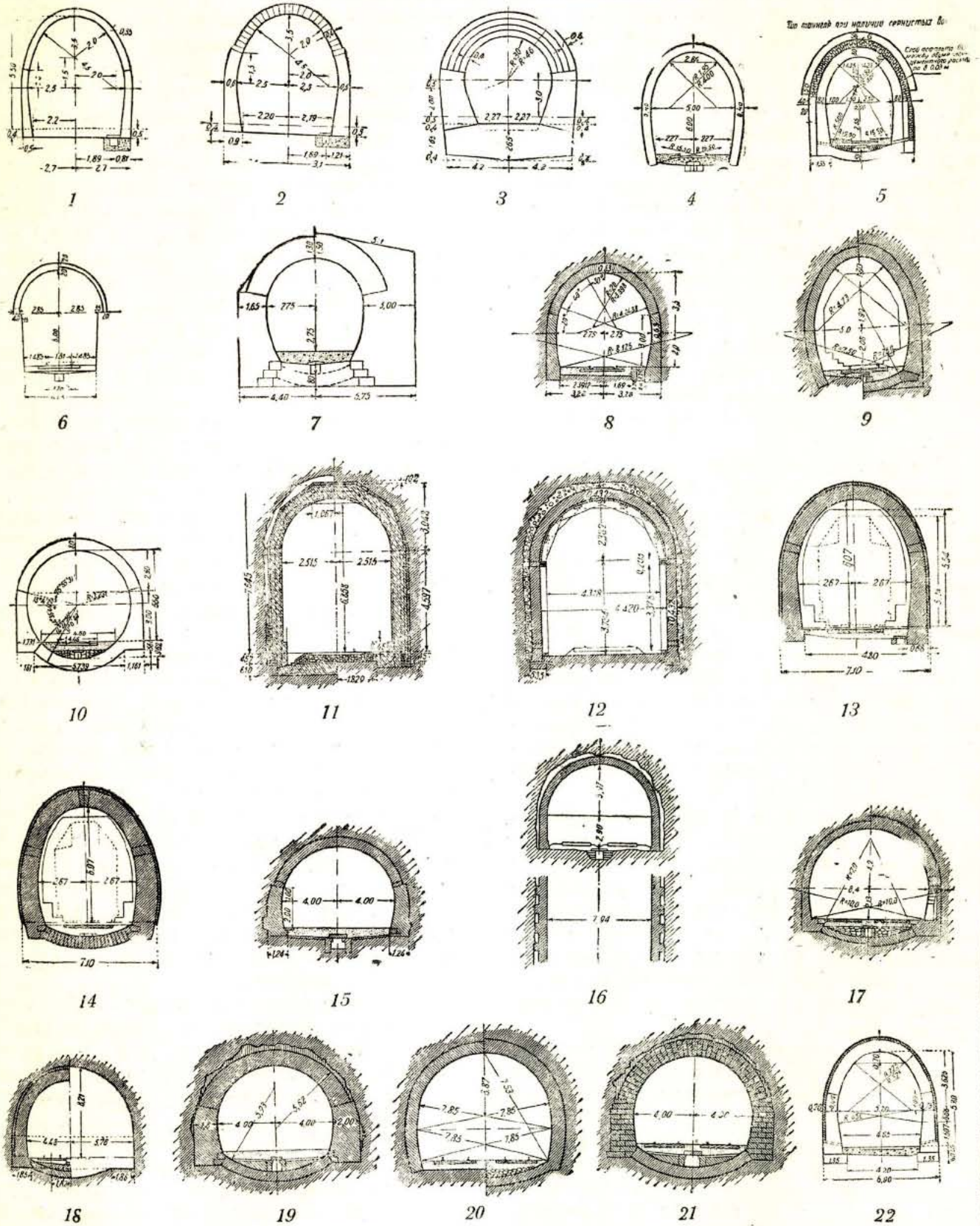


Рис. 126. Типы поперечных сечений однопутных и двухпутных горных железнодорожных тоннелей

Мировая практика сооружений и эксплоатации железнодорожных тоннелей выявила ряд следующих положений. При двухпутном профиле дренажную канаву необходимо располагать посредине тоннеля. При однопутном тоннеле дренажная канава, в зависимости от конструкции, может располагаться как в середине, так и сбоку. В последнем случае это приводит к устройству несимметричного обратного свода. Устройство боковых лотков применяется главным образом там, где ожидается значительное поступление воды с боков тоннеля; при этом стараются отвести воду в лоток, не давая ей проникать в балласт железнодорожного пути. В тех случаях, когда ожидается усиленное гидростатическое давление снизу, необходимо устраивать лоток в виде обратного свода значительной кривизны.

При развитии сильного горного давления тоннельную обделку необходимо конструировать также с обратным сводом. Размеры тоннельной обделки должны определяться на основании расчетов по выбранной теории горного давления с учетом характера деформаций крепи в процессе проходки направляющего хода.

При составлении проекта тоннеля предварительно изучаются геотехнические данные, характеризующие условия и характер пересекаемых тоннелем пород, их физико-механические свойства, мощность, условия напластования, водоносность пород, температура, наличие газов и подземных источников.

В соответствии с назначением данного тоннеля и техническими условиями его эксплоатации определяются габариты и формы его поперечного сечения. Для железнодорожного тоннеля устанавливается форма двухпутного или однопутного сечения с учетом уширения путей на кривых. При проектировании тоннеля для электрических железных дорог учитывается месторасположение контактного провода.

Отметки положения тоннеля в профиле устанавливаются в зависимости от местных условий трассировки тоннеля и подходов к нему с учетом эксплоатационных факторов.

Обычно в тоннельной практике возражают против закладки двух однопутных горных тоннелей, расположенных вблизи друг от друга, мотивируя это главным образом тем, что в осложненном режиме горного массива проявляется усиленное горное давление, которое может повредить конструкции обеих тоннельных обделок. Поэтому при закладке двух однопутных горных тоннелей необходимо стремиться к тому, чтобы расстояние между ними по возможности было не менее 30 *м*. В случае необходимости серьезного ремонта в тоннеле однопутного профиля движение прекращается, в то время как при наличии двухпутного тоннеля ремонт возможно производить без перерыва движения или в крайнем случае при эксплоатации одного пути. Сопротивление движению в однопутном тоннеле в зависимости от местных условий превышает на 50—200% величину сопротивления движению на открытых участках.

В практике сооружения горных железнодорожных тоннелей профили с количеством путей больше двух не применяются, так как это не вызывается условиями эксплоатации и, кроме того, связано с огромными затруднениями в проходке, обусловленными возрастающими размерами горного давления.

Стоимость сооружения однопутного железнодорожного тоннеля составляет ориентировочно 60—70% стоимости двухпутного тоннеля. Сооружение двух однопутных параллельных тоннелей обходится дороже двухпутного тоннеля примерно на 20—40%, в зависимости от геологических условий.

В силу неопределенности направления величины горного давления, которое выявляется лишь в процессе проходки, в установленный проектный профиль тоннеля вводятся коррективы и изменения, определяющие наиболее целесообразный тип обделки на данном кольце (2—9 *м*) трассы тоннеля.

Таким образом, при проектировании и постройке тоннеля, в зависимости от пересекаемых пород, назначается ряд проверенных расчетом типов тоннельных обделок, применение которых для данного кольца выявляется в процессе пробивки направляющего хода и раскрытия профиля.

Вопрос о двух однопутных либо одном двухпутном горном железнодорожном тоннеле до настоящего времени еще не решен: в каждом отдельном случае вопрос этот требует специального технико-экономического анализа.

В практике железнодорожных горных тоннелей в СССР и за границей применяются следующие типы поперечных сечений:

1) профиль тоннеля для не подверженных выветриванию твердых пород, не проявляющих горного давления; выработка оставляется без искусственной облицовки;

2) профиль тоннеля, пересекающего твердые породы, подверженные действию выветривания, но не проявляющие горного давления; защитная бетонная облицовка, а в некоторых случаях торкретный слой толщиной 3—5 *см*;

3) профиль тоннеля, пересекающего горные породы, не проявляющие значительного горного давления;

4) профиль тоннеля, пересекающего слабые грунты, проявляющие сильное вертикальное горное давление;

5) профиль тоннеля, пересекающего грунты с вертикальным и боковым давлением; тоннельная обделка имеет обратный свод;

6) профиль несимметричного типа тоннельной обделки при одностороннем боковом давлении.

Несимметричный профиль применяется при прокладке тоннелей в зонах, подверженных оползневым явлениям, например на косогорах.

В процессе проходки, в зависимости от изменения характера грунтов, заложенных как по пяте свода, так и по подошве фундаментов тоннеля, прибегают к изменению проектных размеров элементов тоннельной обделки. В тех случаях, когда при проходке прорезаются слабые грунты, попадающие в профиль тоннеля, приходится понижать отметки подошвы фундаментов тоннеля, не изменяя при этом отметки головки рельса железнодорожного пути.

При пересечении карстов и при наличии выклинивания слабых пород очертание тоннельной обделки и ее размеры могут выходить за пределы принятых в тоннельной практике типов.

Ниши. По техническим условиям эксплоатации железнодорожных тоннелей предусматривается устройство в стенах тоннельной обделки специальных ниш, предназначенных для укрытия обслуживающего персонала во время прохода поезда. Ниши располагаются на расстоянии 50 *м* друг от друга, считая по одной стороне в шахматном порядке, в тоннелях длиной больше 250 *м*. Ниши для укрытия людей устраиваются высотой 2,2 *м*, глубиной 1 *м* и шириной 2 *м* (рис. 127а).

При наличии выветривающихся пород облицовка контура ниши является обязательной. В некоторых случаях при наличии не выветривающихся пород ниши могут не облицовываться.

В тоннелях устраиваются и специальные большие ниши-камеры (через каждые 300 *м*) для укрытия путевой вагонетки или рабочей платформы. Камеры имеют высоту 2,8 *м*, ширину 4 *м* и глубину до 4 *м*.

При прокладке железнодорожных тоннелей большого протяжения устраиваются, кроме того, камеры больших размеров для хранения

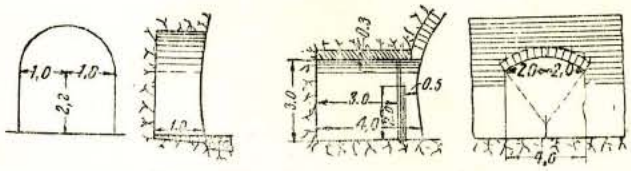


Рис. 127а. Тоннельные ниши

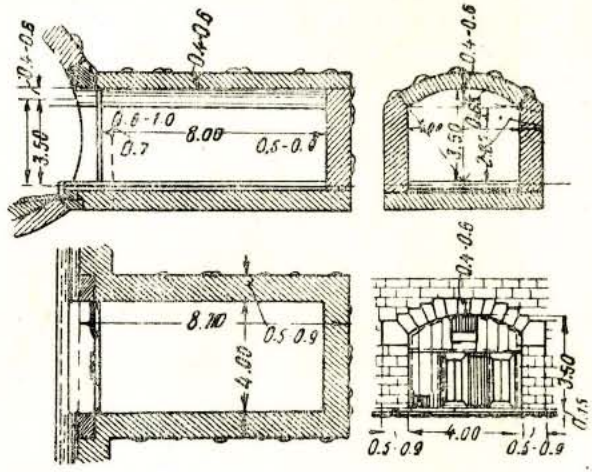


Рис. 127б. Тоннельная камера

вагонеток, материалов, инструментов. Эти камеры делаются шириной 4 *м*, высотой 3,5 *м*, глубиной до 8 *м* и располагаются через каждые 4 *км*. Так, например, при сооружении Симплонского тоннеля на протяжении 19,7 *км* было устроено 4 большие камеры, 16 больших ниш и 176 обыкновенных ниш (рис. 127б).

Тоннельные порталы. Тоннельные порталы (входы и выходы из тоннелей) требуют специального укрепления во избежание оползней откосов (боковых и лобового) подходных выемок. Порталы, в зависимости от значения месторасположения и длины тоннеля, имеют свое архитектурное оформление (рис. 128, 129, 130).

При наличии крепких, не выветривающихся пород специальные портальные укрепления не делаются. В этом случае ограничиваются устройством лишь головного кольца.

Порталы обрабатываются в виде торцовой стены с уклоном 1 : 5 до очертания свода тоннельной обделки. В тех случаях, когда возникает опасность осыпания камней и снежных

лавин с верхней части выемки, портальный участок тоннеля несколько удлиняется, а конструкция портала увязывается с подпорными стенками лобовой части и откосов выемки.

Порталы специальных конструкций устраиваются при прокладке тоннелей на косогорах и в тех случаях, когда ожидаются оползневые явления.

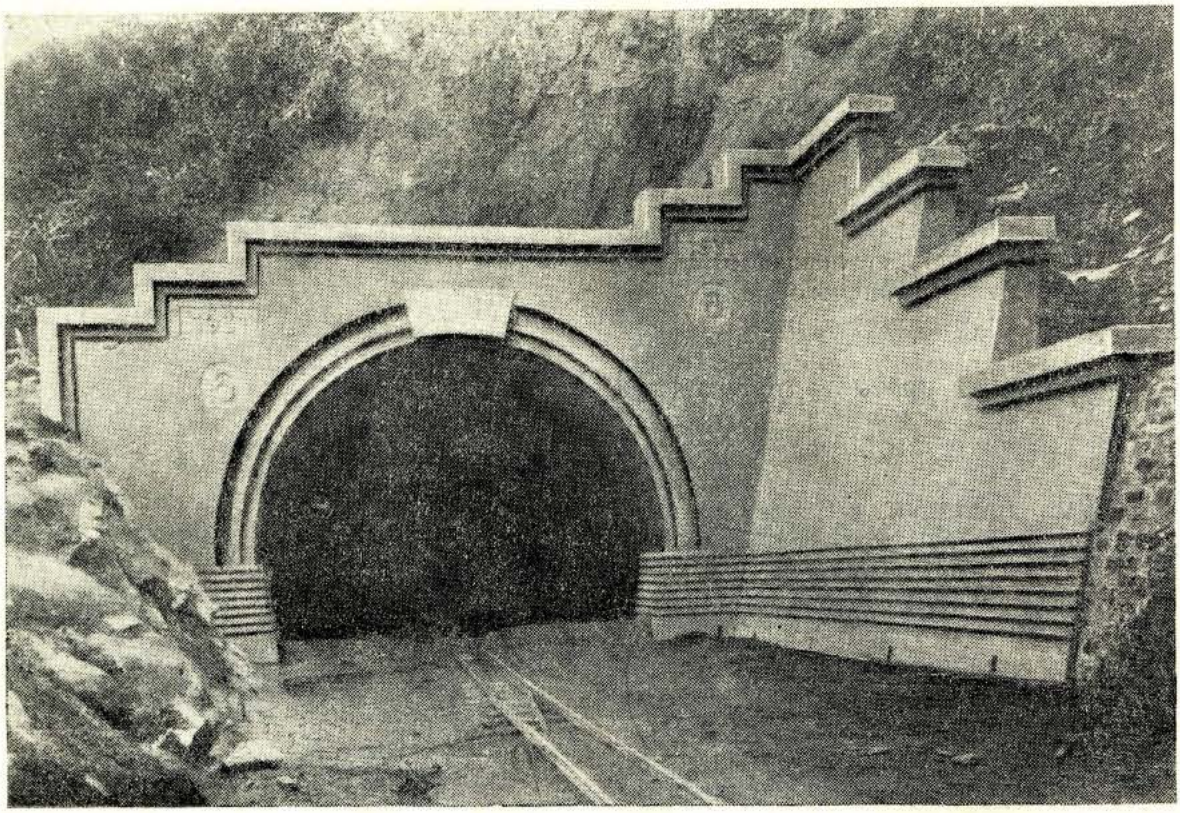


Рис. 128. Общий вид портала железнодорожного тоннеля

При сооружении портала особое внимание уделяется отводу воды, стекающей с лобового откоса и из лотка тоннеля в кюветы

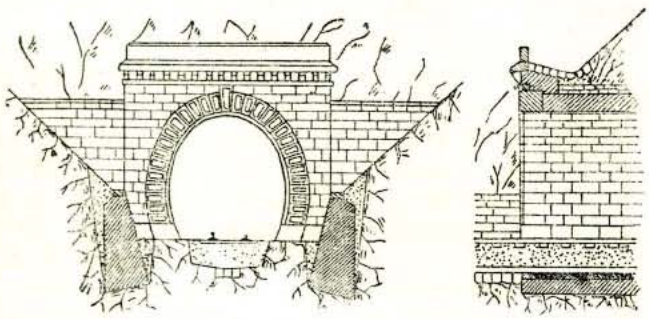


Рис. 129. Конструкция портала железнодорожного тоннеля

припортальной выемки. В тех случаях, когда портал тоннеля проходит под некоторым углом к горному массиву, конструкция портала должна иметь особое очертание.

Конструкции крытых защитных галлерей (полутоннели). При сооружении подходных к тоннелю участков обычно устраиваются крытые галлереи, предназначенные для предохранения железнодорожного пути от загромождения камнями, от снежных и горных обвалов, осыпей. В зависимости от трассировки линии и от характера ее ведения (полунасыпью, полувыемкой или полутоннелем) проектируется тот или иной тип крытой галлереи.

В практике строительства Круго-Байкальской железной дороги (СССР), железной дороги через Скалистые горы (Америка), железных дорог Англии, Швейцарии, Италии и др. крытые галлереи нашли широкое распространение. В Канаде, на Тихоокеанской железной дороге, при подходе к горному кряжу Сиерра-Невада сооружена крытая защитная галлерея протяжением 48 *км*.

Конструкции крытых галлерей бывают каменные, железобетонные, металлические и деревянные. Кроме того, различают галлереи легкого и тяжелого типа.

чем куски скальных пород могут устремляться с большой высоты и проявлять динамическое действие, устраиваются защитные галлереи тяжелого типа. Последние должны быть рас-

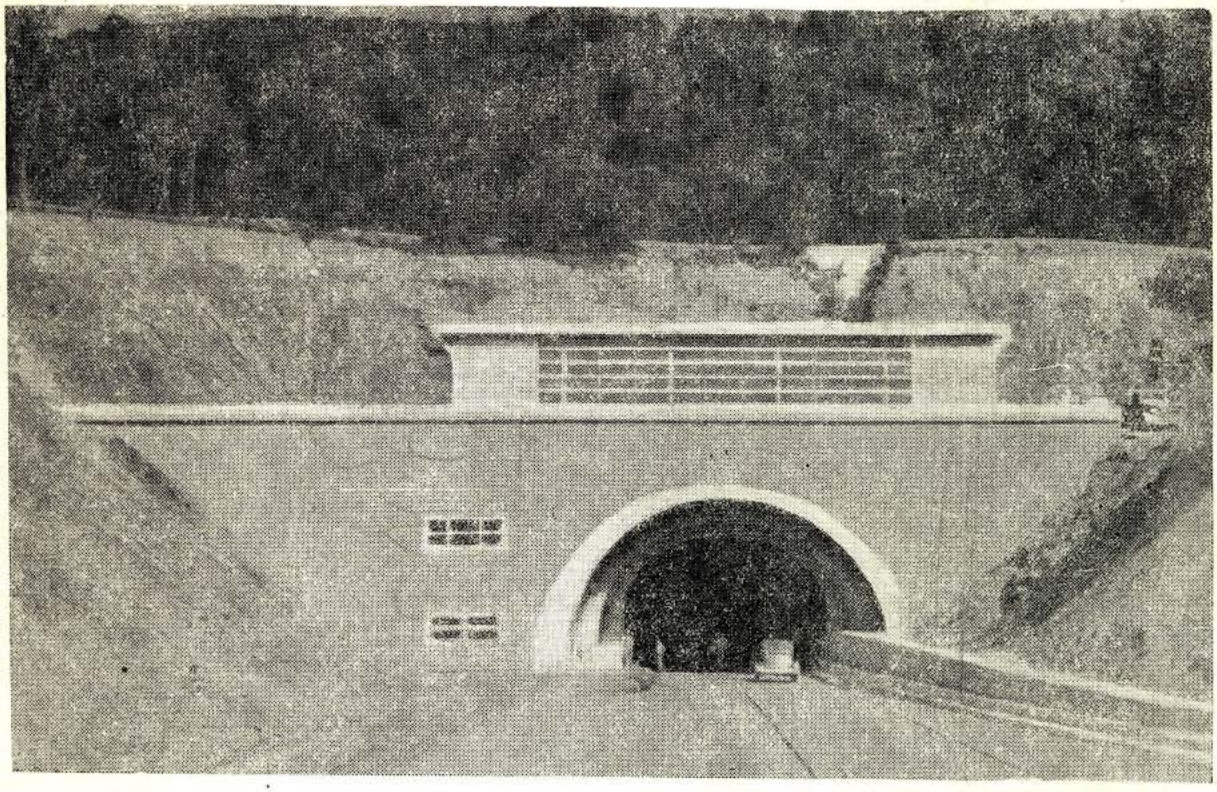


Рис. 130. Портал горного автодорожного тоннеля

Защитные галлереи легкого типа. Защитные галлереи легкого типа применяются главным образом в тех местах, где можно ожидать осыпание пород, которое не вызывает значительного динамического эффекта и разрушающим образом не повлияет на конструкцию галлереи. В этих случаях для защиты путей от засыпки обломочным материалом устраивают галлереи легкого типа. Конструкция такой галлереи в основном представляет собой перекрытие из металлических балок, которые с одной стороны опираются на подпорную стенку, выложенную с нагорной стороны пути, а с другой — на ряд металлических колонн. Поверхность кровли галлереи покрывается слоем щебня толщиной в 0,5 *м* (рис. 131).

Защитные галлереи тяжелого типа. Когда в припортальных участках откосы состоят из пород, подвергающихся непрерывному выветриванию, когда следует ожидать значительного оползания масс на железнодорожный путь, при-

считаны не только на вес устремляющихся вниз сыпучих масс, но и на динамические удары больших глыб породы, которые могут

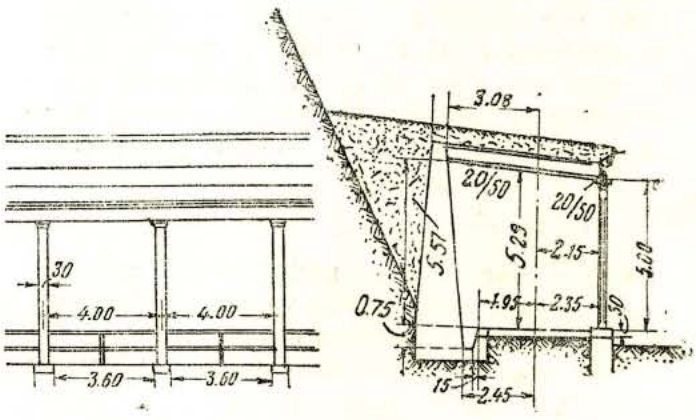


Рис. 131. Схема защитной галлереи

пробить конструкцию защитной галлереи. В практике обычно применяются галлереи железобетонной или металлической конструк-

ции, покрываемые щебнем (слоем 1,5—2 *м*) для амортизации ударов падающих скальных глыб. Галлереи проектируются усиленной конструкции и должны быть рассчитаны на самые неблагоприятные условия.

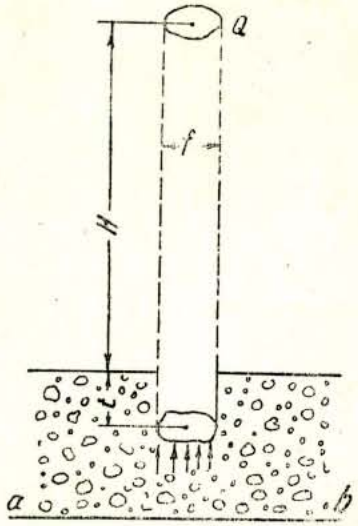


Рис. 132.

В практике известны опыты инж. Бирбаумера, который экспериментальным путем выявил основные предпосылки для расчета конструкции защитных галлерей. Его опытами выявлено, что при падении глыбы весом Q с высоты H она проникает в щебеночную засыпку на глубину t (рис. 132).

Базируясь на уравнении работы:

$$A = Q\ (H + t) = \int_0^t pf dt,$$

где ρ — удельная величина сопротивления прониканию глыбы в толщу засыпки, а f — площадь, по которой распространяется сопротивление ρ, Бирбаумер устанавливает величину проникания глыбы Q на глубину t:

$$t = \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)\sqrt{\frac{2A}{\gamma f}},$$

где γ — объемный вес щебеночной засыпки, а φ — угол внутреннего трения щебеночной засыпки над перекрытием галлереи.

Формула Бирбаумера дает основные параметры для расчета крытых галлерей тяжелого типа.

Следует указать, что расчет крытой, защитной галлереи является все же весьма неопределенным вследствие неясности проявления внешних сил и невозможности учета местных неблагоприятных условий в период устремления лавины на перекрытие галлереи. Но, учитывая динамическое влияние и работу конструкции галлереи, в последнее время предпочитают применять усиленную армированную железобетонную конструкцию, которая наиболее приспособлена к восприятию динамических усилий (рис. 133).

В качестве иллюстрации можно привести несколько примеров сооружения защитных галлерей тяжелого типа. Так, при подходе к тоннелю Миттенштейн на Сен-Готардской железной дороге путь с одной стороны ограничивается скальным обрывом, а с другой — Фирвальдштетским озером. Для защиты полотна железной дороги от обвалов здесь устроена железобетонная галлерея длиной 47 *м*. Перекрытие сделано в виде металлических балок, с одной стороны опирающихся на подпорную стенку, а с другой — на металлические колонны. Над перекрытием галлереи устроена засыпка из щебня слоем в 2 *м*.

При подходе к тоннелю Ауца устроена защитная галлерея протяжением 132 *м*. При трассировке железнодорожного пути по косогору считались с возможностью осыпания больших масс камней, которые должна была

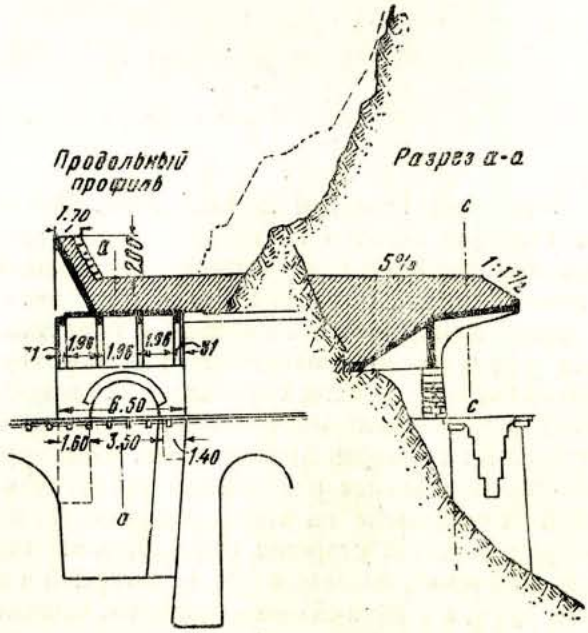


Рис. 133. Защитная галлерея тяжелого типа (консольная железо-бетонная конструкция)

воспринять железобетонная конструкция защитной галлереи. Конструкция представляет собой с одной стороны подпорную бетонную стенку толщиной 50 *см* с уклоном 0,1, а с другой стороны — ряд железобетонных колонн,

поставленных на взаимном расстоянии 4 *м* и поддерживающих железобетонную балку, на которую опирается несущее перекрытие галлереи. Железобетонное перекрытие состоит из ребристой плиты: размеры ребер 40×20 *см*;

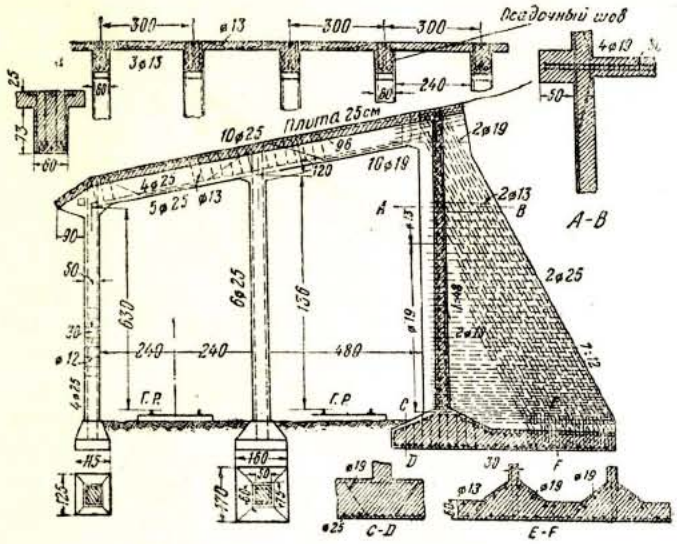


Рис. 134. Защитная галлерея тяжелого типа

толщина плиты 10 *см*; расстояние между ребрами 1,1 *м*. Сверху над перекрытием устроена засыпка из щебня слоем в 0,5 *м*.

Для ограждения путей от снежных обвалов на железной дороге Грейт Норсерн (Англия) устроен целый ряд крытых галлерей. Вначале эти галлереи строились деревянными. Затем приступили к сооружению защитных галлерей железобетонной конструкции. Перекрытие галлерей состоит из железобетонных ребристых плит толщиной 25 *см*, при балках размерами 50×75 *см*. С одной стороны имеется железобетонная подпорная стенка, а с другой — ряд колонн как посредине, так и с края железнодорожного пути (рис. 134). В зависимости от местных условий, опорные части железобетонных конструкций устраивались с выпуском арматуры и заделкой ее непосредственно в скальную породу. Перекрытие двухпутной защитной галлереи проектировалось из расчета нагрузки 6 *т/м*^{2}. Условия эксплоатации этих галлерей, защищающих путь от снежных обвалов, выявили полную их устойчивость (рис. 135).

На этой же дороге были применены и комбинированные конструкции (железобетон и дерево). Так, около 4,5 *км* двухпутных галлерей было сооружено комбинированного типа в виде железобетонной опорной конструкции, заанкеренной в породу с нагорной стороны.

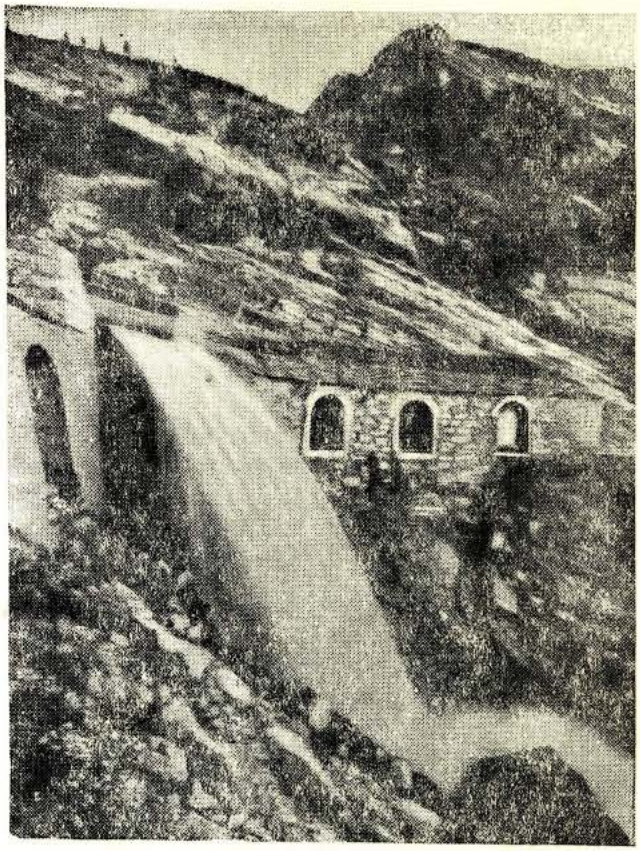


Рис. 135. Симплонская дорога (пропуск воды через защитную галлерею)

Эта конструкция в сочетании с деревянным перекрытием и деревянными колоннами образовала защитную галлерею. Следует указать,

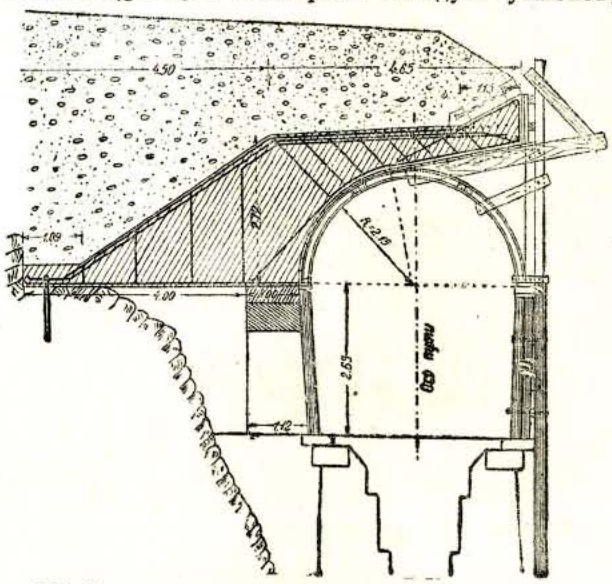


Рис. 136. Защитная галлерея консольной конструкции

что расчет конструкций галлерей в данных условиях велся при нагрузке в 4 *т/м*^{2} (рис. 136).

Обделки тоннелей несимметричного профиля. При проходке тоннелей по косогору и в зонах, подверженных оползневым явлениям, устраиваются обделки несимметричного профиля. В некоторых случаях, если выяснена величина и направление горного давления, очертание обделки проектируется с таким расчетом, чтобы стрела свода была параллельна линии действия доминирующей силы горного давления.

При устройстве тоннелей на косогорах следует ожидать больших деформаций конструкции обделки. В связи с этим при проектировании обделки необходимо иметь в виду самые невыгодные случаи действия внешних нагрузок от горного давления. Тоннельные обделки на косогорах должны обязательно проектироваться замкнутого контура с обратным сводом. Конфигурация тоннельной обделки в основном определяется условиями горного давления. При этом следует указать, что получаемые в практике асимметричные профили являются неэкономичными, поскольку вне требуемых габаритов остается неиспользованным пространство тоннельной выработки, а элементы самой конструкции

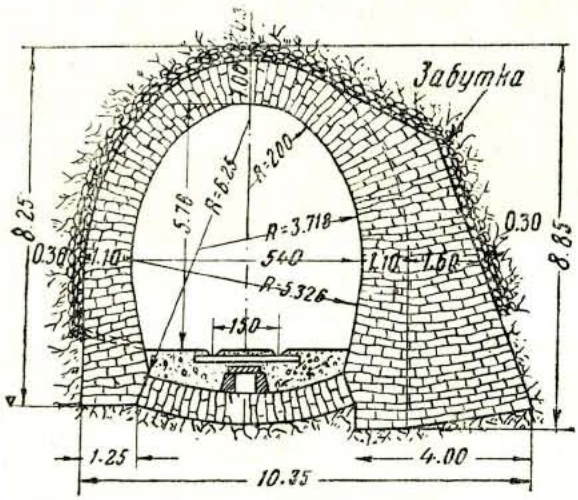


Рис. 137. Обделка тоннеля несимметричного профиля в оползневой зоне

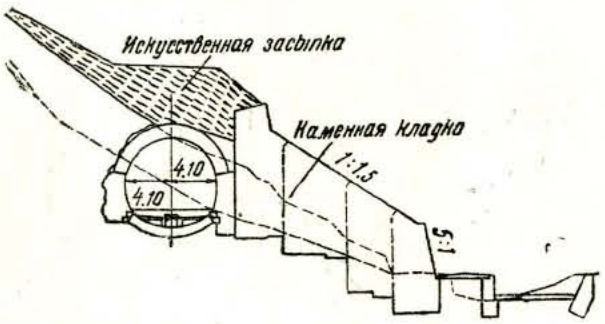


Рис. 138. Обделка тоннеля на косогоре

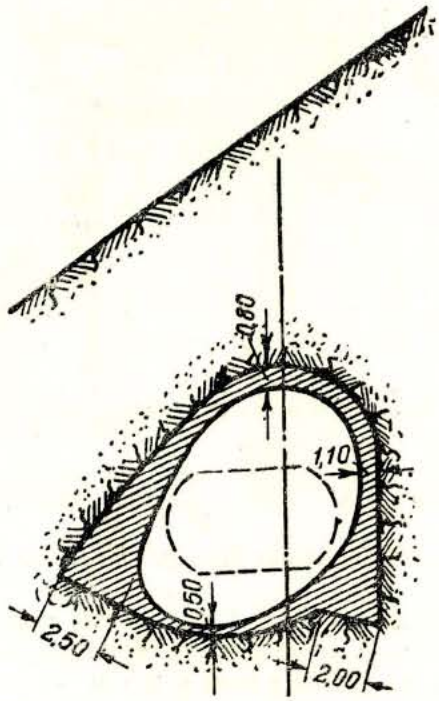


Рис. 139. Обделка тоннеля несимметричного профиля в оползневой зоне

получаются весьма значительных размеров (рис. 137, 138, 139).

При проходке тоннелей под дорогой Вассербург пришлось осуществить косое пересечение с железнодорожной насыпью. Конструкция тоннеля была построена из железобетона с жесткой арматурой. Размер тоннеля в свету $5 \times 5{,}8$ *м*. Металлические (железные) кружала-фермы служили временным креплением для проходки и впоследствии заполнялись бетоном, образуя окончательную несущую конструкцию тоннеля (рис. 140).

Считаясь с наличием одностороннего и несимметричного давления грунта насыпи, пришлось прибегнуть к несимметричному типу тоннельной обделки.

Аналогичным порядком с металлическим временным креплением и бетонным заполнением тоннельной обделки был осуществлен тоннель Шангунтер в Германии.

Обделка тоннелей в сейсмических зонах. При сооружении тоннелей в областях, подверженных землетрясению, помимо расчета на

горное и гидростатическое давление, необходимо учитывать и возможные влияния от действия землетрясения. Опыт закладки тоннелей в местностях, подверженных землетрясению (в частности, имеются в виду тоннели японских железных дорог), показал, что сводчатые тоннельные сооружения оставались неповрежденными. Наиболее уязвимым местом в тоннельных сооружениях оказались их портальные части. Следовательно, последние должны быть соответствующим образом армированы и рассчитаны как антисейсмические конструкции (рис. 141).

Опыт Токийского метрополитена подтверждает, что надлежаще выполненные конструкции, рассчитанные лишь на горное давление, не подвергались деформациям в период землетрясения. Особое значение имеет изоляция тоннелей от воды, которая в период землетрясения не должна проникать непосредственно в тоннель. В этом отношении оклеечная мягкая изоляция, способная воспринимать растягивающие напряжения, является весьма приемлемой.

При землетрясениях тоннельные сооружения подвергаются толчкам, колебаниям и сдвигам, которые могут привести к деформациям и разрушению конструкций. Поэтому

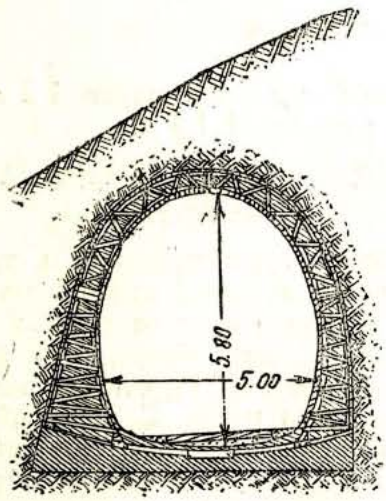


Рис. 140. Усиленная конструкция бетонной обделки с жесткой арматурой

при проектировании тоннелей в сейсмических зонах необходимо учитывать те ускорения и толчки, которые могут в значительной степени повлиять на подбор сечения элементов конструкции. Сила ударов при землетрясениях и последовательных толчков, происходящих через определенные периоды времени, может привести к колебательному движению элементов сооружения в различных направлениях. Игра сил может быть такой, что в конце

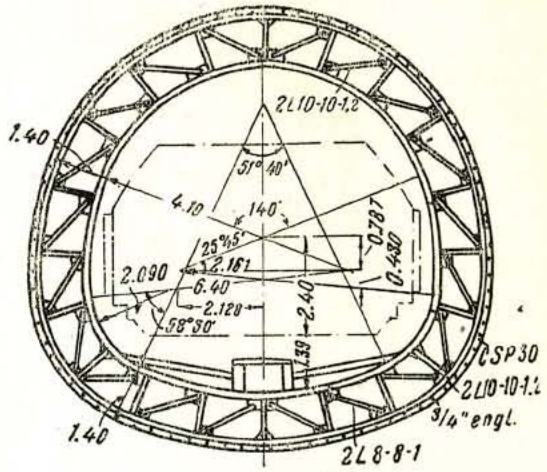


Рис. 141. Усиленная конструкция бетонной обделки с жесткой арматурой

концов приведет к разрушению сооружения. На современном этапе развития техники еще не представляется возможным дать строго математический анализ и метод, обусловливающий работу сил при землетрясении, но известно, что сила землетрясения на удар направлена главным образом тангенциально.

Одним из опасных моментов для тоннельных сооружений, заложенных в подверженных землетрясению массивах, являются перемещение пород и изменение режима грунтовых вод.

Так, например, под влиянием землетрясений могут произойти значительные сдвиги и оползни отдельных пластов, которые будут пагубны для тоннельных сооружений. Поэтому в процессе закладки тоннельных сооружений следует избегать тех мест, где явления сдвигов и оползней наиболее вероятны при землетрясении.

ОБДЕЛКИ СУДОХОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ

По своей конструкции тоннели-каналы аналогичны обычным горным тоннелям, но отличаются значительными размерами своего поперечного сечения (рис. 142 а, б, в, г).

В связи с большими габаритами судов по поперечному сечению в большинстве случаев тоннели-каналы строятся для пропуска одного судна, иногда прибегают к сооружению двух параллельно расположенных тоннелей-каналов.

Однако имеются тоннели-каналы и больших размеров для движения судов в обоих направлениях (тоннель-канал де-Конд — на канале Марна — Рона и тоннель-канал де-Ров — на канале Марсель — Рона).

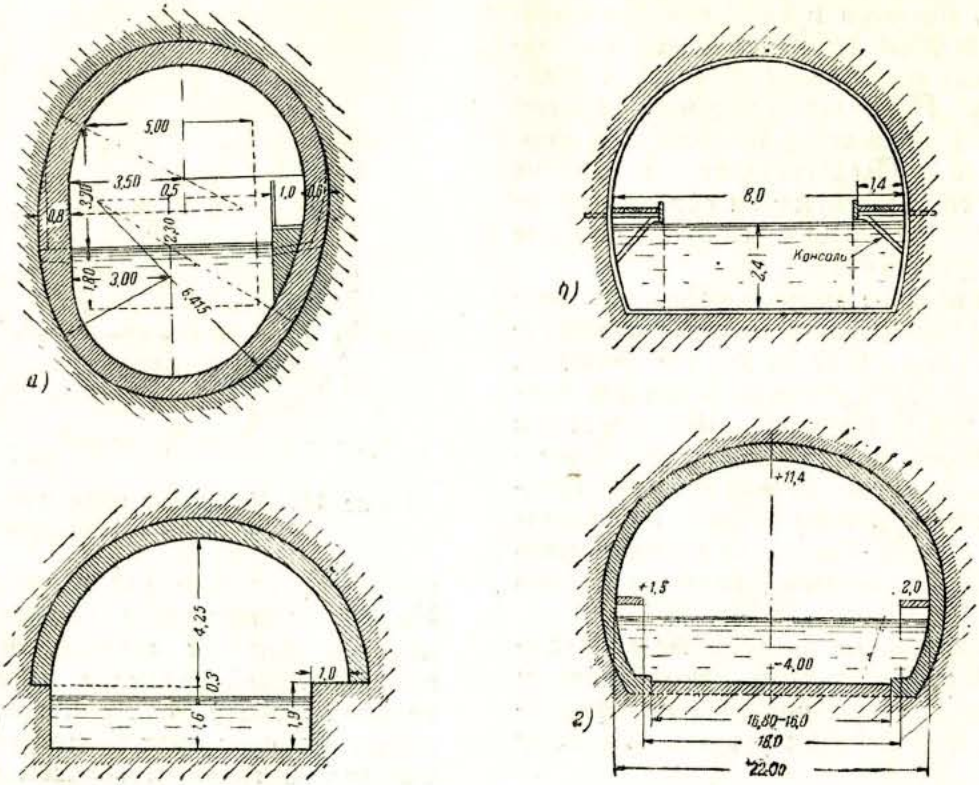


Рис. 142 а, б, в, г. Типы обделок тоннелей-каналов

Тоннели-каналы проектируют таким образом, чтобы сечение тоннеля, заполненное водой, было примерно в 2—2,5 раза больше подводного (мидделевого) сечения судна. Это обусловливает минимальное сопротивление движению судна по каналу. С каждой стороны судна, от борта до стенок тоннеля, должно быть минимум 1,5 *м*. Для целей осмотра и ремонта тоннелей устраиваются специальные консольные тротуары шириной 0,75 — 1 *м*. Профиль тоннеля-канала по ширине в свету доходит до 15 *м*, а иногда даже до 22 *м*.

Наиболее выдающимся сооружением является тоннель-канал Марсель—Рона, который по своим размерам поперечного сечения является самым крупным тоннелем в мире. Этот тоннель-канал пересекает горный массив на протяжении 7 118 *м*. Поперечное сечение тоннеля по ширине 22 *м*, по высоте 15,4 *м* в свету. В тоннеле возможно движение судов в обоих направлениях при глубине воды в 4 *м*. Площадь поперечного сечения 300—320 $м^2$; толщина свода в ключе от 0,7—1,25 *м* до 1,95 *м*. В тоннеле имеются бечевники шириной по 2 *м* и ниши шириной 2 *м*, высотой 2,5 *м* и глубиной 1,5 *м*.

ОБДЕЛКИ ПОДВОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ

В практике проектирования и строительства подводных тоннелей наибольшее распространение получило круглое сечение тоннеля. Это связано главным образом со щитовым способом проходки. Обделкой для подводного тоннеля являются металлические тюбинги из чугуна или стали. Применяются также бетонные блоки и комбинированные обделки из деревянных сегментов с внутренней железобетонной облицовкой.

Существующие методы расчета обделок подводных тоннелей являются весьма приближенными. Это приводит к тому, что строителям тоннелей фактически приходится базироваться на ранее уже примененных в практике конструкциях и производить лишь поверочные расчеты. В зависимости от назначения тоннельного сооружения, размеров его по-

перечного сечения, ожидаемого давления грунта, гидростатического напора выбираются материал и конструкция тоннельной обделки.

Поскольку щитовой метод, как более индустриальный, в последнее время стал вытеснять горные методы проходки, соответственно этому и металлическая обделка вытесняет бетонные конструкции. Это относится преимущественно к тоннелям, прокладываемым в водоносных породах. Металлическая тоннельная обделка обладает тем преимуществом, что она в состоянии воспринимать на себя немедленно усилия от нажима щитовых домкратов в процессе продвижения щита вперед, без специальных приспособлений, кружал. При металлической обделке вопрос изоляции считается решенным вполне удовлетворительно, тогда как применение обделок из заранее заготовленных бетонных или железобетонных блоков не разрешает задачи, поскольку изоляция швов между отдельными блоками и самых блоков не обеспечивается.

Достаточно указать, что тоннель из чугунных тюбингов на Пенсильванской железной дороге, заложенный в исключительно неблагоприятном грунтовом массиве при гидростатическом напоре в 3 *ат*, диаметре 7 *м* и протяжением 1,5 *км*, давал на всем своем протяжении просачиваемость 31 *л/ч* что составляет около 20 $см^3$ воды на 1 *м* в час (рис. 143).

При сооружении подводного тоннеля открытым способом, методом заводных секций или методом кессонов-тоннелей применяются специальные металлические или железобетонные конструкции прямоугольного сечения в виде двухпутных тоннелей или спаренных тоннелей со средней стенкой (тип «бинокль»). Эти конструкции применяются в тех случаях, когда подводное тоннелирование ведется при небольшом залегании под руслом рек, при незначительной толщине кровли над конструкцией обделки тоннеля.

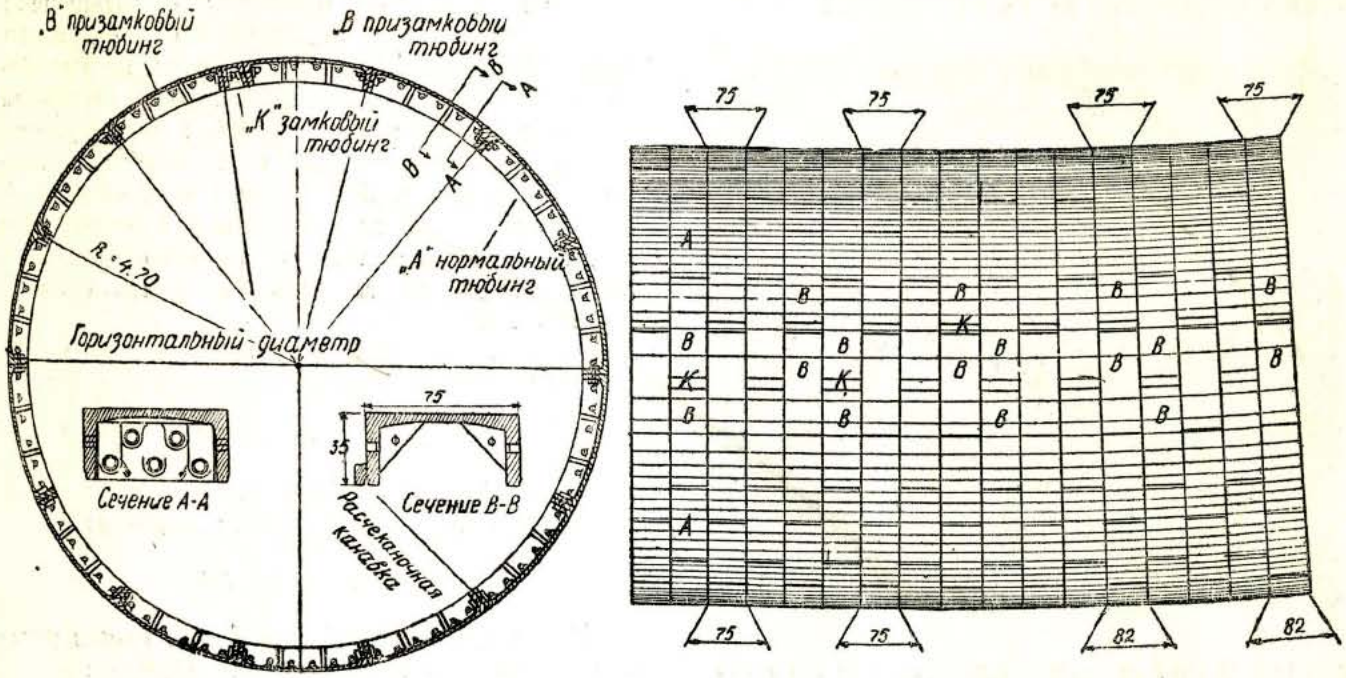


Рис. 143. Обделка подводного тоннеля из чугунных тюбингов

Тюбы при щитовой проходке. Наиболее распространенным типом обделки подводных тоннелей является тюб круглого сечения, обладающий преимуществами как в отношении работы конструкции под действием сил горного давления и гидростатического напора, так и в части производства щитовых работ и монтажа тоннельной обделки.

При круглых тюбах давление нормально и равномерно распределяется по замкнутому контуру обделки. Сегменты взаимозаменяемы. Вращение щита в процессе проходки не влияет на профиль и габариты тюба.

Чугунные тюбинги. Впервые чугунная тоннельная обделка была применена при сооружении лондонских подземных железных дорог и при проходке вертикальных шахт в угольной промышленности.

Однопутные тоннели лондонского Андерграунда, заложенные на большой глубине,

имеют круглое сечение и металлическую обделку из отдельных, сбалчиваемых между собою сегментов.

Чугунные кольца однопутных тюбов большинства тоннелей лондонского Андерграунда диаметром 3,56 *м* состоят из шести сегментов и одного ключевого блока. Чугунные кольца станционных тоннелей диаметром в 6,47 *м* состоят из двенадцати сегментов и одного ключевого блока. Последний помещается вверху сечения тоннельного кольца Ширина сегментов устанавливается в соответствии с ходом поршня гидравлических домкратов щита.

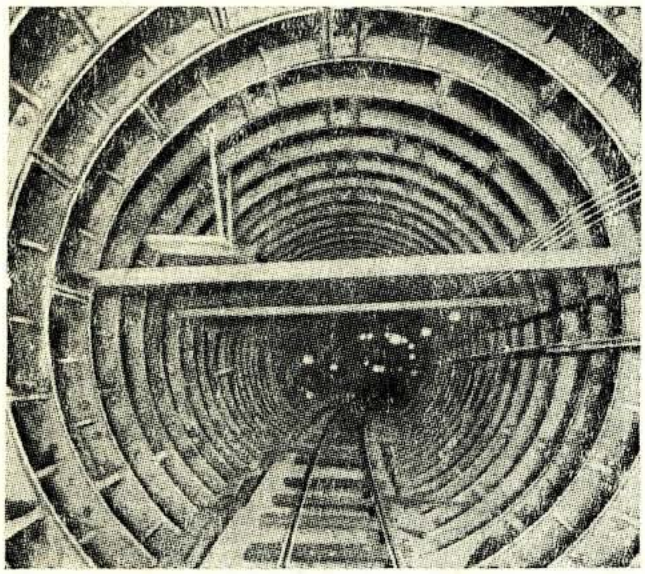


Рис. 144. Общий вид тоннеля из чугунных тюбингов

Сегменты тюбов бывают следующих типов:

а) ключевые сегменты;

б) два соседних сегмента с ключом;

в) сегменты нормального типа;

г) сегменты (на кривой в плане и профиле) специальной конфигурации.

Ширина сегмента тоннельной обделки принимается в зависимости от размеров поперечного сечения тоннеля и от величины ожидаемого давления. При меньшей ширине сегмента, в условиях слабых водоносных грунтов, выявляются следующие преимущества тоннельной обделки:

а) увеличивается число ребер по длине тоннеля, что придает тюбу большую жесткость;

б) щит перемещается с уменьшенным ходом поршня, что наиболее приемлемо при проходке в слабых грунтах и под большими сооружениями, где возможны осадки;

в) значительно увеличивается маневренность щита, так как при небольших сегментах хвост щита и ход поршня уменьшаются и щит при своем продвижении легко вписывается в кривые плана и профиля без повреждения элементов обделки и щита.

Совершенно очевидно, что уменьшение ширины сегментов приводит к увеличению числа стыков и к возрастанию поверхности просачивания. Мировая практика выработала оптимальные размеры для сегментов тюбов с учетом веса сегмента, а также успешности продвижения щита и монтажа тоннельной обделки. В советской и американской практике последних лет пришли к выводу, что в условиях нормального горного давления выгоднее увеличить ширину сегмента от 75 до 100 *см*.

Высота борта f чугунного сегмента для глины определяется по эмпирической формуле:

$$f_1 = 3{,}3\ D\ (\text{в } см),$$

где D — диаметр тюба в *м*.

Высота борта для слабых грунтов:

$$f_2 = 4{,}3\ D\ (\text{в } см).$$

Вес чугунного тюбинга S для глины устанавливается по эмпирической формуле:

$$S_1 = 0{,}20\ D^2\ (\text{в } т/пог.\ м).$$

Вес чугунного тюбинга для слабых грунтов:

$$S_2 = 0{,}33\ D^2\ (\text{в } т/пог.\ м).$$

В ребрах сегментов имеются углубления, образующие канавку шириной 6 *мм* и глубиной 25 *мм*. Эта канавка является одним из важных элементов, обеспечивающих водонепроницаемость тюбов. На дно канавки загоняется свинцовый шнур, а затем производится тщательная расчеканка стыков пастой «раст», представляющей собою смесь чугунных опилок и «салламмония» (нашатырь) с прибавлением серы. В результате расчеканки происходит химическая реакция с выделением тепла, при которой «раст» соединяет сегменты между собой. Ряд специалистов считают, что свинец в тюбах метрополитена не является изоляцией, потому что под влиянием блуждающих токов, отрицательно влияющих на разнородные материалы, свинец разлагается и единственной изоляцией остается затвер-

девшая, как металл, смесь «раст», обеспечивающая водонепроницаемость тоннелей метрополитена (рис. 144).

Для возможности нагнетания песка и цементного раствора с целью заполнения пустот за обделкой в каждом сегменте делается отверстие диаметром 38 *мм*, которое затем закрывается заглушкой с винтовой резьбой. Нагнетание производится снизу вверх от подошвы тюба к шелыге.

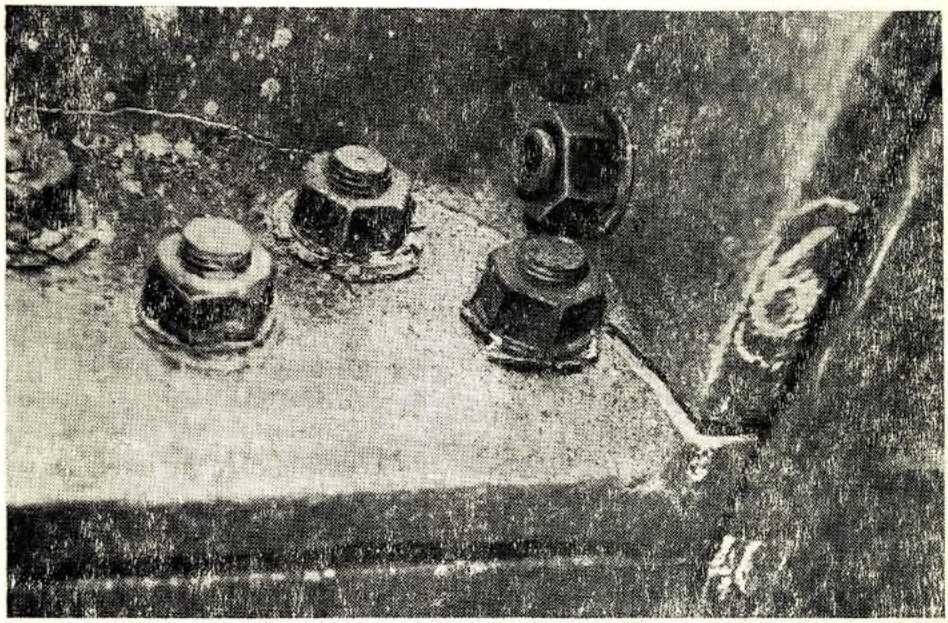


Рис. 145. Трещины в тюбингах от неравномерного нажатия щитовых домкратов

При строительстве подводных тоннелей чугунная обделка обычно заполняется внутри бетоном. Последний выступает за борта тюбингов на 15 *см*, что уменьшает величину внутреннего диаметра до 30 *см*. Бетонное заполнение сообщает конструкции дополнительную жесткость в поперечном и продольном направлениях и, кроме того, предохраняет болтовые соединения и внутреннюю поверхность тюба от коррозии. В некоторых случаях внутренняя бетонная обделка рассчитывается, как несущая. При этом нагрузка от внешнего горного давления и гидростатического напора распределяется между внешней чугунной и внутренней бетонной обделкой, которая усиленно армируется и представляет собой жесткий железобетонный цилиндр. При расчете чугунной тоннельной обделки, помимо величины горного давления и гидростатического напора, учитывается также влияние от нажима щитовых домкратов, упирающихся в тоннельную обделку в период продвижения щита вперед. Недоучет усилий от нажима щитовых домкратов приводит часто к деформациям и к трещинам тюбинговых сегментов (рис. 145).

При проектировании тюба строителю приходится разрешать целый комплекс вопросов, а именно: тип и количество тюбинговых сегментов в кольце; оптимальную ширину и длину сегмента; количество и размеры болтовых отверстий; толщину стенок тюбинга; толщину оболочки тюба; высоту бортов сегментов; размеры желобков.

Для обеспечения правильного монтажа тюбингов между собой к их изготовлению и особенно к обработке предъявляется ряд требований. Следует указать, что допуски для механической обработки бортов чугунных тюбингов могут быть от $\pm 0{,}2$ до $\pm 0{,}5$ *мм*, в соответствии с техническими условиями. К болтам соединяющим отдельные тюбинги между собой, предъявляются высокие требования, так как на них передаются значительные усилия, и они должны обладать большим сопротивлением растяжению при работе тюбингов на горное давление. Эти болты должны быть так сболчены, чтобы ни в коем случае не допускать раскрытия швов между отдельными тюбингами по кольцу.

С целью облегчения монтажа тюбингов диаметры болтов должны быть меньше на 6 *мм* диаметра отверстий в тюбингах.

При прокладке подводных тоннелей на кривых в плане и профиле (подъемы, уклоны) применяют специальные тюбинги конического типа. Конические тюбинги отличаются от нормальных тем, что их кривые борта не параллельны между собой, а несколько сужены в зависимости от радиуса кривой.

Изготовление конических тюбингов, а также их монтаж несколько сложнее обычных, так как они имеют сегменты различных форм и размеров. Так, например, в подводном тоннеле под Гудсоном (Холленд-тоннель) для кривой при диаметре тоннеля 9 *м* пришлось применить около 54 различных отливок тюбингов.

В Лондоне при прокладке тоннелей на кривых применяются стандартные круглые чугунные сегменты, но с введением клинообразных прокладок из металла или пропитанного дерева.

В практике строительства Московского метрополитена была применена оригинальная система, дающая минимум отличающихся между собой типов конических сегментов. Так, при радиусах закругления от 200 до 1 500 *м*, при ширине нормального кольца 75 *см* было решено придать одной из плоскостей тюбингов уклон в 0°25′45″, при этом максимальная ширина кольца получилась в 77,25 *см*, а минимальная 72,75 см.

Для получения проектного направления трассы по заданной кривой был установлен ряд нормальных тюбингов, которые чередовались с двумя специальными коническими кольцами. Число нормальных колец определяется по формуле:

$$N = \frac{R}{50} - 2,$$

где R — радиус закругления, N — число нормальных колец, 2 — число конических колец.

Следовательно, при кривой радиусом 800 *м* необходимо установить 2 конических кольца через каждые 14 нормальных колец.

В американской практике применяются специальные конические кольца для поворота тоннеля на кривой в плане, а равно при сопряжении тоннелей при подъеме и уклоне в профиле.

Инженером Л. Б. Каплан был предложен универсальный тип конического кольца (на кривой при четырех ключевых сегментах), который является стандартным для кривых в плане и профиле; причем для тоннеля диаметром 6 *м* одно коническое кольцо состоит из двенадцати разных элементов, которые обеспечивают указанную выше конструкцию тоннелей на кривой.

В практике тоннельного строительства применяются преимущественно чугунные тюбинги нормального типа, состоящие из четырех стенок и криволинейной оболочки, радиус кривизны которой соответствует радиусу тоннельного кольца.

Заслуживает внимания тип сводчатого тюбинга, который применялся за границей и в СССР (на соликамских рудниках при креплении стволов глубоких шахт диаметром 5,45 *м*, глубиной 165 *м*). При сборке тюба из сводчатых тюбингов получается труба несколько волнистого очертания. Сводчатость в тюбингах дает возможность по статическим расчетам значительно увеличить сопротивляемость тюбинга внешней нагрузке и тем самым уменьшить вес против обычного тюбингового кольца до 20% на 1 *пог. м* тоннеля. В сводчатом тюбинге имеется двойная кривизна как по радиусу кольца, так и по направлению вдоль оси тоннеля.

Несмотря на то, что подобная обделка уже применялась в шахтных условиях и, по предварительным расчетам, может дать определенный экономический эффект, для тоннельных условий она должна быть практически проверена постановкой ряда дополнительных экспериментов.

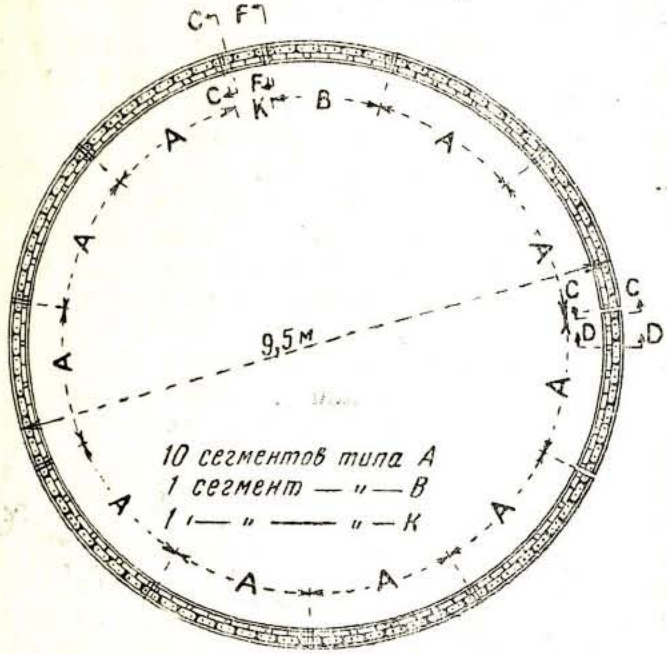
Стальные тюбинги. Высокие качества стали дают возможность с большим успехом применять ее при обделке подводных тоннелей, так как при одинаковой прочности стальной и чугунной конструкции вес первой примерно на 35—50% легче второй. Водонепроницаемость стальной обделки достигается сваркой отдельных сегментов между собой. Однако сталь до сих пор не нашла своего широкого применения в строительстве подводных тоннелей, потому что она не обладает антикоррозийным свойством в той степени, в какой обладает чугун, который поддается коррозии весьма медленно.

По данным американского Бюро Стандартов, коррозия разрушает стальные трубы, заложенные в грунте, интенсивностью 0,02—0,06 *мм* в год.

Антикоррозийность стали достигается добавкою меди или покрытием стальных тюбингов антикоррозийными веществами (например битумом, цементом). В практике сооружения тоннелей весьма малое применение имеет стальная обделка из литой стали, чаще упо

требляется обделка из прокатных профилей и отдельных сварных конструкций.

В то время как применение чугунной обделки тоннелей имеет значительную давность и проверено на практике, стальная обделка (главным образом из прокатной стали) применяется относительно редко. Стальная обделка была применена при сооружении следующих подводных тоннелей: тоннеля под р. Шпрее в Берлине (1889 г.) диаметром 4 *м*,



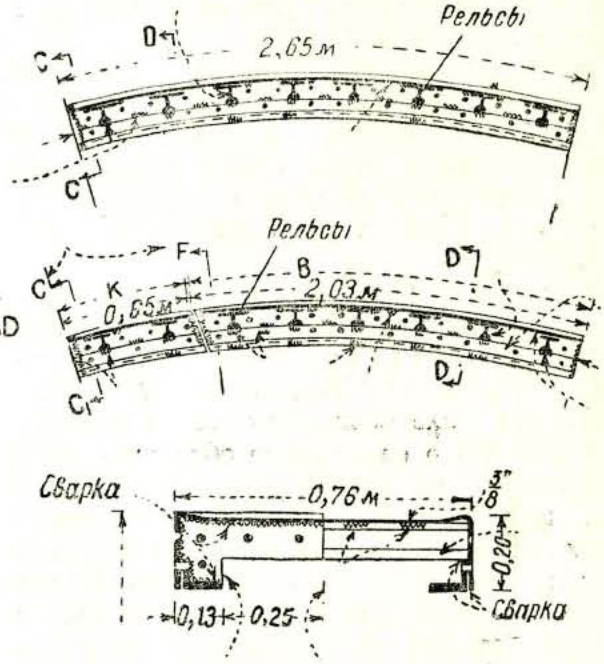


Рис. 146. Обделка подводного тоннеля из стальных тюбингов

при внутренней бетонной облицовке; Эльбского тоннеля в Гамбурге (1910 г.) диаметром 5,92 *м*; тоннеля под р. Гудсон в США; тоннеля под Кильским каналом (1913 г.) диаметром 3,36 *м*. В США (1929—1932 гг.) были сооружены Бостонский тоннель диаметром 9,5 *м* (рис. 146) и Детройтский тоннель диаметром 9,35 *м* для автомобильного движения.

Для примера приведем технические данные стальной обделки, примененной при строительстве подводного тоннеля под р. Эльбой:

а) площадь сечения ⊤ № 25	86,60 *см*²;
б) момент сопротивления	152,00 *см*³;
в) вес 1 *пог. м.* обделки ⊤ № 25 . . .	67,55 *кг*;
г) вес одного сегмента	220,00 *кг*;
д) вес одного кольца из 6 сегментов .	1 320,00 *кг*;
е) количество сегментов одного кольца на 1 тюб	1 695 шт.
ж) заклепки диаметром 22 *мм* ставились через 166,76 *мм* в количестве 108 шт. на кольцо.	

Стыки сегментов помещались по окружности на каждую $^1/_3$ сегмента обделки, что сообщало конструкции тюбов надежную жесткость. Стальные сегменты до опускания их в тоннель тщательно проверялись на поверхности, причем элементы, имевшие отклонения от проектных размеров больше 1 *мм*, браковались.

Особое внимание было обращено на предохранение тоннельной обделки от коррозии. После ряда экспериментов был принят метод защиты внутренней и внешней поверхности стальных сегментов цементным раствором и бетоном. На специальной площадке вне тоннеля внешняя поверхность стальных двутавров между полками сегментов тщательно покрывалась слоем цементного раствора. После повторного нагнетания цементного раствора за обделку через специальные отверстия в сегментах и устройства внутренней бетонной рубашки металлические кольца удавалось защитить от коррозии.

Благодаря высоким сравнительно с чугуном строительным качествам стали в условиях значительного горного давления и гидростатического напора сталь является более приемлемой для обделки, чем чугун, поскольку она в состоянии воспринимать большие растягивающие напряжения.

Деревянные обделки. При щитовой проходке подводных тоннелей применяется также (в особенности в Америке) деревянная

обделка, составленная из отдельных деревянных косяков размером 30 × 30 *см*, которые соединяются между собой болтами и укладываются «в перевязку».

Деревянная обделка является лишь временной, на период проходки щитом. В дальнейшем внутри нее делается оклеечная изоляция из гудронированного толя на горячей клебемассе и укладывается железобетонное кольцо, а в некоторых случаях бетонная обделка, которые являются уже постоянными и несущими конструкциями.

Расчет обделки для подводных тоннелей при неопределенности внешних активных нагрузок, действующих на тоннель, и при наличии большого числа весьма разнообразных и противоречивых теорий ставит проектировщиков в весьма затруднительное положение.

Существующая в тоннельной практике теория расчета круглой тоннельной обделки Хьюита базируется на ряде принципов, вызывающих возражения. Так, например, Хьюит считает, что после проходки тоннеля и нагнетания цементного раствора за обделку восстанавливается такой пассивный горизонтальный отпор, при котором изгибающие моменты в тоннельном кольце под влиянием внешних нагрузок обращаются в нуль. Между тем известно, что кольцо при работе на горное давление все же испытывает напряжения, а следовательно, в тоннельном кольце имеются изгибающие моменты.

Несмотря на ряд попыток некоторых исследователей внести коррективы в эту теорию, следует констатировать, что до сих пор правильного решения задачи нет и в этой области предстоит большая научно-исследовательская и практическая работа (см. главу XXI).

ВЫБОР ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ТОННЕЛЯ ПРИ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКЕ

В зависимости от особенностей сооружения и от назначения тоннеля, форма и очертание его профиля при щитовой проходке выбираются в каждом отдельном случае с учетом основных данных, приводимых для тоннелей разных типов с чугунной обделкой.

В виде примера приводим в определенных геотехнических условиях технико-производственные, эксплоатационные и сравнительные данные для двух однопутных тоннелей круглого сечения: объем породы на 1 *пог. м* 59,2 $м^3$, вес тюбингов на 1 *пог. м* 21,6 *т*; для одного двухпутного тоннеля эллиптического сечения — объем породы на 1 *пог. м* 52,8 $м^3$, вес тюбингов на 1 *пог. м* 21,1 *т*; для одного двухпутного тоннеля круглого сечения — объем породы на 1 *пог. м* 68 $м^3$, вес тюбингов на 1 *пог. м* 25 *т*.

Для оценки и выбора наиболее приемлемого в требуемых условиях типа обделки тоннеля рекомендуется учитывать ряд приводимых ниже факторов.

Достоинства двух однопутных круглого сечения тоннелей заключаются в следующем: 1) при круглом сечении обделки обеспечиваются наиболее равномерное распределение усилий и работа конструкции; 2) обеспечивается взаимозаменяемость сегментов обделки тюба, что упрощает изготовление их и облегчает монтаж тюбингов в тоннеле; 3) поворот щита вокруг своей оси не влияет на габарит прокладываемого тоннеля; 4) скорость проходки щитами однопутного профиля выше скорости проходки двухпутным щитом (учитывается размер выработки, легкость манипуляций щитом и монтаж тюбингов); 5) в условиях проходки под сжатым воздухом утечка последнего из забоя однопутного тюба несравненно меньше, чем из забоя двухпутного тюба; при этом крепление лба забоя однопутного сечения значительно легче; 6) осадки грунта при однопутном щите несравненно меньше, чем при двухпутном, что важно при проходке под застроенной городской территорией; 7) щит круглого сечения легче проводить по кривым в плане и в профиле, чем эллиптический щит; при этом не требуется применения фигурных сегментов; 8) примыкание однопутных тоннелей метрополитена к станциям с островными платформами не требует раструбов; 9) при однопутных тюбах лучше разрешается вопрос вентиляции, так как подвижной состав работает подобно поршню в цилиндре; при двухпутном же сечении получается перебивка воздушных струй, что отрицательно влияет на систему вентиляции тоннелей; в случае пожара в одном из тюбов пассажиры другого тюба находятся в полной безопасности; при устройстве ряда сбоек между тюбами пассажиры имеют возможность, перейдя в другой тюб, избежать пожарной опасности; 10) в однопутных тюбах повышается степень безопасности движения; в частности, исключается возможность столкновения поездов встречных направлений при сходе с пути одного из поездов.

К недостаткам двух однопутных тоннелей круглого сечения можно отнести следующие обстоятельства:

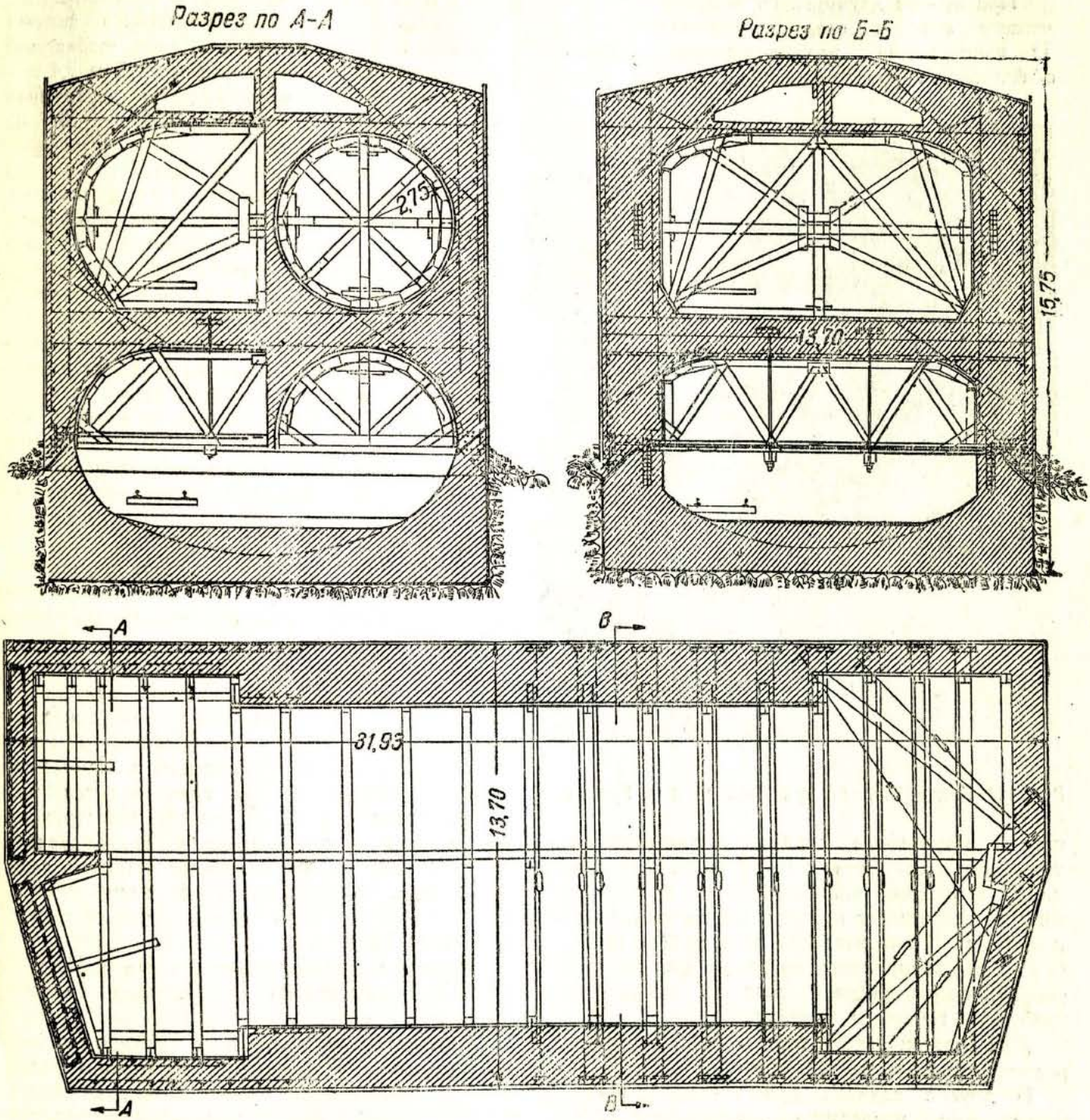


Рис. 147. Кессон-тоннель при подходе к р. Гудсон (конструкция)

1) объем выработки двух однопутных тюбов больше объема для тоннеля эллиптического сечения на 6,4 $м^3$ — 10,5% на 1 *пог. м* тоннеля; 2) вес тюбинговой обделки двух однопутных тюбов больше веса тюбинговой обделки эллиптического сечения на 0,4 *т* — 2% на 1 *пог. м* тоннеля; 3) потребное количество в однопутных щитах в два раза больше двухпутных; следует также учесть, что вес конструкции двухпутного щита составляет 75% веса двух однопутных щитов; 4) для устрой-

ства съезда с одного пути на другой необходимо устраивать специальные переходные камеры.

При оценке двухпутного тоннеля эллиптического сечения следует учитывать, что: 1) конструкция эллиптического тоннеля с большей горизонтальной полуосью усту-

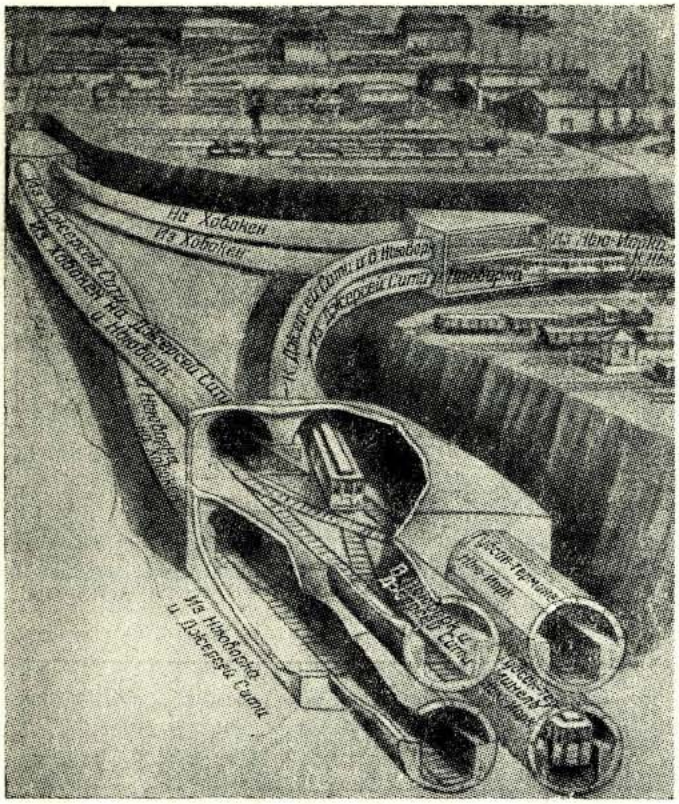


Рис. 148. Кессон-тоннель при подходе к р. Гудсон

пает в статическом отношении конструкции тоннеля круглого сечения; 2) разнообразные типы сегментов эллиптического очертания тоннеля осложняют процесс их изготовления и монтаж; 3) при повороте щита вокруг своей оси весьма затруднительно (даже при регулировании специальным балластом) сохранить требуемые габариты тоннеля.

Для восстановления габаритов приходится реконструировать тоннельную обделку.

В других случаях при повороте щита конструкция последнего претерпевает настолько сильные деформации, что дальнейшее продвижение щита становится практически невозможным.

При оценке двухпутного тоннеля круглого сечения приходится учитывать, что: 1) объем выработки двухпутного тоннеля круглого сечения больше объема двух однопутных тоннелей на 8,8 $м^3$ — 15% и больше объема двухпутного эллиптического тоннеля на 15,2 $м^3$ — 28,5% на 1 *пог. м* тоннеля; 2) вес тюбинговой обделки двухпутного тоннеля круглого сечения больше веса тюбинговой обделки двух однопутных тоннелей на 3,4 *т* — 16% и больше веса обделки двухпутного эллиптического тоннеля на 3,85 *т* — 18% на 1 *пог. м* тоннеля.

Двухпутный тоннель круглого сечения может оказаться выгодным при проходке подводных тоннелей под обыкновенную дорогу. «Мертвые» пространства нижнего и верхнего сегментов поперечного сечения тоннеля используются в этом случае для целей искусственной, приточно-вытяжной вентиляции.

На основании технико-экономического сравнения тоннелей круглого и эллиптического очертания, а также изучения данного вопроса в СССР и за границей автор считает, что при щитовой проходке подводных тоннелей для метрополитена и для железнодорожного сообщения преимущество должно быть отдано однопутным щитам круглого сечения замкнутого контура.

Тюбы крупного круглого сечения являются наиболее приемлемыми при сооружении подводных тоннелей для автомобильного сообщения.

Кессоны-тоннели. В мировой практике строительства кессонов-тоннелей заслуживает внимания конструкция тоннельного треугольника у берега р. Гудсон (США) в месте сопряжения линий Гудсонской и Манчестерской железных дорог, где сходятся три направления подземных линий. Конструкция имеет вид железобетонного двухъярусного кессона-тоннеля, имеющего по 2 тюба в каждом этаже. В месте сопряжения опущено три кессона-тоннеля (в углах треугольника; рис. 147, 148).

Размеры кессона-тоннеля в плане 31,93 × × 13,7 *м*; высота по поперечному сечению 15,75 *м*.

Вначале кессон-тоннель предполагалось опустить под сжатым воздухом, но в дальнейшем приток воды уменьшился, и кессон оказалось возможным опустить без применения сжатого воздуха, с помощью водоотлива. При опускании кессона по боковым поверхностям наблюдалось трение большой силы и, несмотря на значительный вес кессона и дополнительный балласт, нельзя было опустить нож кессона до проектной отметки. Это обстоятель-

ство вынудило произвести разработку поперечного сечения нижнего профиля с подводкой непосредственно под ножом кессона на величину более 2 *м*. Затем был устроен обратный свод и таким образом осуществлен замкнутый контур обделки нижнего яруса.

Конструкция тоннеля-кессона станции собиралась в котловане глубиною 3 *м*. При периметре ножа кессона в 155 *м* и общем весе бетонированной конструкции в 11 000 *т* давление на 1 *пог. м* доходило до 710 *т*.

Конструкции кессонов, образующих двухпутный подводный тоннель метрополитена под р. Сеной, состоят из ряда металлических ферм, обтянутых металлической оболочкой. С целью обеспечения полной водонепроницаемости конструкции, которая должна находиться под постоянным гидростатическим напором, была устроена внутренняя облицовка из чугунных, сболченных между собою сегментов. Поперечное сечение проектировалось в соответствии с запасами на возможные отклонения кессона-тоннеля от оси трассы, в процессе опускания. Ширина кессона-тоннеля 9,15 *м*, длина колеблется от 25 до 44 *м*.

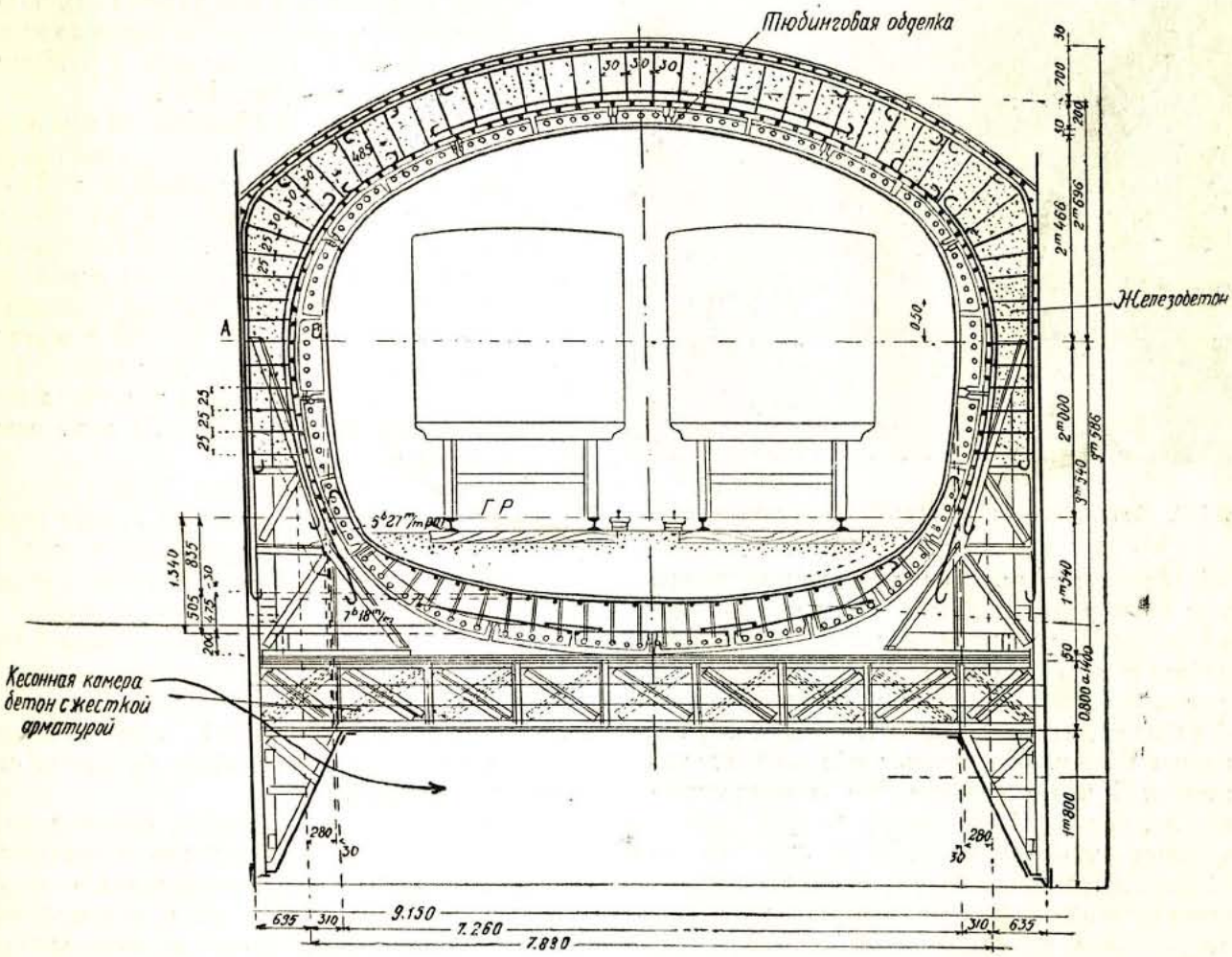


Рис. 149. Подводный кессон-тоннель под р. Сеной (конструкция)

В условиях исключительно слабых грунтов опускались (с поверхности мостовой) тоннели-кессоны станции Сен-Мишель и Старый город, в пределах поймы р. Сены (Франция).

Размеры поперечного сечения этих тоннелей (вчерне): ширина 16,6 *м*, высота 12,5 *м*. Общая длина станции в 75 *м* была разделена на три кессона-тоннеля. Средняя секция имела длину 67 *м*, а крайние по 4 *м*. Соединялись они с эллиптическими шахтами размерами в плане 26 × 18,5 *м* для размещения лифтов и лестниц.

Кессоны-тоннели снабжены ножами, при высоте рабочей камеры 1,8 *м* (рис. 149, 150).

На трассе первоочередной линии Московского метрополитена были опущены на большую глубину 3 кессона-тоннеля железобетонной конструкции.

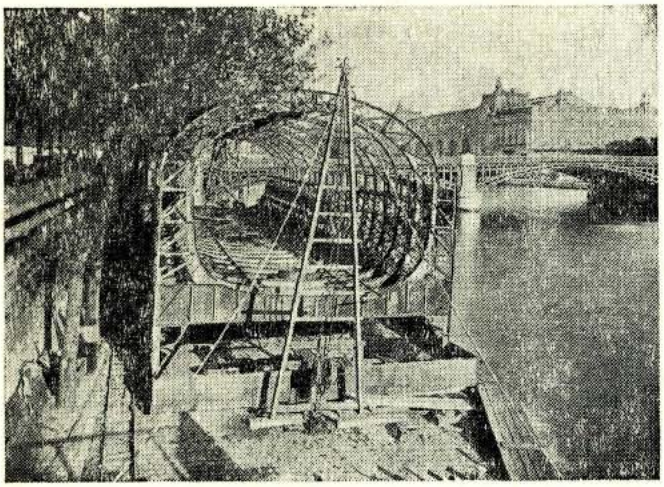


Рис. 150. Металлический каркас кессона подводного тоннеля

Заводные секции. При сооружении тоннеля между Детройтом и Виндзором на протяжении 813 *м* применялся метод заводных секций. Предварительно был подготовлен котлован и устроена бетонная подготовка. Металлические тюбы были диаметром 7,12 *м* при толщине оболочки 9,5 *мм*. Жесткость тюба усиливалась постановкой через каждые 3,6 *м* металлических диафрагм. Расстояние между осями спаренных тюбов-биноклей 8 *м*. После монтажа тюбов конструкция была полностью забетонирована, а внутри каждого из тюбов была устроена железобетонная рубашка так, что размер по внутреннему сечению каждого из тоннелей составлял 6,1 *м* (рис. 151).

Таким же методом был сооружен подводный тоннель в Чикаго. Этот тоннель-бинокль состоит из двух спаренных тюбов со средней стенкой толщиной 0,92 *м*. Ширина спаренной трубы 12,5 *м*, длина секции 85 *м*, высота 7,3 *м*. Внутри тоннеля устроено бетонное кольцо толщиной от 0,5 до 1 *м*.

Методом заводных секций сооружен тоннель под р. Гарлем (США). Тоннель состоит из четырех спаренных тюбов (рис. 152) общей шириной 23,2 *м* и высотой 7,5 *м*. Длина каждой секции 67 *м*. Весь подводный тоннель был сооружен из пяти заводных секций.

При строительстве подводного тоннеля для автомобильного движения (Окланд — Аламеда в Калифорнии) длиной 784 *м* было опущено 12 заводных секций длиной по 61 *м*. Ширина проезжей части тоннеля 7,32 *м*, внутренний диаметр тоннеля 9,75 *м*. Аналогичной конструкции сооружен подводный тоннель под р. Маас в Роттердаме (рис. 153).

При наличии слабого основания до укладки заводных секций устраивают искусственное свайное основание (рис. 154).

Тоннели-мосты. В Нью-Йорке под р. Ист-Ривер проложено до 20 подводных тоннелей, из них 17 — железнодорожных и 3 — для газопроводов. Длина каждого из этих подводных тоннелей около 1,6 *км*. Глубина воды в реке от 12 до 15 *м*. Тоннели прокладывались преимущественно в илистом грунте, мощность которого достигает 15—18 *м* ниже дна реки, с выклиниванием скалистых пород. В некоторых местах глубина залегания скальных пород доходит до 80—100 *м* от поверхности воды в реке.

В силу исключительно неблагоприятных условий прокладки в илистом грунте тоннели во время движения поездов претерпевали значительные деформации. В связи этим их конструкции пришлось усиливать устройством внутри тюба железобетонной обделки, балок жесткости и специальных свайных оснований. В последнем случае в соответствии с расчетом носности свай тюбинговый тоннель фундируется на отдельно стоящих бетонных сваях или кустах свай.

В американской практике, когда от указанных мероприятий нельзя было ожидать надлежащего эффекта, проектировалась система фундирования тюба в виде тоннеля-моста. Непосредственно из тоннеля опускались колодцы, которые при заполнении их бетоном создавали надлежащие опоры. Затем внутри тюба, вне габаритов приближения строений, монтировалась конструкция металлического пролетного строения и проезжей части с пролетами, соответствующими расстоянию между возведенными опорами (рис. 155)

На конструкцию тоннельной обделки в условиях слабых грунтов влияет также изменение режима вод во время прилива и отлива. Так, например, при подъеме воды во время прилива тоннель вследствие сжатия окружающего илистого грунта опускается и, наоборот, во время отлива конструкция тоннеля поднимается. По наблюдениям за указанными тоннелями эта амплитуда колебаний

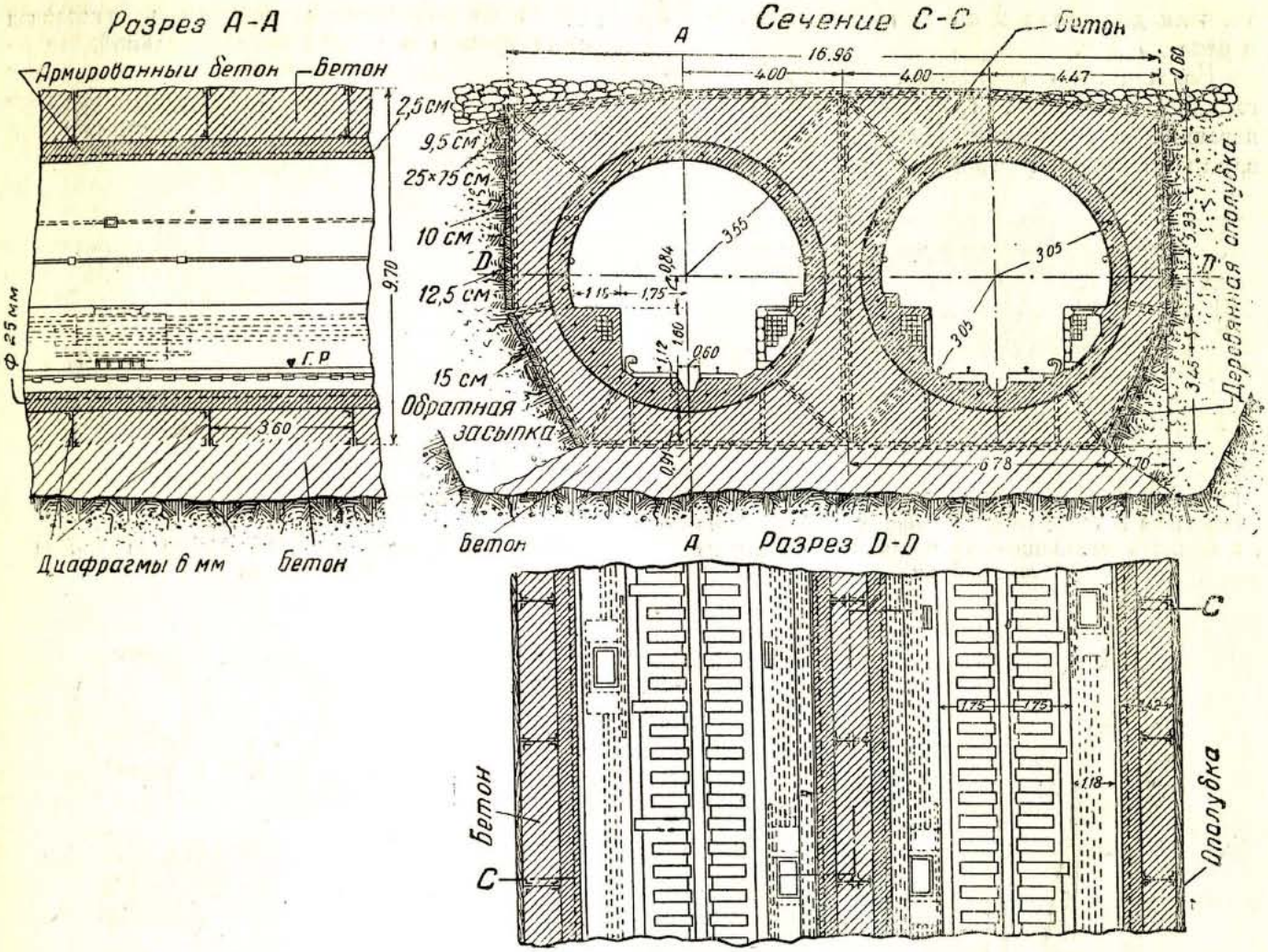


Рис. 151. Заводные секции подводного тоннеля под р. Детройт

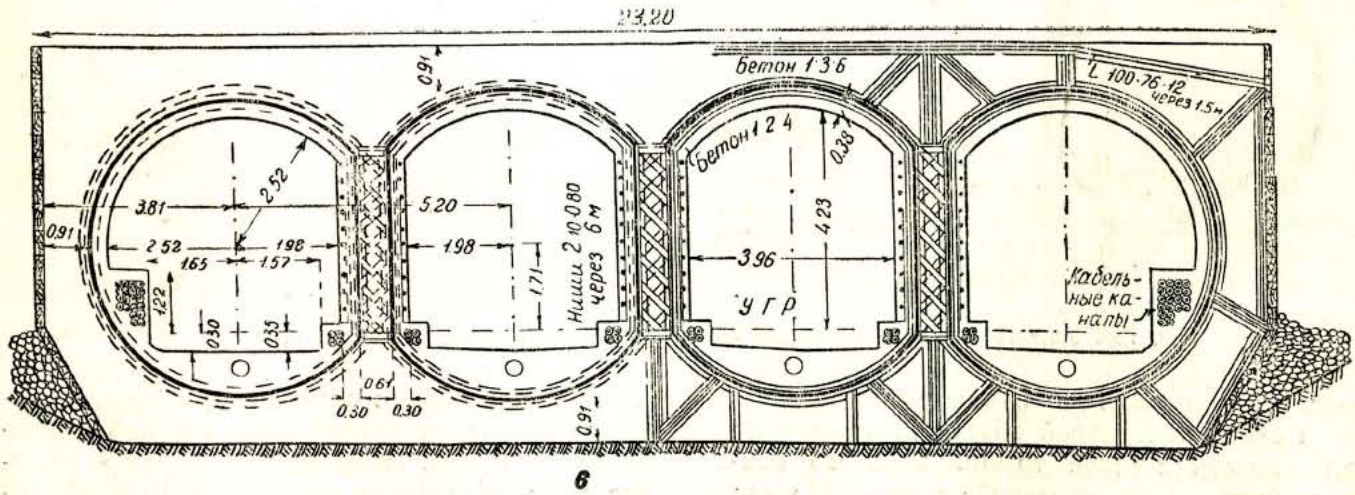


Рис. 152. Заводные секции подводного тоннеля под р. Гарлем

тоннеля достигала 5 *см* при подъеме воды в реке до 3 *м*.

Большинство подводных тоннелей, залегающих в слабых грунтах, находится во взвешенном состоянии. Подъемная сила, под влиянием которой тоннельная обделка продится во взвешенном состоянии, указанная сила трения является незначительной.

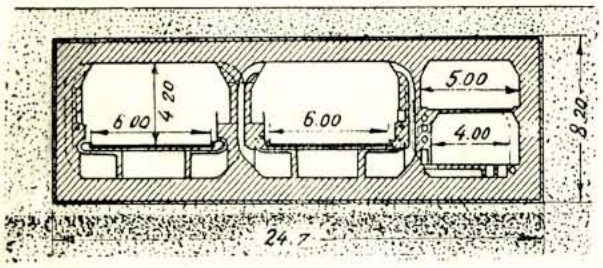


Рис. 153. Тоннель под р. Маас в Роттердаме (заводная секция; железобетонная конструкция с внешней металлической изоляцией — толщина листа 6 *мм*).

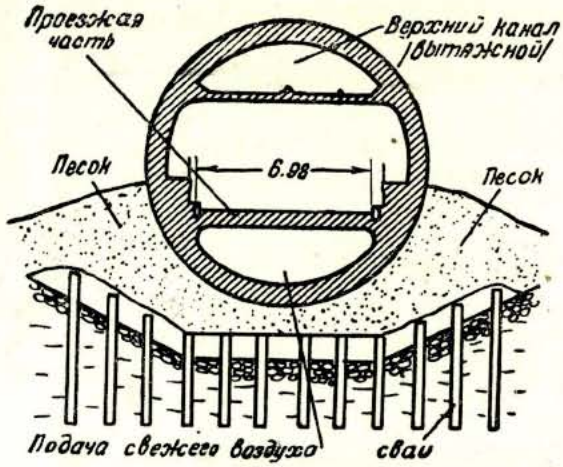


Рис. 154. Тоннель заводной секции на свайном основании

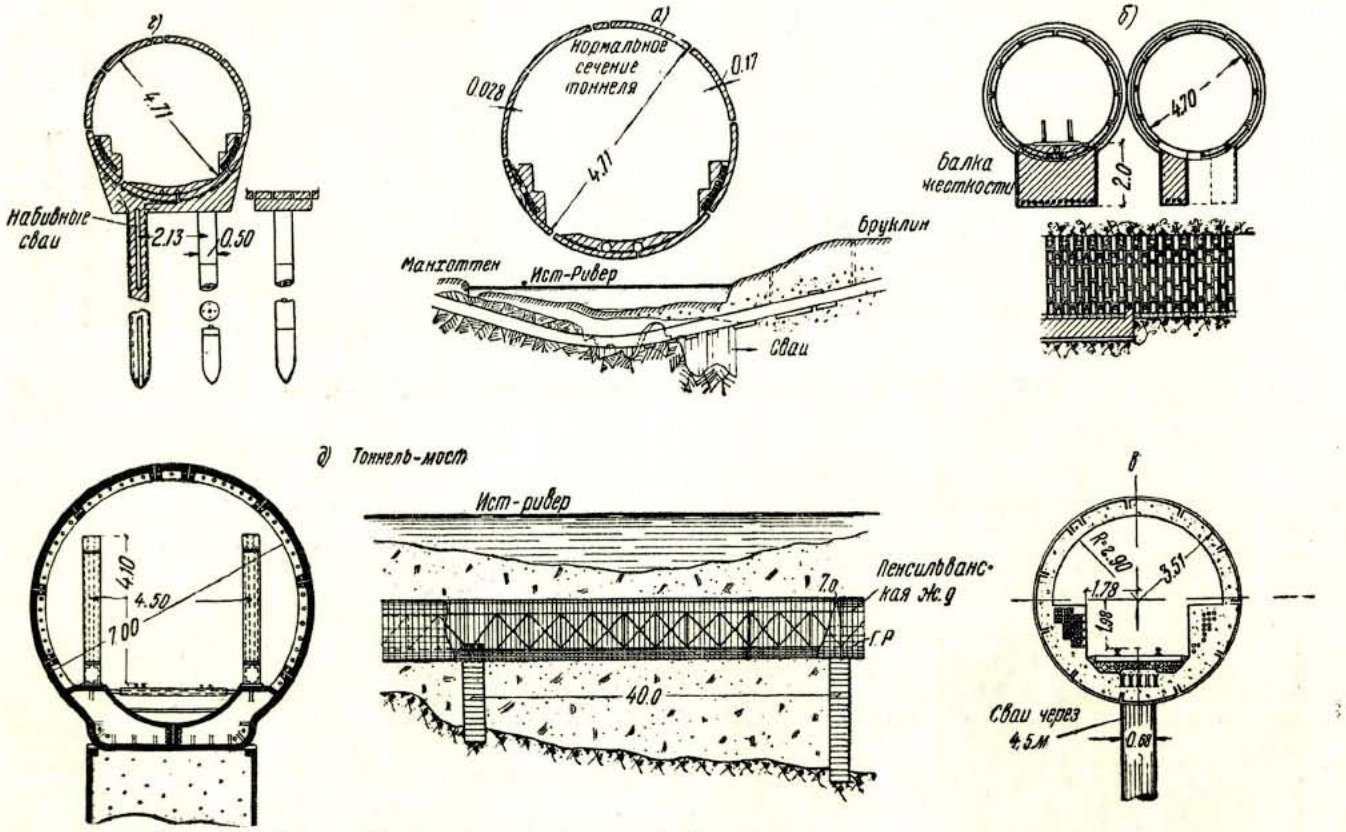


Рис. 155. Укрепление подводных тоннелей балкой жесткости, сваями. Тоннель-мост

является тенденцию к всплытию, преодолевается весом самой тоннельной обделки, весом грунта над тоннелем и силой трения внешнего контура тоннельной обделки о грунт. Но так как грунт, будучи пропитан водой, сам нахо-

Дополнительная жесткость обделки тоннеля достигается устройством мощной железобетонной балки, включающей верхнее строение пути. Создается ленточный железобетонный фундамент, равномерно распределяющий

давление, вовлекающий в солидарную работу значительное протяжение конструкции тюба и устраняющий возможность взаимного перемещения и осадок отдельных колец тюба (рис. 155 б).

Расчет этого фундамента может производиться как расчет балки на упругом основании. Вместе с тем окружающая тюб грунтовая среда может оказаться настолько слабой, что и указанная выше конструкция ленточного фундамента не решит вопроса фундирования тоннельной обделки. В этом случае прибегают к довольно сложным конструкциям. При сооружении тоннеля под р. Ист-Ривер, между Бруклином и Нью-Йорком, на протяжении около 1 220 *м* тоннель диаметром 4,7 *м* пересекал исключительно слабый, илистый грунт. Хотя тоннель был пройден под сжатым воздухом, получились отдельные просадки тоннеля, доходившие до 35 — 40 *см*. Устройство продольной балки жесткости оказалось недостаточным для устранения осадок. Пришлось устраивать свайный ростверк в виде бетонных, набивных, армированных свай диаметром 1,5 *м*, заложенных до скальных пород. После устройства свайного основания была сделана железобетонная плита, включившая элементы чугунных тюбов в единую конструкцию.

Этими мероприятиями удалось локализовать дальнейшее распространение осадок и устранить отрицательное влияние вибрации при движении поездов.

При проходке тоннеля Пенсильванской железной дороги, имеющего диаметр 7 *м* и обделку из чугунных тюбингов, в связи с присутствием плывуна и слабых грунтов, а равно наличием контактных зон со скалой также пришлось прибегнуть к дополнительным мероприятиям по фундированию тоннельной обделки. В период эксплоатации оказалось, что чугунная обделка не обладает достаточным моментом инерции для восприятия напряжений переменного знака, вызываемых движением поездов и взаимодействием подвижного состава и пути. В связи с этим пришлось сделать мощную бетонную плиту с жесткой арматурой толщиной порядка 2 *м*. Плита была расположена на отдельных металлических сваях, завинченных до скальных пород и конструктивно сопряженных с тюбингами тоннельной обделки. Эти сваи были расположены на расстоянии 4,5 *м* друг от друга и состояли из чугунных труб диаметром до 68 *см*, набитых бетоном. Свайные опоры устраивались после устройства тоннельной обделки. При длине сваи 9 *м* носность каждой из них была порядка 100 *т*. Всего было забурено до 700 свай (рис. 155 в).

Тюбинговая конструкция тоннеля Пенсильванской железной дороги под р. Гудсон также фундирована на винтовых сваях, расставленных на расстоянии в 4,7 *м* друг от друга. Подобное свайное основание для тоннеля было вызвано условиями залегания слабого, илистого грунта, составляющего ложе р. Гудсон. Каждый из тюбов диаметром 6,9 *м* составлен из отдельных чугунных сегментов, причем в основании имеется специальный фигурный тюбинг, сопрягающий конструкцию тоннельной обделки непосредственно со сваей. В каждом кольце имеется по 12 сегментов шириной 90 *см*. Сегмент, включающий в себя голову винтовой сваи, изготовлен из литой стали и одновременно покрывает два кольца. В середине этих специальных сегментов имеется отверстие для пропуска башмака винтовой сваи и стальная отливка, закрывающая это отверстие после завинчивания сваи.

Сваи, имеющие наружный диаметр 70 *см*, составлены из отдельных патрубков длиной по 2,2 *м*. После опускания всей полой сваи до проектной отметки она заполнялась бетоном.

Сооружение этого подводного тоннеля производилось щитом с закрытой грудью «вслепую», с применением сжатого воздуха.

Подводный тоннель под р. Ист-Ривер, соединяющий Бруклин с Менхеттеном, состоит из двух параллельных тюбов, размещенных на расстоянии 8,4 *м* друг от друга. Тоннель пересекает частично песок, ил, твердый гнейс и выклинивания твердой глины. Проходка тюбов велась с применением щита и сжатого воздуха.

Нижняя часть тоннельной обделки для увеличения жесткости тюба и уменьшения вибрации при движении поездов сделана из железобетона и конструктивно связана непосредственно с чугунными сегментами тюба. Тоннель был заложен на 28 *м* ниже самого низкого уровня воды в реке. При проходке в иле тоннель настолько изменил свое положение, что в дальнейшем пришлось реконструировать обделку в соответствии с проектным профилем. Для обеспечения незыблемости сооружения в наиболее слабых местах под тоннелем было устроено специальное основание. Это основание состоит из ряда железобетонных набивных свай, размещенных по-

парно (на расстоянии 2,13 *м* друг от друга) через каждые 15 *м* по оси тоннеля. Сваи представляют собой металлические цилиндры диаметром 0,5 *м* при толщине стенок в 12 *мм*. Сваи запрессовывались в грунт телескопически, отрезками в 1,5 *м*. Армировка свай, набитых бетоном, состоит из четырех железных стержней толщиной 25 *мм* (рис. 155г).

Устройство свайного основания велось из готового тоннеля, для чего предварительно вынимались три чугунных сегмента и затем с помощью гидравлических домкратов производился зажим свай. Песок, входивший внутрь свайного цилиндра, размывался водой. После задавливания полых свай до проектной отметки производилось их бетонирование. В дальнейшем устраивалась конструкция, соединявшая головы свай и тоннельную обделку. Кроме того, во избежание всевозможных осадок производилось нагнетание за обделку цементного раствора.

Сваи, в зависимости от глубины залегания материка, вдавливались на глубину от 3 до 15 *м*.

Таким образом, устройством сплошной железобетонной плиты и свайного основания под тоннельной обделкой представляется возможным в значительной степени увеличить жесткость конструкции тоннеля и тем самым уменьшить неравномерную осадку тюба в илистой среде, а также уменьшить напряжения от вибрации при проходе поездов.

Однако опыт устройства тоннелей-мостов на чугунных сваях показал, что, несмотря на углубление свай до скалистой породы, все же наблюдалось некоторое колебание конструкции от движения поездов. При учете упругого укорочения металлической сваи до 6 *мм* при несности ее в 100 *т* упругие колебания все же не удалось полностью уничтожить. В дальнейшем решение этого вопроса искали в сообщении тоннельной обделке дополнительной инерции за счет устройства внутренней железобетонной конструкции и балки жесткости.

Когда при эксплоатации тоннеля Пенсильванской железной дороги, заложенного в исключительно мощной толще ярко выраженных плывунов, появилось опасение сдвига и поломки конструкций тюба от динамической нагрузки, инженер Джекобс запроектировал мостовую конструкцию тоннеля.

Эта конструкция, объединяющая тюб и пролетное строение, имеет вид двух металлических сквозных ферм, опирающихся на бетонные опоры, возведенные по ширине тоннеля до скального основания. Конструкция воспринимает нагрузку горного и гидростатического давления и полностью сопротивляется всем изгибающим моментам и перерезывающим усилиям, возникающим в конструкции в период движения поездов по тоннелю.

Сечение элементов пролетного строения рассчитывается в соответствии с пролетами между опорами обычным порядком. При диаметре тюба в 7 *м* приняты пролеты металлических ферм в 40 *м*, с ездой понизу, при расстоянии между фермами 4,5 *м* и высоте верхнего пояса над головкой рельса 4,1 *м* (рис. 155д).

Заслуживает внимания также намечаемое сооружение подводного тоннеля-моста для автомобильного сообщения под р. Миссисипи между пунктами Сент-Люис в штате Миссури и Ист-Сент-Люис в штате Иллинойс.

Сначала предполагается установить бетонные опоры, на которые уже впоследствии методом заводных секций будет уложена тоннельная конструкция, включающая в себя пролетное строение моста в виде ферм и проезжей части. Каждая тоннельная секция длиной 90 *м* имеет шестигранную форму. Высота каждой из ферм стальной конструкции 6 *м*, общая длина тоннеля-моста 450 *м*. Подходные части тоннеля будут пройдены щитовым способом на протяжении 640 *м* со стороны Ист-Сент-Люис и 530 *м* — со стороны Сент-Люис.

ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

В крупных городах с интенсивным уличным движением выявляется настоятельная необходимость в строительстве городских железных дорог большой скорости вне уличных проездов, причем эти дороги могут возвышаться над землей в виде эстакад или быть заложены под проезжей частью улиц, под реками, каналами, домами, в виде тоннельных линий метрополитена.

В зависимости от условий глубины заложения тоннели метрополитенов могут располагаться в слабых грунтах четвертичных отложений при значительной водоносности пород и в коренных устойчивых породах, что обусловливает создание разнообразнейших и сложных типов тоннельных конструкций.

В зависимости от городских и от геологических условий принимается мелкое или глубокое заложение метрополитена, что определяет форму поперечного сечения тоннелей.

Форма поперечного сечения в значительной степени зависит также и от рода материала, который предназначен для устройства конструкции обделки.

В практике строительства городских тоннелей применяются обделки круглого сечения, сводчатые и прямоугольные. При глубоком заложении обычно применяют горный тип сводчатой тоннельной обделки подковообразного сечения. В тех случаях, когда надо применить сводчатый тип обделки (при неглубоком заложении, по местным условиям пропуска подземных сооружений или по другим причинам), приходится прибегать к более пологой форме свода эллиптического очертания. Обделки этих типов устраиваются из бетона и из бутовой кладки на цементном растворе. Тип подобных обделок применен в Парижском метрополитене. Круглая обделка обычна главным образом при щитовой проходке и устраивается из чугунных или из стальных тюбингов. Такая обделка получила большое распространение при сооружении Московского и Лондонского метрополитенов.

При мелком заложении большое распространение получило прямоугольное сечение тоннеля, при котором допускается минимальное расстояние между отметкой мостовой и головкой рельса. Прямоугольные тоннели обладают тем преимуществом, что объем земляных и бетонных работ при их сооружении сведен к минимуму, причем в поперечном сечении не содержится излишних пространств по отношению к габариту. Недостатки прямоугольных тоннелей заключаются в том, что при значительной глубине засыпки плоское перекрытие приводит к тяжелому типу конструкций и дает неэкономичное решение. В таких случаях обычно переходят к сводчатому типу тоннельной обделки. Стремясь уменьшить размеры конструкции перекрытия, при проектировании прибегают к устройству промежуточных опор в виде средней стенки или колонн.

В плывунных породах наиболее целесообразной в статическом отношении является круглая обделка, которая обычно сооружается при щитовом способе работ.

При выборе конструкции тоннельной обделки для метрополитена приходится считаться с теми высокими требованиями, которые предъявляются к материалам обделки. Материалы должны удовлетворять требованиям механизированных методов производства работ. Конструкция тоннельной обделки рассчитывается на внешнюю нагрузку, в соответствии с геологическими и гидрогеологическими условиями пересекаемых пород.

Трассировка и проектирование профиля и поперечного сечения городских тоннелей, а также методы сооружения этих тоннелей в значительной степени отличаются от сооружения горных железнодорожных тоннелей. При городском тоннелировании, помимо геотехнических условий, приходится считаться с осложненным городским режимом, застроенностью территории, наличием подземного сложного хозяйства, уличным движением.

Комплекс тоннельных сооружений метрополитена складывается из следующих типов сооружений: тоннели для перегонов (однопутные, двухпутные и многопутные), тоннели станций (односводчатые, двухсводчатые, трехсводчатые и многоярусные; рис. 156 и 157 а, б, в, г), раструбы, тупики, переходные камеры. Кроме того, по трассе метрополитена создается ряд тоннельных сооружений, обусловленных технологией и условиями метрополитена: вентиляционные камеры и тоннели для подводки воздуха к трассе от вентиляционных шахт, камеры дренажных перекачек, уборные, устройства, связанные с электрическим оборудованием метрополитена — понизительные подстанции, контакторные посты, форкамеры.

При сооружении метрополитенов строителям приходится прибегать к особым видам тоннельных работ, так как процесс тоннелирования в городских условиях создает особые требования как к конструкции тоннельных сооружений, так и к производству работ.

В силу чрезвычайной пестроты и разнообразия городских и геологических условий при постройке городских тоннелей приходится создавать различные конструкции обделок, существенно отличающиеся от конструкций обделок горных тоннелей. Поперечные сечения городских тоннелей в каждом отдельном случае отличаются своими размерами и формой, причем они находятся в тесной взаимозависимости от методов их сооружения.

В крупных городах Европы и Америки выработаны свои типы тоннельных обделок, которые в соответствии с глубиной заложения и геотехническими условиями применяются на конкретных участках трассы. Тоннель круглого сечения (тюб) создается преимущественно с металлической обделкой из чугунных или стальных тюбингов. Этот тип тоннеля размером диаметра от 3,6

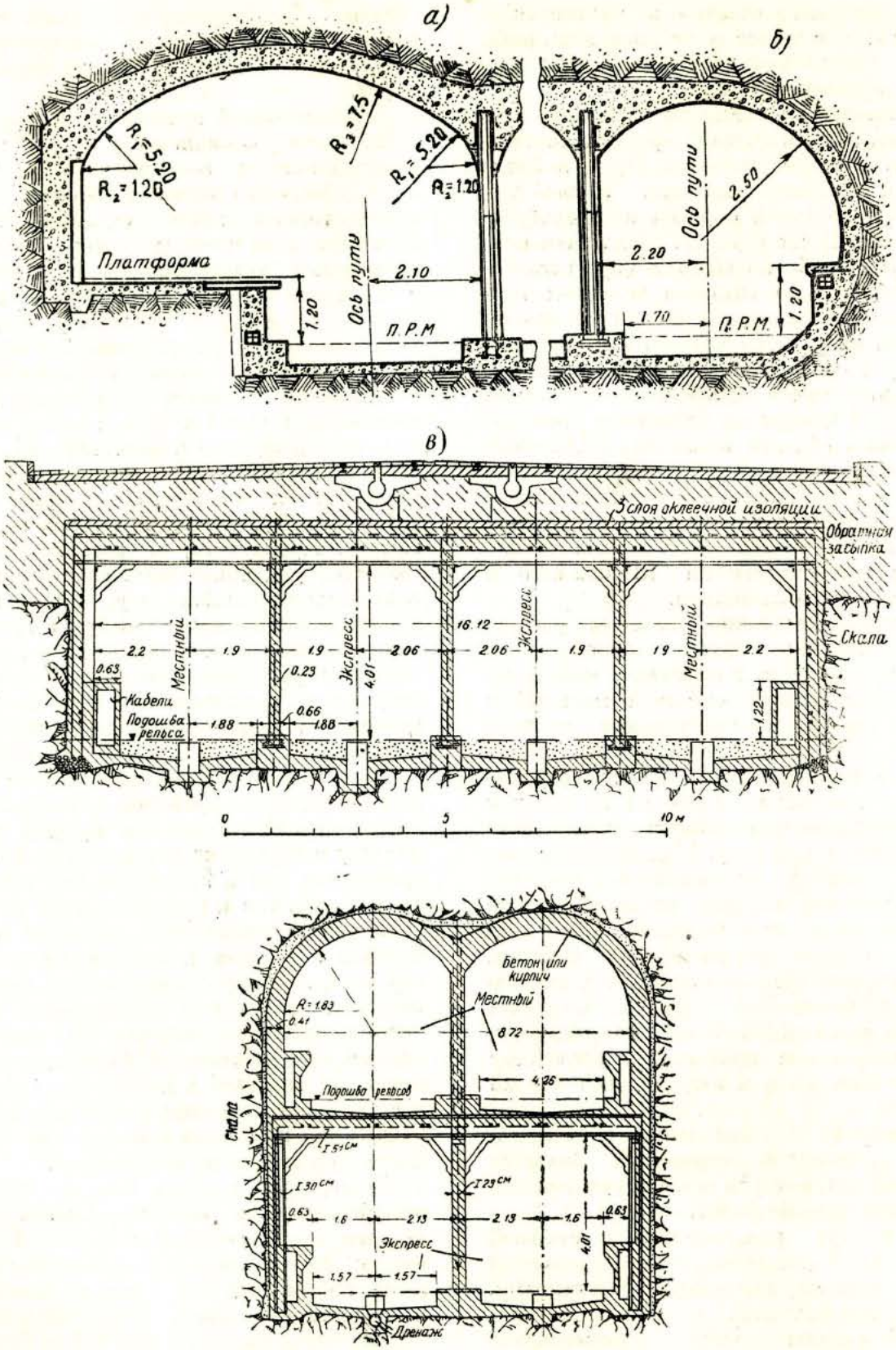


Рис. 156. Нью-Йоркский метрополитен (бетонная обделка в скале перегонных тоннелей и станций)

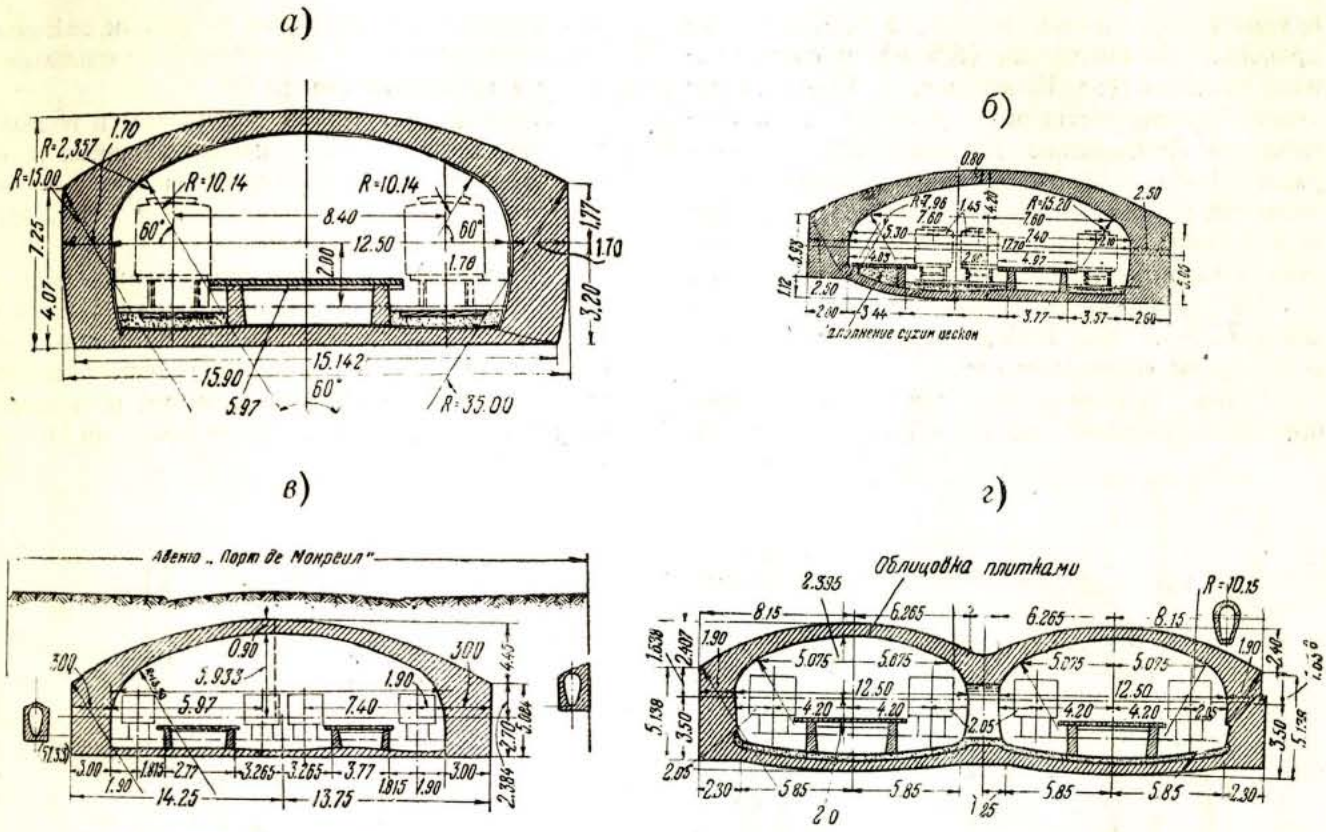


Рис. 157 а, б, в, г. Парижский метрополитен (односводчатые и двухсводчатые станции)

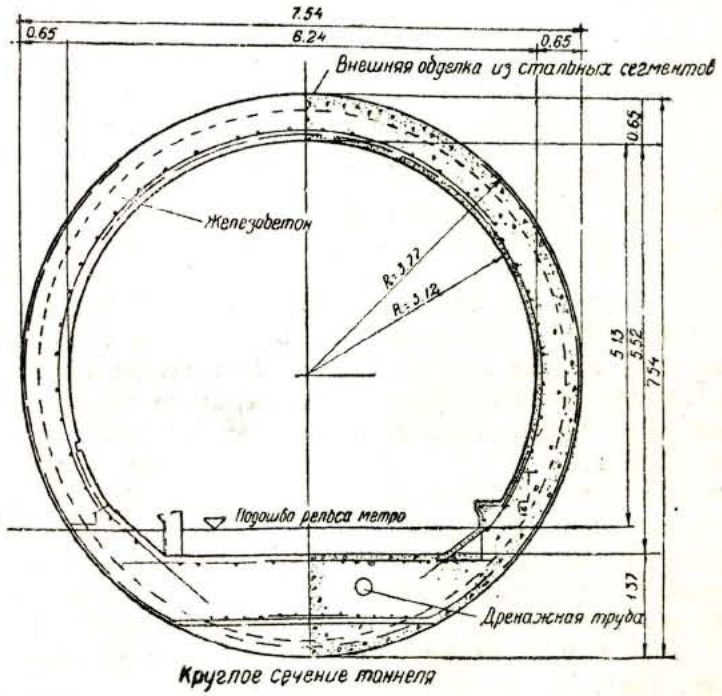


Рис. 158. Железобетонная конструкция перегонного тоннеля

крупных профилей, например двухпутного профиля, эскалаторных (8,5 *м*) и станционных тоннелей (до 10 *м*) и т. д. Однопутные тюбы преимущественно применяются в Англии, на Лондонском метрополитене, размерами 3,66 *м*. На Московском метрополитене перегонные тюбы имеют диаметр 6 *м*. При пересечении подводным тоннелем метрополитена в Париже, под р. Сеной, на линиях № 4 и № 8 у Пон де ля Конкорд, тюб имел размеры 7,77 *м*. Все тюбы сходятся по трассе к станциям метрополитена.

Тюбы применяются, как указано выше, при металлической тоннельной обделке и при исключение, сооружаться открытым способом Преимущественно используется тоннельный способ производства работ.

Иногда приходится рассчитывать тоннельные обделки и при комбинированных приемах производства работ, когда стены устраиваются закрытым способом в штольнях а свод открытым способом.

Материалом для тоннельных обделок метрополитенов Парижа, Берлина и Нью Йорка является преимущественно бетон. Американцы все же имеют определенную тенденцию к введению в бетон металла, в частности широко применяют конструкции из бетона

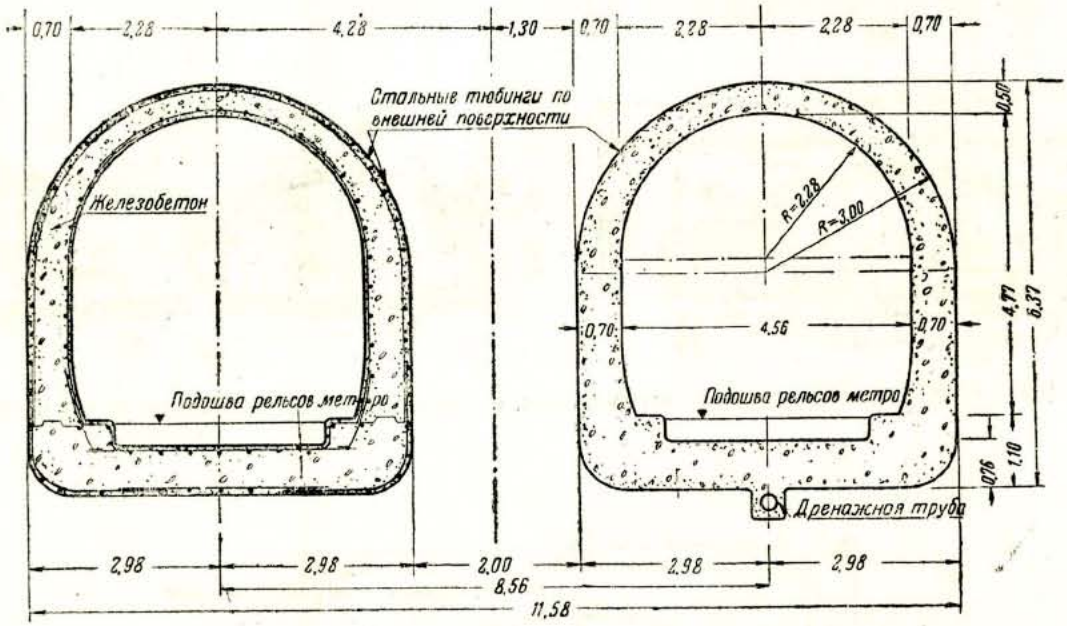


Рис. 159. Однопутные тоннели метрополитена

бетонных блоках для городских тоннелей в СССР, Англии и Америке. Тюбы обычно приспособлены для проходки щитовым способом производства работ.

В широком масштабе применены железобетонные конструкции тоннелей (однопутных и двухпутных), а равно и станции при сооружении новой линии Чикагского метрополитена, открытой для эксплоатации в 1942 г. (рис. 158, 159, 160, 161, 162 и 163).

Тоннели из каменной кладки, из бетона или из бута могут быть применены как однопутного, так и двухпутного профиля. Помимо этого, сводчатые каменные тоннели могут быть применены для сооружения различного рода раструбов, переходных камер и т. п. помещений (см. таблицу и рис. 164).

Сводчатые тоннели из каменной или бетонной кладки для городских тоннелей могут, как

с жесткой арматурой. В Париже гидроизоляция тоннеля разрешается нанесением цементного слоя по внутренней поверхности тоннельной обделки или торкретированием. В Германии и в США применяется мягкая оклеечная изоляция на горячей клебемассе.

В Париже преимущественно применяются тоннели со сводчатым перекрытием, по типу горных тоннелей. В городах с исключительно интенсивным уличным движением этот тип сводчатой тоннельной обделки, который обусловливает производство тоннеля горным способом, не вскрывая поверхности мостовой оказался более приемлемым, поскольку он не стесняет уличного движения.

Тоннели с плоским железобетонным или металлическим перекрытием, опирающимся на бетонную или железобетонную конструкцию стены, применяются в метрополитенах

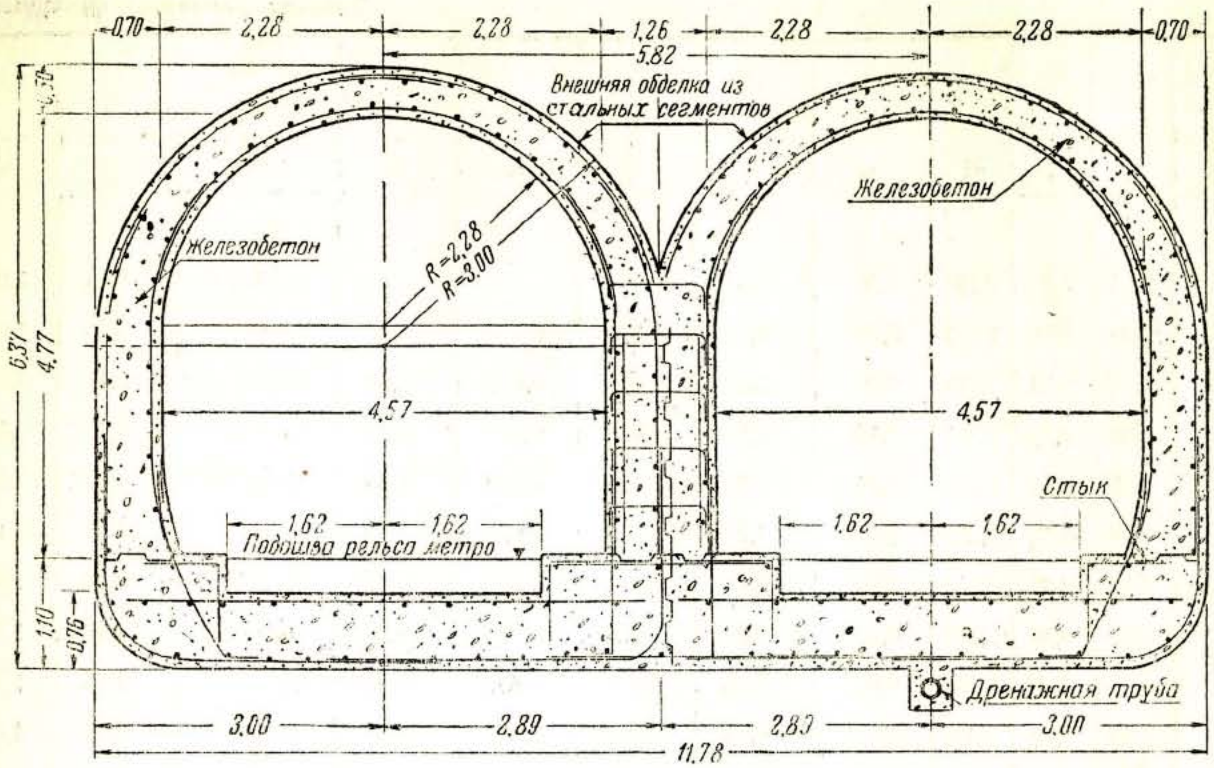


Рис. 160. Железобетонная конструкция двухсводчатого (спаренного тоннеля)

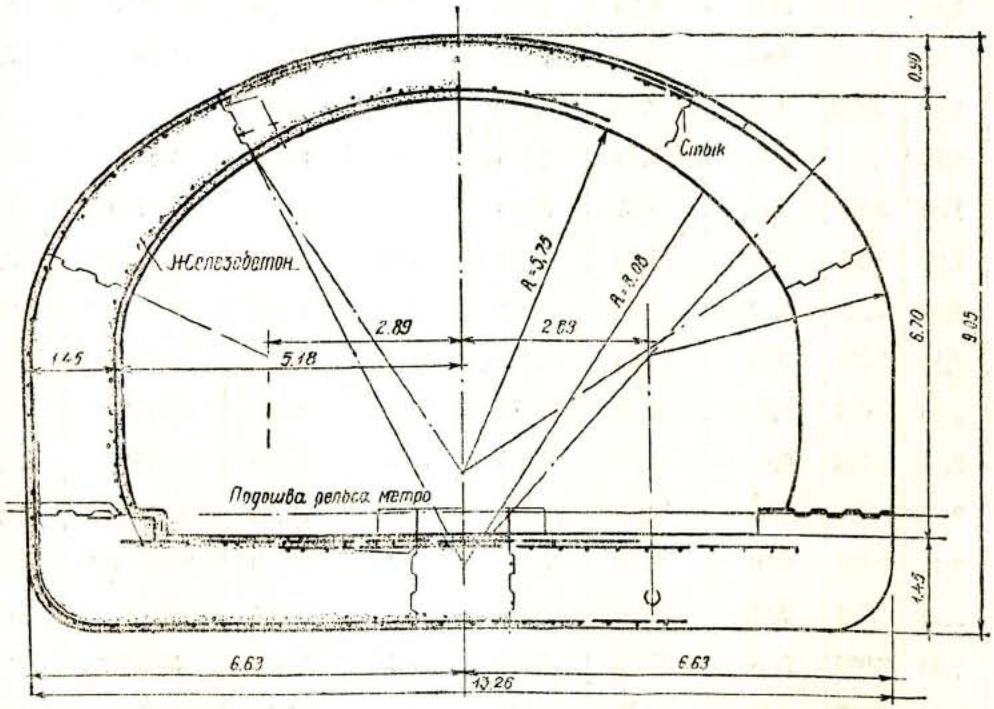


Рис. 161. Железобетонная конструкция односводчатого двухпутного тоннеля

Таблица элементов французских

Пролеты в м	$\sigma_{1,2}$	ε	M	e	$R_{..}^{1}$	$C_{..}^{1}$	$F_{..}^{1}$	$R_{..}^{2}$	$A_{..}^{2}$	$C_{..}^{2}$	$F_{..}^{2}$
4,50	2,25	0,60	2,250	0,50	—	—	—	4,00	45°26′30″	2,85	1,193
5,00	2,50	0,65	2,317	0,50	2,75	1,375	0,368	5,00	39°3′	3,15	1,117
5,50	2,75	0,70	2,384	0,50	3,25	1,625	0,435	5,50	38°51′	3,45	1,217
6,00	3,00	0,70	2,451	0,55	3,75	1,875	0,502	6,00	38°4′30″	3,70	1,277
6,50	3,25	0,75	2,518	0,55	4,25	2,125	0,569	6,50	37°58′30″	4,00	1,376
7,00	3,50	0,75	2,585	0,55	4,75	2,375	0,636	7,00	37°23″	4,25	1,438
7,50	3,75	0,85	2,652	0,60	5,25	2,625	0,703	7,50	37°49′51″	4,60	1,580
8,00	4,00	0,95	2,719	0,60	5,75	2,875	0,770	8,00	38°13′30″	4,95	1,715
8,50	4,25	1,00	2,786	0,60	6,25	3,125	0,837	9,00	35°41′	5,25	1,690
9,00	4,50	1,10	2,853	0,60	6,75	3,375	0,904	9,00	38°29′	5,60	1,954
9,50	4,75	1,20	2,920	0,65	7,25	3,625	0,971	10,00	36°31′	5,95	1,963
10,00	5,00	1,30	2,987	0,65	7,75	3,875	1,038	10,00	39°3′	6,30	2,228
10,50	5,25	1,40	3,054	0,65	8,25	4,125	1,105	11,00	37°12′	6,65	2,238
11,00	5,50	1,45	3,121	0,65	8,75	4,375	1,172	11,00	39°11′4″	6,95	2,474
11,50	5,75	1,55	3,188	0,65	9,25	4,625	1,239	12,00	37°28′9″	7,30	2,476
12,00	6,00	1,65	3,255	0,70	9,75	4,875	1,306	13,00	36°3′	7,65	2,489
12,50	6,25	1,75	3,322	0,70	10,25	5,125	1,373	14,00	34°51′	8,00	2,511
13,00	6,50	1,80	3,389	0,70	10,75	5,375	1,440	14,00	36°21′30″	8,30	2,725
13,50	6,75	1,90	3,456	0,70	11,25	5,625	1,507	14,00	38°9′30″	8,65	2,992
14,00	7,00	2,00	3,523	0,70	11,75	5,875	1,574	15,00	36°52′30″	9,00	3,000
14,50	7,25	2,10	3,590	0,75	12,25	6,125	1,641	16,00	35°45′30″	9,35	3,016
15,00	7,50	2,20	3,657	0,80	12,75	6,375	1,708	16,00	37°19′	9,70	3,275
15,50	7,75	2,25	3,724	0,80	13,25	6,625	1,775	18,00	33°45′	10,00	3,034
16,00	8,00	2,35	3,791	0,80	13,75	6,875	1,842	20,00	31°10′	10,35	2,886
16,50	8,25	2,45	3,858	0,80	14,25	7,125	1,909	20,00	32°20′30″	10,70	3,102
17,00	8,50	2,50	3,925	0,80	14,75	7,375	1,976	20,00	33°22′	11,00	3,297
17,50	8,75	2,50	3,992	0,90	15,25	7,625	2,043	22,00	30°45′30″	11,25	3,094
18,00	9,00	2,50	4,059	0,90	15,75	7,875	2,110	22,00	31°31′	11,50	3,245

[1] Стоимость приведена по довоенному курсу.

тоннельных сооружений (см. рис. 164)

$R_{..}^{3}$	$A_{..}^{3}$	$C_{..}^{3}$	H'	H	Выемка породы в $м^3$	Бетонная кладка в $м^3$	Каменная кладка в $м^3$	Цементная штукатурка по своду в $м^2$	Цементная штукатурка по стенам в $м^2$	Сечение тоннеля в свету в $м^2$	Стоимость 1 *пог. м* тоннеля во франках1
8,10	14°16′30″	1,997	1,557	4,757	31,80	6,38	6,20	6,08	10,00	19,22	900
10,22	12°42′	2,247	1,700	4,900	35,74	6,92	7,08	6,60	10,48	21,74	1 005
12,60	11°26′	2,497	1,667	4,867	39,32	7,48	7,50	7,12	10,96	24,48	1 190
15,22	10°24′	2,747	1,724	4,924	42,90	7,78	8,02	7,64	11,48	26,90	1 165
18,09	9°92′	2,997	1,692	4,892	46,66	8,34	8,74	8,13	11,98	29,58	1 265
21,21	8°48′30″	3,247	1,697	4,897	50,02	8,58	9,16	8,70	12,48	32,28	1 335
24,58	8°10′45″	3,497	1,672	4,872	54,70	9,44	10,26	9,22	12,98	35,00	1 470
28,20	7°38′8″	3,747	1,604	4,872	59,14	10,30	11,10	9,74	13,48	37,74	1 590
32,07	7°9′30″	3,997	1,696	4,896	63,46	10,84	12,02	10,26	13,98	40,60	1 700
36,20	6°44′	4,247	1,499	4,698	67,52	17,88	6,20	10,78	14,46	43,34	1 790
40,57	6°21′30″	4,497	1,607	4,807	73,06	19,36	7,28	11,32	14,98	46,42	1 940
45,19	6°1′47″	4,747	1,409	4,609	77,28	20,18	7,80	11,82	15,44	49,30	2 045
50,06	5°43′43″	4,997	1,466	4,666	82,40	21,92	8,12	12,36	15,98	52,36	2 185
55,19	5°27′20″	5,247	1,297	4,497	86,00	22,20	8,44	12,88	16,44	55,36	2 260
60,56	5°12′27″	5,497	1,362	4,562	91,26	23,68	9,10	13,40	16,94	54,48	2 400
66,18	4°59′	5,747	1,466	4,666	97,32	25,50	9,94	13,94	17,48	61,88	2 575
72,05	4°46′27″	5,997	1,511	4,711	102,60	27,10	10,64	14,46	17,96	64,86	2 725
78,18	4°35′	6,247	1,364	4,564	106,50	27,54	10,88	14,98	18,46	68,08	2 805
84,55	4°24′30″	6,497	1,161	4,364	110,82	28,36	11,14	15,50	18,96	72,32	2 900
91,17	4°15′	6,747	1,223	4,423	116,38	29,84	11,86	16,06	19,46	78,68	3 050
98,04	4°5′30″	6,997	1,274	4,474	122,12	31,36	12,70	16,54	19,96	78,06	3 210
105,16	3°57′30″	7,247	1,182	4,382	128,30	32,56	14,22	17,08	20,46	81,52	3 390
112,54	3°49′	7,497	1,490	4,690	134,94	34,56	15,42	17,60	20,96	84,96	3 590
120,16	3°42′	7,747	1,705	4,905	142,02	36,58	16,96	18,12	21,46	88,48	3 805
128,03	3°35′	7,997	1,556	4,756	146,78	37,60	17,14	18,64	21,96	91,98	3 965
136,15	3°28′30″	8,247	1,428	4,628	151,08	37,94	17,68	19,16	22,46	95,46	4 005
144,52	3°22′	8,497	1,798	4,998	159,90	39,80	20,60	19,68	22,96	99,18	4 285
153,14	3°16′30″	8,747	1,714	4,914	163,54	39,84	20,72	20,22	23,46	102,98	4 350

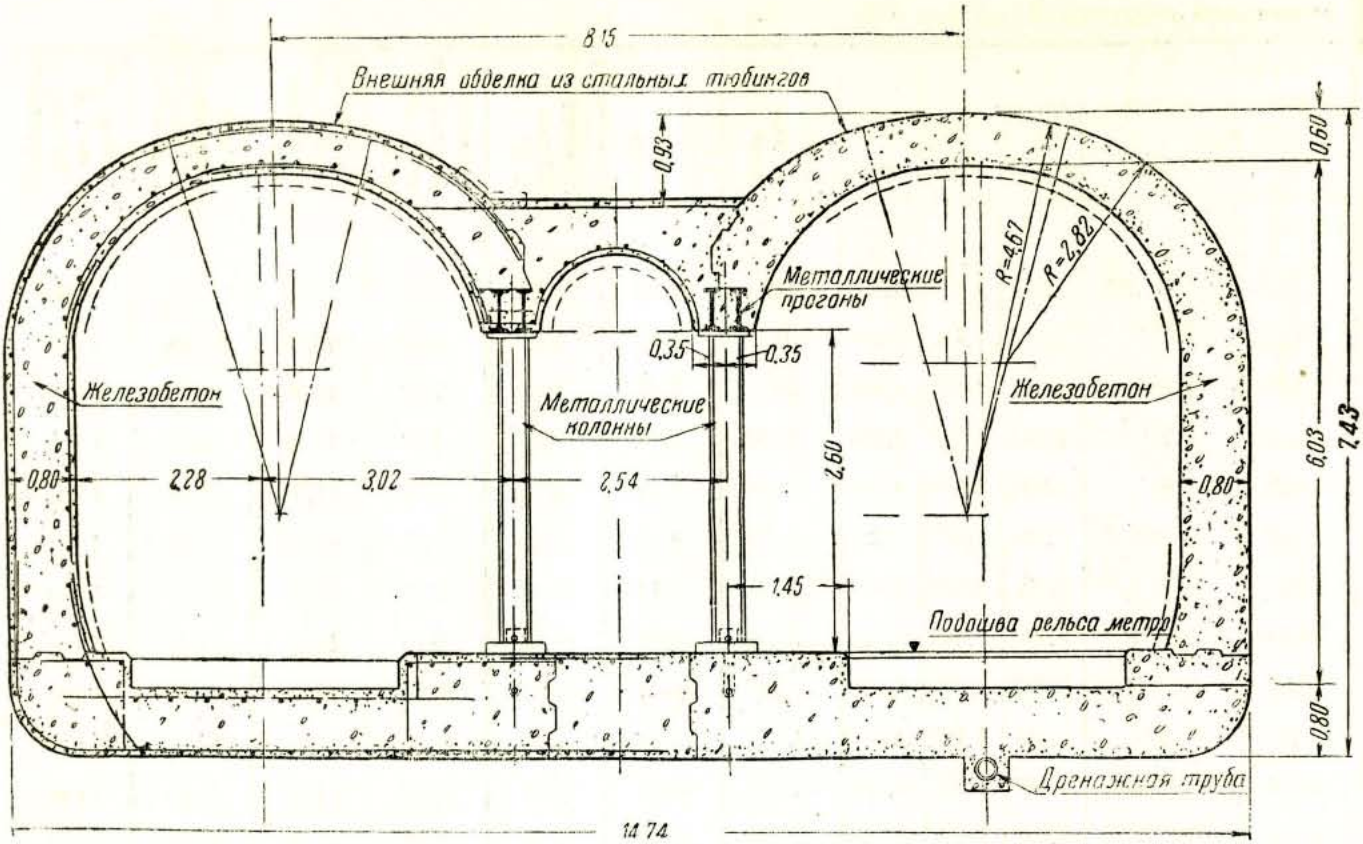


Рис. 162. Чикагский метрополитен (железобетонная конструкция станций)

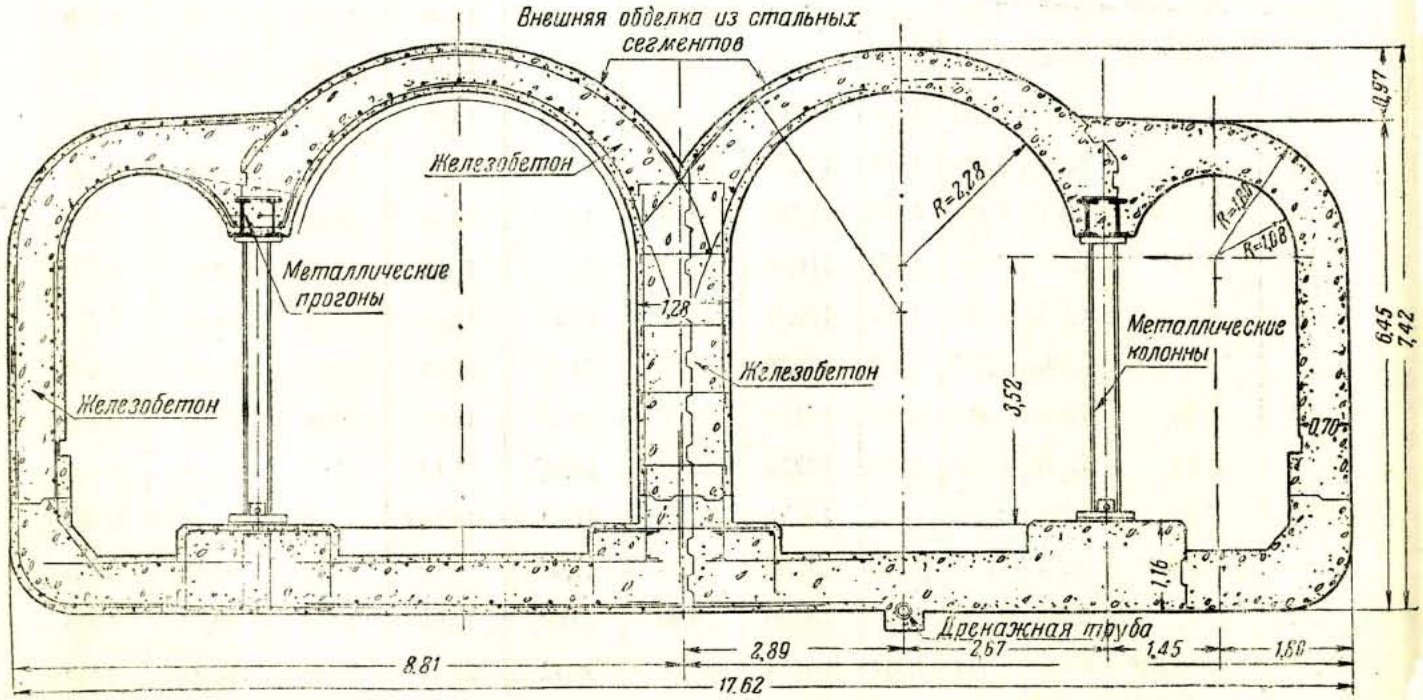


Рис. 163. Чикагский метрополитен (железобетонная конструкция станций)

Берлина, Будапешта, Бостона, Филадельфии и на значительной части трассы метрополитена Нью-Йорка. Тоннели с плоским перекрытием имеют в Берлине величину засыпки до поверхности мостовой 1 *м*, в Будапеште 0,5 *м*.

В зависимости от характера пород, водоносности их, проявляемого горного давления устанавливается ряд типов тоннельных обделок: нормальных и усиленных типов.

Как указывалось выше, конструкции тоннелей метрополитена в основном по своему характеру разделяются на два типа: а) конструкции тоннелей и станций мелкого заложения и б) конструкции тоннелей и станций глубокого заложения. Тоннельные сооружения мелкого заложения, при которых наиболее ясны величины внешних сил, действующих на обделку, представляются преимущественно в виде конструкций с плоским перекрытием железобетонного или металлического ребристого, плитного или безбалочного типа, которое опирается на бетонные стены; в зависимости от размеров поперечного сечения может быть устроена средняя стенка или ряд колонн. При мелком заложении тоннелей в плывунных грунтах возможно применение конструкций в виде железобетонной замкнутой рамы. Обычно тоннели мелкого заложения изолируются внешней оклеечной изоляцией из нескольких слоев гудронированного толя или рубероида на горячей клебемассе. По лотку предварительно устраивается бетонная подготовка под изоляцию, а по стенам устраивается защитная стенка (шуцванд) толщиной от 12 до 15 *см*, по которой производится оклейка изоляции. Число слоев оклеечной изоляции назначается в соответствии с ожидаемым гидростатическим давлением.

Тоннели глубокого заложения осуществляются сводчатого типа из бетона, или из металлических (чугунных, стальных или железобетонных) тюбингов, или из бетонных блоков. Наилучшей формой однопутного тоннеля при проходке щитом является круг. При этой форме достигается стандартность отдельных элементов и тем самым простота сборки колец из отдельных блоков, которые изготовляются заранее на поверхности.

Приводим типы тоннелей метрополитена:

При сооружении тоннелей на 1-й очереди строительства Московского метрополитена горным способом наиболее распространенным типом являлся однопутный перегонный тоннель бетонной конструкции. Внутреннее очертание тоннеля круглое, что дает возможность устройства круглой железобетонной рубашки, рассчитанной на гидростатическое давление. Внутренний диаметр тоннеля 5,1 *м*. Внешний размер тоннеля по ширине 7,1 *м*. Высота тоннеля 6,50 *м*. Толщина свода в замке 50 *см*. Стены толщиной до 1 *м*.

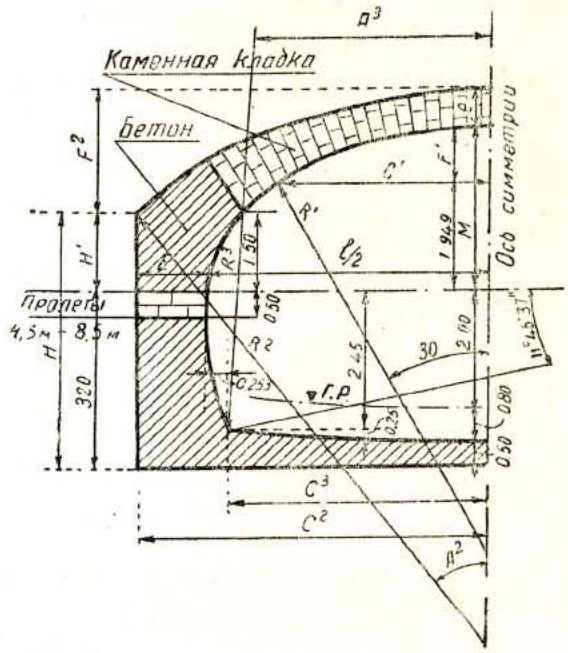


Рис. 164. Схема элементов тоннельного сооружения (к таблице на стр. 166—167)

Обратный свод 50 *см*. Свод тоннеля из бетона марки $R = 130$ *кг/см*^{2}. Стены из бетона марки $R = 110$ *кг/см*^{2}. Обратный свод из бетона марки $R = 90$ *кг/см*^{2}. Толщина гидроизоляционного слоя 2 *см*. Толщина внутренней железобетонной рубашки 18 *см* (рис. 165).

В условиях сильного гидростатического давления снизу и наличия слабых грунтов применяется несколько видоизмененный тип тоннельной обделки, при котором лоток выполняется по типу несущего обратного свода, так что получается симметричное сечение относительно горизонтального диаметра тоннеля. В этом случае марка бетона по всему сечению тоннеля $R = 110$ *кг/см*^{2}.

В двухпутных тоннелях устраиваются боковые проходы с наибольшей шириной 0,75 *м* от стенки вагона до внутреннего очертания обделки. Расстояние между осями путей 3,3 *м*, между внутренними стенками вагонов 0,6 *м*. Третий рельс для обоих направлений располагается в междупутье. Сигналы располагаются с боков между линией габарита приближения и стенкой тоннеля (рис. 166).

Внутренние размеры: ширина 7,5 *м*, высота от головки рельса до замка свода 6,45 *м*. Внешние размеры: высота 9,77 *м*, ширина 11,60 *м*. Очертание свода ввиду большого давления выбирается полуциркульное. Толщина

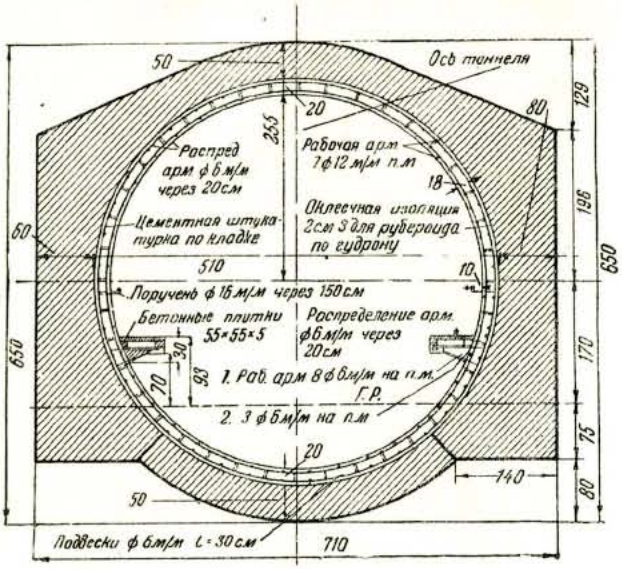


Рис. 165. Бетонная конструкция перегонного тоннеля с внутренней железобетонной гидроизоляционной рубашкой

в замке 0,8 *м*, в пятах 1,1 *м*. Толщина стены в уровне наибольшей ширины тоннеля 1,25 *м*. Наименьшая толщина лотка 0,6 *м*. С внутренней стороны обделка покрывается торкретом или оклеечной изоляцией с внутренним железобетонным кольцом.

Кроме описанного типа, в двухпутном тоннеле применяется при меньшем давлении и другой тип, очертание свода которого соответствует эллипсу.

При расчете конструкций тоннельных сооружений приходится учитывать их собственный вес и вес вышележащих пород. При наличии в кровле слабых грунтов или глубоком заложении тоннеля (до 50 *м*) для тоннелей двухпутного профиля, переходных камер и станций метрополитена приходится считаться с полным весом налегающей толщи.

Расчет однопутных тоннелей при наличии в кровле относительно устойчивых пород позволяет принимать нагрузку от вышележащего столба грунта, по высоте не менее четырехкратного радиуса тоннельной обделки. При мелком заложении тоннелей метрополитена приходится, кроме того, учитывать и временную подвижную нагрузку при динамическом коэфициенте, равном 1,2.

Рассчитывая бетонную обделку при горном способе производства работ, рекомендуется придерживаться метода Коммереля-Розанова. Расчет ведется раздельно по элементам обделки. Свод считается с заделанными пятами, а стены тоннеля рассчитываются отдельно с учетом пассивного отпора породы. Лоток может быть рассчитан на гидростатическое давление снизу. При большом напоре воды снизу устраивается обратный свод.

Расчет круглых обделок тоннелей может быть произведен методом расчета кольца в упругой среде, разработанным Отделом типового проектирования Метропроекта (см. главу XXI).

При расчете тоннелей бетонной конструкции с внутренней изоляцией и защитной железобетонной рубашкой расчеты могут быть проведены следующим порядком, рекомендованным Советской экспертизой по проекту Московского метрополитена:

1. Для нормального режима:

а) наружная обделка рассчитывается на давление земли за вычетом потери веса в воде в части, находящейся ниже уровня грунтовых вод при нормальных допускаемых напряжениях;

б) внутренняя оболочка на полное гидростатическое давление; при этом допускаемое

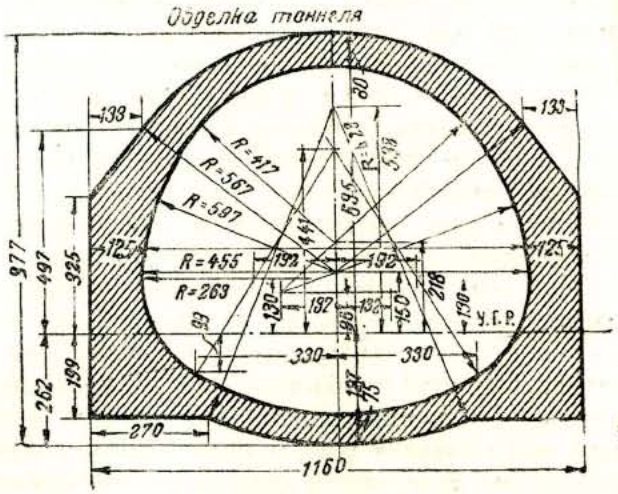


Рис. 166. Двухпутный тоннель метрополитена

напряжение в бетоне может быть повышено на 40%, а железа до 1 500 *кг/см*^{2}.

2. Для временного режима с увеличением нормального напряжения в бетоне на 40% против нормального:

а) наружная обделка на давление сухого грунта (на время устройства внутренней оболочки);

б) совокупность наружной и внутренней обделок (на время окончания фильтрации воды через бетон) на давление насыщенного водой грунта.

* * *

Для Московского метрополитена 2-й очереди применен тип тоннеля из чугунных тюбингов внешним диаметром 6 *м*. Ширина тюбингового кольца 750 *мм*. Отдельные тюбинги сбалчиваются между собой болтами. Каждое кольцо тюбинга состоит из двенадцати тюбинговых сегментов. Швы стыкующихся между собой сегментов по тюбу имеют радиальное направление, за исключением бортов тюбингов, смежных с ключевым сегментом. Перегонный тюб имеет следующие типы сегментов: 9 нормальных, 1 ключевой и 2 тюбинга, смежных с ключевым. Каждый чугунный тюбинг представляет собой открытую коробку с четырьмя бортами, имеющую плиту-оболочку с кривизной по радиусу тоннеля. Высота борта 200 *мм*. Толщина оболочки 35 *мм* в середине и у бортов до 45 *мм*. Расчет оболочки ведется как расчет плиты, заделанной по контуру. В круговых и радиальных бортах тюбингов имеются четверти, образующие при стыковании желобки размерами 32×12 *мм*, которые обеспечивают расчеканку свинцом и цементной или металлической замазкой для водонепроницаемости тюбов в стыках. Борта тюбингов в месте их соприкасания между собой (по четырем сторонам) подвергаются механической обработке. Каждый из сегментов соединяется между собой болтами диаметром 30 *мм*. Общее количество болтов по контуру кольца 67 шт. Болтовые отверстия в бортах тюбингов устраиваются примерно на 6 *мм* больше диаметра болтов для обеспечения необходимой игры в болтовых соединениях при сборке тюбингов. Водонепроницаемость болтовых отверстий достигается применением асбобитумных шайб или кольцевых прокладок из пеньки (пропитанной суриком на олифе), прижимаемых головкой и гайкой болта. Указанные мероприятия по расчеканке и по заделке болтовых отверстий на основании существующего опыта эксплоатации тюбов обеспечивают полную водонепроницаемость тоннельной конструкции.

Непосредственно в каждом тюбинге имеется отверстие (диаметром 30 *мм*) для вдувания гравия и нагнетания цементного раствора под давлением от 3 до 4 *ат*, с целью заполнения пустот, образуемых за обделкой в процессе проходки и обеспечения требуемого пассивного отпора. Это отверстие заделывается впоследствии металлической пробкой с нарезкой (рис. 167, 168, 169, 170).

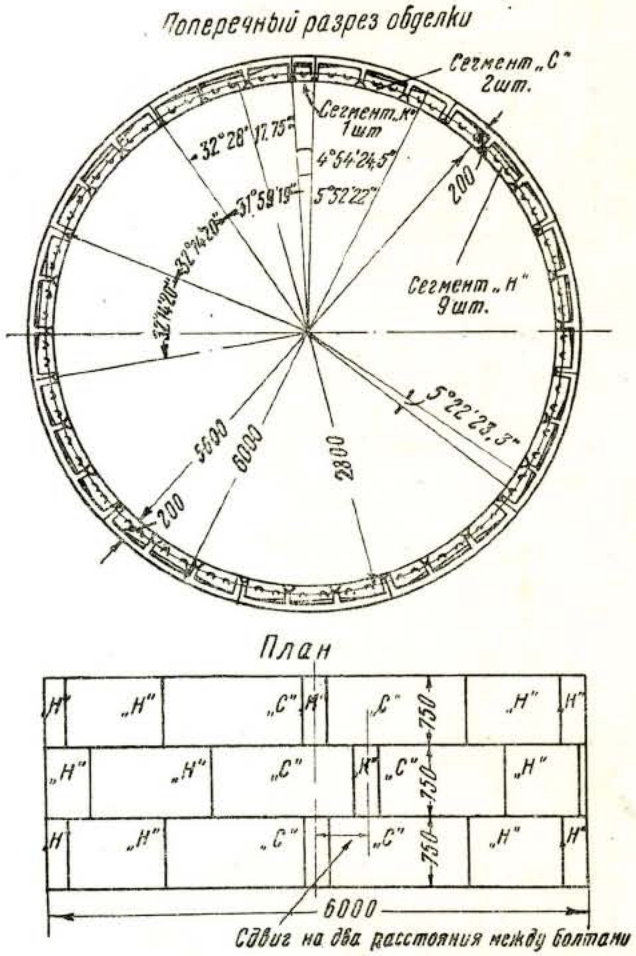


Рис. 167. Обделка перегонного тоннеля метрополитена из чугунных тюбингов

Вес 1 *пог. м* тоннеля составляет 9,46 *т*.

Обделка из бетонных блоков, заранее приготовленных на поверхности, применяется также при щитовой проходке. Большое распространение этот тип обделки получил в Америке при постройке ряда деривационных тоннелей и тоннелей метрополитенов. Такая же обделка была применена и при постройке Московского метрополитена (рис. 171).

Для тоннелей диаметром 6,5 *м* применяются блоки толщиной 50 *см*, снабженные выступами, пазами и отверстиями для нагнетания за обделку цементного раствора и для

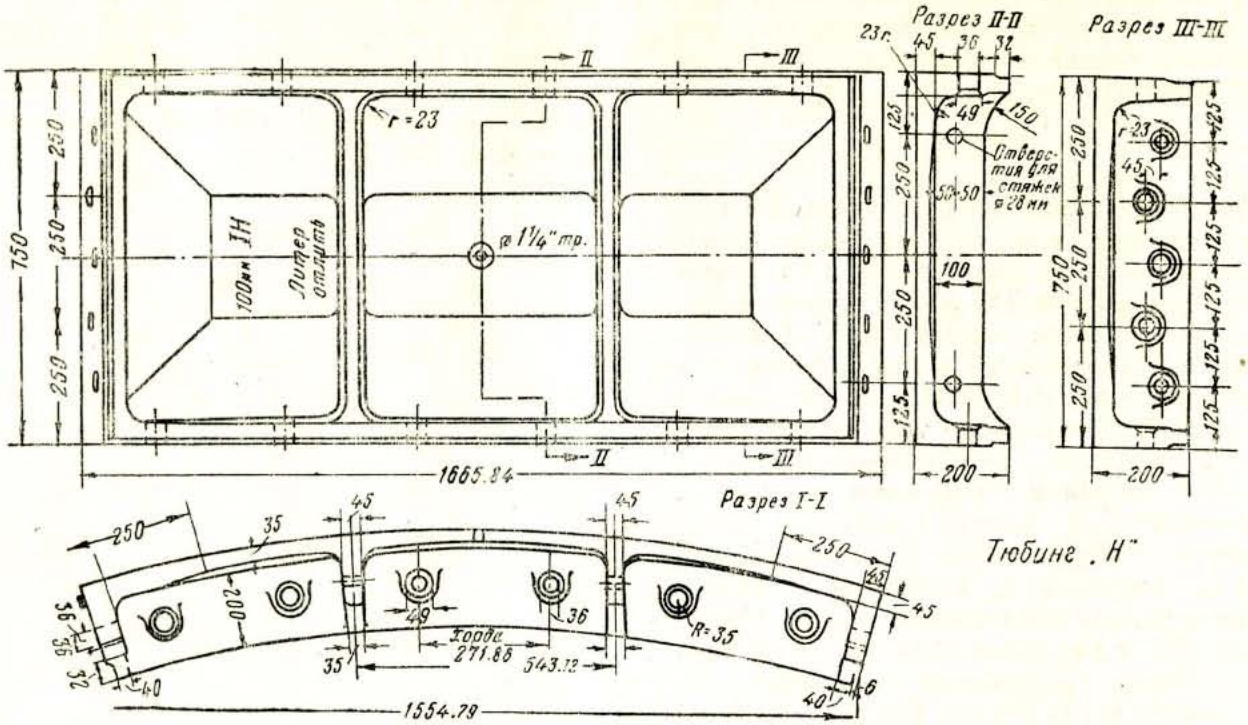


Рис. 168. Нормальный чугунный тюбинг перегонного тоннеля метрополитена

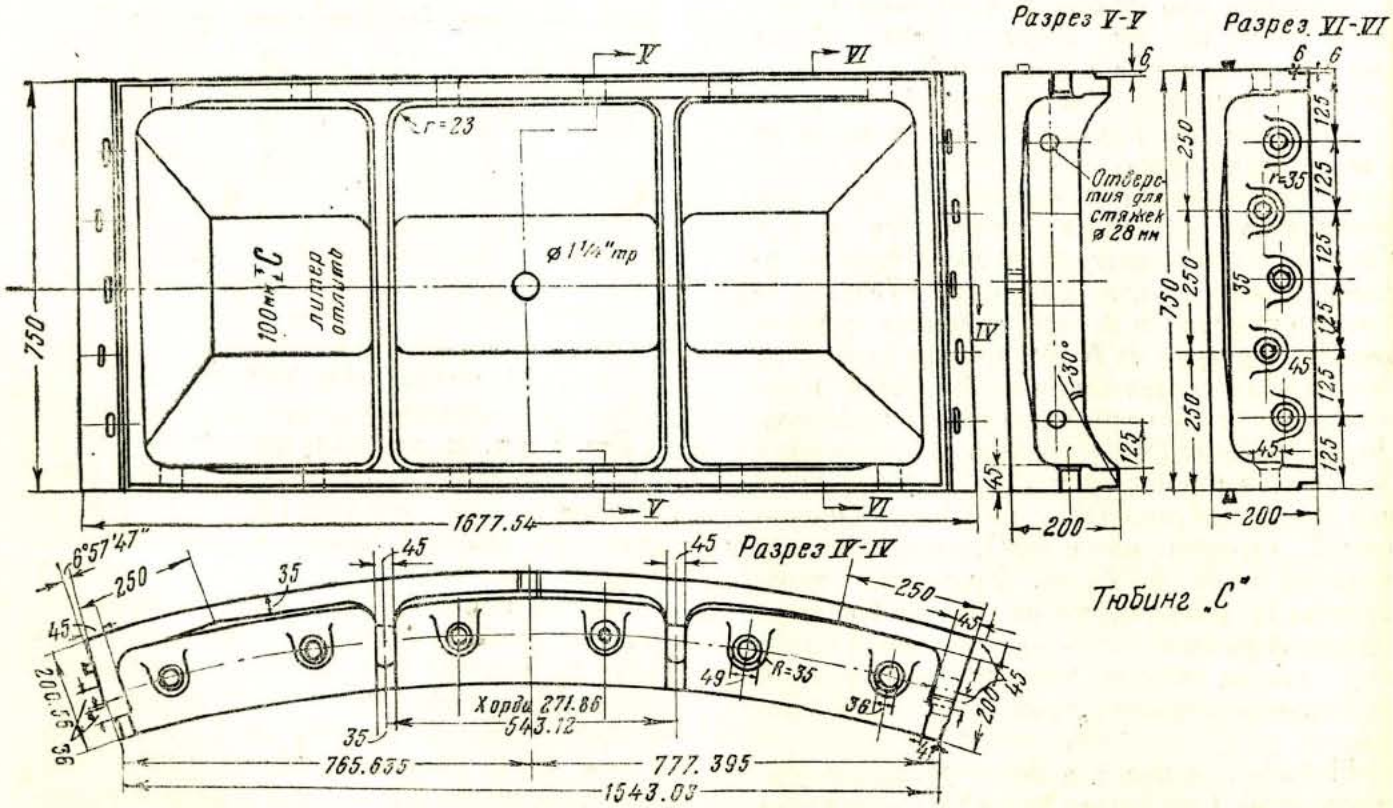


Рис. 169. Смежный чугунный тюбинг перегонного тоннеля метрополитена

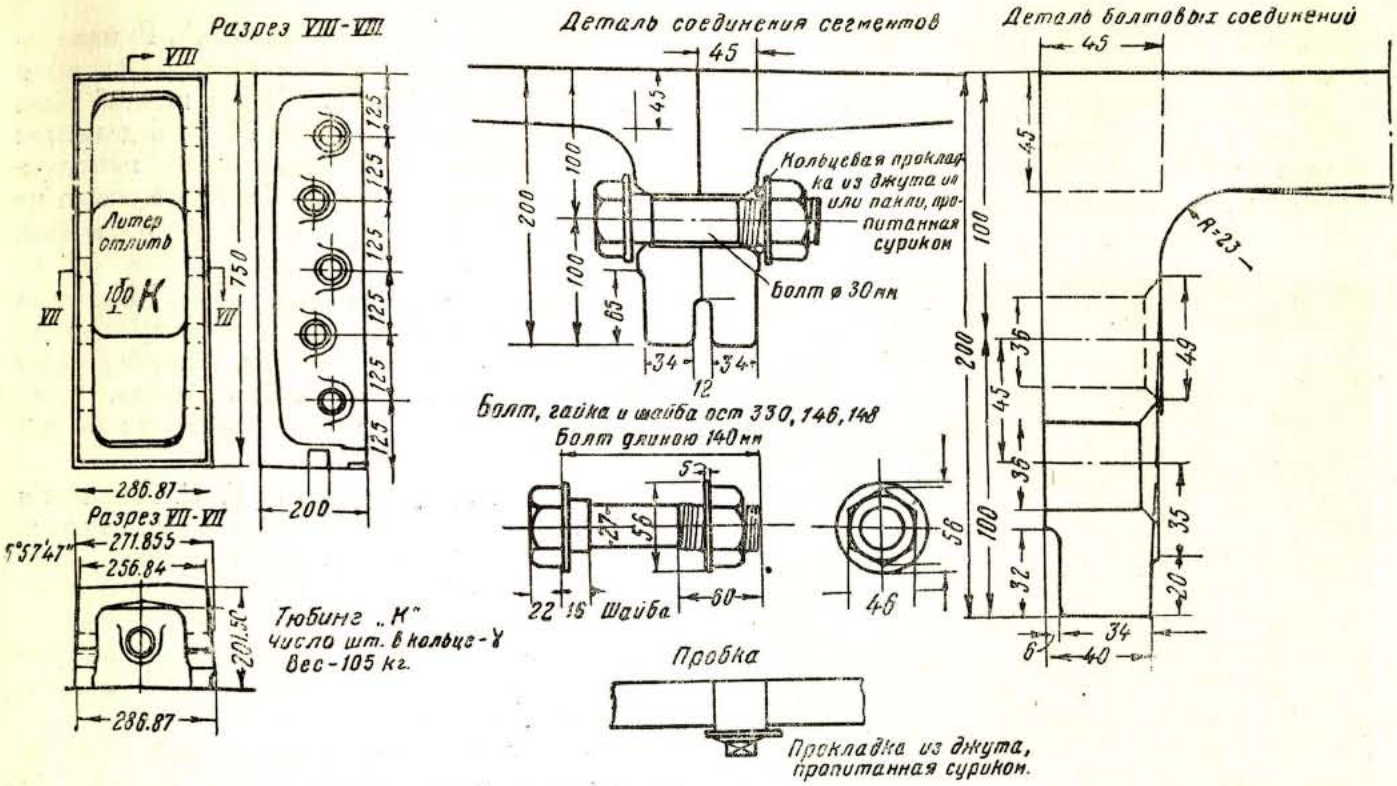


Рис. 170. Ключевой чугунный тюбинг перегонного тоннеля метрополитена

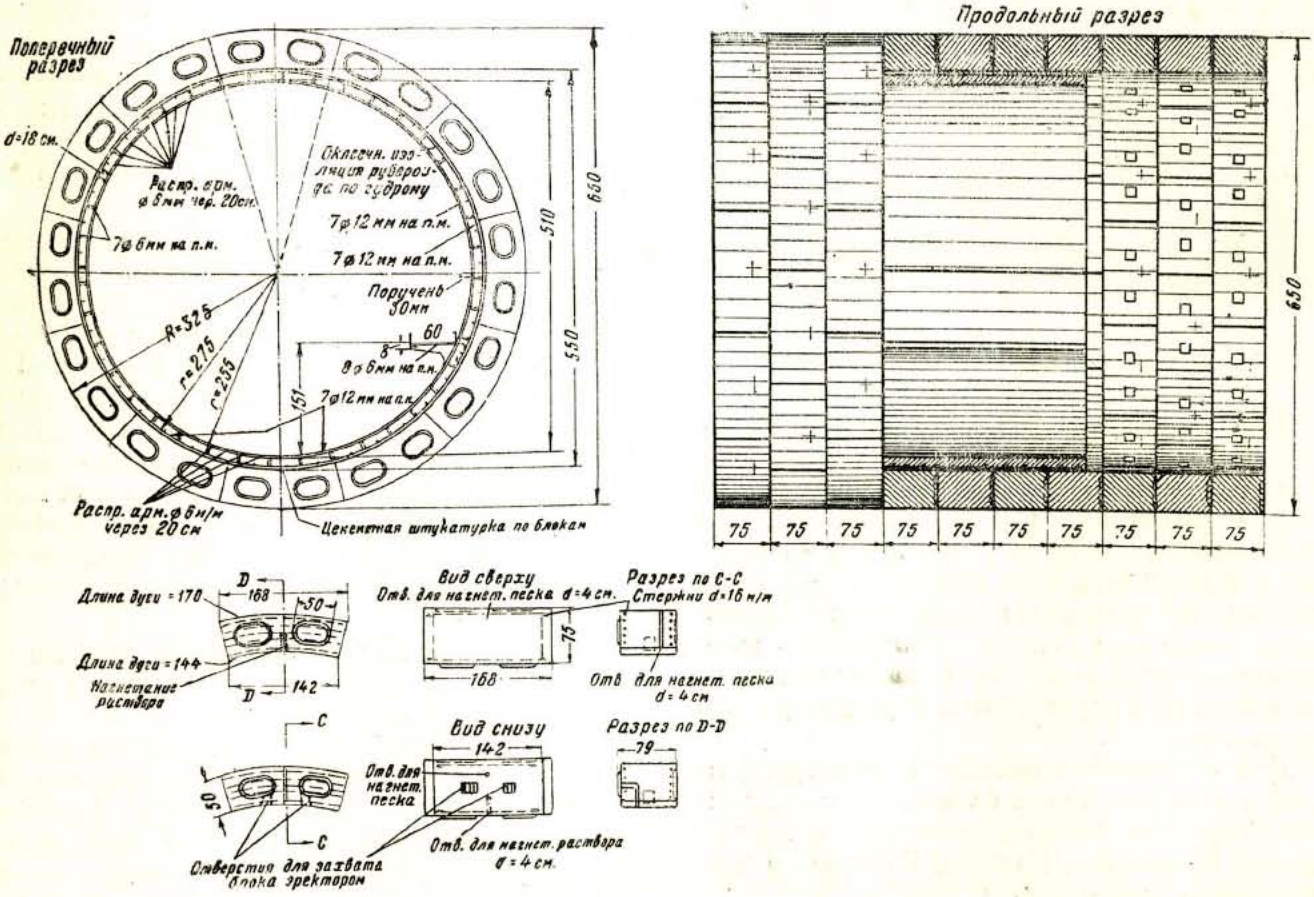


Рис. 171. Обделка тоннеля из бетонных блоков

захвата блока эректором щита. Кроме того, блоки имеют отверстия для их цементации с целью заполнения швов между ними и образования монолитного тюба. Вес бетонных блоков от 1,5 до 2 *т*. Размеры элементов конструкции усматриваются из рис. 171.

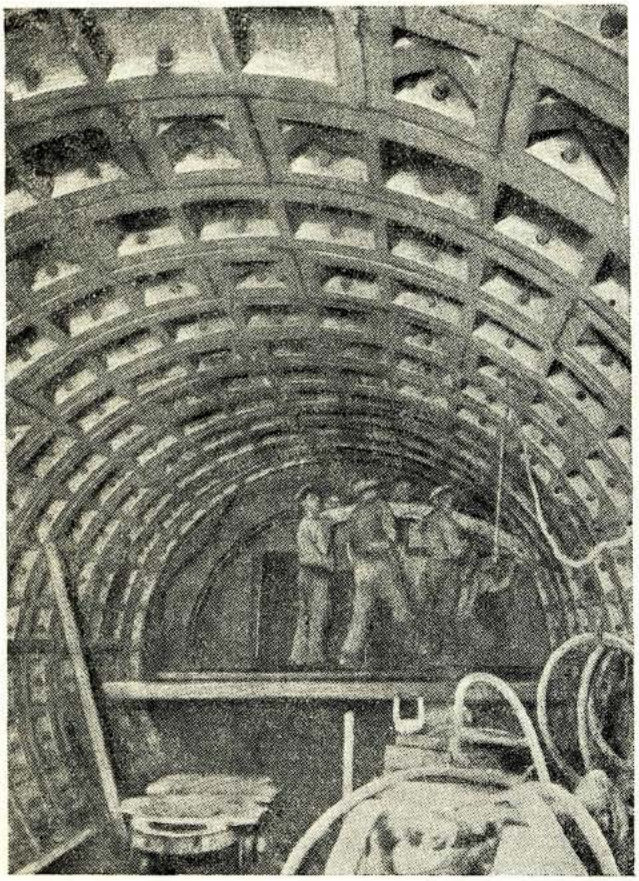


Рис. 172. Тоннель из железобетонных тюбингов

При сооружении Московского метрополитена с целью увеличения жесткости тоннеля в условиях неоднородных пород приведенная система блоков была усовершенствована. Применение различного рода систем армирования и дополнительных элементов для сбалчивания и соединения отдельных блоков между собой дает возможность получить конструкцию, обеспечивающую надежность работы тоннеля в неустойчивых породах при его эксплоатации.

Для обеспечения жесткости конструкции тюба и железобетонных блоков, заложенных в неустойчивых породах, советские инженеры Рудник, Маковский, Каханов, Розанов и др. предложили ряд проектов.

Блоки по системе инж. М. А. Рудника соединяются в продольном направлении рядом металлических болтов. Через каждый блок проходит 4 болта длиной 74 *см* и диаметром 36 *мм*. Свинченные между собой металлические стержни должны обеспечить жесткость тюба из бетонных блоков в продольном направлении.

Блоки по системе инж. В. Л. Маковского армируются в продольном и поперечном направлениях круглым железом, которое выходит на внутреннюю поверхность блоков. Блоки можно сбалчивать между собой так же, как и чугунные сегменты.

По системе инженеров Г. С. Каханова и С. Н. Розанова, внутри обделки из бетонных блоков устраивается несущая жесткая, металлическая конструкция, заполняемая бетоном. Блоки в данном случае являются временным креплением в период проходки щита, а основной несущей конструкцией является внутренняя обделка тоннеля.

Обделка тоннеля при щитовой проходке из бетонных блоков по своему качеству как в отношении водонепроницаемости, так и жесткости самого тоннельного кольца значительно уступает конструкции из тюбингов и требует в зависимости от гидростатического давления специальной изоляции внутри тоннеля и устройства внутренней железобетонной рубашки, рассчитанной на гидростатическое давление.

На Московском метрополитене тоннель из бетонных блоков при щитовой проходке применен на 1-й очереди на пересечении староречья в неустойчивых породах и на 2-й очереди в коренных устойчивых породах. При ширине кольца 750 *мм* оно составлено из двенадцати сегментов. В конструкции из бетонных блоков специального замкового типа блок не устанавливается. Для равномерной передачи давления от щитовы домкратов на обделку при продвижени щита бетонные блоки армируются специал ной сеткой.

Помимо этого, каждый блок снабжен отверстием для нагнетания за обделку с целью заполнения пустот и с другой стороны — отверстием, через которое нагнетается цементный раствор в целях взаимного скрепления блоков между собой и создания элементов монолитности конструкции. Для локализации возможных сдвигов одного тоннельного кольца по отношению к другому каждый блок, как

указано выше, снабжен выступами и пазами, которые взаимно сопрягаются.

В условиях сухих пород, в частности при сооружении некоторых участков перегонных тоннелей Лондонского метрополитена, применяли обделки из железобетонных тюбингов. В 1939 г. на линии Илфорд Лондонского метрополитена в условиях мощного слоя водо-

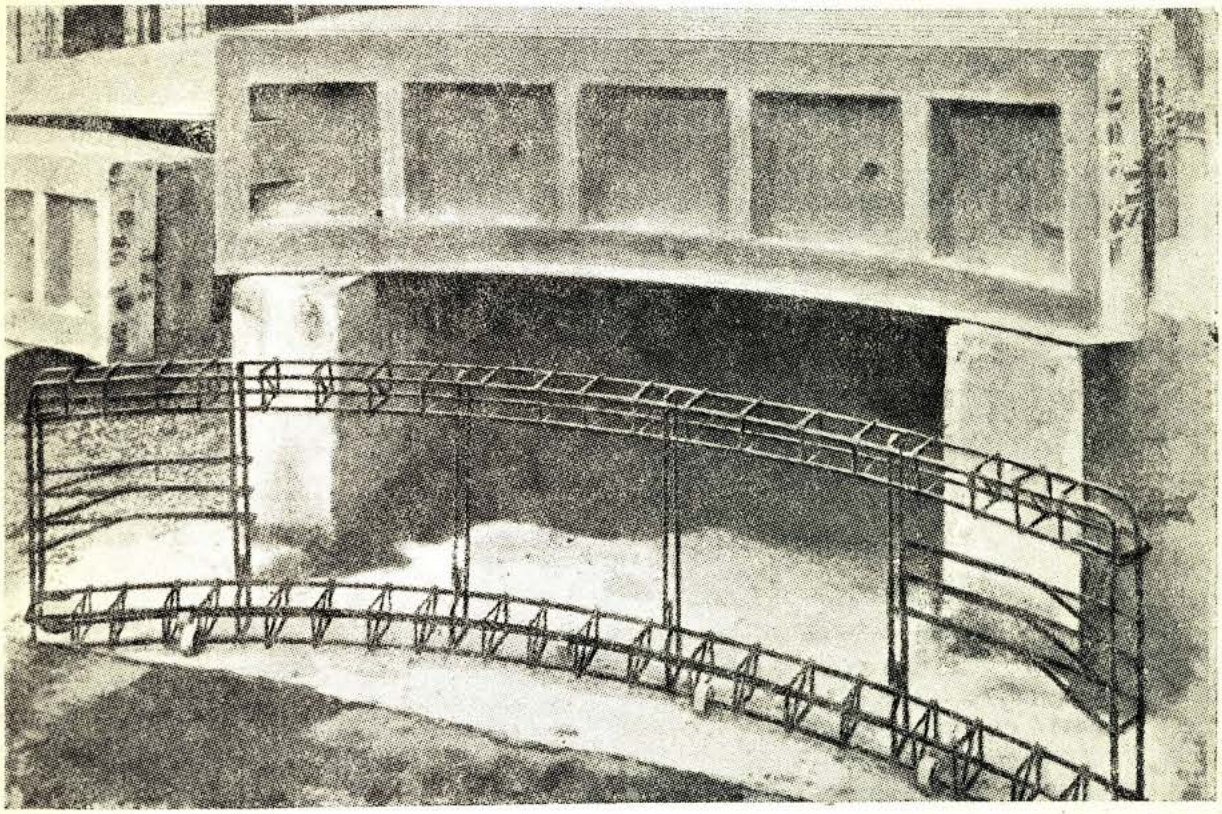


Рис. 173. Железобетонный тюбинг (арматурный каркас)

непроницаемой глины был сооружен перегонный тоннель диаметром, равным 3,72 *м*, из железобетонных тюбингов. Кольцо обделки образовано 6 нормальными и 1 замковым тюбингом. При ширине кольца в 0,5 *м* толщина оболочки тюбинга 5 *см*, высота ребра 12,5 см, а толщина ребра 8 *см*. Вес тюбинга 230 *кг* (рис. 172, 173).

Железобетонные тюбинги изготовлялись на поверхности заводским способом в специальных металлических формах. Тюбинги выдерживались в последних до 12 часов, затем опускались на трое суток в специальные водяные баки. После этого тюбинги выдерживались на поверхности 28 дней и направлялись в дело на шахту.

Монтаж тюбингов в тоннеле осуществлялся обычно способом с помощью эректора, причем сбалчивание сегментов производилось болтами диаметром $^{7}/_{8}$ дюйма. Процесс подземного монтажа показал, что на сбалчивание кольца из чугунных или железобетонных тюбингов практически требуется одинаковая затрата времени. Между отдельными тюбингами укладывались прокладки (толщиной 10 *мм*) из пропитанного креозотом дерева или битуминозные прокладки (толщиною 5 *мм*). Швы расчеканивались цементом.

Изоляция болтовых отверстий железобетонных тюбингов идентична изоляции при чугунных тюбингах.

Осуществление конструкции перегонного тоннеля из железобетонных тюбингов обеспечило экономию чугуна и снижение стоимости строительства до 60%.

Однако применительно к условиям сооружения тоннеля в водоносных грунтах, особенно при наличии гидростатического напора, вопрос о применении железобетонных тюбингов еще не является разрешенным в отношении гидроизоляции конструкции.

Несмотря на мероприятия по обеспечению плотности бетона, последний по своей структуре является материалом водопрони-

цаемым. Насыщенное водой бетонное тело обделки служит проводником электричества и дает выход блуждающим токам, разрушающим близрасположенные провода и кабели, а равно и арматуру самой конструкции тюбингов.

Сообщение водонепроницаемости железобетонным тюбингам идет по линии импрегнирования тела бетона битумом под давлением.

Несмотря на благоприятный показатель отношения $\frac{W}{S}$, где W — объем тюбинга, а S — его поверхность, до сих пор не удалось достигнуть требуемых результатов. Ведутся опыты по шоопированию — металлизации поверхности тюбингов. На Московском метрополитене запроектирована обделка из железобетонных тюбингов для тоннеля диаметром 6 *м*. Кольцо состоит из семи нормальных, двух смежных и одного замкового тюбинга. Толщина оболочки 8 *см*, высота ребра 25 *см*, толщина ребра 12 *см*, при ширине кольца в 100 *см*.

На опытных участках тоннеля из железобетонных тюбингов испытываются различные способы достижения водонепроницаемости конструкции.

* * *

Переходные камеры, раструбы, ответвления, тупики. В общем комплексе тоннельных сооружений метрополитена создаются камеры переменных профилей для ответвлений, съездов и тупиков. Материалами для них могут служить как чугун, так и бетон. В первом случае устройство обделки может быть произведено специальным эректором; во втором случае проходка ведется обычным горным способом. В зависимости от размеров переходных камер они могут осуществляться как круглого, так и эллиптического очертания. В некоторых случаях переходные камеры сооружаются переменного сечения, телескопически входят одна в другую (рис. 174, 175).

Конструкции станций метрополитена. Конструкции станций мелкого и глубокого заложения выполняются как из бетона, железобетона, так и из металла. Габариты станций во многом зависят от ширины платформы, которая назначается в соответствии с ожидаемыми пассажиропотоками на данной станции.

При назначении профиля станции метрополитена, помимо эксплоатационных условий, приходится считаться с ее архитектурным оформлением.



Рис. 174. План переходных тоннельных камер

При постройке станций глубокого заложения метрополитена, помимо обеспечения прочности и устойчивости сооружения, необходимо особо считаться с методами тоннельных работ по отдельным стадиям их производства.

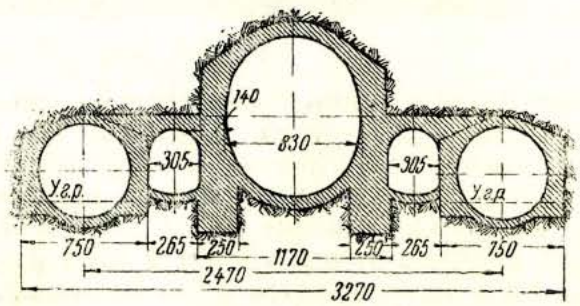


Рис. 175. Поперечное сечение переходных тоннельных камер

Тоннельные конструкции станции могут быть сооружены как щитовым, так и горным способом.

Станции — подземные вокзалы метрополитена относятся к наиболее сложным тоннельным сооружениям в общем комплексе метростроения. Учитывая всесторонний богатейший опыт трех очередей Московского метрополитена

и последние достижения иностранной техники, станциям метрополитена уделяется теперь совершенно исключительное внимание. Оценку качества и удобств метрополитена пассажир дает прежде всего по характеру самих станций. От условий размещения входов и выходов, расположения эскалаторов, вестибюлей и общей планировки станций в доминирующей степени зависят удобства пользования метрополитеном. Излишние переходы и коридоры, приводящие к удлинению пути пассажира (от входа до платформы), являются отрицательными факторами. Станции Московского метрополитена имеют минимум переходов. Эскалаторы, где это представляется по местным условиям приемлемым, выходят непосредственно на поверхность, на уровень тротуаров. Пассажир из наземного вестибюля попадает при механизированном спуске (эскалатором) непосредственно на платформу станции.

Станции глубокого заложения метрополитена сооружаются преимущественно двух типов, а именно:

I тип — трехсводчатый, при котором имеются два крайних станционных тоннеля, объединяемых через ряд проемов средним вестибюльным залом.

II тип является совершенно новым достижением советской тоннельной техники. Применением особой конструкции металлических колонн, арок и прогонов удается достигнуть полного раскрытия перспективы тоннельной станции. При этом крайние тоннели и средний тоннель сливаются в один общий архитектурный ансамбль (станция Площадь Маяковского).

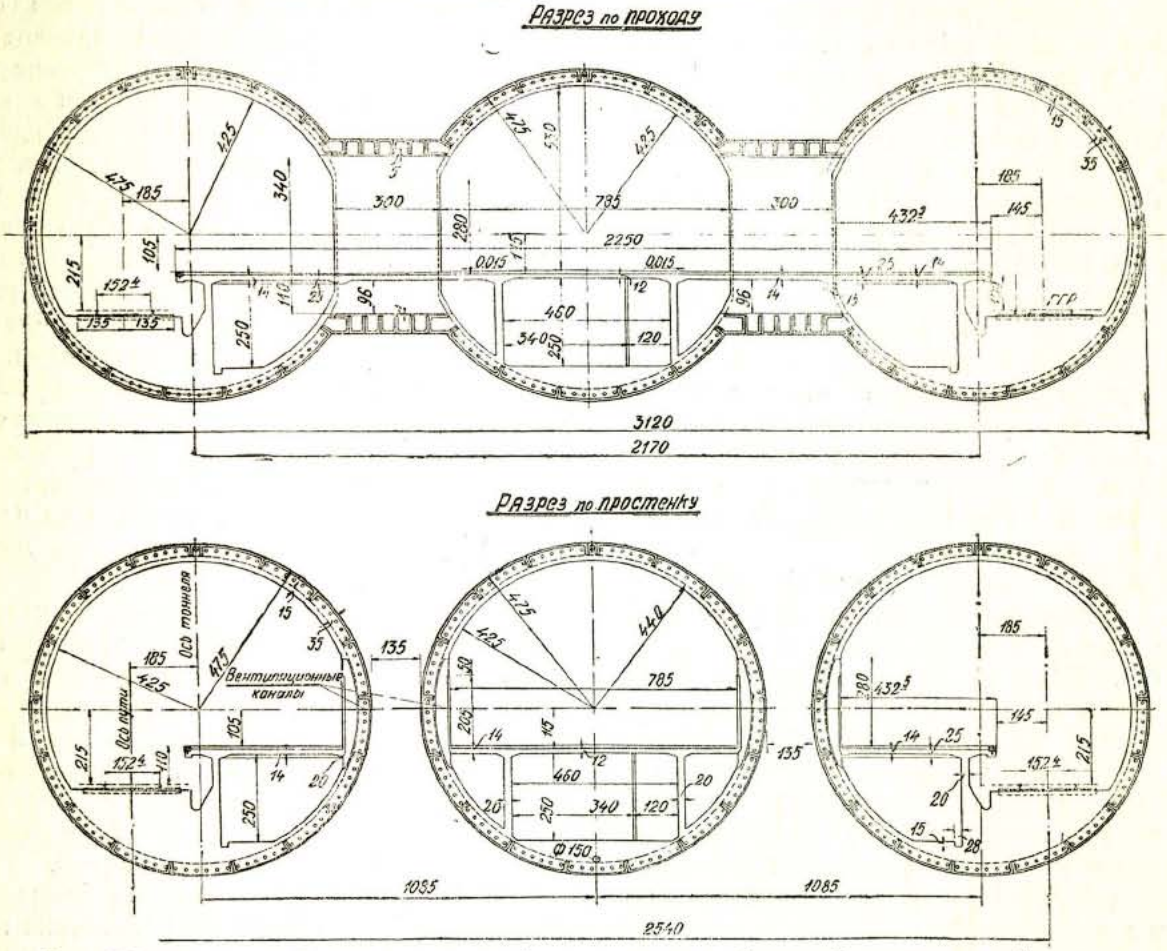


Рис. 176. Московский метрополитен (конструкции тюбинговой трехсводчатой станции глубокого заложения)

Сооружение тоннелей глубоких станций метрополитена 2-й и 3-й очередей, в отличие от станций метрополитена 1-й очереди, которые сооружались горным способом, проведено механизированным щитовым способом.

Для станций глубокого заложения 1-й очереди Московского метрополитена был приме-

нен преимущественно трехсводчатый тип бетонной конструкции, а на 2-й очереди—трехсводчатая станция, состоящая из трех параллельных тоннелей из чугунных тюбингов (рис. 176). Боковые станционные тоннели предназначены для пропуска поездов и посадочных платформ; средняя часть станции образует распределительный подземный зал, к которому примыкают эскалаторные тоннели. Поперечное сечение каждого тоннеля имеет диаметр 9,5 *м*. Каждое кольцо шириной в 60 *см* составлено из восемнадцати тюбингов: пятнадцати нормальных сегментов, двух смежных с ключевым и одного ключевого. Толщина крышки тюбинга 45 *мм*, высота бортов 350 *мм*, диаметр болтов 30 *мм*, в количестве 193, соединяющих одно кольцо с другим.

При трехсводчатой станции из чугунных тюбов устанавливается положение горизонтальных диаметров тюбов на 1,05 *м* выше уровня платформы. Общая ширина платформы 22,5 *м*. Расстояние между путями 25,4 *м*. Высота от платформы до шелыги свода 5,3 *м*, возвышение платформы над головкой рельса 1,1 *м*. Максимальная ширина подземной выработки 31,2 *м*.

Все три станционных тоннеля соединяются между собою проемами, которые обрамляются специальными рамами из чугунных тюбингов (рис. 177). Ширина каждого проема 3 *м*, глубина 2,8 *м*, высота 3,35 *м*. Размер каждого из простенков, образуемых проемами, 4,2 *м*.

Под платформой в среднем тоннеле устраиваются все служебные помещения высотой до 2,5 *м*. Пространства под платформами боковых тоннелей используются для вентиляционных целей. Общее протяжение посадочной платформы в тоннеле 155 *м*.

Подземные вестибюли станций определяются габаритами машинного помещения для эскалаторов и имеют размеры в плане 18 × × 11,75 *м* в свету.

Эти подземные вестибюли представляют собой двухъярусные помещения.

Тоннельные сооружения, создаваемые для вентиляционных целей, прокладки кабелей, водоотлива, контакторных постов и т. д., устраиваются в виде тоннельных конструкций из бетона и из железобетона и почти не отличаются от обычных тоннелей.

Особо конструктивным моментом являются сопряжения железобетонных и бетонных конструкций с металлическими. В этом случае устраивается специальная система металлической изоляции.

Как указывалось выше, вторым типом является станция метрополитена, сооружаемая также из чугунных тюбингов, но при металлической конструкции колонн и балок. Конструкция этой станции такова: при поперечном сечении двух станционных тюбов 9,5 *м*, располагающихся на взаимном расстоянии 13,5 *м*, устраивается средний тоннель; этот тоннель, образуемый специальным сводом, сопрягается с конструкцией крайних станционных тоннелей через конструкцию продольных металлических балок высотой 1,05 *м;* под последнюю конструкцию подведены металлические колонны поперечного сечения 65 × 75 *см*, которые опираются на продольную металлическую балку высотой 1,6 *м*, уложенную на бетонном основании (рис. 178). В средней части тоннеля устроена специальная распорка-затяжка, причем распор от свода погашается как затяжками, так и взаимным распором от крайних тоннелей. Металлические затяжки бетонируются с целью увеличения общей жесткости тоннельной конструкции станции. Металлические колонны расположены вдоль оси тоннеля на взаимном расстоянии 4,2 *м*, а в поперечном направлении — на расстоянии 8,9 *м*.

Общая ширина станционной платформы 14,3 *м*, а длина посадочной платформы 156 *м*.

Эскалаторные тоннели примыкают непосредственно к торцам среднего тоннеля станции под углом 30° к горизонту и имеют внешний диаметр 8,5 *м*. Тюб состоит из 17 отдельных тюбинговых сегментов, в числе которых 14 нормальных, 1 ключевой и 2 смежных с ключевым сегментом. Тюбинги шириной 75 *см* сбалчиваются между собой болтами диаметром 30 *мм*. Толщина крышки сегмента 40 *мм*, высота бортов 30 *мм* и толщина их 40 *мм*. Тюбинги образуют между собой при стыковании колец желобки размерами 32 × 17 *мм* для расчеканки их свинцом и цементной замазкой. В месте примыкания к станции эскалаторный тоннель сопрягается специальными фигурными тюбингами по кривой радиусом 13 *м* по внешнему очертанию и 2,7 *м* по внутреннему. По этому типу построена подземная станция 2-й очереди Московского метрополитена Площадь Маяковского, являющаяся шедевром советской техники метростроения.

* * *

Перегонные тоннели по трассе 3-й очереди Московского метрополитена представляют

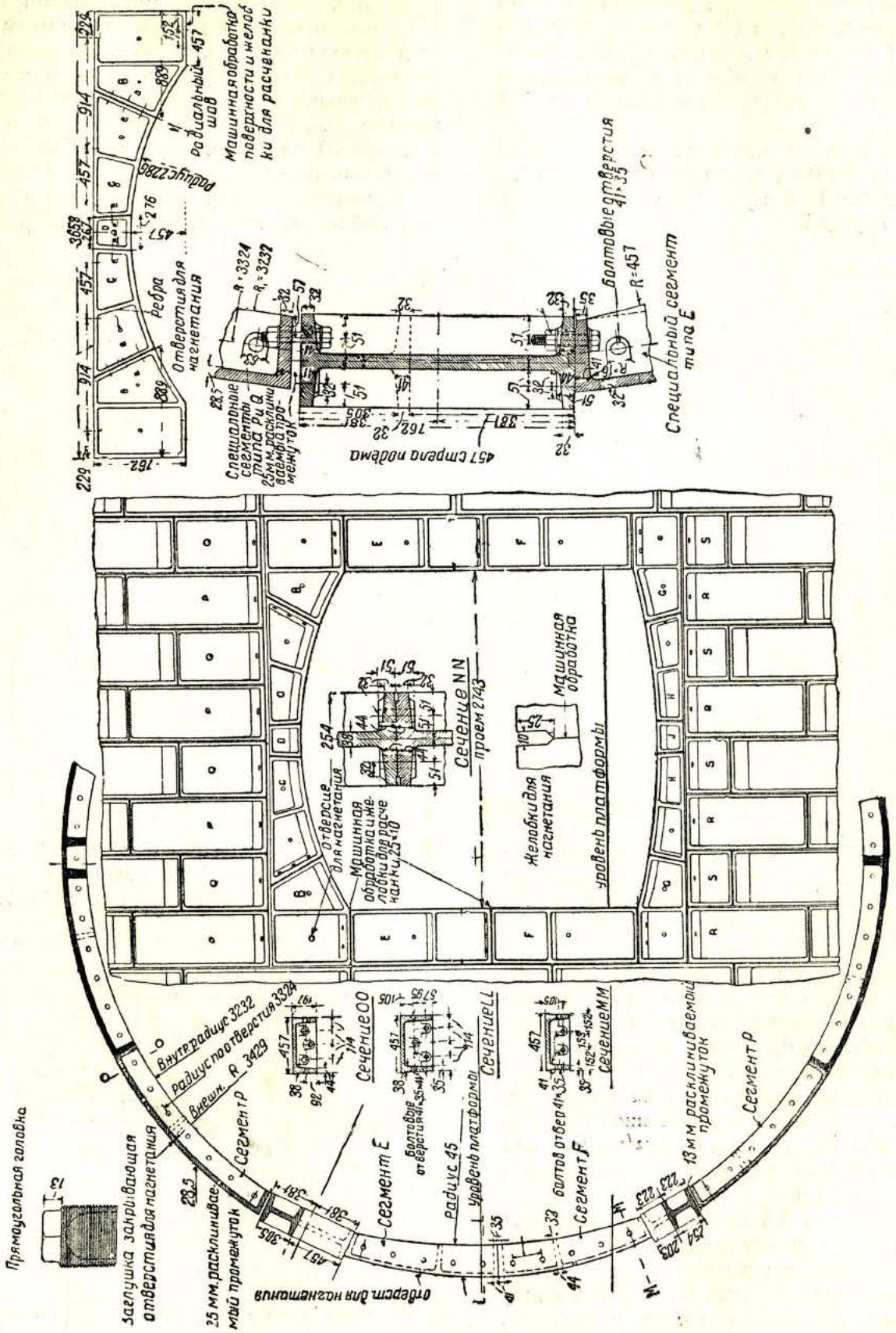


Рис. 177. Чугунная рама проемов станционных тоннелей

собой конструкцию кольца диаметром 6 *м* из 12 чугунных тюбингов (9 нормальных, 1 ключевой и 2 смежных с ключевым). Наружные поверхности бортов тюбингов механически обработаны и соединяются между собой болтами.

Тюбинги имеют отверстия для нагнетания раствора за обделку, чтобы заполнить пустоту между внешней поверхностью тюбингового кольца и породой.

отверстий, являющихся источниками течи. Одновременно было достигнуто уменьшение веса металла на 1 *пог. м* тоннеля, уменьшение количества болтов и свинца для расчеканки и сокращена площадь обрабатываемых поверхностей. Количество монтажных единиц (сегментов) на 1 *пог. м* тоннеля сокращено, чем достигнуто ускорение монтажа обделки.

Преимущественная характеристика метровых тюбингов, примененных при сооружении

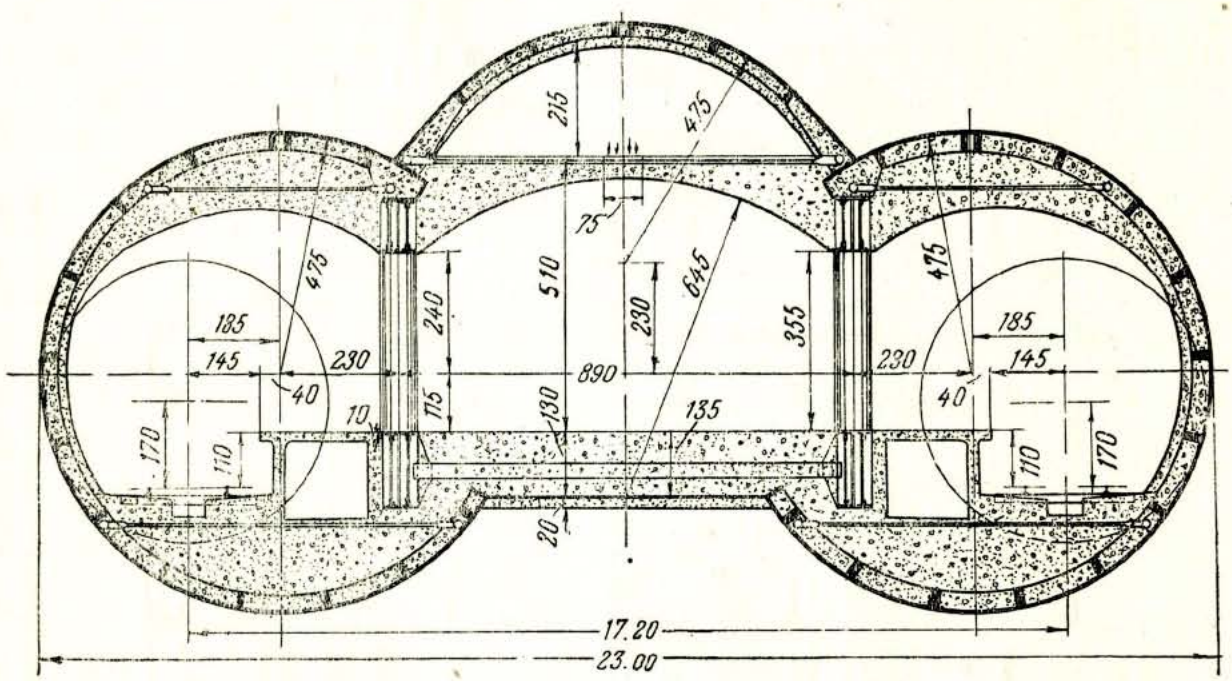


Рис. 178. Московский метрополитен (тюбинговая станция с металлическими колоннами)

Гидроизоляция тоннелей достигнута расчеканкой бортов тюбингов свинцом и асбестом с последующей расчеканкой цементом желобков, образуемых при стыковании между собой четвертей тюбингов.

В конструкцию и материал тюбингов, примененных на 3-й очереди, внесены следующие изменения по сравнению со 2-й очередью: ширина тюбингов принята 1 *м* вместо 0,75 *м* и введено среднее ребро.

Механические качества чугуна повышены, а именно: временное сопротивление на разрыв принято в 20 *кг/мм*^{2} вместо 18 *кг/мм*^{2}; стрела прогиба при разрушении стандартного образца 10 *мм* вместо 8 *мм*.

Внедренное на 3-й очереди строительства конструктивное усовершенствование позволило при сохранении запасов прочности увеличить водонепроницаемость тоннелей ввиду уменьшения количества стыков и болтовых

тоннелей 3-й очереди, при сопоставлении с тюбингами шириной 0,75 *м*, примененными на 2-й очереди, усматривается из табл. 9.

Таблица 9

Сравнительная характеристика тюбингов

№ по пор.	Наименование	Единица измерения	Тюбинги		Уменьшение в процентах
			2-я очередь l_2= 750 *мм*	3-я очередь l_3= 1000 *мм*	
1	Вес тюбингов . . .	*кг.*	9 468	7 391	22,5
2	Число монтажных единиц	шт.	16	12	25,0
3	Длина расчеканочных швов	*пог. м*	35,68	29,76	16,9
4	Число болтов . . .	шт.	169,30	139,00	17,9
5	Площадь обработки поверхностей тюбингов	*м*	14,522	12,092	16,8

Таким образом, применение новой конструкции тюбингов на 3-й очереди дало экономию чугуна в 22%, сокращение количества болтов на 18% и сокращение количества свинцовой проволоки на 17%. При этом достигнуты значительные преимущества в монтаже обделки тоннеля из более крупных единиц при общем сокращении числа последних.

Нижняя часть тюбингового кольца заполнена бетоном для образования жесткого основания пути метрополитена, устраиваемого на деревянных шпалах, втопленных в бетон.

Значительный накопленный Метростроем опыт позволил перейти в ряде сооружений как мелких, так и больших объемов к применению оправдавших себя типовых конструкций. Так, на трассе построены типовые сооружения, обусловленные технологией строительства и условиями метрополитена:

а) камеры для монтажа и демонтажа щитов для проходки тоннелей;

б) вентиляционные камеры и тоннели для подводки воздуха к трассе от вентиляционных шахт;

в) камеры дренажных перекачек;

г) уборные;

д) устройства, связанные с электротехническим оборудованием метрополитена: понизительные подстанции, контакторные посты, форкамеры, обусловленные питанием контактного рельса.

Конструкции тоннелей рассчитаны как замкнутые кольца с учетом упругого отпора грунтовой среды в зависимости от местных геологических и гидрогеологических условий.

Конструкции станций метрополитена 3-й очереди представляют собой инженерные сооружения огромных пролетов и объемов, находящихся на большой глубине, под значительным горным давлением. Разработка научно-исследовательских и теоретических вопросов метростроения послужила базой для создания крупных станций общими размерами поперечного сечения 10×30 *м* на большой глубине, под двадцатиметровой толщей плывунов.

Станции Новокузнецкая (Замоскворецкого радиуса), Бауманская и Электрозаводская (Покровского радиуса) сооружены трехсводчатого типа, из чугунных тюбингов, аналогично типу станции Площадь Свердлова 2-й очереди, но значительно усовершенствованной конструкции.

Основная конструкция этих станций состоит из двух боковых тоннелей длиной по 155 *м* и среднего тоннеля с примыкающими к нему тоннелями для эскалаторов.

Все три станционных тоннеля внешним диаметром 9,5 *м* сооружены из чугунных тюбингов, обеспечивающих водонепроницаемость и индустриальность производства подземных работ.

Конструкция тюбингов станционного кольца 3-й очереди в части разбивки болтовых отверстий в радиальных стыках имеет преимущества перед тюбингами 2-й очереди в отношении удобства сбалчивания.

Боковые и средний станционные тоннели соединяются между собой в поперечном направлении проходами, количество которых зависит от длины среднего тоннеля.

Окаймление проходов в чугунных тюбах боковых и среднего тоннелей осуществлено чугунными рамами из фасонных сегментов. Ширина проема в свету составляет 3 *м* при расстоянии между осями проемов по длине станции в 7,2 *м*. В концах станции устроены монтажные и демонтажные щитовые камеры.

На указанных станциях конструкция обделки проемов была сооружена из специальных легких чугунных тюбингов, что позволило осуществить сплошную, непрерывную чугунную конструкцию и тем самым значительно повысить водонепроницаемость конструкции.

Особенно следует отметить монтаж проемных рам станции параллельно с проведением щитовой проходки при временном заполнении проемов металлическими тюбингами сварной конструкции.

Это нововведение, давшее большой технико-производственный эффект при сооружении станции Бауманская, получило свое распространение на строительстве других станций 3-й очереди Московского метрополитена им. Л. М. Кагановича.

На станции Электрозаводская удачным сочетанием станционных тюбингов проектировщикам удалось значительно повысить проходы между станционными тоннелями и достигнуть значительного архитектурного эффекта.

Станция Сталинская представляет собой совершенно новый конструктивный тип станции глубокого заложения. Остроумной заменой массивных пилонов сквозной колоннадой из чугунных тюбингов между боковыми и средним станционным тоннелем удалось объединить средний вестибюль и боковые платформы станции в общий зал шириной 22,5 *м*.

Эта система значительно улучшила условия эксплоатации станции и открыла широкие возможности для архитектурного оформления.

Горное давление воспринимается непосредственно чугунными тюбами станции и через конструкцию металлических клепаных прогонов, размещенных поверху и понизу, по длине смежных станционных тоннелей передается на мощные металлические стойки. Последние образуют две парные колоннады с каждой стороны зала при взаимном расстоянии между осями стоек в 3 *м* (рис. 179).

Сопоставляя новую конструкцию станции Сталинская с основным типом тюбинговой трехсводчатой станции глубокого заложения, выясняем, что при одинаковом объеме подземных выработок полезная квадратура среднего зала нового типа станции на 22% больше. Это обстоятельство является весьма важным для эксплоатации, учитывая значение среднего зала, имеющего распределительные функции при движении пассажиропотоков в период работы станции.

При проектировании станции Павелецкая на Замоскворецком радиусе базировались на конструктивном замысле станции Площадь Маяковского 2-й очереди, с дополнением отдельными новыми конструктивными элементами.

По первоначальному проекту конструкция станции представляла собой два незамкнутых с внутренней стороны тюбинговых кольца диаметром по 9,5 *м*, сопрягающихся через специальный опорный тюбинг со средним несущим чугунным сводом, перекрывающим среднюю часть станционного зала.

Горное давление воспринимается через верхние металлические клепаные прогоны двумя рядами мощных металлических колонн, передающих нагрузку на нижний бетонный массив. Взаимное расстояние между осями колонн 4,2 *м*.

Однако к моменту раскрытия средней части станции Павелецкая в распоряжении Метро-

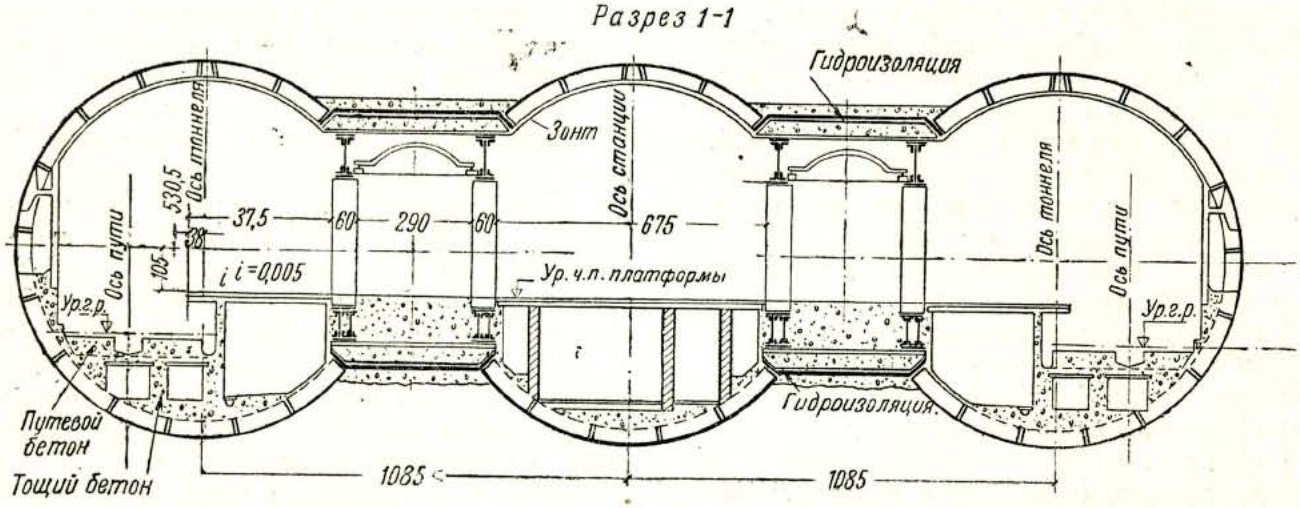


Рис. 179а. Московский метрополитен (тюбинговая станция с парной колоннадой)

строя по обстоятельствам военного времени имелось лишь ограниченное число колонн и прогонов.

В целях быстрейшего ввода станции Павелецкая в эксплоатацию инженерам-проектантам пришлось изменить первоначальный проект. В результате была создана новая оригинальная конструкция аванзала станции, удачно сочетавшая имевшиеся на строительстве мощные металлические прогоны и колонны с элементами железобетонных конструкций.

При этом был применен ряд новых, облегченных конструкций, приводивших к минимальному объему работ, но сохранявших прочность и устойчивость несущих элементов, а также достигнуто определенное облегчение производственного процесса по сооружению станции Павелецкая.

Проект односводчатой станции метрополитена металлической конструкции. В метростроении представляет интерес односводчатая станция метрополитена, запроектированная (по предложению автора) в виде тоннеля

крупного профиля с металлической обделкой по типу Балтиморского тоннеля. Пролет станционного профиля в свету 17,6 *м* даст возможность устройства островной платформы шириной до 10,5 *м* (рис. 179б).

Свод станции полуциркульного очертания ($R = 9$ *м*) опирается непосредственно на бетонные стены, возведенные в двух крайних тоннелях перегонного профиля диаметром 6 *м*. Металлический свод из тюбингов сопрягается в пятах с тюбингами, обрамляющими бетонные стены, которые в свою очередь имеют сопряжение с обратным сводом, созданным также из тюбингов. При этом получается сплошная металлическая конструкция станционного профиля, обладающая исключительно высокими гидроизоляционными качествами.

Эскалаторные тоннели подходят с торцов станции. Высота тоннеля станции в свету, считая от платформы до щелыги свода, 8,75 *м*. Это создает исключительно благоприятные условия для архитектурного оформления станции.

Распределение сечения станционного профиля позволяет удобно разместить служебные помещения и вентиляционные каналы.

Процесс производства работ по сооружению односводчатой станции металлической конструкции максимально механизирован.

Стены тоннеля создаются в перегонных тоннелях, которые проходятся при помощи щитов, идущих по трассе, насквозь через станцию. В дальнейшем внутри перегонных тюбингов в пределах станции производится бетонирование стен. По последним пускается полущит пролетом 20 *м*, который, будучи выпущен из торцовой щитовой камеры, осуществляет сооружение односводчатой части станции.

В зависимости от условий эксплоатации в практике метростроения применяются, кроме того, станции многоярусного и многосводчатого типов (см. главу IX «Сооружение тоннелей крупных профилей»).

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СООРУЖЕНИЕ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

КОНСТРУКЦИИ СООРУЖЕНИЙ

Общие данные

§ 131. Все постоянные сооружения Московского метрополитена подразделяются на следующие основные виды:

1. Сооружения, расположенные ниже дневной поверхности (тоннельные): перегонные тоннели, станционные тоннели, переходные камеры, раструбы, тупики, эскалаторные тоннели, съезды, переходные коридоры, подземные вестибюли, вентиляционные камеры,

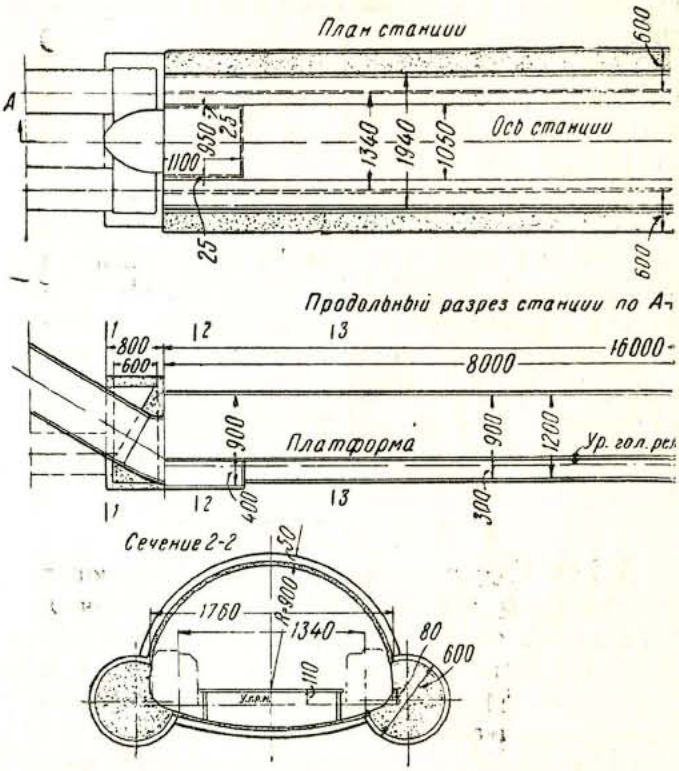


Рис. 179б. Схема односводчатой станции глубокого заложения

вентиляционные шахты и подходные тоннели, понизительные подстанции, перекачки.

2. Сооружения, расположенные на дневной поверхности (надземные):

а) мосты, эстакады, рампы;

б) надземные вестибюли, электротяговые подстанции, понизительные подстанции, депо, мастерские, надземные части вентиляционных шахт.

§ 132. Все тоннельные сооружения относятся к первому классу сооружения.

Все надземные сооружения, кроме мостов и эстакад, относятся ко второму классу.

Мосты и эстакады проектируются и сооружаются по особым техническим условиям.

§ 133. Выбор конструкции производится во взаимной увязке с планом и продольным профилем, с учетом гидрогеологии, способа

производства работ и габарита приближения строений.

Для каждого случая должен быть установлен наиболее экономный тип конструкции. Учитывая повторяемость конструкций, необходимо стремиться к максимальному применению типовых решений как для отдельных элементов, так и целых комплексов конструкций.

При применении типовых конструкций с точно заданными размерами допускаются перенапряжения до 5% и недонапряжения до 15%.

§ 134. Если фактические гидрогеологические данные, пробные нагрузки или иные фактические опытные данные, обнаруженные при производстве работ, будут резко расходиться с данными предварительного разведочного бурения, то назначенные типы конструкций и их размеры подлежат проверке на основе новых данных и при необходимости изменению в соответствии с этими новыми данными.

МАТЕРИАЛЫ

§ 135. Сооружения метрополитена могут выполняться из всех видов строительных материалов, обладающих достаточной прочностью, долговечностью, огнестойкостью и способностью сопротивляться воздействию химических и атмосферных влияний.

Для частей подземных сооружений, подверженных действию воды, обязательны пуццоланизация цемента путем добавления трепела или применение пуццолановых цементов.

Свойства и качества строительных материалов должны соответствовать ОСТ. Чугунные тюбинги изготовляются и поставляются согласно специальным техническим условиям.

Допускаемые напряжения в бетонных и железобетонных сооружениях принимаются согласно приложениям № 9, 10, 11; для прочих сооружений — согласно Единым нормам строительного проектирования со снижением на 10% за счет 1 класса сооружений.

Примечание. Для металлических конструкций, полностью защищенных слоем бетона, допускаемые напряжения принимаются по Единым нормам без снижения на 10%.

РАСЧЕТНЫЕ НАГРУЗКИ

§ 136. Обделка тоннельных сооружений метрополитена должна быть рассчитана на следующие нагрузки:

А. Основные

а) Собственный вес.

б) Давление воды и земли.

в) Подвижная вертикальная нагрузка на дневной поверхности, принимаемая согласно бюллетеню № 12 Отдела типового проектирования Метропроекта.

г) Вес сооружений, расположенных над тоннелем.

д) Нагрузка от поездов метрополитена.

Б. Дополнительные

е) Влияние температуры и усадки бетона.

В. Случайные

ж) Нагрузки, оказывающие воздействие на сооружение во время производства работ, как-то: вес механизмов и строительных материалов, действие щитовых домкратов.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ

§ 137. Расчеты прочности сооружений производятся на основании специальных технических условий с учетом лабораторных и экспериментальных данных, полученных Метростроем и научно-исследовательскими институтами в соответствии с указаниями Единых норм и соответствующих распоряжений Министерства.

§ 138. Вне зависимости от расчета конструктивные размеры обделки путевых и станционных тоннелей должны быть не менее следующих величин:

А. Толщина стен

а) Из бутовой и буто-бетонной кладки . .	0,60 *м*
б) Из бетонной кладки, монолитной или отдельных камней	0,50 „
в) Из железобетона	0,20 „

Б. Толщина перекрытия

а) Плиты при железобетонном перекрытии:	
1) ребристом вне проездов	0,12 *м*
2) ребристом под проездами	0,14 „
3) безбалочном	0,25 „
б) Свода в замке:	
1) бутового	0,50 „
2) бетонного	0,40 „
3) железобетонного	0,25 „
в) Ребра, по ширине и высоте	0,30 „

В. Толщина лотка

(в виде обратного свода)	0,40 *м*

§ 139. При прокладке тоннелей, сооружаемых открытым или траншейным способом под зданиями или сооружениями, необходимо предусматривать раздельные конструкции тоннелей для поддержания зданий или сооружений.

В тех случаях, когда осуществление раздельных конструкций не представляется технически возможным или экономически целесообразным, допускается опирание здания или сооружения непосредственно на перекрытие тоннеля с обязательными мероприятиями по сведению к минимуму вибраций и шума.

§ 140. Если тоннели метрополитена пересекаются существующими и проектируемыми городскими подземными сооружениями, заложенными ниже верха перекрытия, и если при этом эти подземные сооружения могут быть пропущены в пределах конструкции перекрытия без нарушения габарита, то в соответствующих местах надлежит устраивать для этой цели специальные ячейки в перекрытии или своде тоннеля по соглашению с Отделом подземных сооружений Моссовета.

§ 141. Когда тоннели метрополитена пересекаются существующими или проектируемыми подземными сооружениями, расположенными ниже верха перекрытия тоннеля, причем пропуск их в пределах конструкции перекрытия согласно § 140 настоящих технических условий не представляется возможным, то надлежит, по соглашению с Отделом подземных сооружений Моссовета, прибегнуть:

а) к соответствующему переустройству данного подземного сооружения;

б) либо к пропуску его в специальной конструкции под тоннелем.

Примечание к §§ 140 и 141. Данные о проектируемых городских подземных сооружениях, подлежащих учету при проектировании тоннельных сооружений, должны быть получены от Отдела подземных сооружений Моссовета.

§ 142. Осадочные швы устраиваются только в тоннелях, сооружаемых открытым или траншейным способом работ. Вне зависимости от характера грунта осадочные швы на перегонах должны располагаться в расстоянии до 80 *м* друг от друга при железобетонной конструкции тоннеля и до 40 *м* — при бетонной конструкции. Станционные тоннели должны быть разрезаны не менее чем на 3 части. В местах резкого изменения качества подстилающего тоннель грунта устройство осадочного шва обязательно, так же как и в местах изменения типа конструкции.

Равным образом необходимо устройство осадочных швов в местах примыкания к основному тоннелю подземных переходов, кабельных коллекторов, вентиляционных каналов.

§ 143. В однопутных тоннелях с внутренними вертикальными гранями стен должны быть предусмотрены ниши размером 50×120×200 *см* через каждые 25 *м*, расположенные в правой стене по ходу поезда. В аналогичных двухпутных тоннелях ниши того же размера располагаются в обеих стенах тоннеля через каждые 25 *м*.

В однопутных тоннелях с криволинейным очертанием стен устраивается платформа (тротуар) шириной 60 *см* на высоте 93 *см* от уровня головки рельса у левой (по ходу поезда) стены.

В аналогичных двухпутных тоннелях такие же платформы устраиваются у обеих стен тоннеля.

Примечание. В случае устройства площадок (тротуаров) в тоннелях прямолинейного очертания устройство ниш не обязательно.

В тоннелях с наружными стенами ребристого сечения, а равно в двухпутных тоннелях со средней стеной, снабженной проемами, ниши не устраиваются.

§ 144. Между двумя средними тупиковыми путями не менее как на всю полезную длину их должна быть устроена платформа постоянного типа шириной не менее 1 *м* и высотой 1,1 *м* над головкой рельса.

В тупиках конечных и зонных станций, расположенных не в непосредственной близости от депо, при бетонных и железобетонных конструкциях должны быть предусмотрены смотровые канавы длиной не менее 150 *м* при глубине 1,20 *м* (считая от головки рельса) и кладовые при них для хранения соответствующего инвентаря и инструмента.

§ 145. Устройство лотков в тоннелях открытого и траншейного способа работ обязательно; они могут быть выполнены из бетона или железобетона толщиной, определяемой расчетом, но не менее 50 *см* для двухпутного тоннеля и 40 *см* для однопутного.

§ 146. В тоннелях со стенами ребристого сечения и наружной гидроизоляцией ребра должны располагаться с внутренней стороны тоннеля.

ГИДРО-, ТЕПЛО- И ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ

§ 147. Для защиты тоннелей от попадания в них атмосферных и грунтовых вод все тоннельные сооружения, вне зависимости от глубины заложения и способа производства работ, подлежат обязательной изоляции.

Материал для гидроизоляции должен удовлетворять требованиям долговечности, обеспечивать водонепроницаемость сооружения и отвечать специальным техническим условиям.

§ 148. Гидроизоляция тоннельных сооружений, выполняемых открытым или траншейным способом, осуществляется в виде наружной гибкой оклеечной изоляции. Изоляция перекрытия обязательно покрывается защитным слоем из бетона или кладки. Наклейка гидроизоляции непосредственно по дереву не допускается.

§ 149. Для тоннельных сооружений, выполняемых закрытым способом при бутовой и бетонной обделке, обязательно устройство внутренней изоляции с соблюдением следующих требований:

а) тщательного заполнения всех пустот за обделкой путем нагнетания цементного раствора под давлением;

б) применения пуццоланового цемента для бутовой и бетонной обделки (в соответствии с § 135);

в) полного осушения внутренней поверхности обделки перед наклейкой гидроизоляции;

г) поддержания внутренней оклеечной изоляции посредством защитной оболочки, рассчитанной на полное гидростатическое давление.

§ 150. Для изоляции обделки тоннелей, составленной из отдельных литых чугунных тюбингов, последние обязательно должны иметь специальные желобки на всех бортах, в которых расчеканивается закладываемая свинцовая проволока или другой испытанный и утвержденный изоляционный материал.

§ 151. Гидроизоляция тоннелей, составленных из отдельных сегментов, может быть осуществлена как с помощью чеканки, так и путем заварки бортов.

§ 152. При заглублении станционных тоннелей и подземных переходов от поверхности земли меньше 1,8 *м* по верхнему перекрытию тоннелей надлежит предусмотреть наружную теплоизоляцию.

В случаях, когда над тоннелями проходит или проектируется прокладка трамвайных линий, от верха перекрытия тоннеля (вместе с гидроизоляцией и защитным слоем) до головки рельса трамвая должно быть оставлено не менее 1 *м* с обязательными мероприятиями к сведению до минимума передачи вибрации и шума.

§ 153. Блок-пост и другие служебные станционные помещения должны быть тщательно изолированы от шума.

§ 154. Для уменьшения шума в перегонных тоннелях должны приниматься специальные меры: звукоизоляционная штукатурка или другие виды покрытия внутренней поверхности тоннеля, сварка стыков рельсов, упругие прокладки под рельсами.

ОБДЕЛКИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ ТОННЕЛЕЙ

Конструкции обделок гидротехнических тоннелей безнапорного типа, работающих неполным сечением, мало отличаются от горных железнодорожных тоннелей. Обделка гидротехнического тоннеля должна обеспечить от возможной утечки воды из тоннеля и от фильтрации подземных вод внутрь последнего, для чего обычно внутренняя поверхность покрывается торкретным слоем, уменьшая при этом шероховатость. Особый вид обделки в гидротехническом строительстве имеют напорные тоннели, которые, помимо восприятия на себя внешних сил горного давления, работая полным сечением, воспринимают также и внутреннее давление воды и не допускают при этом просачивания воды в окружающий горный массив. При выборе вида материала и типа конструкции напорного тоннеля принимаются во внимание главным образом характер окружающих пород и величина внутреннего напора воды.

При установлении типа и конструкции гидротехнического тоннеля приходится считаться не только с условиями статического расчета обделки на горное и гидростатическое давления, но и принимать во внимание внутреннее очертание тоннеля, удовлетворяющее гидравлическим и экономическим требованиям.

В практике сооружения гидротехнических безнапорных тоннелей форма поперечного профиля бывает как подковообразной, так и

близкой к круговому очертанию[1]. Форма напорного тоннеля принимается, как правило, кругового очертания.

При прокладке напорных тоннелей в скальных породах, которые могут воспринимать на себя часть внутреннего давления, обделка рассчитывается на восприятие только части внутреннего напора; при этом учитывается солидарная работа обделки и окружающих тоннель пород. При наличии слабых грунтов применяется усиленный тип конструкции, целиком воспринимающей внутренний напор воды и обеспечивающей полную водонепроницаемость обделки.

Из практики строительства гидротехнических тоннелей известно, что стоимость облицовок напорных тоннелей в некоторых случаях доходит до 50% общей стоимости прокладки тоннеля.

В условиях коренных, устойчивых, водонепроницаемых пород, не проявляющих усиленного горного давления, достаточно защитить поверхность выломки тоннеля торкретированным слоем в 3—15 *см*, что уменьшает коэфициент шероховатости (рис. 180).

Оставлять выработки напорных тоннелей без облицовки можно (тоннели Дзорагэс, Аренэее и др.), но с осмотрительностью, так как вывалы породы могут затруднить работу тоннеля в период эксплоатации.

При прокладке напорных тоннелей через коренные породы, проявляющие горное давление, применяются бетонные обделки. Окружающий горный массив может полностью или частично воспринимать внутренний напор воды лишь в том случае, когда обеспечен пассивный отпор породы благодаря плотному прилеганию обделки к породе за счет заполнения всех пустот нагнетанием цементного раствора под давлением. В противном случае неизбежны деформации и даже разрушение обделки. Нагнетанием (инъекцией) цементного раствора (под давлением от 3 до 5 *ат*), который заполняет все пустоты за обделкой, неизбежные в процессе производства работ, обеспечивается совместная работа обделки и породы окружающего горного массива. Производить инъекцию под большим давлением не следует, так как это может вызвать местное неравномерное давление на облицовку, что приведет к ее деформации. Водонепроницаемость бетонной обделки достигается покрытием ее внутренней поверхности торкретным слоем от 1 до 3 *см*.

При строительстве напорных тоннелей применяется также обделка из штучных бетонных

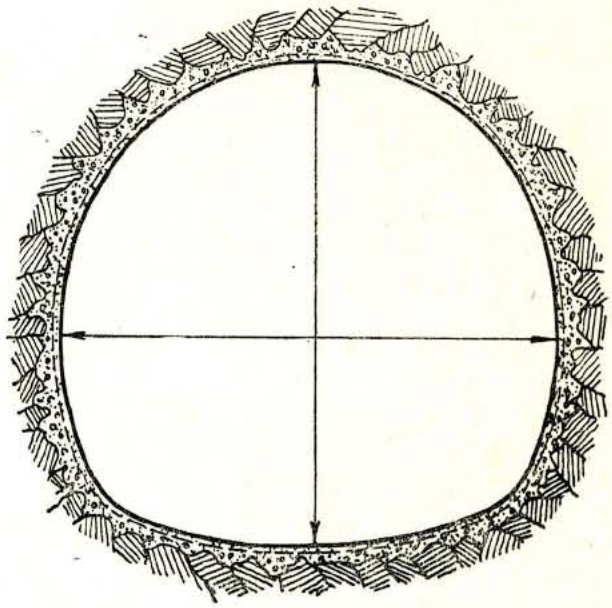


Рис. 180. Сечение гидротехнического тоннеля в скальных породах

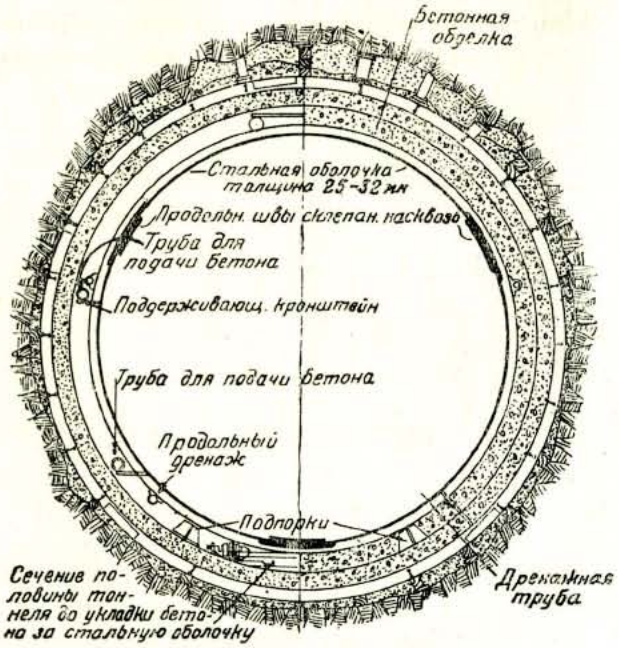
камней (бетонитов). Работа конструкций обделки из бетонитов на внутренний напор является не вполне приемлемой, так как такая обделка слабо воспринимает растягивающие напряжения, но благодаря своим производственным преимуществам (заготовка камней заводским способом) она имеет применение в тоннелях с небольшим напором воды. Так, например, в Детройте построен напорный тоннель диаметром 6,1 *м* в свету, с толщиной блоков в 50 *см* при щитовой проходке.

В тех случаях, когда напорным тоннелем приходится пересекать зону слабых грунтов, где сама обделка должна воспринять на себя все усилия от внутреннего напора воды, применяются железобетонные конструкции обделок. Однако устройство их вызывает большие затруднения в производстве самих тоннельных работ (установка арматуры и опалубки при наличии временного деревянного крепления вызывает исключительное стеснение работ).

При сооружении напорных тоннелей применяются также комбинированные обделки, состоящие из внешней бетонной обделки

[1] Типы напорных и безнапорных тоннелей приведены в Технических условиях и нормах на проектирование гидротехнических сооружений—Деривационные тоннели. М., 1941 (составлены Г. Г. Зурабовым и О. Е. Бугаевой).

и внутренней деревянной облицовки из отдельных клепок и брусьев толщиной до 10 *см*. Эти брусья одновременно служат и опалубкой при устройстве внешнего бетонного кольца. Несмотря на то, что деревянная облицовка при разбухании проявляет высокие качества водонепроницаемости, все же этот тип обделки в гидротехнических тоннелях не получил распространения.



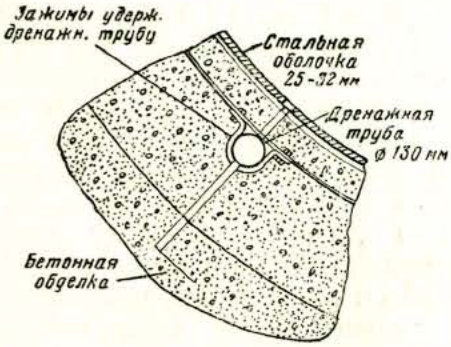


Рис. 181. Конструкция обделки гидротехнического тоннеля с внутренней стальной оболочкой

В практике строительства напорных тоннелей наибольшее распространение получили обделки комбинированных типов. При таких конструкциях предварительно устраивается временная («ложная») бетонная обделка, которая рассчитывается на соответственное давление горных пород, а затем под ее защитой устраивается изоляция и железобетонное кольцо, рассчитанное на восприятие внутреннего напора воды. Заполнением всех пустот между внешней бетонной облицовкой и породой достигается солидарная работа облицовки и породы на упругий отпор.

Комбинированная обделка применяется в виде внешнего бетонного кольца и внутреннего железобетонного кольца толщиной до 20 *см*.

Между внешним бетонным кольцом и внутренним железобетонным иногда применяется упругая прокладка в виде асфальта или мягкой оклеечной изоляции на горячей клебемассе. Применением такой комбинированной обделки удается значительно повысить водонепроницаемость тоннельной облицовки даже при больших напорах воды.

При сооружении тоннелей, рассчитанных на большую величину напора, применяют внутреннюю металлическую облицовку (рис. 181, 182). С этой целью предварительно устраивается внешняя бетонная обделка, рассчитанная на горное давление, а внутри нее укладываются металлические секции, образующие внутреннее металлическое кольцо. Такие металлические цилиндры заготовляются вне тоннеля и затем вводятся непосредственно в тоннель (рис. 183).

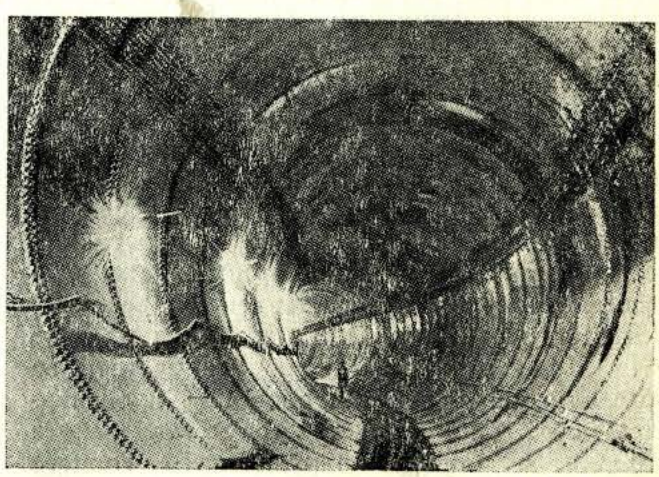


Рис. 182. Тоннель Форт-Пик (внутренняя стальная оболочка толщиной 25—32 *мм*)

Стыкование внутренних металлических цилиндров между собой является наиболее сложным видом работ. Они соединяются сваркой, а также с помощью заклепок.

В практике гидротоннельного строительства известны случаи устройства металлической обделки для тоннельных трубопроводов, напор в которых доходит до 40 *ат*.

Однако к устройству металлической облицовки тоннеля, ввиду высокой стоимости ее, прибегают в тех случаях, когда применением других указанных выше типов обделок, в осложненных геотехнических условиях, при высоком внутреннем напоре, не достигают технического решения задачи.

Специальным видом гидротехнических подземных выработок являются высоконапорные металлические трубопроводы, прокладываемые в скальных породах, в виде вертикальных и наклонных шахт и тоннелей, для подачи воды к гидростанциям. По современным данным практики, различают следующие виды высоконапорных трубопроводов металлической конструкции.

Трубопроводы жесткого типа, где металлический чехол воспринимает полный внутренний гидростатический напор.

Трубопроводы полужесткого типа, расчет которых ведется при распределении величины внутреннего гидростатического давления частично на конструкцию металлического чехла, частично на окружающую породу.

Трубопроводы эластичного типа, которые проектируются с учетом передачи внутреннего давления воды полностью на окружающую породу (тип металлической обделки системы Маринони). Сама обделка представляет собой податливую металлическую трубу, не рассчитанную на восприятие внутреннего напора воды, а передающую этот напор через окружающую ее бетонную оболочку непосредственно на скалу. Металлический чехол имеет ряд углублений (через 0,2 — 0,3 *м*), обращенных выпуклостью внутрь тоннеля. С внешней стороны чехла, со стороны породы, последний перекрывается металлическими полосами с целью обеспечения возможности эластичной подвижности обделки при растяжении под напором воды. Металлическая труба обеспечивает лишь водонепроницаемость тоннеля, не допуская утечки воды в окружающую плотную, с высоким коэфициентом крепости породу.

При сооружении высоконапорных трубопроводов полужесткого типа учитывается совместная работа материала обделки и окружающей ее скальной породы. Упругие деформации обделки должны создавать условия, благоприятные для передачи части внутреннего напора воды на окружающую породу. Таким образом для обеспечения нормальной работы конструкции является совершенно необходимым плотное соприкосновение обделки с породой и заполнение всех пустот инъекцией цементного раствора.

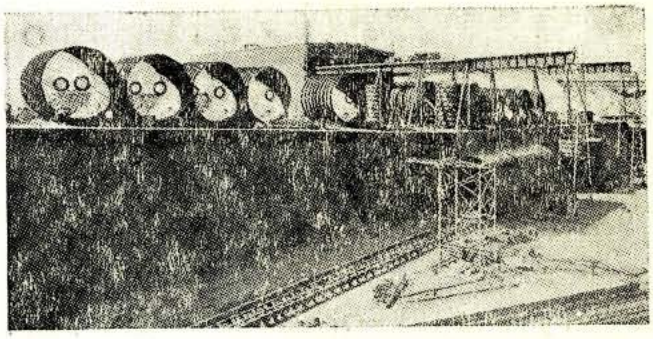


Рис. 183. Тоннель Форт-Пик у портала (стальные цилиндры)

При расчете трубопроводов полужесткого типа учитываются следующие факторы: а) внешнее горное давление пород, а также гидростатическое давление; б) внутренний напор воды; в) напряжения от усадки бетона тоннельной обделки; г) термические деформации; д) величина температурных напряжений при разности температур окружающей породы и воды, протекающей по трубопроводу.

Примеры применения металлических высоконапорных трубопроводов по данным Марчелло приведены в табл. 10.

В каждом отдельном случае в зависимости от результатов технико-экономического расчета, с учетом приведенных выше факторов, устанавливается целесоответствующий для данных условий один из указанных трех типов металлических высоконапорных трубопроводов.

Наиболее распространенный метод расчета гидротехнических напорных тоннелей круглого сечения, метод Мюльгофера, базируется в основном на том, что обделка, подверженная внутреннему напору вод, в своем стремлении расшириться встречает определенное сопротивление со стороны окружающей породы; при этом в сфере взаимного соприкасания породы и обделки в последней проявляются сжимающие напряжения. Соотношение упругих свойств материала обделки напорного тоннеля и породы обусловливает размеры этих напряжений, принимая, что

Таблица 10

Высоконапорные металлические трубопроводы

Наименование установки	Диаметр трубопровода D в *м*	Максимальный внутренний напор H	Толщина стенок металлического трубопровода в *мм*
А. Трубопроводы полужесткого типа			
Установка Хандек	2,1—2,3	545	10—14
Установка Бромма на р. Трюйэр	2,6—4,0	180—259	12—22—44
Установка Черное озеро	4,60	91—128	10—18
Б. Трубопроводы эластичного типа			
Альпийские итальянские гидроэлектрические установки:			
Палланцэно	1,5—1,8	527	4
Ровеска	1,2	720	4
Мезэ на р. Лире	1,8	758	5

при появлении деформации не нарушается плотность соприкасания обделки и породы. Исходя из условий равенства деформации радиуса тоннельной выработки и внешнего радиуса обделки, Мюльгофер и составил уравнения для определения упругого отпора породы.

ОБДЕЛКИ КОММУНАЛЬНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Обделки тоннельных канализационных коллекторов, как и тоннелей другого коммунального назначения, должны удовлетворять всем требованиям в отношении прочности и гидроизоляции. Статический расчет тоннельной обделки для канализации производится не только на горное и гидростатическое внешнее давление, но и на внутреннее давление жидкости канализационного коллектора. Помимо этого, учитывая специфические требования, предъявляемые к коллекторам в отношении химических реагентов сточных вод, влияющих разрушающим образом на материал обделки, последний должен быть соответствующим образом изолирован.

При сооружении тоннельных коллекторов неглубокого заложения с применением траншейного способа производства работ для целого ряда водопроводных тоннелей можно применить и прямоугольные сечения тоннелей в виде устройства бетонных стен, железобетонных перекрытий и бетонных лотков. При наличии грунтовых вод конструкция тоннеля с плоским перекрытием устраивается с внешней оклеечной изоляцией.

В случаях, когда встречаются исключительно плывунные породы, тоннель может быть устроен прямоугольного сечения в виде замкнутой, железобетонной рамы. В практике строительства коммунальных тоннелей глубокого заложения тоннеля наиболее экономичными представляются тоннели сводчатого очертания как бетонной, так и железобетонной конструкции. В тоннелях небольших пролетов возможно применение кирпичных сводчатых перекрытий как параболического, так и эллиптического очертания. Материал обделки: камень, бетон, железобетон. В некоторых случаях при слабых породах могут быть применены и металлические тюбинги для обделки коллекторов.

В тоннельной практике размеры канализационных коллекторов колеблятся от 1,5 до 3,5 *м*, доходя до 6 *м*.

При горном способе производства работ обделки тоннельных коллекторов выполняются обычной бетонной конструкции. При щитовой проходке, которая получила наибольшее распространение в Советском Союзе, Америке и в Англии, применяются следующие типы тоннельных обделок для канализационных коллекторов:

Обделки из чугунных тюбингов и из обычных железобетонных блоков: а) прямоугольного сечения, б) трапецоидального сечения, в) сотовой формы.

Наиболее жесткой является сотовая форма обделки, которая применялась в американской практике при постройке коллекторов для электрокабелей под железнодорожными путями.

Бетонные блоки соединены шипами и впадинами, входящими друг в друга; при заполнении швов битумом обеспечивается водонепроницаемость обделки. Наиболее приемлемой формой для обделки коллекторов из штучных камней является круг, дающий стандартность отдельных элементов конструкций. Изготовленные заводским способом бетониты — прессованием или вибрационным способом — обеспечивают высокое качество изделий. Применением пуццолановых или

шлаковых цементов можно достигнуть устойчивости в отношении вредного влияния агрессивных вод. При наличии вредных газов в условиях канализационных коллекторов применяется защита внутренней поверхности коллектора покрытием специальной эмульсией или керамическими плитками. Получить правильные проектные размеры бетонных блоков возможно только при условии применения обработанных чугунных или стальных форм.

Материал и конструкция обделки должны быть водонепроницаемы как для внешних, стремящихся проникнуть в тоннель, так и для внутренних вод, стремящихся через конструкцию обделки проникнуть в окружающую породу. Водонепроницаемость обделки достигается покрытием внешней поверхности конструкции битуминозной массой, а разъедание внутренней поверхности предупреждается, как указывалось выше, покрытием эмульсией и керамиковыми плитками. Плотное прилегание одного блока к другому и заполнение швов битумом обеспечивается дополнительно при нажиме щитовых домкратов в процессе проходки.

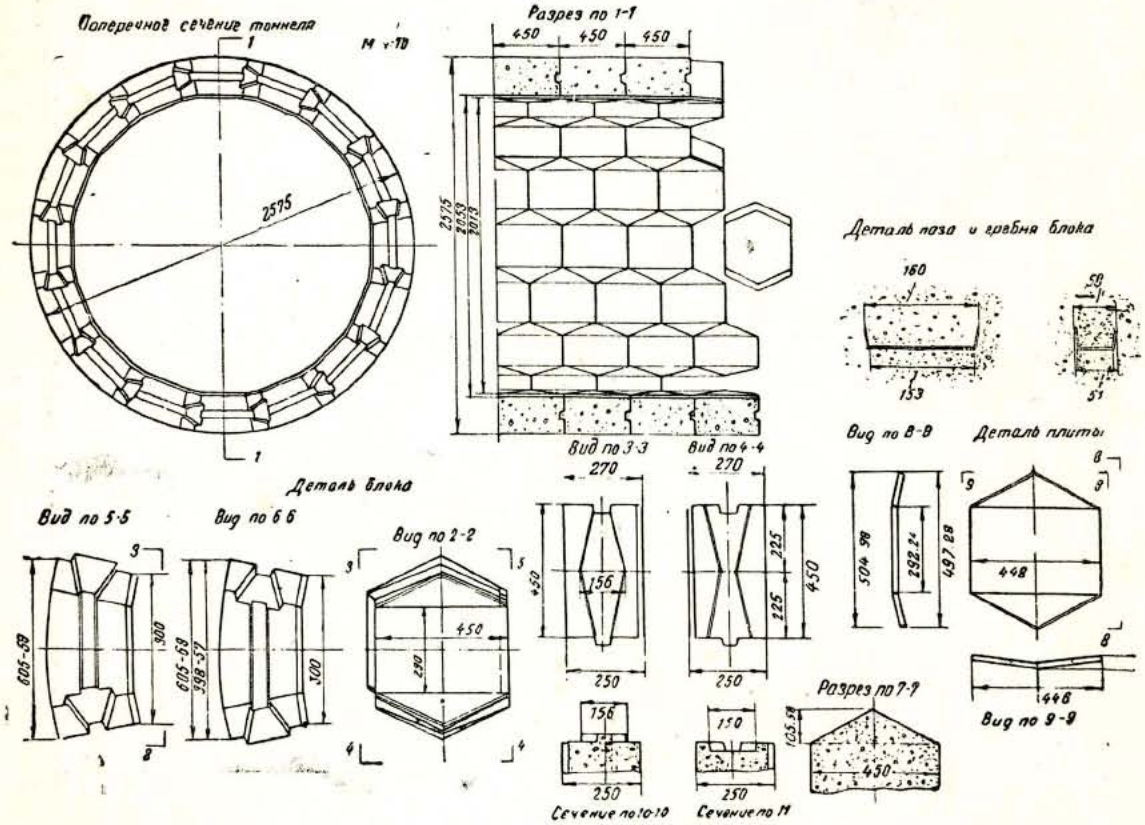


Рис. 184. Обделка канализационного тоннеля из бетонных блоков сотовой формы

Производя статический расчет обделки тоннельных коллекторов, приходится особое внимание обращать на возможность появления растягивающих напряжений, сказывающихся в раскрытии швов на битуме. Не исключена возможность образования и зигзагообразных раскрытий по швам. Обделка тоннельного коллектора, состоящая из отдельных бетонных элементов, образует цилиндрическую трубу, способную воспринять на себя внешнее горное и гидростатическое давление, а равно давление жидкости, которая, в зависимости от назначения тоннеля, может заполнять коллектор.

Блоки сотовой формы. Каждый из блоков сотовой формы представляет собой шестигранник, который имеет по наружной поверхности кривизну, соответствующую радиусу тоннельного коллектора. По трем боковым граням блока имеются выступы, по другим трем — пазы. Входящие друг в друга блоки

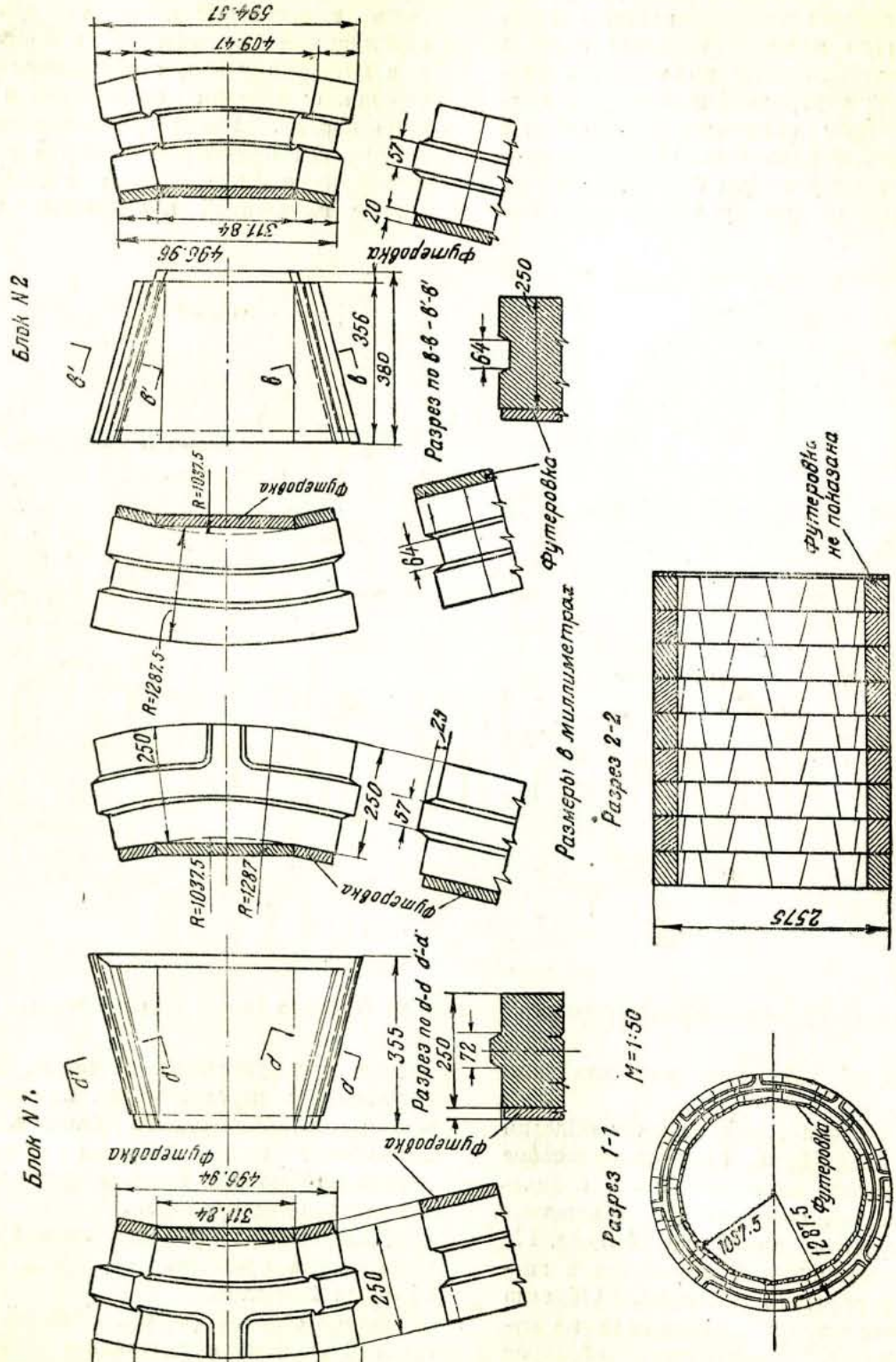


Рис. 185. Обделка канализационного тоннеля из бетонных блоков трапецоидальной формы

образуют при соединении тоннельный коллектор. Преимущество тоннельного коллектора из сотовых блоков заключается в том, что там отсутствуют ярко выраженные продольные и поперечные швы, имеющиеся в обычных коллекторах из прямоугольных блоков (рис. 184).

Трапецоидальные блоки. Трапецоидальные блоки имеют поверхность, соответствующую кривизне тоннеля. Обделка состоит из двух типов трапецоидальных блоков. В одном из блоков имеются три выступа и один паз, а в другом один выступ и три паза (рис. 185). В этом типе обделки образуются кольцевые швы. Трапецоидальные блоки получили большое распространение при сооружении тоннельных коллекторов в Москве.

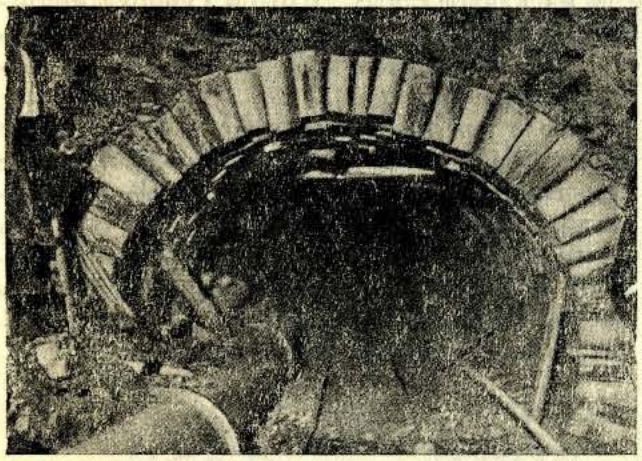


Рис. 186. Крепление тоннельной галлереи деревянными блоками

Для характеристики приведем таблицу данных по обделкам из трапецоидальных бетонных блоков (см. табл. 11).

Таблица 11

Характеристика обделки из трапецоидальных блоков

Внешний диаметр тоннеля в *м*	Внутренний диаметр тоннеля в *м*	Количество блоков в кольце в шт.	Длина блока в *м*	Толщина блока без керамиковой плитки в *м*	Толщина керамиковой плитки в *см*	Объем бетона на 1 блок в $м^3$	Вес одного блока с керамиковой плиткой в *кг*
1,490	1,188	18	0,208	0,125	2	0,0063	15
2,575	2,000	16	0,355	0,250	2	0,051	119
3,430	2,758	16	0,509	0,300	2	0,12	275

Бетонные блоки изготовляют на поверхности заводским способом и до спуска в шахту их погружают в ванну горячего битума, чтобы покрыть внешние и торцовые поверхности блоков. Внутреннюю поверхность не покрывают битумом, если предполагают иметь поверхность из керамиковых плиток

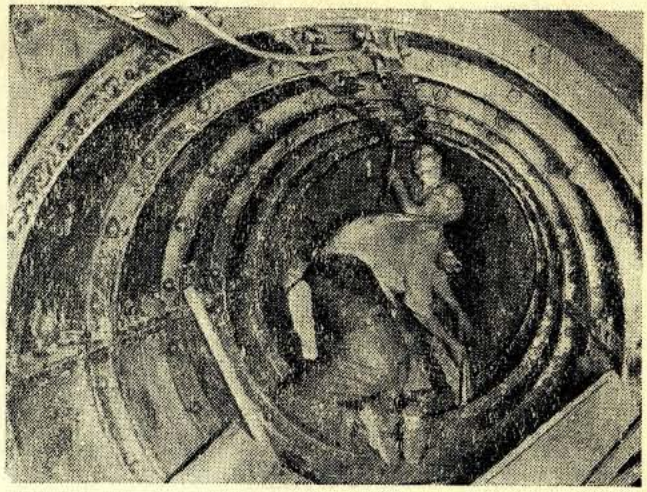


Рис. 187. Канализационный тоннель из чугунных тюбингов

или сделать покрытие специальной эмульсией.

Для тоннелей малых профилей (до 1,5 м) блоки весом до 15 *кг* собираются вручную. Бетонные блоки для диаметра тоннеля 2,6 *м* имеют вес до 120 *кг* и монтируются в тоннеле специальным эректором[1]. В практике в отдельных случаях велась проходка тоннельных галлерей при креплении деревянными блоками (рис. 186).

Чугунная обделка канализационных коллекторов отличается от конструкций, применяемых для специальных тоннелей, только своими размерами (рис. 187).

Прямоугольные блоки. В практике строительства коммунальных тоннелей применяются железобетонные блоки прямоугольной формы. Так, для тоннеля диаметром 3,5 *м* в свету блоки длиной в 1 *м* и толщиной в 25 *см* весят 0,5 *т*. Блоки имеют выступы и пазы, между которыми закладываются прутья диаметром 16 *мм*. Под давлением производится нагнетание цементного раствора через блоки за обделку и между блоками для обеспечения монолитности конструкции (рис. 188).

[1] Инж. В. Л. Маковский, Сооружение тоннелей метрополитенов. М., 1935.

По мере продвижения забоя устанавливаются блоки, образующие полное кольцо обделки. Затем с торца заводятся в пазу два железных прута, свернутых в полукруг, диаметром 16 *мм*, связывающих бетонные кольца, и дальше, вслед за выработкой породы,

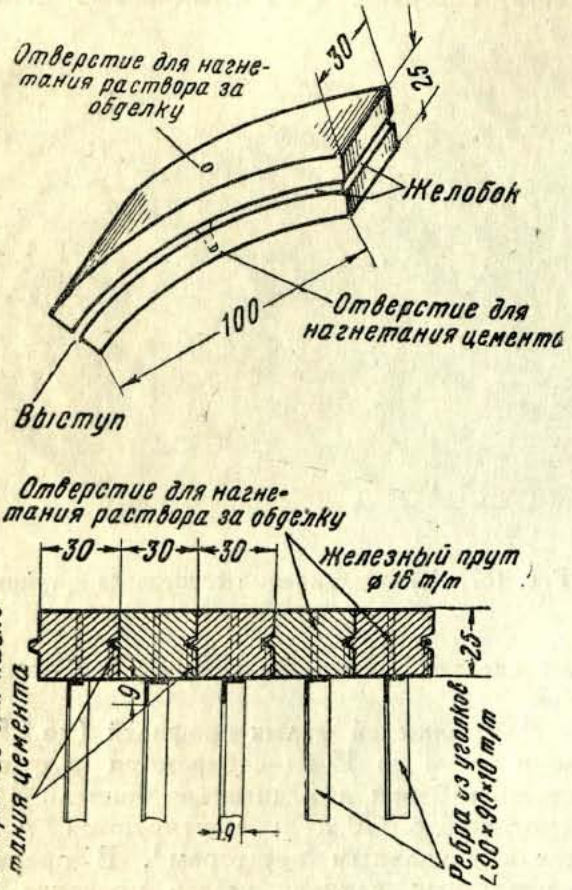


Рис. 188. Бетонные блоки прямоугольной формы

производится установка последующих блоков и т. д. Для обеспечения от взаимных сдвигов отдельных блоков и правильности формы и очертания тоннельной обделки на первых десяти кольцах от лба забоя устанавливают кольцевые металлические кружала из уголков.

Клиновидные блоки. В практике для тоннелей небольших профилей находит широкое применение обделка из клиновидных блоков системы Герцбуха. Сущность ее заключается в том, что блокам дается клиновидная форма не только в направлении поперечного сечения тоннеля, но и вдоль его. Таким образом, при действии горного давления на одно кольцо неразрывно, благодаря заклиниванию, вовлекаются в работу соседние кольца. В то время как при обычной системе каждое кольцо работает самостоятельно, в системе Герцбуха работает тоннельный цилиндр, смонтированный из заклиненных во всех направлениях блоков. При этом кольца, находящиеся непосредственно под сильно проявляемым давлением, распределяют его на прилегающие кольца. Исключается местная перегрузка отдельных колец, которые в обычных системах претерпевают иногда большие деформации.

В силу этих обстоятельств меняется и расчетная схема самой тоннельной обделки, и при известных условиях размеры элементов клиновидной обделки могут оказаться меньше, чем обделки из разрезных колец по оси тоннеля (рис. 189).

С целью увеличения сопротивления обделок из клиновидных блоков Герцбух применил следующий прием, который может быть с успехом применен при заготовлении бетонных блоков вообще.

После изготовления блоков в специальных формах Герцбух опускал их в воду. Процесс твердения происходил под водой. Через четыре дня блоки вынимались из ванн и твердели на воздухе при нормальных условиях. Будучи пропитаны водой, блоки приобретали высококачественные свойства равномерно развитого повышенного сопротивления.

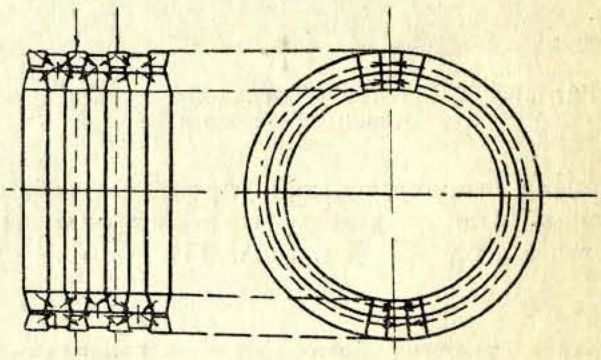


Рис. 189. Конструкция коллектора из бетонных клиновидных блоков

Опыты Герцбуха показывают, что блоки, приготовленные указанным выше путем, приобретали через 3,5 недели величины сопротивления порядка 650—720 *кг/см*^{2}.

Система клиновидных блоков и метод их приготовления должны найти применение в наших условиях, в частности при щитовой проходке с обделкой из бетонитовых камней.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕХАНИЗАЦИЯ ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ОТКРЫТИЕ ФРОНТА ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

ОБЩИЕ ДАННЫЕ

Перед тем как открыть фронт тоннельных работ и установить место вскрытия и атаки забоев, необходимо учесть комплекс обстоятельств, к которым относятся геотехнические условия, методы производства и механизации тоннельных работ в соответствии с наличием рабочей силы и парка оборудования, длина тоннеля, размеры подходной выемки, толща налегающего над тоннелем горного массива, установленный срок окончания строительства.

При сооружении железнодорожных линий может оказаться настоятельно необходимым пробить тоннельный ход еще до окончания строительства других искусственных сооружений и станций. Именно наличие естественного препятствия в виде горного хребта может в некоторых случаях затруднить развитие основных работ (например, транспортировку материалов к разным искусственным сооружениям) по постройке железнодорожной линии. Быстрая пробивка тоннеля может в значительной степени облегчить и удешевить работы по постройке части линии, находящейся по другую сторону горного кряжа, и обеспечить скорейший пуск в эксплоатацию всей линии в целом. Таким образом, ускорение работ при постройке тоннеля может дать большую экономическую выгоду для определенных участков железнодорожной линии.

Помимо применения специальных методов производства работ и мощного оборудования, форсирование производства тоннельных работ достигается увеличением числа забоев, открывающих фронт работ.

Обычным, наиболее простым и дешевым способом разработки горного железнодорожного тоннеля является вскрытие порталов его и ведение работ из двух забоев — на сбойку.

В тех случаях, когда по условиям рельефа местности представляется возможным заложить шахты или пробить ряд боковых штреков или бремсбергов, может быть достигнуто значительное ускорение в производстве тоннельных работ.

Однако когда позволяют установленные сроки постройки, целесообразно вести проходку короткого тоннеля только с одного конца. При этом концентрация работ и оборудования дает определенный технико-экономический эффект и снижение стоимости строительства.

В зависимости от местных условий устройство подходных выемок к тоннелю приходится иногда осуществлять в первую очередь, до пробивки направляющего хода, по соображениям производственного характера. Имеется в виду при определенных топографических условиях пересеченной местности необходимость в размещении материалов, в постройке подсобно-производственных предприятий.

Когда объем работ по подходной выемке небольшой, имеется возможность немедленного их производства и форсирования основных тоннельных работ. Но при осложненных топографических условиях и большом объеме земляных работ по притоннельным выемкам приходится начинать проходку штольневых забоев, не дожидаясь окончания работ по устройству выемок. В этом случае открытие фронта работ может быть проведено следующим порядком:

1) устройством узкой траншеи в пределах подходной выемки, из которой продолжается штольневый ход;

2) проходкой штольни с дневной поверхности через нетронутый земляной массив будущей подходной выемки;

3) вскрытием лишь части подходной выемки, из которой задается штольневый ход в горный массив;

4) при большом протяжении подходной выемки устраивается шахта или бремсберг, переходящий в направляющую галлерею тоннеля; одновременно на сбойку в зависимости от местных условий ведется проходка штольневого хода, соединяющего штольню, вскрытую из шахты, со штольней, пройденной с дневной поверхности через земляной массив подлежащей вскрытию подходной выемки. В зависимости от условий рельефа местности необходимо стремиться к развитию фронта тоннельных работ из ряда бремсбергов (окон), идущих перпендикулярно или под углом в плане к оси сооружаемого тоннеля.

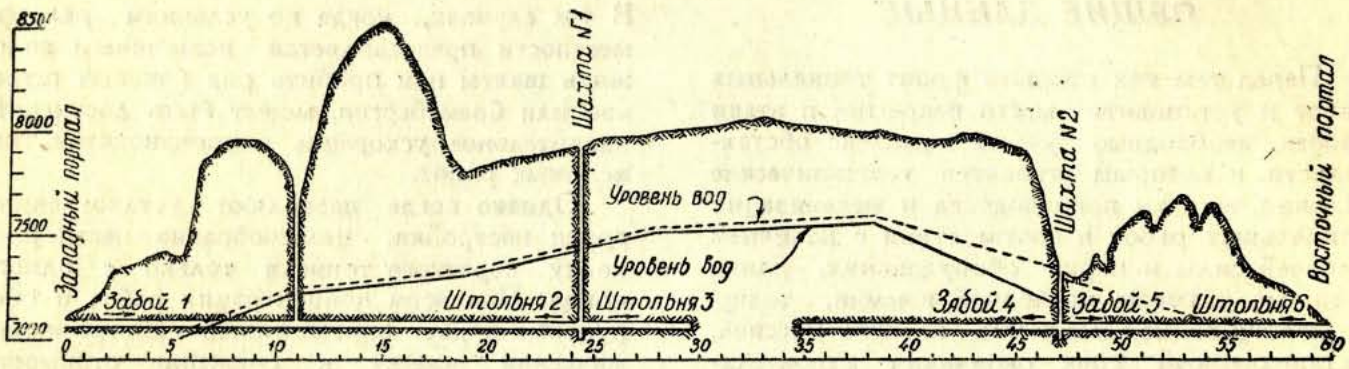


Рис. 190. Тоннель Моно-Кратерс (открытие фронта работ по сооружению тоннеля длиной 18 *км*)

В тоннельной практике распространен способ вскрытия фронта работ из штольни, направляемой через нетронутый массив выемки. Это, с одной стороны, позволяет, не дожидаясь окончания работ по разработке выемки, форсировать тоннельные работы и, с другой стороны, облегчает земляные работы по самой выемке. Наличие штольневого хода в основании выемки позволяет вести ее разработку с помощью ряда вертикальных воронок, через которые грунт удаляется непосредственно по постоянному, нижнему горизонту штольневого хода.

Для устройства врезки штольни в портальной части необходимо произвести надлежащее раскрепление поверхности лобового откоса при системе контрфорсов, упираемых через схватки в ряд забитых свай. Тип устанавливаемого крепления врезки в каждом отдельном случае зависит от характера давления и положения откоса портальной части.

Если по условиям заданных сроков окончания работ и по природным трудностям не представляется возможным при имеющейся технической вооруженности успеть провести тоннельные работы, пользуясь лишь двумя фронтами работ на сбойку с портальных забоев, приходится прибегать к закладке промежуточных вертикальных шахт, бремсбергов или боковых штреков. Когда по топографическим условиям отвал породы у портальных участков затруднителен, необходимо прибегнуть, если это представляется возможным, также к открытию фронта работ из дополнительных шахт или бремсбергов (рис. 190). Однако следует учесть, что эксплоатация промежуточных шахт и бремсбергов, а главное, ведение через них основных тоннельных работ удорожает последние сравнительно с организацией работ из портальных забоев. Поэтому, используя эти промежуточные фронты работ на первый период проходки направляющего хода, следует при дальнейшем развертывании основных тоннельных работ от шахтного подъема по возможности отказаться и осуществлять подземный транспорт породы и материалов через портальные ходы. В связи с этим вся проходка временных шахт и бремсбергов и их оборудование должны быть осуществлены с минимальными затратами. При закладке промежуточных шахт приходится считаться с тем обстоятельством, что обычно скорость проходки штольни в нормальных условиях пересечения горного массива в 8—10 раз выше, чем проходка шахты. Если считать, что средняя скорость при горизонтальной проходке штольни для определенных условий достигает, например, 5 *м* в сутки, то вертикальная проходка шахты в аналогичных условиях составляет лишь 0,5 *м* в сутки. При этих обстоятельствах нужно учесть, что при закладке шахты на глубине 50 *м* она должна отстоять от портала минимум на 1500 *м*.

На основании большого опыта в постройке тоннелей, учитывая состояние внутритоннельного транспорта, вентиляции и другие условия, установлено, что продвижение тоннельных забоев проходит примерно на 5—10% медленнее при шахтном стволе, чем через штольню, идущую непосредственно из портального забоя. При закладке шахт необходимо иметь технико-экономическое обоснование, подтверждающее, что в данных условиях расходы на проходку и эксплоатацию шахты оправдываются достигаемым эффектом в части ускорения проходки направляющей штольни. При этом приходится особо учитывать вопрос выдачи породы и отвала ее. Выгодность закладки шахт и установление расстояния шахты от портала в каждом отдельном случае зависят от топографических и геологических условий, глубины заложения тоннеля и тоннельного оборудования, обусловливающего успех штольневой проходки. В связи с этим сооружение горных тоннелей в настоящее время проводится преимущественно без применения промежуточных шахт, а лишь из двух портальных забоев — на сбойку. Исключение представляет лишь проходка тоннелей в водоносных, неустойчивых грунтах, где требуются особые приемы тоннелирования. Но и в условиях плывунных пород проходка шахт также вызывает определенные строительные затруднения. В большинстве случаев ориентируются на проходку штолен и штреков, проходящих под углом к оси трассы тоннеля в соответствии с условиями местности.

К устройству вспомогательных шахт прибегают преимущественно для вентиляции, в случаях, когда эти шахты остаются на все время эксплоатации тоннеля. Но при закладке рабочих шахт обычно после окончания работ их засыпают, так как оставление шахт открытыми требует определенных расходов на содержание их в исправности.

Поскольку в большинстве случаев применение шахт в строительстве горных тоннелей носит временный характер, необходимо стремиться к минимальным размерам их сечения.

Большое число забоев приходится открывать при ведении городских тоннельных работ. В условиях застроенности городской территории выбор шахтных площадок даже весьма ограниченных размеров связан с большими трудностями. Шахтный ствол обычно не удается в городе расположить по оси тоннеля, а преимущественно на некотором расстоянии от трассы. Длина подходных штолен в некоторых случаях довольно значительна. Это диктуется специфическими городскими условиями. При сооружении подводных тоннелей стараются использовать водный путь для подачи материалов и транспортировки породы. Устраивается ряд деревянных подмостей и эстакад, сопряженных непосредственно с шахтным стволом. Подобные приемы были осуществлены при сооружении ряда подводных тоннелей, например под Темзой (в Лондоне), под рр. Гудсон и Ист-Ривер (в США).

При сооружении Парижского метрополитена пробивался ряд штолен от трассы непосредственно к р. Сене, по которой на баржах транспортировался весь грунт из тоннельных разработок, не отягчая грузовым автомобильным транспортом оживленное уличное движение.

При прокладке больших подводных тоннелей приходится иногда проводить спе-

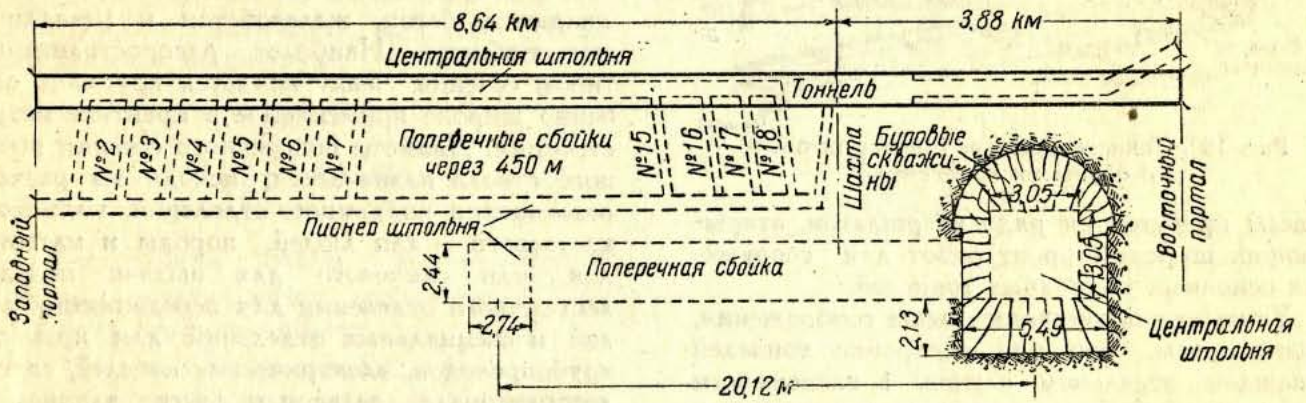


Рис. 191. Тоннель Моффат (пионер-штольня при открытии работ)

циальные приемы прокладки передовых *пилот-штолен* для широкого развития фронта основных тоннельных работ. В проекте сооружения тоннелей под Ла-Маншем (между Дувром и Калэ) намечена пробивка между двумя однопутными тоннелями одной пилот-штольни, из которой перпендикулярно к оси

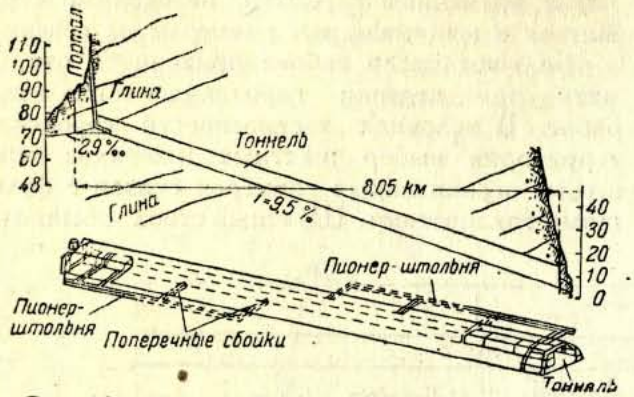


Рис. 192. Тоннель Роджерс (пионер-штольня с боковыми сбойками)

трассы пробивается ряд квершлагов, открывающих широкий фронт работ для сооружения основных подводных тоннелей.

Учитывая приведенные выше соображения, констатируем, что при постройке тоннелей в каждом отдельном случае, в зависимости от местных топографических и геотехнических условий, сроков работ, наличия тоннельного оборудования и рабочей силы, приходится устанавливать соответствующее число забоев, обусловливающих открытие фронта работ по трассе сооружаемого тоннеля.

Для форсирования работ и открытия большого числа забоев по основной трассе тоннеля осуществляют проходку тоннеля с параллельной пионер-штольней. Из последней, связанной с тоннелем рядом поперечных сбоек, открывается необходимый фронт работ и осуществляются транспортировка породы и материалов, отвод воды, вентиляция (рис. 191).

Применением пионер-штольни (в расстоянии от 15 до 30 *м* от оси основного тоннеля) был открыт фронт работ при сооружении тоннелей Моффат, Каскад, Коннаут, Сан-Джасинто, Роджерс и др. (рис. 192).

ПРОХОДКА ШАХТ

Для сооружения тоннелей метрополитена, обычно заложенных в коренных устойчивых проходах на глубине 30—50 *м* от поверхности, прибегают к устройству шахт.

Шахта является вертикальной выработкой, по которой происходит спуск людей и материалов и выдача породы, а равно осуществляются вентиляция и водоотлив в период сооружения и эксплоатации тоннеля.

Стволы шахт, в зависимости от своего назначения, имеют сечения прямоугольное, круглое и эллиптическое.

Для восприятия давления окружающих грунтов и напора подземных вод ствол закрепляют специальной конструкцией шахтной крепи.

Стволы прямоугольных шахт обычно проходятся на деревянном креплении. Материалами для конструкции крепления шахтных стволов круглого и эллиптического сечения являются бетон, железобетон и металлические тюбинги. Наиболее распространенным типом сечения шахт является круглое, особенно широко применяемое в практике метростроения. Диаметр поперечного сечения шахтного ствола назначается, исходя из расчета размещения подъемного отделения, подъемов: клетьевого — для людей, породы и материалов, или скипового для выдачи породы, лестничного отделения для передвижения людей и специальных отделений для пропуска трубопроводов, электрических кабелей, спуска лесоматериала, рельсов и других длинномерных материалов.

Конструкция верхней части ствола шахты обычно сооружается со специальным воротником, образуя *форшахту*. Последняя проходится на глубину 3—7 *м* до уровня грунтовых вод. Воротник шахты, опираясь на грунт, дает возможность поддерживать крепление ствола в период его проходки.

Часть шахтного ствола, пройденная ниже подошвы горизонтальной выработки и служащая сборником для подземных вод, является *зумпфом*.

Для примера приведем ряд типовых сечений шахт, применяемых при сооружении тоннелей Московского метрополитена. На этом строительстве приняты круглые сечения ствола, удовлетворяющие как условиям эксплоатации для вентиляционных целей, так и условиям производства работ при проходке. И действительно, круглое очертание шахты стандартного типа требует несложного временного крепления. Постоянное крепление шахтного ствола круглой формы лучше всего сопротивляется усилиям от внешнего горного давления. Распределение сечения ствола при двухклетьевом подъеме проводится для клетей

на две вагонетки размерами 3 000 × 1 000 *мм* и на одну вагонетку размерами 2 000 × × 1 000 *мм*. Габариты клети определены из условий емкости вагонетки в 0,5 $м^3$. Размеры поперечного сечения ствола шахты определяются габаритами клетей, размерами отсека для пропуска трубопроводов, проводников и длинномерных лесных материалов и рельсов (рис. 193). В результате диаметр круглого сечения шахтного ствола для клетей на две вагонетки определяется в 5 *м* при площади поперечного сечения в 19,16 $м^2$, а для клетей под одну вагонетку диаметром 4,5 *м* при площади поперечного сечения 16 $м^2$. При этом коэфициент использования поперечного сечения шахтного ствола составляет 0,9.

Пропускная способность шахтного ствола N определяется по формуле:

$$N = \frac{3\,600 \times 20}{\left(\frac{H}{V_{ср}} + t\right) 1{,}25},$$

где H — глубина шахты, $V_{ср}$ — средняя скорость, t — пауза между подъемами, 1,25— коэфициент неравномерности.

По данным Метропроекта, при высоте подъемов для шахтных стволов Метростроя от 20 до 50 *м* и средней скорости подъема $V = 1{,}53 — 1{,}77$ *м/сек*, при паузе между подъемами $t = 25$ *сек*. количество подъемов в сутки соответственно определяется от 1 500 до 1 080, что дает от 3 000 до 2 160 вагонеток за 20 часов работы для двухклетьевых подъемов при четырех вагонетках емкостью по 0,5 $м^3$.

При каждом стволе организуются шахтные строительные площадки. На них располагаются следующие основные надземные сооружения: копер, машинное помещение, эстакада с бункерами для выдачи породы на автомобильный транспорт, трамвай и троллейбус; тельферная эстакада для подачи тюбингов, трансформаторная подстанция, механическая и пневматическая мастерские, кузница, компрессорная, бетонная установка.

Приспособление шахтной площадки для выдачи породы из забоя в период производства работ и для подачи материалов обусловливается наличием сооружений горного комплекса, куда входят копер, подъемная машина, бункерная и тельферная эстакады (рис. 194).

Копер — сооружение металлической конструкции, по которому производится подъем из шахты клетей, поднимаемых на поверхность (рис. 195).

Подъемная машина осуществляет подъем и спуск по стволу клетей посредством стальных канатов, перекинутых через шкивы, размещенные на голове копра.

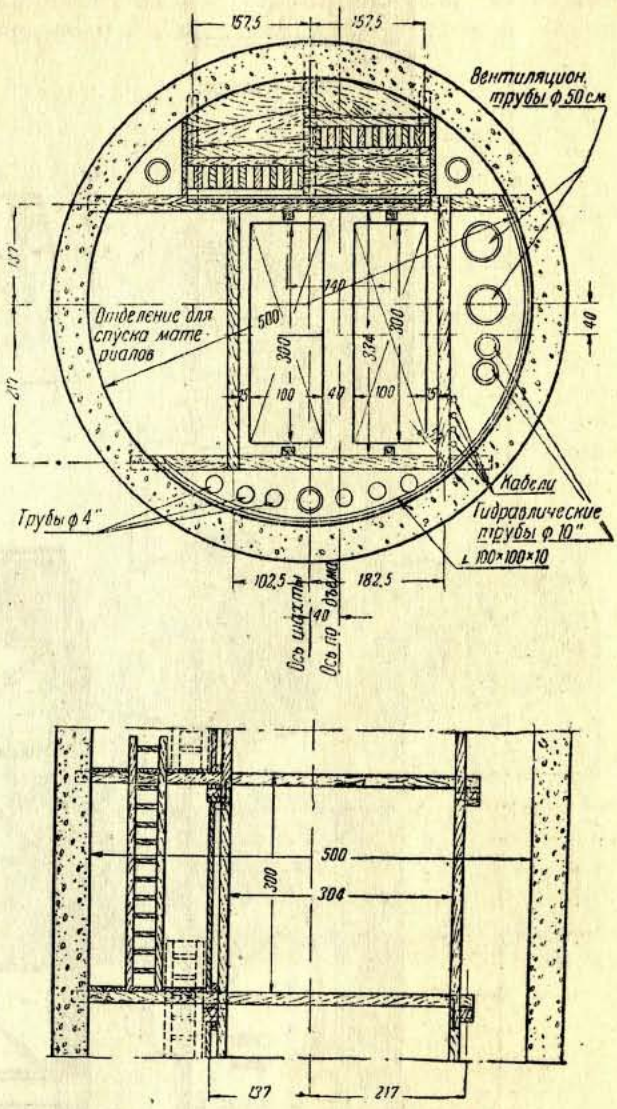


Рис. 193. Распределение сечения круглого ствола шахты

Эстакада с бункерами — эстакада, на поверхности которой уложены узкоколейные рельсовые пути; вагонетки с породой, поднятые по клетям, передаются на рельсовый путь, с которого выгружаются «опрокидыванием» в бункеры.

Бункеры снабжены механическими затворами в виде металлических пластинчатых питателей, через которые порода перегружается в грузовые автомобили или трамваи, транс-

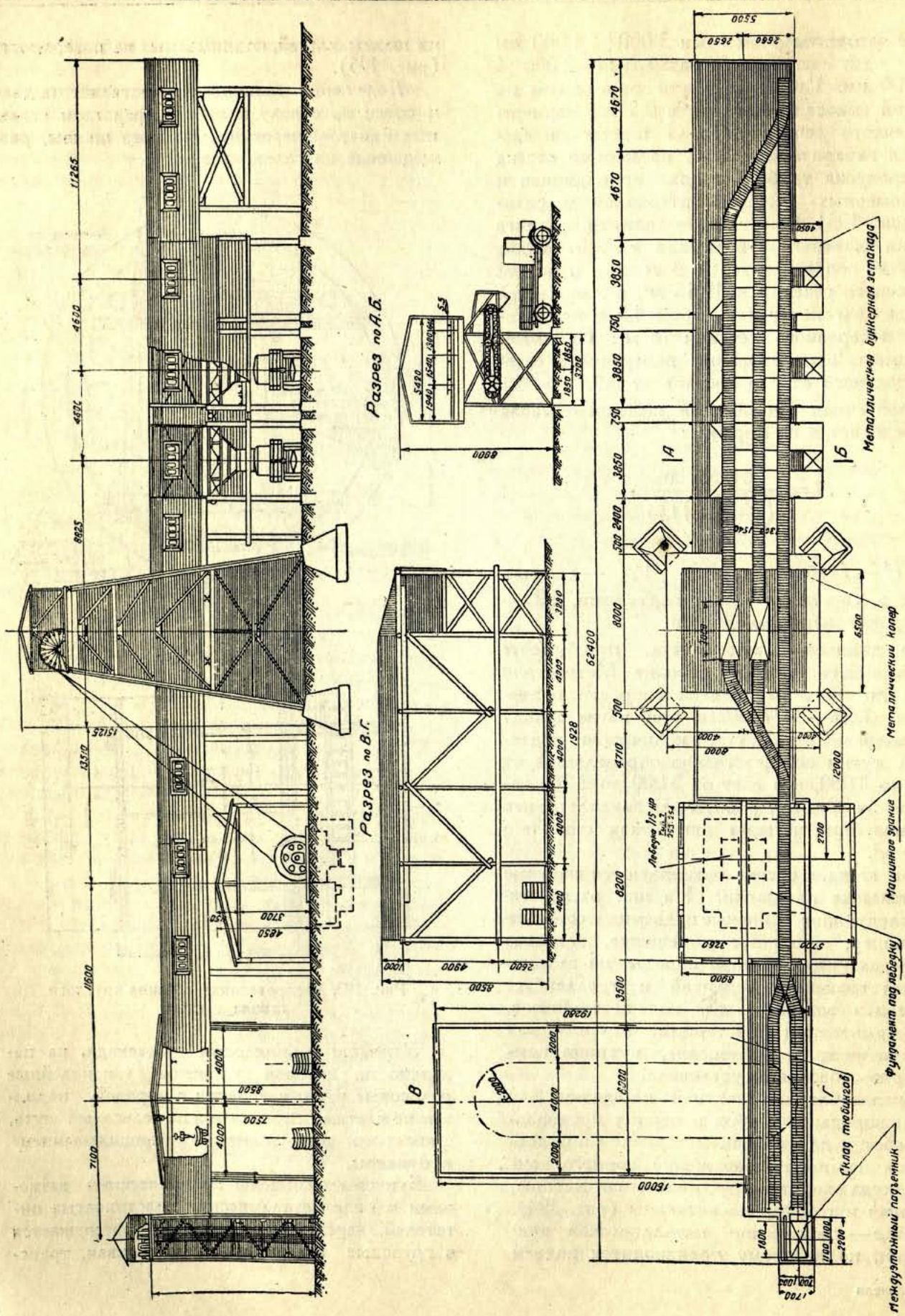


Рис. 194. Горный комплекс на шахтной поверхности

портирующие породу к месту свалки (рис. 196).

Тельферная эстакада оборудуется для разгрузки тюбингов с грузовых автомобилей, укладки их в местный склад под эстакадой и подачи тюбингов к стволу. Вверху эстакады подвешена двутавровая балка, по которой движется тельферная тележка с крюком для подхвата тюбинга. Перед отправкой в ствол тюбинг укладывается на специальную платформу.

Методы проходки шахтных стволов, в зависимости от геологических и гидрогеологических условий (от мощности пересекаемой плывунной толщи), подразделяются на обычные методы проходки и специальные методы проходки.

Обычные методы проходки шахт применяются в устойчивых породах с обычным водоотливом; к ним относятся проходка на временном креплении с последующим постоянным бетонным креплением и проходка на постоянном креплении с подводкой тюбингов.

Специальные методы проходки шахт применяются преимущественно в неустойчивых породах, когда мощность пород плывунного характера превышает 5—6 *м*; к ним относятся: а) проходка опускным колодцем; б) проходка под сжатым воздухом опускным кессоном и со стационарным потолком; в) проходка замораживанием грунтов; г) применение приемов тампонажа грунтов (цементация, силикатизация, битумизация), д) искусственное водопонижение, при последующей проходке обычным способом; е) проходка специальным герметическим щитом ВЛМ-2 (системы автора); ж) проходка шахт методом бурения и з) проходка шахт вибрационной крепью.

До начала проходческих работ необходимо обеспечить строительство бесперебойным снабжением электроэнергией и сжатым воздухом.

Метод проходки, не соответствующий характеру пересекаемых неустойчивых пород, неизбежно вызывает в период производства работ деформации и поломки крепи, выплывы грунта, вплоть до аварийных явлений при затоплении проходимого ствола стремительно прорывающимся грунтом с водой.

ОБЫЧНЫЕ МЕТОДЫ ПРОХОДКИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ В УСТОЙЧИВЫХ ПОРОДАХ

1. Проходка шахт на деревянном креплении. При проходке шахт на деревянном креплении применяется преимущественно прямоугольное сечение, при котором предусматривается расположение лестничного и двух клетьевых отделений. Трубы размещаются в лестничном отделении, образуемом путем постановки расстрелов в вандруты, причем для направления подъемных клетей устраиваются боковые или лобовые направляющие. Сечение шахты на деревянном креплении, примененное на строительстве линии 1-й очереди Московского метрополитена, имеет размеры 570 × 260 *см* (рис. 197).

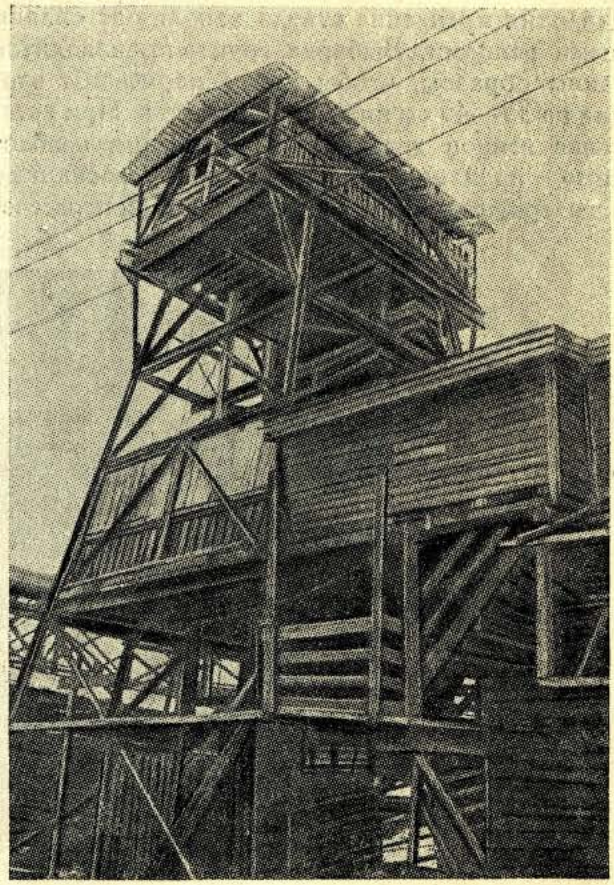


Рис. 195. Общий вид копра

Проходка шахт на деревянном креплении с марчеванной крепью на «бабках» ведется следующим образом. Над устьем шахты укладывается верхняя обчинная рама из бревен (диаметром 30 *см*), скрепленных между собой болтами. Затем подводятся два-три венца, и дальнейшая проходка ведется забивной крепью — *марчеванами*, при установке венцов через 1—1,5 *м*. Между венцами устанавливаются коротыши-бабки, через которые вышележащие венцы опираются на основные выпуском пальцев. Основные венцы устраиваются, в зависимости от местных

условий, через 6—10 *м*. До установки основного венца временное деревянное крепление подвешивается к обчинным рамам, уложенным над устьем ствола при помощи скоб или специальных временных подвесок. При появлении сильного бокового давления, кроме установленных через 1—1,5 *м* венцов, устанавливаются еще промежуточные рамы (рис. 197). При появлении нарастающего давления крепление ствола заполняют сплошными венцами. Выборка грунта производится таким образом, чтобы конец марчеваны входил на 35—45 *см* ниже забоя шахты. При установке венцов деревянного крепления необходимо производить тщательную расклинку и выверку отдельных элементов. При пересечении водоносных песчаных грунтов мощностью до 4 *м* представляется возможным применить и забивку вертикального шпунта, но это заранее должно быть предусмотрено при установлении сечения шахты, еще до закладки ее. В этом случае требуется проект шахты телескопического сечения, при котором суженное вертикальным шпунтом сечение должно по габаритам соответствовать данному распределению по сечению клетьевого подъема и других шахтных устройств. При пересечении водоносных грунтов мощностью более 4 *м* система деревянного крепления становится непригодной. Крепление обычно начинает деформироваться, рамы оседают, расходятся между собой, и скобы выдергиваются. Удержание ствола шахты на стальных канатах, применяемое в горной практике, также не достигает цели. В этом случае необходимо перейти на другие, более совершенные методы проходки шахт. Элементы шахтного деревянного крепления, по Протодьяконову, проверяются следующими формулами:

а) Крепление на бабках:

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{16\,pla^2}{K}};$$

б) сплошное деревянное крепление:

$$d_2 = 0{,}92a\sqrt[4]{\frac{p}{K}},$$

где d — толщина элемента крепления, p — давление породы, l — расстояние между венцами, a — максимальный пролет венца и K — сопротивление изгибу в *кг/см²*.

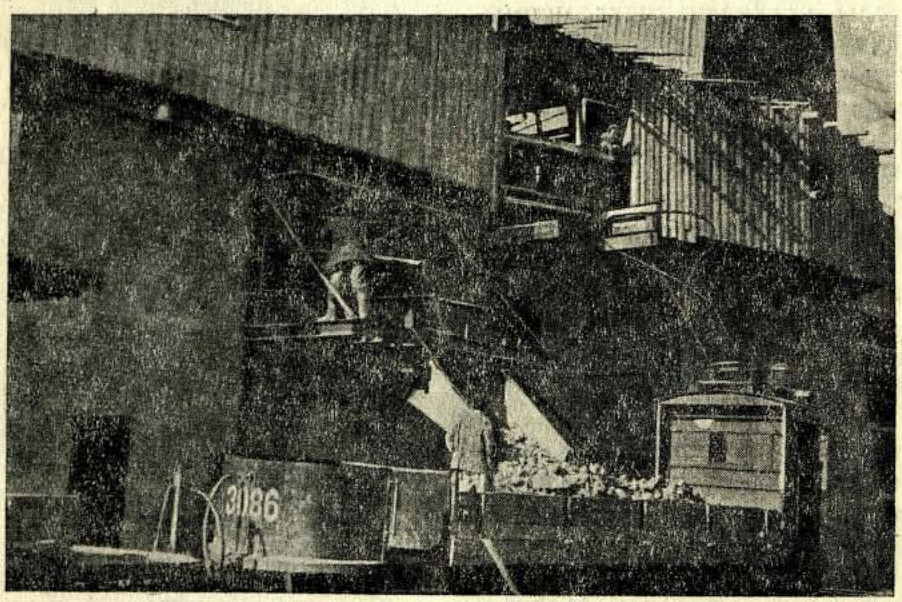


Рис. 196. Погрузка породы из бункеров в трамвайные грузовые вагоны

2. Проходка шахт круглого сечения на временных металлических кольцах *при постоянном креплении ствола бетоном.*

Этот метод проходки шахт применяется главным образом в тех случаях, когда намечаемая к проходке рабочая шахта предполагается к использованию как постоянное сооружение, например в виде вентиляционной шахты. Обычный метод проходки, который также возможен при пересечении водоносных грунтов мощностью до 3—5 *м*, осуществляется следующим порядком (рис. 198а, б).

Предварительно закладывается котлован,

который своим основанием не доходит на 1 *м* до горизонта грунтовых вод. В котловане устраивается форшахта с воротником, предназначенным для предохранения шахтного ствола от оседания (рис. 199 а), затем начинается углубление шахты на временном креплении из швеллерных колец № 16, 18. Каждое кольцо состоит из отдельных сегментов, которые стыкуются между собой. В зависимости от величины бокового давления временные металлические кольца располагаются на взаимном расстоянии 1—1,5 *м*. Поддержание колец осуществляется зетообразными металлическими подвесками. Временное крепление ствола шахты при пересечении неустойчивых пород производится забивкой марчеван. При плотных породах обычным способом заводятся затяжки. После углубления забоя шахты на 6—10 *м*, в зависимости от грунтов и притока грунтовых вод, закладывается основной бетонный венец — башмак. После этого, базируясь на основной венец, возводится бетонное крепление ствола шахты снизу вверх. В процессе возведения бетонного крепления ствола временное крепление при устойчивых породах снимается, а при пересечении слабых пород оставляется в обделке ствола. При встрече неустойчивых водоносных грунтов мощностью более 3—4 *м* представляется возможным забить по внутреннему контуру ствола шахты вертикальный шпунт. Однако это приводит к сужению сечения шахты, что заранее должно быть предусмотрено: проходку в самом начале надо вести увеличенным сечением — телескопически. При забивке шпунта замкнутым контуром в бетонном стволе шахты устанавливаются наружные направляющие металлические кольца, распираемые клиньями и поддерживаемые специальными штырями. Жесткость и устойчивость этих колец обеспечивается внутренними направляющими и специальной конструкцией распорной рамы. Забивка вертикального металлического шпунта производится равномерно по контуру пневматическим или паровым молотом (рис. 199, б и в). Временные направляющие кольца снимаются по мере забивки вертикального шпунта. Когда шпунт забит до требуемой отметки, так что концы его заходят на 2—2,5 *м* в плотную породу — водоупор, начинается углубление ствола. По мере выработки грунта шпунт с внутренней стороны распирается специальными металличе-

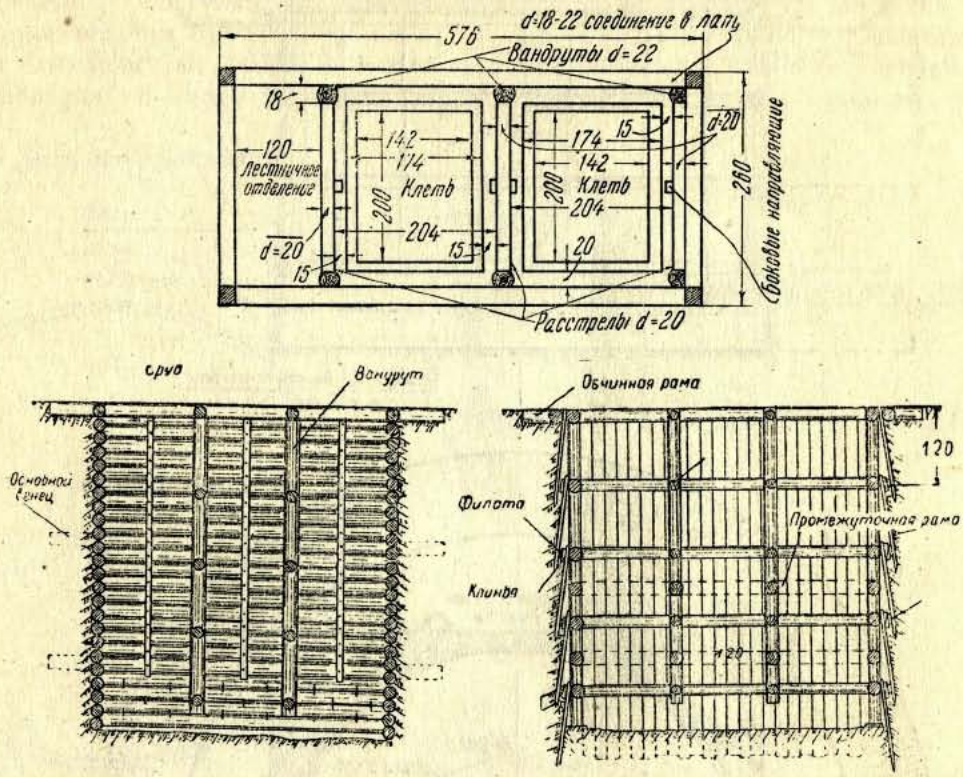


Рис. 197. Проходка шахты прямоугольного сечения на бабках, забивной крепью и срубом

скими кольцами. Когда шпунт оголен, с внутренней стороны производится бетонное крепление ствола снизу вверх. Толщина $\delta = R - r$ где H — глубина шахты, φ — угол внутреннего трения грунта, γ — объемный вес грунта.

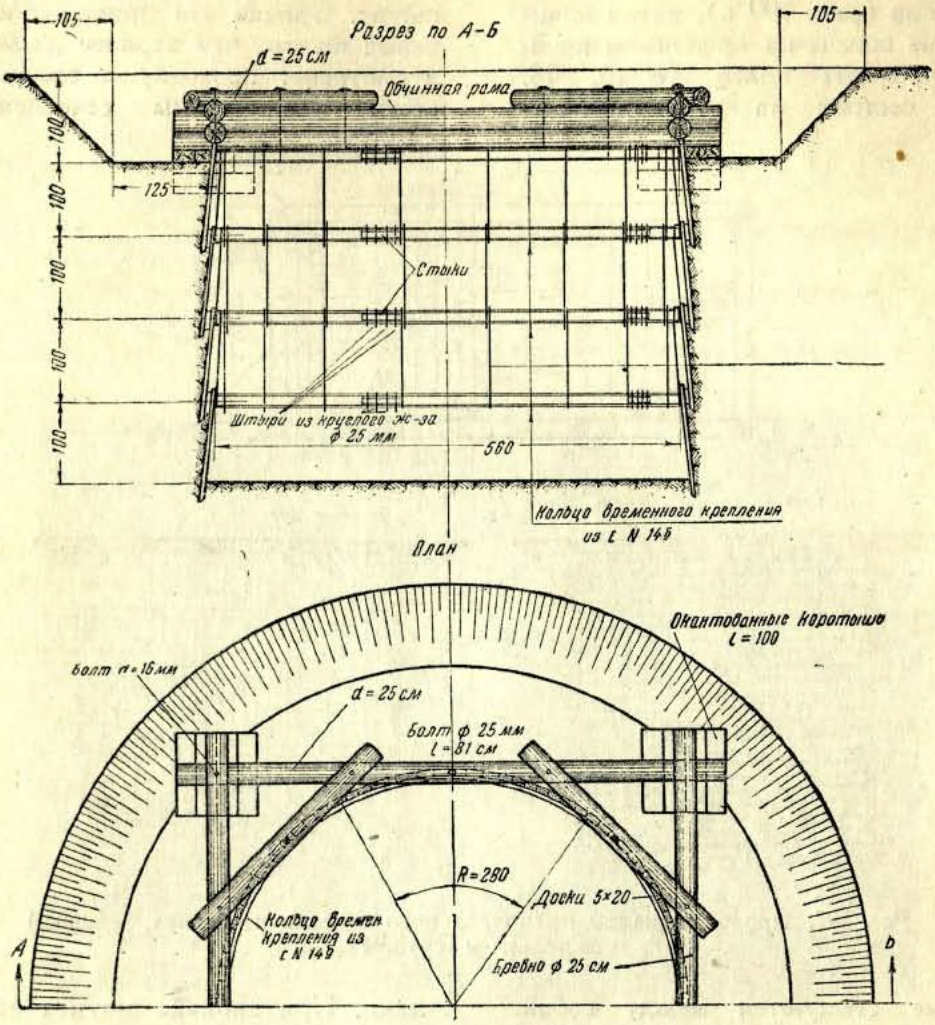


Рис. 198 а. Проходка шахты на временных кольцах

крепления ствола круглого сечения обычно проверяется по формуле Ламэ:

$$R = r\sqrt{\frac{\sigma}{\sigma - 2p}},$$

где p — единичное давление грунта на внешнюю поверхность шахтной крепи (в $кг/см^2$), σ — величина допускаемого напряжения кладки сжатию (в $кг/см^2$), R — внешний радиус ствола шахты (в $м$), r — внутренний радиус ствола шахты (в $м$).

Величина бокового давления на ствол шахты определяется по формуле:

$$p = \gamma H \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right),$$

Необходимо учесть, что бетонное крепление ствола шахты устраняет многие осложнения, выявляющиеся при эксплоатации ствола с деревянной крепью, в виде деформации элементов крепления, перекосов сечения и большого притока воды через ствол шахты.

Порядок производства работ по проходке шахт *обычным методом* в условиях устойчивых пород (глины, мергели и известняки) заключается в проведении следующих основных операций:

а) разработки грунта в забое;

б) погрузки породы в забое и подъема по стволу на поверхность;

в) устройства временного крепления ствола;

г) возведения конструкции постоянной крепи.

а) Разработка грунта в забое

Разработка грунта в забое шахты в плотных породах (глинах, мергелях и слабых известняках) производится при помощи кайл, пневматических отбойных молотков и лопат. В скальных породах и крепких известняках — с применением буровзрывных работ (рис. 200).

Взрывные работы осуществляются циклично, причем за один цикл в забое проводятся нижеследующие операции: бурение шпуров, закладка взрывчатого вещества, взрыв породы, погрузка и подъем породы и устройство временного крепления.

Бурение шпуров в забое ствола производят 2 проходчика, погрузку породы 3—4 проходчика, устройство временного крепления 2—3 проходчика, прием бадей с породой на поверхности 1—2 человека.

При проходе шахт круглого сечения в крепких скальных породах взрывным способом шпуры по забою располагаются по концентрическим кругам, часто с применением пирамидального вруба.

Шпуры, задаваемые по контуру, не должны выходить за проектный профиль выработки вчерне.

Значительный выход шпуров за контур выработки неминуемо приводит к большому перебору профиля и к излишним затратам.

Когда шпуры значительно не доходят до проектного контура, то неизбежны трудоемкие работы по отбойке профиля вручную, что задерживает темпы проходки.

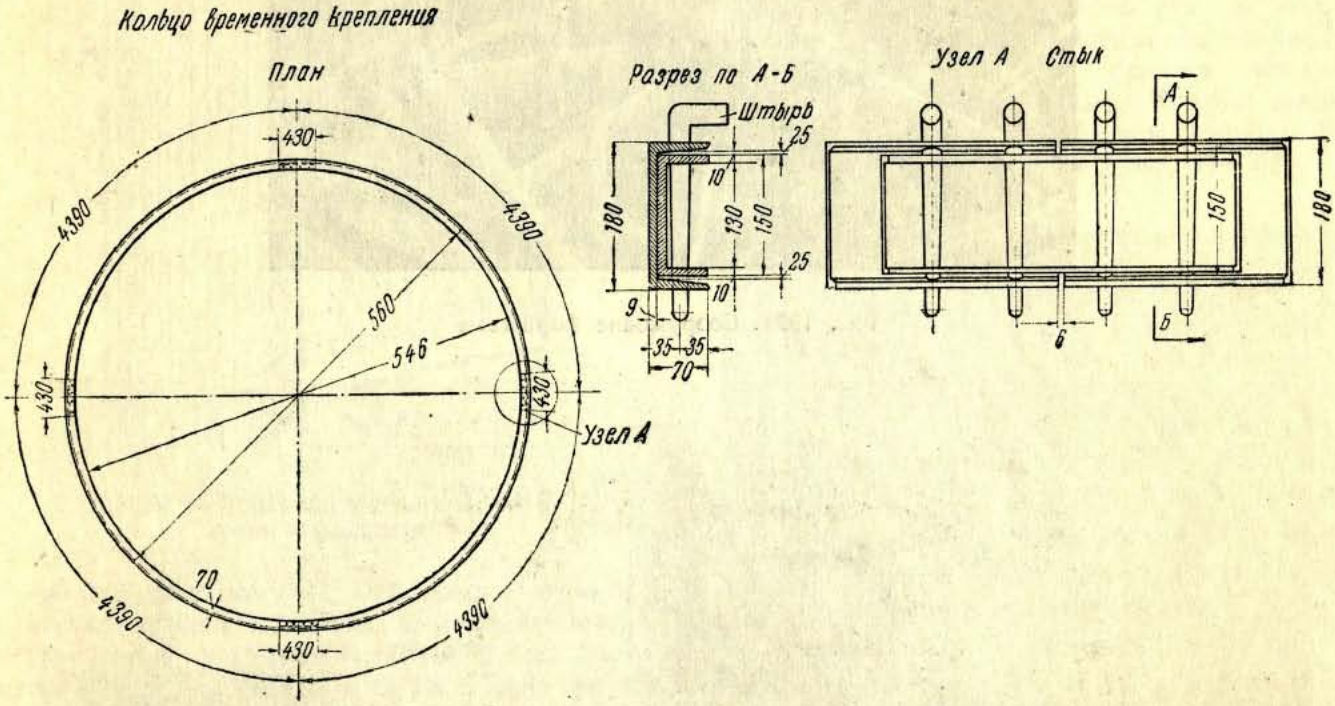


Рис. 198 б. Конструкция кольца временного крепления

Шпуры бурятся на глубину 1,5—2,5 *м*, причем наклон шпуров устанавливается в забое в зависимости от характера напластования, крепости и трещиноватости пород, качества и количества взрывчатого вещества.

б) Погрузка породы в забое и подъем по стволу на поверхность

Погрузка породы в забое производится в бадьях железных, опрокидных и неопрокидных. Емкость бадьи составляет от 0,25 до 1 $м^3$.

Подъем бадьи осуществляется электрической лебедкой мощностью до 1,5 *т* с кра-

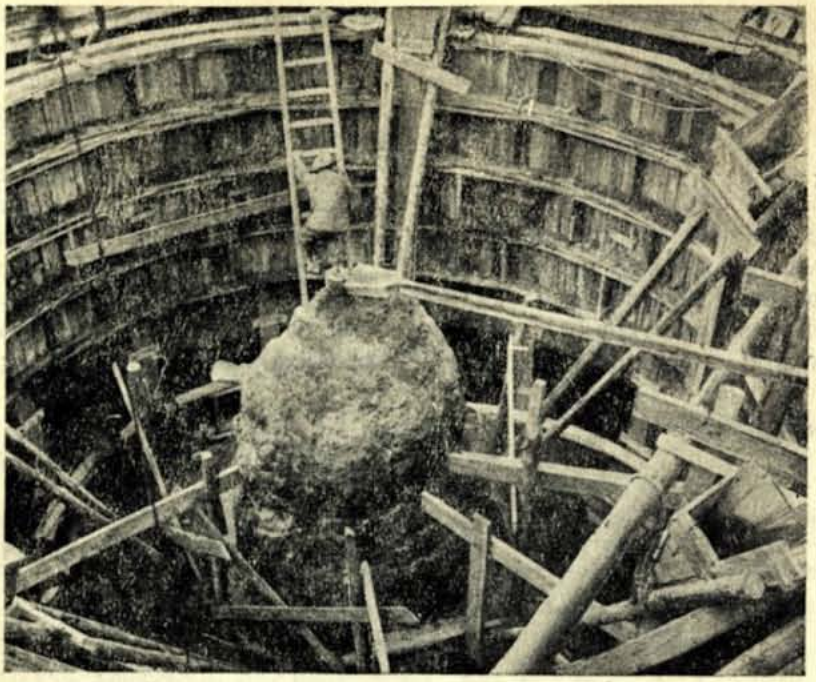


Рис. 199 а. Сооружение форшахты

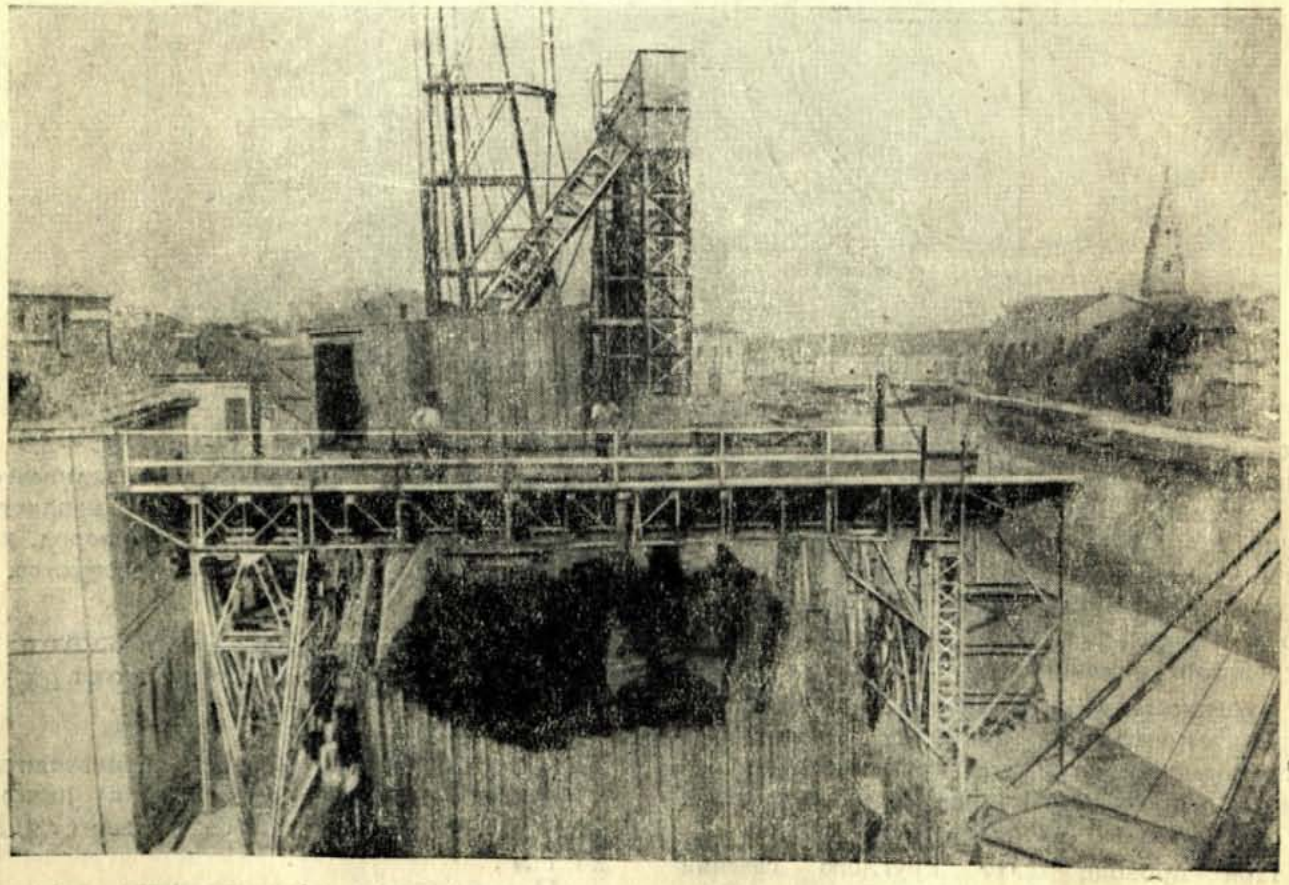


Рис. 199 б. Проходка шахты при шпунтовом ограждении

ном-укосиной, укрепленным на мачте у устья шахты.

При углублении забоя шахт более 20 *м* для устранения раскачивания бадьи при подъеме в стволе устраивают обшитое досками специальное бадьевое отделение.

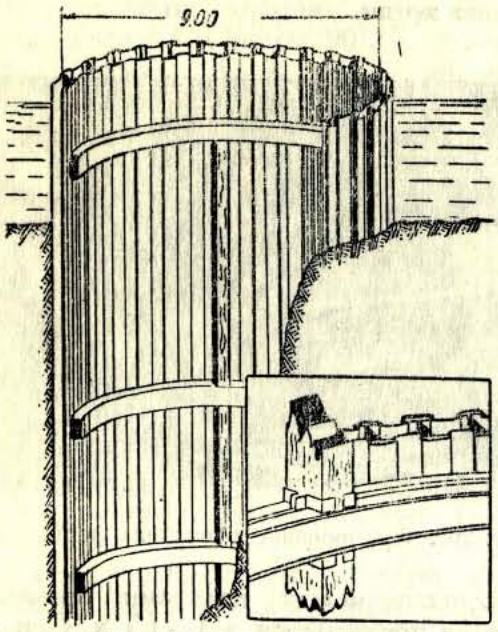


Рис. 199 в. Проходка шахты при шпунтовом ограждении

Устье подъемного отделения ствола, в частности бадейного отсека, должно быть перекрыто и открываться только для пропуска бадьи или другого груза. При этом подъемное отделение на верхней площадке должно иметь надежное ограждение с нерабочих сторон.

Подъем и спуск людей в бадьях по условиям безопасности воспрещается.

Между приемщиком бадей в забое и лебедчиком устанавливается двойная сигнализация — ударная и звуковая.

Зумпф в стволе должен быть расположен обязательно в стороне от бадейного отсека.

Вслед за проходкой забоя в стволе шахты устраиваются лестницы с площадками не реже чем через 4 *м*.

Во избежание несчастных случаев лестницы должны быть расположены так, чтобы исключалась возможность падения людей в отверстие нижерасположенной площадки.

По лестницам воспрещается спуск и подъем людей с инструментами; последние в обязательном порядке должны спускаться и подниматься в бадье.

в) Устройство временного крепления

После выемки породы в забое шахтного ствола на глубину 1—1,5 *м* во избежание вывалов производится установка временного крепления. Последнее состоит из металлических колец и швеллеров и из деревянных затяжек.

При диаметре ствола 5,5 *м* швеллерное кольцо для удобства монтажа его в шахте состоит из четырех сегментов, которые стыкуются в забое при помощи четырех швеллерных накладок. Каждый стык закрепляется четырьмя или шестью железными клинообразными штырями (рис. 198 б).

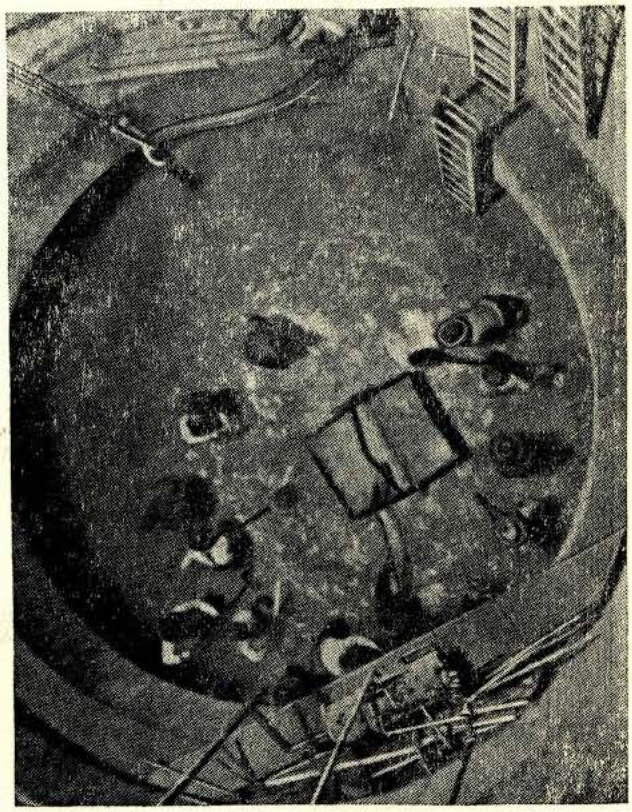


Рис. 200. Проходка шахтного ствола

Швеллерные кольца временного крепления подвешиваются друг к другу снизу на металлических подвесках. Последние, обычно из квадратного 20×20 *мм* или из круглого дюймового железа, бывают прямые или зетообразные (z).

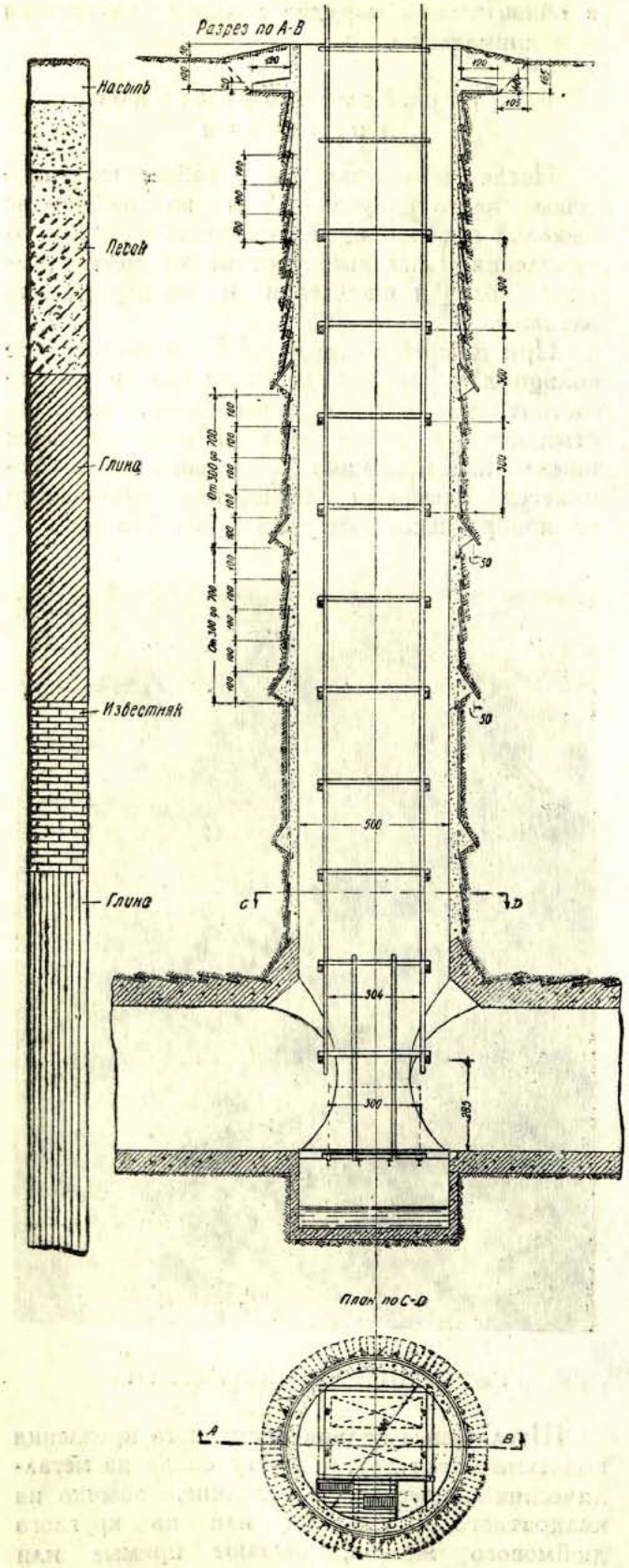


Рис. 201. Конструкция бетонной крепи ствола

Крепление поверхности ствола шахты производится деревянными досками — *затяжками*—толщиной 5—7 *см* и шириной 20 *см*. Затяжки заводятся за швеллерные кольца и тщательно расклиниваются. Недостаточно тщательная расклинка приводит к расстройству временного крепления, а иногда и к обрушению крепи.

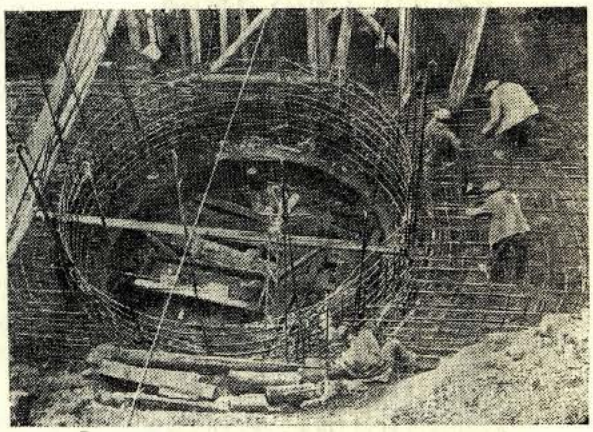


Рис. 202. Армирование воротника форшахты

Расстояние между кольцами временного крепления принимается в 1—1,5 *м*. При проявлении давления пород ставятся промежуточные кольца.

При пересечении небольшой мощности слоя (до 3—4 *м*) водоносных, неустойчивых песчаных грунтов производится проходка с забивной крепью.

В этом случае вместо затяжек за швеллерные кольца временного крепления с помощью деревянных кувалд непосредственно в породу забивают марчеваны, иногда шпунтованные доски.

Таким образом, выборка породы в забое уже производится в огражденном марчеванами контуре, не допускающем выпуска породы. Установка промежуточных колец временного крепления производится с учетом давления слабых грунтов.

г) Возведение конструкции постоянной крепи

После проходки и устройства временного крепления ствола, в зависимости от крепости окружающих грунтов (на участке 4—8 *м* в крепких грунтах и на участке 4 *м* в слабых грунтах), приступают к устройству постоянного крепления ствола шахты из бетона или железобетона (рис. 201).

Толщина бетонной крепи в скальных породах принимается 30 *см*, в мягких грунтах 40—50 *см*.

Предварительно устраивается бетонный опорный башмак — основной венец крепи — с целью передачи веса вышеукладываемой конструкции постоянной крепи на породу.

В устойчивых породах башмак устраивается врубом под углом 90°. В мягких породах башмак ограждается марчеванной крепью, забитой под углом 60°.

Для возможности создания постоянной конструкции шахтной бетонной крепи устраивается деревянная опалубка, состоящая из деревянных кружал и из опалубочных досок толщиной 5 *см*. Кружала составляются из отдельных сегментов, образующих внутреннюю поверхность бетонной крепи, и устанавливаются в стволе для удобства бетонирования на взаимном расстоянии 1,5—2 *м*.

Кружала поддерживаются системой стоек. Бетон опускается в бадье на специальный деревянный настил, с которого и производится укладка бетона за опалубку (рис. 202, 203).

После того как бетон окрепнет, опалубку снимают, и получается готовая конструкция постоянной бетонной крепи, способная воспринять давление окружающих пород и напор подземных вод.

При встрече водоносных пород необходимо вести борьбу с водой. Для этого устраивается шахтный водоотлив (рис. 204). В начале проходки, когда приток воды в забое не превышает 5 $м^3$ в час, воду выдают бадьями, затем переходят на механический водоотлив при помощи электрических насосов.

Для возможности ведения работ по выемке грунта в забое проходят опережающий шурф—зумпф, откуда и производят откачку воды.

Два насоса подвешивают на специальном полке. Один из насосов является действующим, другой — запасным. На поверхности имеется, кроме того, насос аварийного назначения; в случае надобности он может быть спущен для работы в шахту.

Насосы устанавливаются в шахтах на подвесном полке, последний поддерживается канатом лебедки на шахтной поверхности.

Насос имеет гибкий всасывающий шланг, заканчивающийся храпком с металлической сеткой, который опускается в зумпф. Насос устанавливается на расстоянии 5—6 *м* по вертикали от горизонта воды в зумпфе, ограничивающем глубину всаса. С другой стороны насос присоединяется гибким шлангом к водоотливным трубам, идущим к стволу, по которым откачиваемая из забоя вода направляется в водосток.

Во время паления при производстве взрывных работ насосы защищаются специальными щитами или поднимаются на поверхность.

При углублении ствола шахты более 10 *м* необходимо производить искусственное проветривание забоя. Это особенно необходимо при производстве взрывных работ. На поверхности монтируется вентилятор (типа «Сирокко»), и по вентиляционным железным трубам диаметром 300—500 *мм* нагнетается в необходимом количестве свежий воздух.

Освещение забоя должно быть электрическое при напряжении не более 12 *в*. Применение более высокого напряжения в подземных условиях, при мокром забое, может привести к несчастным случаям (поражениям электрическим током).

3. Обычный способ проходки при тюбинговом креплении. Наиболее совершенной является крепь из чугунных тюбингов. Тюбинговое кольцо диаметром 6 *м* состоит из отдельных чугунных тюбингов, сболченных между собой и имеющих канавки для расчеканки свинцом с целью создания водонепроницаемости крепи.

Крепление ствола тюбингами по сравнению с бетонным креплением имеет следующие преимущества:

а) сразу по проходке ствола достигается водонепроницаемость оболочки из чугунных тюбингов и отпадает необходимость в специальной гидроизоляции и железобетонной рубашке;

б) упрощается процесс производства работ, так как укладываются сразу готовые элементы ствола шахты без предварительного временного крепления;

в) чугунные тюбинги позволяют почти полностью механизировать процесс возведения крепи.

При углублении ствола и выемке породы по глубине на 25 *см* больше ширины кольца тюбингов стадия временного крепления отпадает; кольца монтируются в стволе подвеской снизу к ранее смонтированной колонне тюбингов.

Конструкция тюбингового шахтного ствола, проходимого обычным способом, состоит из следующих элементов:

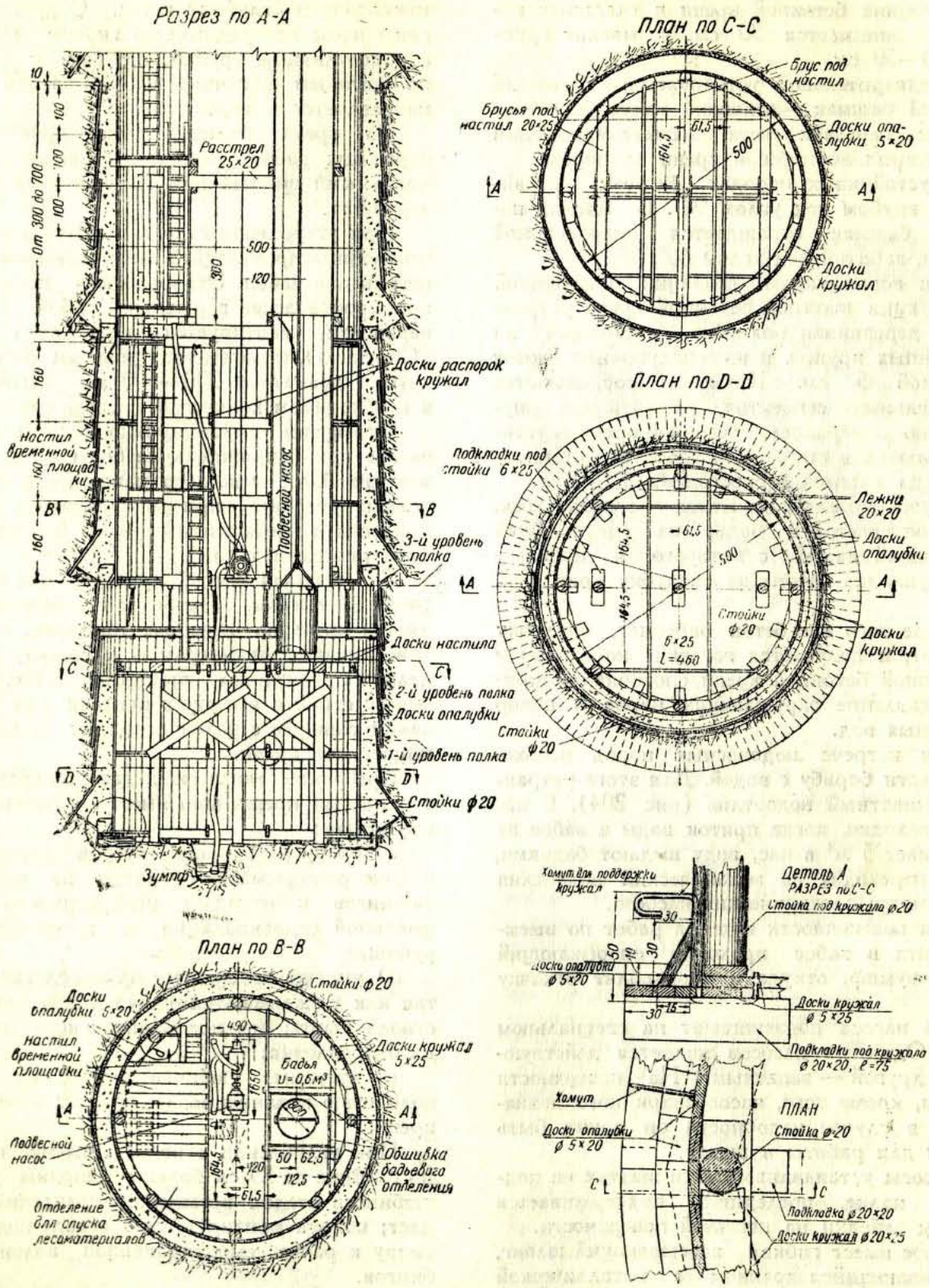


Рис. 203. Бетонирование шахтной крепи

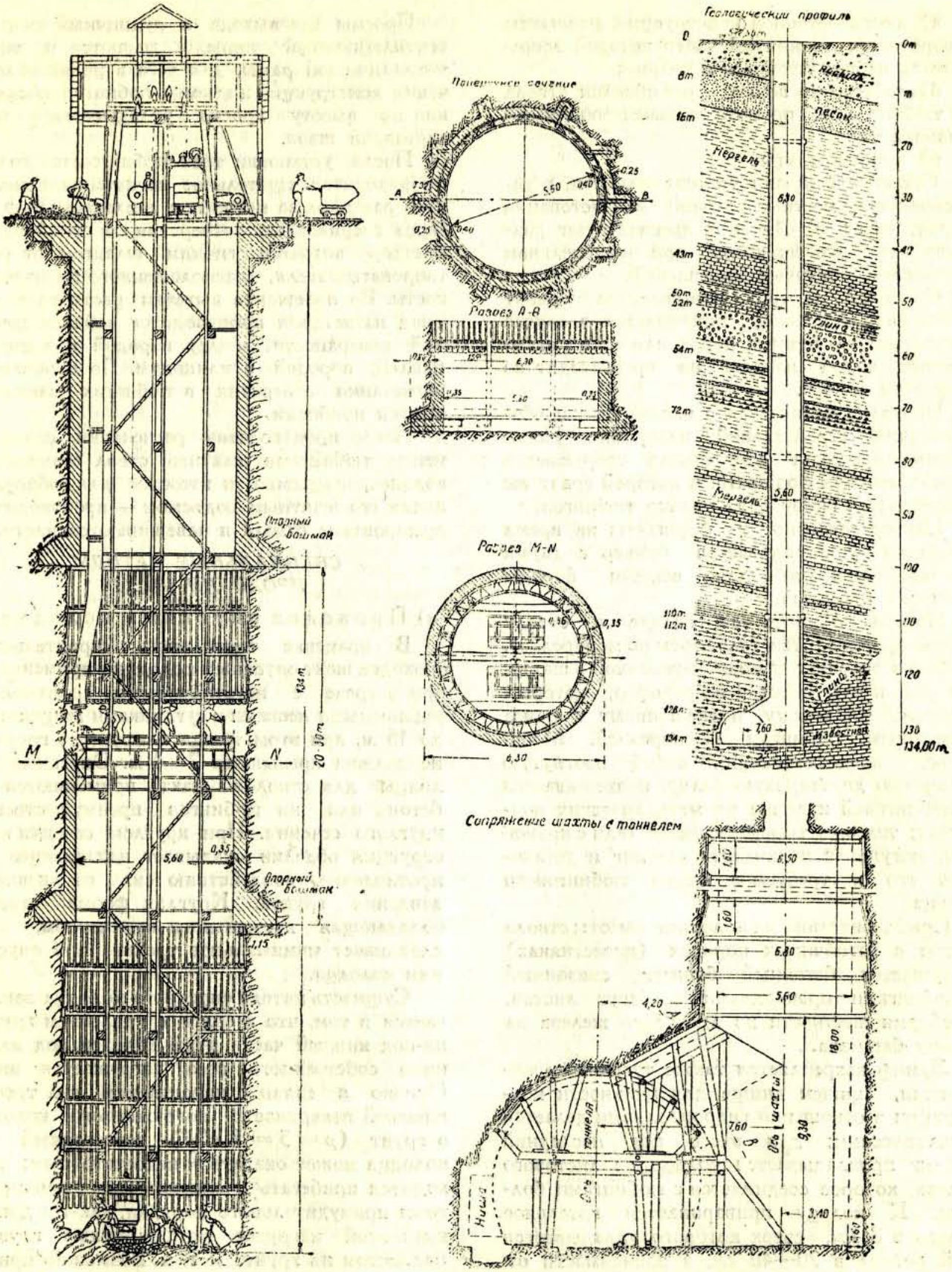


Рис. 204. Хаунштейнский тоннель (проходка вентиляционного шахтного ствола)

а) железобетонной конструкции форшахты с воротником, в нижней части которой закрепляется первое тюбинговое кольцо;

б) собственно конструкции обделки ствола из тюбингов с промежуточными опорными башмаками;

в) зумпфа шахты.

Опорные башмаки устанавливаются, в зависимости от местных условий напластования пород, через 10—15 *м* и препятствуют разрыву тюбинговых колец при значительном натяжении болтовых скреплений.

Обычный способ производства работ путем подводки колец применяется в случае отсутствия плывунных пород или если насыщенные водой породы не превосходят по мощности 3—4 *м*.

Проходка начинается с планировки и оборудования строительной площадки. После закрепления места для ствола сооружается железобетонная форшахта, в которой сразу же закрепляется снизу одно кольцо тюбингов.

Непосредственно у форшахты на время проходки устанавливается бункер с двумя кранами-укосинами для выдачи породы и спуска тюбингов.

Подача тюбингов со склада к стволу шахты производится тельфером по монорельсу. Тюбинги опускаются краном-укосиной в шахту, где они перецепляются на тельфер, который движется по кольцу, подвешанному к ранее уложенным тюбингам (монорельс). Монорельс, представляющий собой изогнутую кольцевую двутавровую балку, подвешивается к тюбинговой колонне на металлических подвесках; тележка тельфера имеет тали с крючьями, могущими подхватить тюбинг и установить его в требуемое место тюбингового кольца.

Приблизительно на половине высоты ствола шахты в устойчивых породах (известняках) сооружается бетонный башмак, связанный с тюбингами прокладками из двух листов, с ребрами жесткости из листового железа на высоту башмака.

Зумпф закрепляется также чугунными тюбингами, причем днище для цельности конструкции в отношении гидроизоляции делается металлическим; для этого под последний тюбинг прокладывается кольцо из листового железа, которое соединяется с тюбингами болтами. К кольцу приваривается котельное железо в 8 *мм*, сверх которого укладывается слой бетона в 20—40 *см*, в зависимости от величины гидростатического напора.

Проемы для выхода в рудничный двор и вентиляционный тоннель делаются в виде металлической рамы, для чего в целях облегчения конструкции и выемки тюбингов последние на высоту проема укладываются без перевязки швов.

После установки трех тюбинговых колец производится тщательное нагнетание цементного раствора за крепь под давлением 3—5 *ат* через специальные отверстия в тюбингах. Раствор подается гибким шлангом от растворонагнетателя, расположенного на поверхности. Во избежание вытечки раствора в период нагнетания производится забивка щековой поверхности, между породой и крепью, паклей, породой и клиньями. По окончании нагнетания отверстия в тюбингах завинчиваются пробками.

После производства расчеканки свинцом между тюбингами шахтный ствол становится водонепроницаемым и готовым для оборудования его шахтным подъемом — производится армирование ствола и навешиваются клети.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРОХОДКИ ШАХТ

а) Проходка опускным колодцем

В практике тоннельного строительства проходка шахт опускным колодцем применяется при встрече с неустойчивыми грунтами — водоносными песками и суглинками мощностью до 15 *м*, при этом толща плывунных грунтов не должна превышать 2—4 *м*. Опускные колодцы для стволов шахт применяются из бетона или из тюбингов преимущественно круглого сечения. При круглом сечении конструкция обделки оказывает надлежащее сопротивление воздействию сил от внешнего давления грунта. Круглая форма ствола, обладающая наименьшим периметром, обусловливает минимальное трение при опускании колодца.

Сущность метода опускного колодца заключается в том, что в связи с удалением грунта из-под нижней части ножа колодец под влиянием собственного веса погружается вниз. Однако в связи с нарастанием сил трения внешней поверхности погружаемого колодца о грунт ($\rho = 3 = 5$ *т*/*м*^{2}) собственный вес колодца может оказаться недостаточным; приходится прибегать к специальным мероприятиям принудительного порядка, как-то: дополнительной нагрузке металлическим грузом, балластом из грунта и т. п. Возможно применение метода задавливания колодца при по-

мощи гидравлических домкратов, упирающихся через системы балок в форшахту. Последний прием с успехом применен при проходке стволов шахт на 4-й очереди строительства Московского метрополитена.

С целью уменьшения трения при погружении колодца применяется подмыв его. В обделке последнего закладывается система трубок, через которые подается вода, играющая роль смазки и способствующая погружению колодца. Эффект подмыва сказывается уже через полчаса после подачи воды за обделку колодца, и последний начинает погружаться. Собственно подмывное устройство состоит из вертикальных трубок, подающих воду в ряд горизонтальных колец, расположенных через 4—5 *м* по шахтному стволу и снабженных соплами, выходящими под углом 50° с внешней поверхности колодца (рис. 205). Возможно и нагнетание через трубки сжатого воздуха.

Такой прием в определенных случаях может дать некоторый эффект.

На основании практики проходки стволов на Метрострое рекомендуется с целью обеспечения достаточного собственного веса колодца принимать при диаметре ствола 5 *м* толщину стен 70 *см*.

Во избежание разрыва стен в процессе опускания колодца конструкция последнего армируется двадцатимиллиметровыми железными тяжами, размещенными по периметру ствола через 25 *см* и связанными восьмимиллиметровой горизонтальной кольцевой арматурой также через 25 *см*.

Нож опускного колодца рекомендуется металлический с углом заострения 30°. По мере опускания колодца производится наращивание его с применением стационарной опалубки, сборно-разборной или подвижной опалубки.

В первом случае, при применении стационарной опалубки, состоящей из кружал и досок, погружение колодца осуществляется вместе с опалубкой. При этом следует обращать особое внимание на тщательность устройства внешней опалубки, которую надлежит острогать с целью уменьшения силы трения о грунт.

Сборно-разборная опалубка состоит из ряда деревянных щитов или металлических секций, сбалчиваемых между собой по кружалам. Подвижная опалубка опускного колодца высотой до 1,5 *м* представляет собой два концентрически расположенных цилиндра, образующих внешнюю и внутреннюю поверхность бетонируемого колодца. Подъем опалубки производится *джеками* — винтовыми домкратами, укрепленными на *иоках* — П-образных рамах, укрепленных собственно на конструкции внешней и внутренней опалубки.

Выемка грунта в забое производится из середины с оставлением «завалинки» по контуру ножа. Затем последнюю равномерно выбирают последовательно участками, оставляя лишь отдельные секторы, в которые колодец врезается своим ножом в момент посадки.

Выдача породы из забоя осуществляется бадьевым подъемом или кранами-укосинами в бункеры.

По мере погружения колодца производится его наращивание бетонированием конструкций. Работы в забое ведутся с непрерывным водоотливом, с устройством опережающего зумпфа.

В практике применяется и метод выемки породы грейфером с затопленным «слепым» забоем; но такой метод связан с выпуском избыточного объема грунта и может привести к осадкам поверхности вблизи ствола, поэтому рекомендуется вести работы при затопленном забое (рис. 206).

Метод опускного колодца нашел широкое применение при проходке шахтных стволов 3 и 4-й очереди строительства Московского метрополитена.

Применяя конструкции опускного колодца из чугунных тюбингов, принимают меры, предупреждающие разрыв и скручивание тюбингового ствола при его опускании, устройством специальных тяжей из профильного железа. Наращивание ствола производится монтажом тюбингов посредством тельфера, направляемого по кольцевому монорельсу, расположенному по контуру ствола над устьем последнего.

После проходки колодцем неустойчивых пород мощностью 12—18 *м*, в зависимости от местных геотехнических условий, врезавшись ножом колодца в водоупор, дальнейшее углубление ствола в коренных устойчивых породах производят обычным способом на кольцах или подводкой тюбингов снизу.

В тех случаях, когда в процессе проходки опускным колодцем мощность плывуна оказывается более значительной, чем это предполагалось (> 5 *м*), необходимо переходить на специальные методы работ, в частности на проходку под сжатым воздухом.

При пересечении мощных слоев плывунов более 10 *м* описанные выше приемы являются

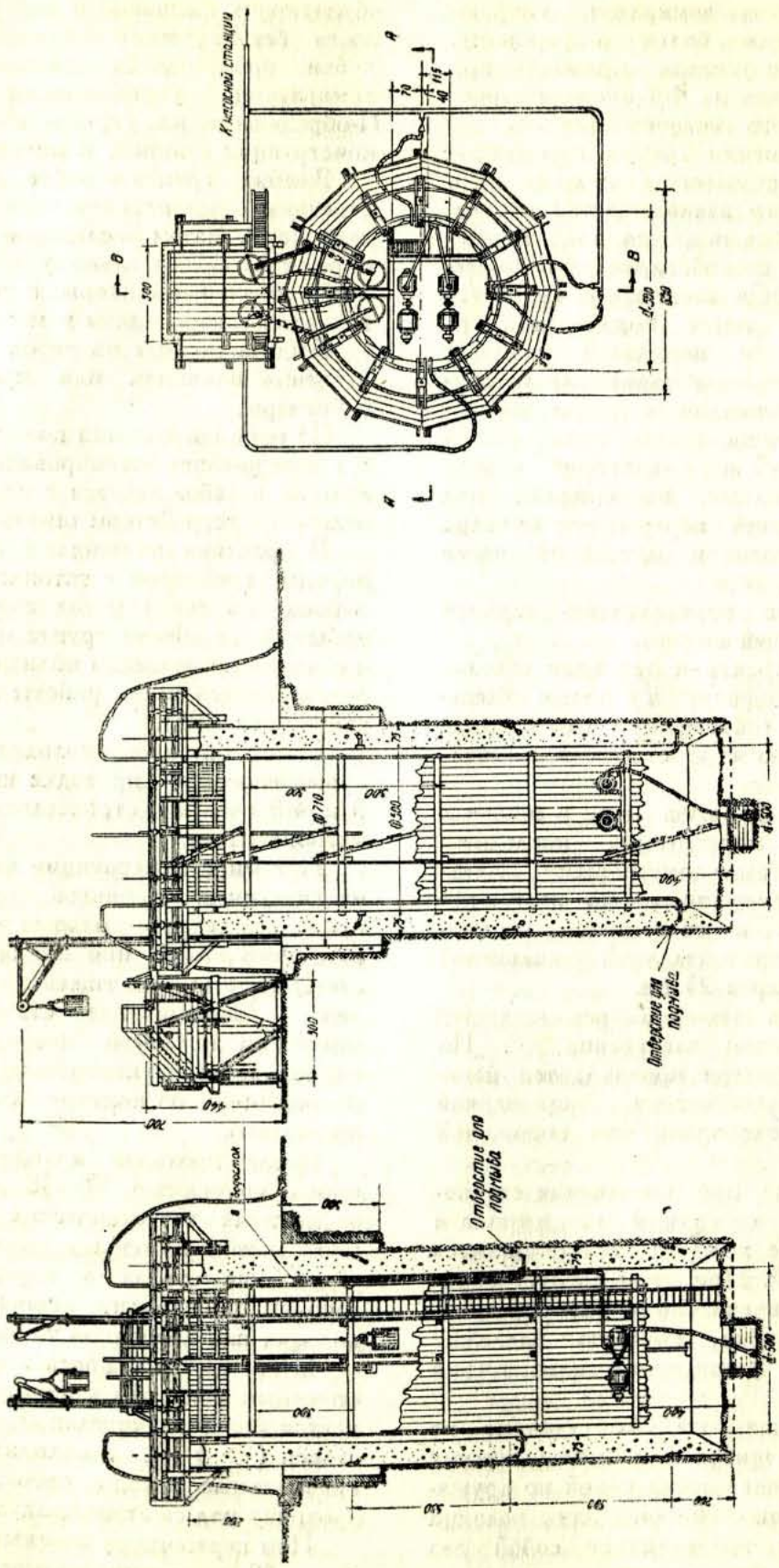


Рис. 205. Проходка опускного колодца с подмывным устройством

уже недостаточными и требуют применения специальных методов в виде проходки шахт под сжатым воздухом, замораживания, тампонажа.

При проходке шахтных стволов 4-й очереди строительства Московского метрополитена широкое применение нашел способ задавливания тюбинговой опускной крепи при помощи гидравлических домкратов. При наличии водоносной песчаной толщи до 10—12 *м*, отдающей воду, когда применением искусственного понижения уровня грунтовых вод или при работе с опережающим зумпфом нельзя ожидать выплывов из-под ножа задавливаемого колодца, указанная система дает определенный технико-производственный эффект.

До уровня грунтовых вод закладывается мощной конструкции железобетонная форшахта при толщине стен до 1,8 *м*, на глубине 3—8 *м*.

Форшахта снабжается воротником из расчета, что собственный вес форшахты и грунтовая засыпка над воротником обеспечивают возможность задавливания колодца. Домкраты упираются, с одной стороны, в консольные металлические балки (⌶ № 55), заделанные в форшахту, и, с другой, через прокладки в тюбинговую крепь.

Нижнее тюбинговое кольцо снабжается металлическим ножом, срезающим грунт по мере задавливания колодца.

Практически при диаметре ствола 6 *м* двенадцатиметровую толщу водоносных песков пересекали колодцем при помощи 6 гидравлических домкратов мощностью каждый по 100 *т*. Наращивание тюбингов производилось сверху, по мере задавливания крепи.

б) Проходка шахтных стволов под сжатым воздухом

Проходка шахт под сжатым воздухом может быть осуществлена одним из следующих приемов: проходкой опускным кессоном или проходкой со стационарным потолком.

Сущность работы по проходке шахт в водоносных, плывунных грунтах под сжатым воздухом заключается в том, что нагнетанием в камеру ствола сжатого воздуха вытесняется грунтовая вода из забоя, чем достигается возможность производства земляных работ практически в сухих условиях. Величина воздушного давления в рабочей камере кессона должна соответствовать величине гидростатического напора в зависимости от характеристики физико-механических свойств пересекаемых грунтов.

Величина максимального воздушного давления, допустимая для человеческого организма, не должна превышать 4 *ат*, что соответствует сорокаметровому напору грунтовых вод.

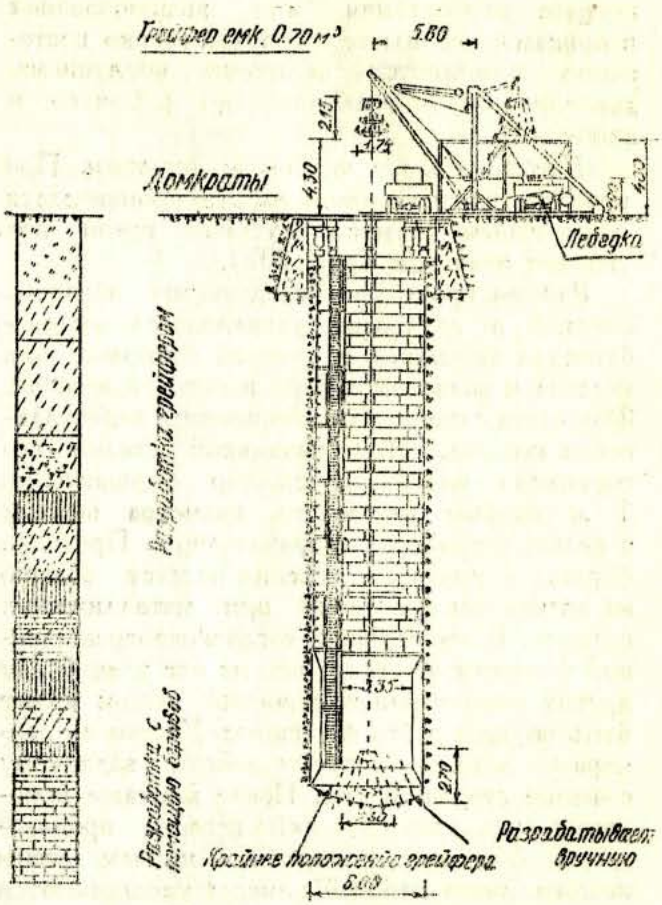


Рис. 206. Проходка опускным колодцем с помощью грейфера

Для производства работ по проходке шахтного ствола под сжатым воздухом необходимо иметь основное оборудование в виде компрессорной станции для подачи воздуха в рабочую камеру и шлюзовые аппараты с шахтными трубами. Последние служат для передвижения людей, транспорта породы и материалов из зоны повышенного в зону нормального давления, без потери давления воздуха (процесс шлюзования).

Рабочая камера образуется обделкой ствола шахты и потолком. На последнем укреплены шахтные трубы и шлюзовые аппараты, через потолок пропущены трубы для подачи сжатого воздуха, телефонные провода и электрокабели.

Грунт, вынимаемый из забоя кессона, грузится в бадьи, поднимаемые по материальному отделению шахтных труб, и передается через материальный шлюз. Рабочие поднимаются по лестницам шахтной трубы и шлюзуются через людской прикамерок.

В зависимости от того, происходит ли процесс шлюзования или вышлюзования в прикамерках шлюза, соответственно постепенно изменяется величина воздушного давления от нормального до рабочего и наоборот.

Проходка шахт опускным кессоном. При проходке шахт кессоном работы производятся применением системы опускной крепи под сжатым воздухом (рис. 207).

Работы протекают следующим образом: сначала в котловане устраивается железобетонная форшахта, в которой собирают нож кессона и возводят камеру и потолок кессона. Форшахта служит для обеспечения вертикальности кессона. При начальной стадии его опускания назначают диаметр форшахты на 1 *м* больше наружного диаметра кессона с целью устройства направляющих. Проходка форшахты круглого сечения ведется обычно на временном креплении при металлических кольцах. В тех случаях, когда в непосредственной близости от ствола шахты нет зданий или других ответственных строений, кессон может быть опущен и без форшахты. Кессон по размерам должен соответствовать заданному сечению ствола шахты. После монтажа шлюзовых аппаратов опускание кессона производится обычным порядком, причем стены кессона выше рабочей камеры наращиваются сверху по мере его опускания. При сооружении Московского метрополитена значительное количество шахт, пересекавших мощные плывуны, было пройдено кессонами. При диаметре круглого кессона в свету, равном 5 *м*, толщина стенок кессона для получения достаточного собственного веса кессона была принята в 80 *см*, толщина стенок рабочей камеры 90 *см*; высота рабочей камеры была 3,5 *м*. В отличие от кессонов, применяемых при сооружении мостовых опор, кессоны для шахтных стволов должны иметь потолки, которые бы легко разбирались вслед за опусканием кессона для возможности немедленного оборудования ствола шахты клетьевым подъемом или скипами. Потолок кессона устраивается в этом случае из двутавровых балок с бетонным заполнением. Эта конструкция относительно быстро поддается удалению. Потолок рассчитывается на двухстороннюю нагрузку: с одной стороны (сверху) на водяной или земляной балласт, при отсутствии давления сжатого воздуха в рабочей камере кессона, и с другой стороны (снизу) — на противоположное воздушное давление снизу вверх. Стены кессона снабжаются тяжами (толщиной 36 *мм*), которые рассчитываются на удержание нижней части кессона в случае отрыва его от верхней части ствола, могущей быть сильно зажатой плывунами.

Учитывая возможность отклонения кессона шахты в процессе его опускания от вертикали, обычно диаметр кессона принимают на 0,3—0,5 *м* больше проектного диаметра ствола.

Проходка шахт опускным кессоном при тюбинговом креплении. После фиксирования места для ствола шахты сооружается железобетонная форшахта и устраивается кольцевой монорельс, идущий от склада тюбингов. Непосредственно у форшахты на время проходки устанавливается бункер с двумя кранами-укосинами (рис. 208).

На дне форшахты собираются нож кессона и первые семь колец. Тюбинговую колонну усиливают тяжами первого яруса в количестве 17 шт. из рельсов. Затем устанавливаются арматура, балки потолка кессона и производится бетонирование рабочей кессонной камеры внутри собранной чугунной колонны.

До уровня грунтовых вод проходка ведется без сжатого воздуха. После достижения уровня воды устанавливаются шлюзовые аппараты и начинается опускание кессона под сжатым воздухом.

Так как по мере проходки увеличивается сила трения, то при опускании приходится наращивать усилительные тяжи ярусами, постоянно увеличивая их сечение по ярусам. В каждом ярусе на тяжах закрепляются металлические полки, создающие дополнительную нагрузку, необходимую для обеспечения погружения кессона в грунт. В среднем на глубину проходки 20 *м* требуется установка не менее четырех полков.

Если позволяют условия, кессонная камера опускается до зумпфа, потолок достигает уровня откаточных путей в рудничном дворе и в дальнейшем служит нижним приемным полком.

Проходка шахт со стационарным потолком. В то время как при опускании кессона рабочая камера имеет постоянный объем и

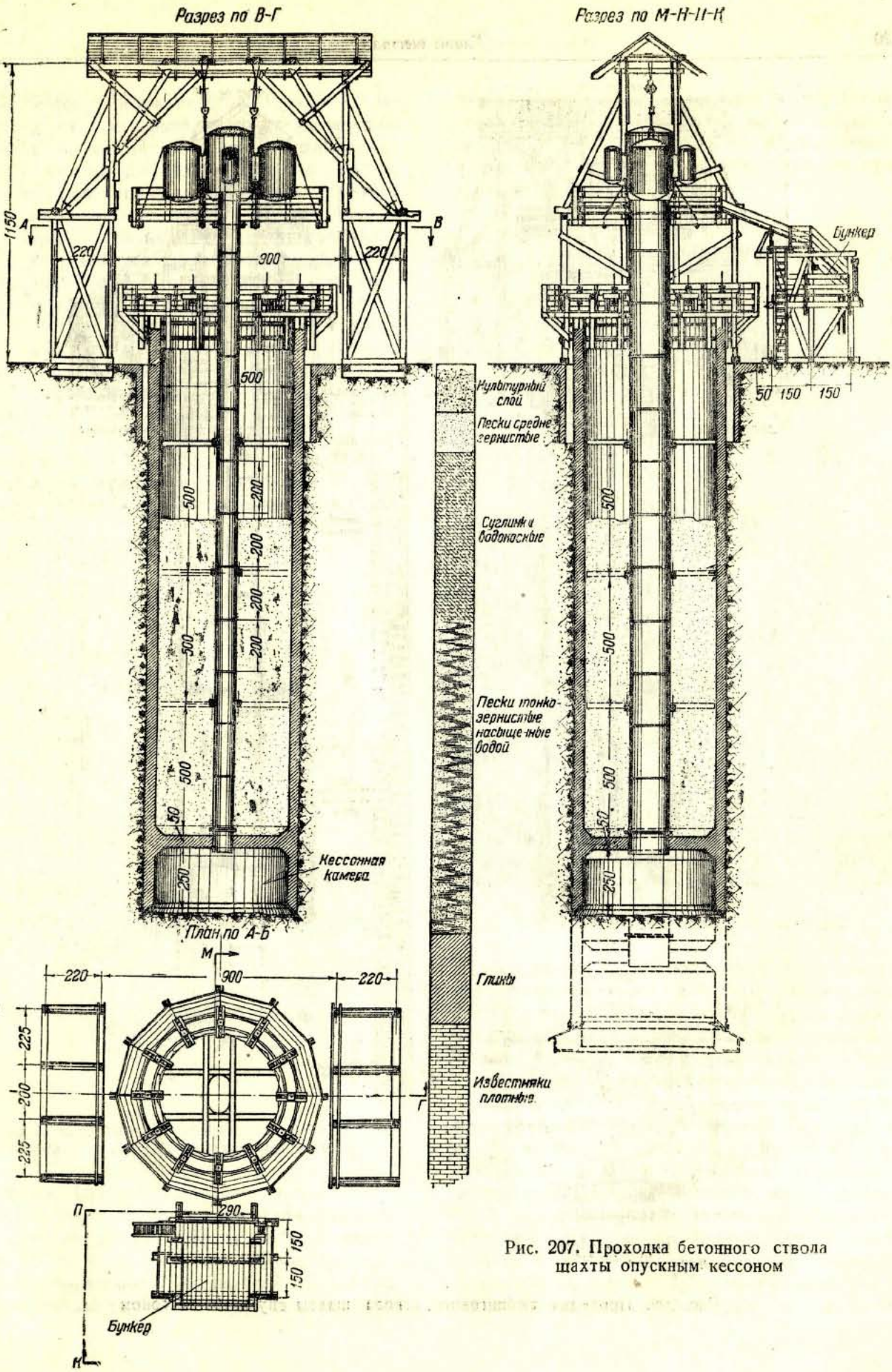


Рис. 207. Проходка бетонного ствола щахты опускным кессоном

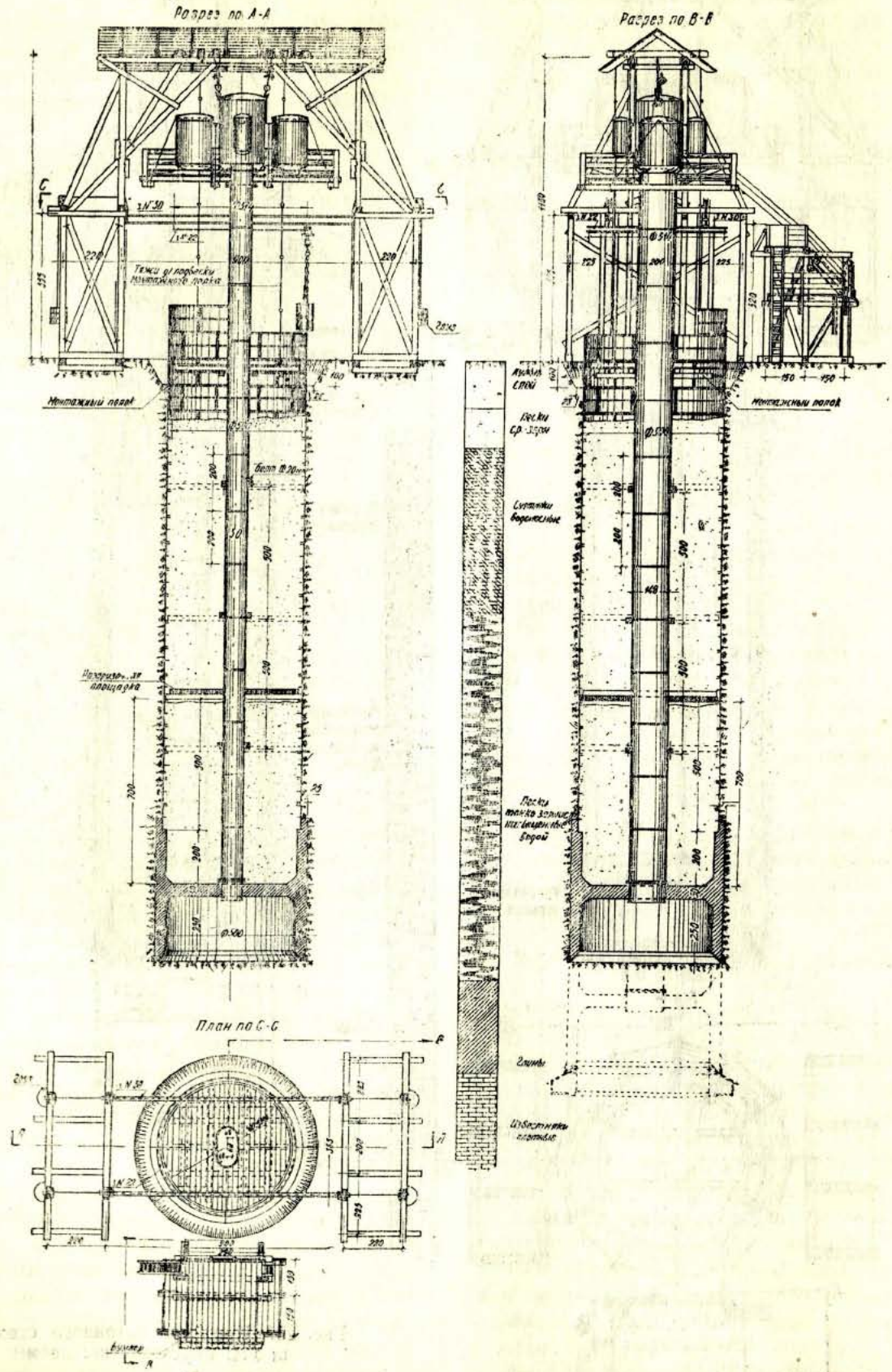


Рис. 208. Проходка тюбингового ствола шахты опускным кессоном

потолок кессона опускается по мере заглубления его ножа, при проходке со стационарным потолком последний остается неподвижным, и работа по проходке проводится под сжатым воздухом, при увеличении объема рабочей камеры в соответствии с углублением забоя шахты. При работе по этому методу предварительно устраивается форшахта, в которой заделывается потолок, рассчитанный на максимальное воздушное давление снизу вверх (рис. 209). В потолке заделываются шлюзовые аппараты и дается сжатый воздух, который, отжимая воду, предоставляет возможность вести проходку обычным способом на временных металлических кольцах с последующим возведением постоянного бетонного крепления (рис. 210). Углубление шахты производится на ограниченную величину в 1,5—2 *м* при немедленной бетонировке конструк-

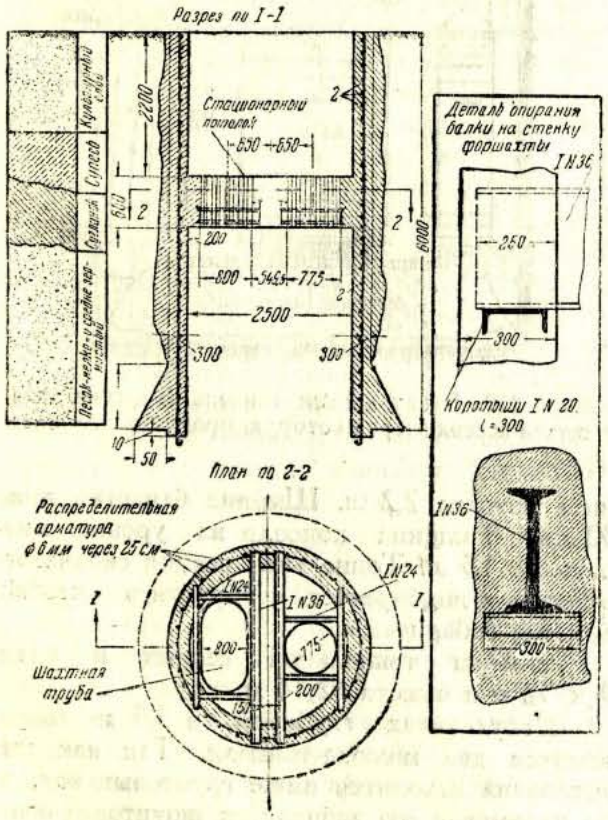


Рис. 209. Конструкция стационарного потолка при проходке ствола под сжатым воздухом

ции ствола. Проходка под сжатым воздухом имеет, однако, свои пределы применимости. В тех случаях, когда слабые породы залегают слишком глубоко, причем гидростатическое давление превышает 40 *м*, дальнейшие работы не представляются физически возможными для человека. При залегании мощных пластов слабых пород при большом гидростатическом давлении ($H > 40$ *м*) прибегают к применению других специальных методов проходки.



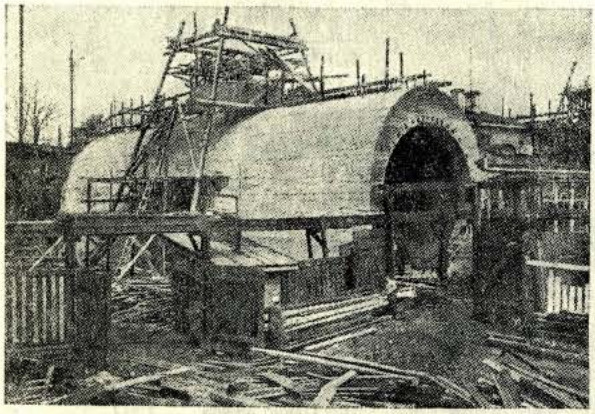
Рис. 210. Монтаж шлюзового аппарата

Основные недостатки метода проходки под стационарным потолком заключаются в том, что в зоне сжатого воздуха, кроме земляных работ, приходится осуществлять временное крепление, а равно бетонные работы по возведению потоянной крепи. Кроме того, в связи с непрерывным увеличением объема рабочей камеры по мере углубления ствола расход сжатого воздуха увеличивается.

При заглублении кессона в устойчивые породы вследствие значительного трения появляются большие затруднения в дальнейшем опускании кессона. В этом случае кессон останавливается. Под нож кессона подводят бетонный башмак. Дальнейшее углубление ведут на временном креплении при металли-

ческих кольцах обычным способом. В случае обнаружения выклинивания слабых пород или значительного притока вод, требующих применения сжатого воздуха, принимают потолок кессона за стационарный и продолжают углубление ствола под сжатым воздухом.

Опускание кессонов-тоннелей, сопряженных с шахтными стволами (из практики Метростроя). Для открытия фронта работ по сооружению двух однопутных тоннелей в условиях водоносных и плывунного характера грунтов щитами под сжатым воздухом возможно применить систему кессонов-тоннелей, сопряженных с шахтными стволами.



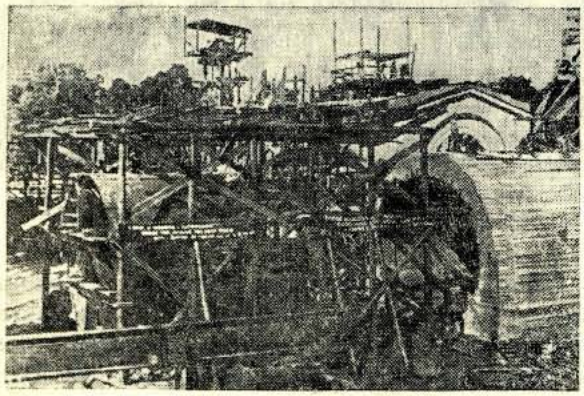


Рис. 211 а, б. Секция кессона-тоннеля на поверхности

Перед началом проходки щитами обычно требуется сооружение щитовых монтажных камер. Ввиду неблагоприятных геологических условий в месте расположения шахт (наличие плывунов и сильно насыщенных водой пород) создать камеры для монтажа щитов горным способом чрезвычайно трудно; поэтому применяется система опускного кессона-тоннеля (рис 211 а, б).

Рабочая камера кессона и тоннельная секция составляют монолитную железобетонную конструкцию.

Рабочая камера кессона обычной конструкции со сплошным потолком толщиной 1,2 *м*. Высота рабочей камеры от кромки ножа до

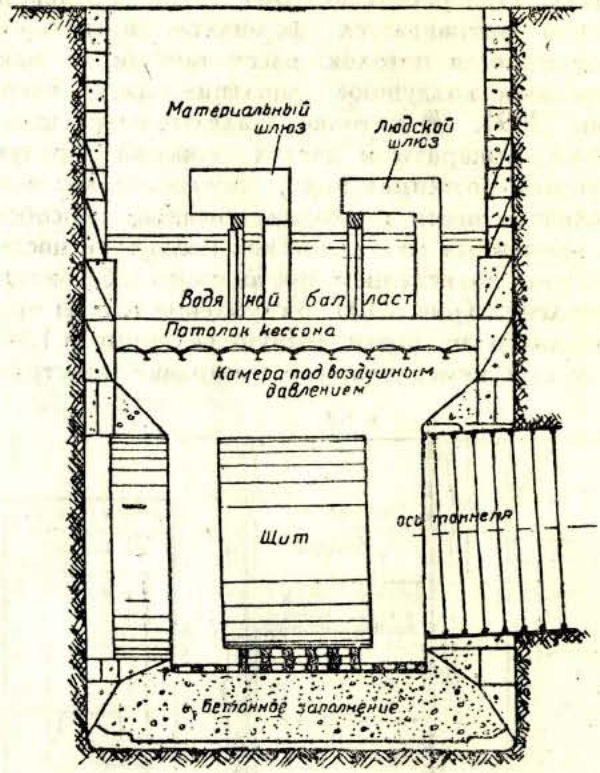


Рис. 212. Блекуэльский тоннель (вертикальная шахта-кессон, через которую пропускается щит)

низа потолка 2,2 *м*. Ширина банкетки ножа 30 *см*. Толщина консоли на уровне низа потолка 1,5 *м*. Тоннельная секция сводчатого очертания подбирается, сообразуясь с необходимыми габаритами.

Размеры тоннельной секции в плане 9×32 *м* и высота 12,14 *м*.

В котлованах глубиной в 3,5 *м* сооружаются два кессона-тоннеля. Так как низ котлована находится ниже грунтовых вод, то по периметру его забивается шпунтовое ограждение. В котловане производится установка опалубки и арматуры, после чего бетонируется кессонная часть длиной 32 *м*.

Два щита вместе с эректорными тележками помещаются в камерах тоннельных секций и опускаются вместе с ними до проектной отметки.

Торцовые стены устраиваются разборными; в оставленные гнезда тоннельной сек-

ции закладываются двутавровые балки (⌶ № 45), к полке двутавра прибалчивается деревянный брус 20×20 *см* для подшивки досок. Вся стена тщательно конопатится.

Когда работы по оборудованию тоннельных щитов и заделке торцовой стены закончены, в кессонную камеру подается сжатый воздух. После того как тоннельная секция (вес с оборудованием $P = 3\,000$ *т*) снята с подкладок, нож кессона врезается в грунт на глубину 50 *см*.

Верхняя часть тоннельной секции соединяется с вертикальным стволом, имеющим внутренний диаметр 4,5 *м*. Так как опускание производится под сжатым воздухом, каждая тоннельная секция снабжается металлическими шлюзовыми аппаратами.

Шахтные трубы пропускаются через потолок тоннельных секций и через потолок рабочей камеры кессона. Кроме шахтных труб, заделываются еще специального типа материальные трубы, по одной на каждый ствол.

После опускания тоннельных секций до проектной отметки рабочие камеры кессонов заполняются бутовой кладкой на цементном растворе; при этом оставляется зумпф сечением 10×6 *м*. После этого сжатый воздух подается в щитовые камеры, для чего шахтные трубы, находящиеся в щитовой камере, разбираются. Затем разбираются торцовые стены щитовых камер, щиты вступают в работу по проходке тоннелей.

После проходки щитами 30 *м* от ствола в тоннелях сооружаются шлюзовые перегородки и начинается горизонтальная проходка под сжатым воздухом.

* * *

Для строительства подводных тоннелей Московского метрополитена в неустойчивых, плывунных породах на 3-й очереди строительства был применен метод опускания крупных шахтных стволов с выпуском специально реконструированных щитов на трассу, давший определенный технико-производственный эффект.

Сущность примененного метода производства работ заключается в следующем. Непосредственно по оси трассы закладывается шахтный ствол круглого сечения диаметром 8,5 *м*. На высоте 8,3 *м* от потолка рабочей камеры закладывается конструкция специальной горизонтальной диафрагмы, рассчитанной на максимальное давление в 3 *ат*. Специально реконструированный щит с двумя горизонтальными и одной вертикальной перегородкой монтируется непосредственно на дне шахты (отметка потолка рабочей камеры).

Положение аванбека щита на дне шахты определяется с учетом выпуска щита на трассу по требуемому направлению. С целью максимального уменьшения диаметра шахты щит был реконструирован, причем рука эректора перенесена на корпус щита при гидравлическом приводе, что создало весьма компактную конструкцию щитового агрегата. После монтажа и оборудования щита в условиях нормального атмосферного давления монтируется горизонтальная шлюзовая диафрагма и в образуемую камеру подается сжатый воздух. По кольцевому контуру тоннеля разбирается кладка, замурованная в конструкции обделки ствола, и щит выпускается на трассу. После проходки щитом под сжатым воздухом 30 *м* устраивается перегородка со шлюзами непосредственно в тоннеле. Далее демонтируется диафрагма в стволе, опускается второй щит, который аналогично выпускается в противоположную сторону на трассу плывунного участка.

Таким образом 4 щита были выпущены на трассу плывунных участков подводных тоннелей без специальных щитовых камер и без применения специальной конструкции кессонных тоннельных секций. Аналогичным способом был выпущен на трассу из шахтного ствола щит Блекуэльского тоннеля (рис. 212).

в) Проходка шахт методом замораживания грунтов

В условиях городских тоннельных работ метод замораживания плывунных, водоносных пород, при котором исключаются осадки и выплывы породы, связанные с обычной проходкой в слабых грунтах (что особенно важно для избежания осадок зданий и улиц), находит широкое применение.

К методу искусственного замораживания грунтов обычно прибегают, когда другими методами не представляется возможным разрешить задачу проходки мощной плывунной толщи (рис. 213).

При мощности плывунного слоя более 20 *м* проходку шахтного ствола целесообразно осуществить применением искусственного замораживания грунтов. Вокруг ствола шахты предварительно создается цилиндр из замороженного грунта с толщиной стенки, достаточной

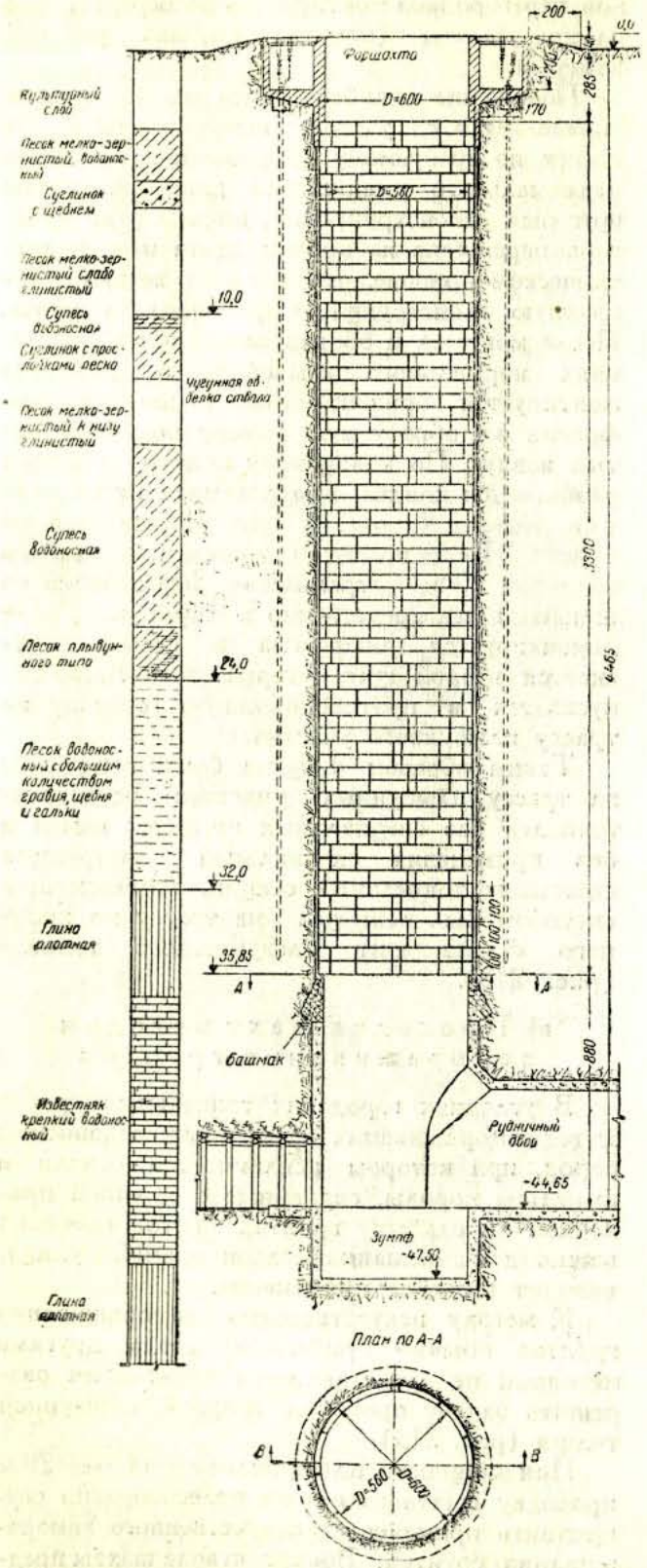


Рис. 213. Шахтный ствол из тюбингов при проходке замораживанием грунтов

для восприятия давления окружающего грунта и напора подземных вод (рис. 214). Чтобы воспрепятствовать проникновению грунта и воды через дно цилиндра замороженного грунта, основание последнего должно иметь водоупор из плотных пород толщиной 2—3 *м*.

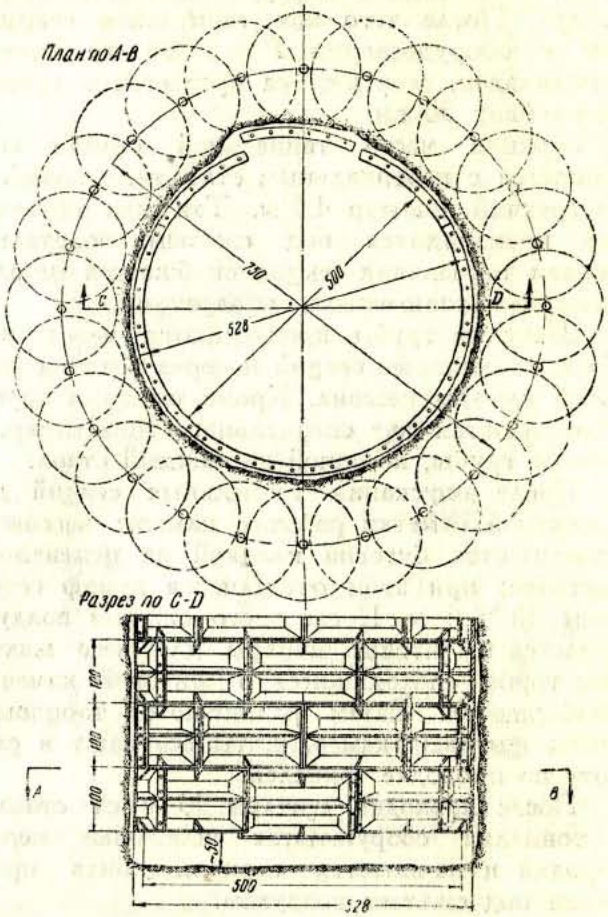


Рис. 214. Схема замороженного цилиндра вокруг шахтного ствола

По контуру ствола шахты производится бурение вертикальных скважин, в которые опускаются замораживающие колонки диаметром 100 *мм* с питательными трубами 25—40 *мм*, работающими под давлением 2—5 *ат*. Замораживающие колонки объединяются в распределительное коллекторное кольцо, размещенное в форшахте. Распределительное кольцо соединяется рассолопроводом ($D = 150$—200 *мм*) с замораживающей станцией.

Замораживающая жидкость (рассол) поступает по рассолопроводу через питательные трубки, поднимается по кольцевому пространству между внутренними стенками замораживающих

вающих колонок и внешней поверхностью питательных трубок и по обратному рассолопроводу к замораживающей станции (рис. 215 а, б).

В период циркуляции охлаждающего рассола по скважинам происходит обмен теплом между грунтом и рассолом.

Грунт, охлаждаясь, постепенно замерзает, вокруг колонок образуются отдельные цилиндры замороженного грунта. В процессе дальнейшего замораживания, при увеличении размеров отдельных цилиндров, последние сливаются между собой, образуя один цилиндр замороженного грунта вокруг шахтного ствола толщиной стены в 2—3 *м*.

Под защитой ограждающей поверхности замороженного грунта вокруг ствола представляется возможным начать проходку шахты при креплении ствола чугунными тюбингами (рис. 216, 217).

При методе искусственного замораживания грунтов необходимо особо принять во внимание характеристику физико-механических свойств грунтов, дебита грунтовых вод, скорости потока и данные химического анализа грунтов и вод.

Применением системы Тихельмана, обусловливающей равное сопротивление движению замораживающей жидкости к скважинам, обеспечивается равномерная подача рассола к последним при нормальном процессе замораживания грунтов.

На замораживающей станции понижение температуры раствора достигается посредством испарения газов углекислоты или аммиака, которые сжимаются компрессорами. Самый газ получает охлаждение от конденсаторов и при изменении давления испаряется. Испарение этих газов достигается в испарителе при интенсивном поглощении теплоты

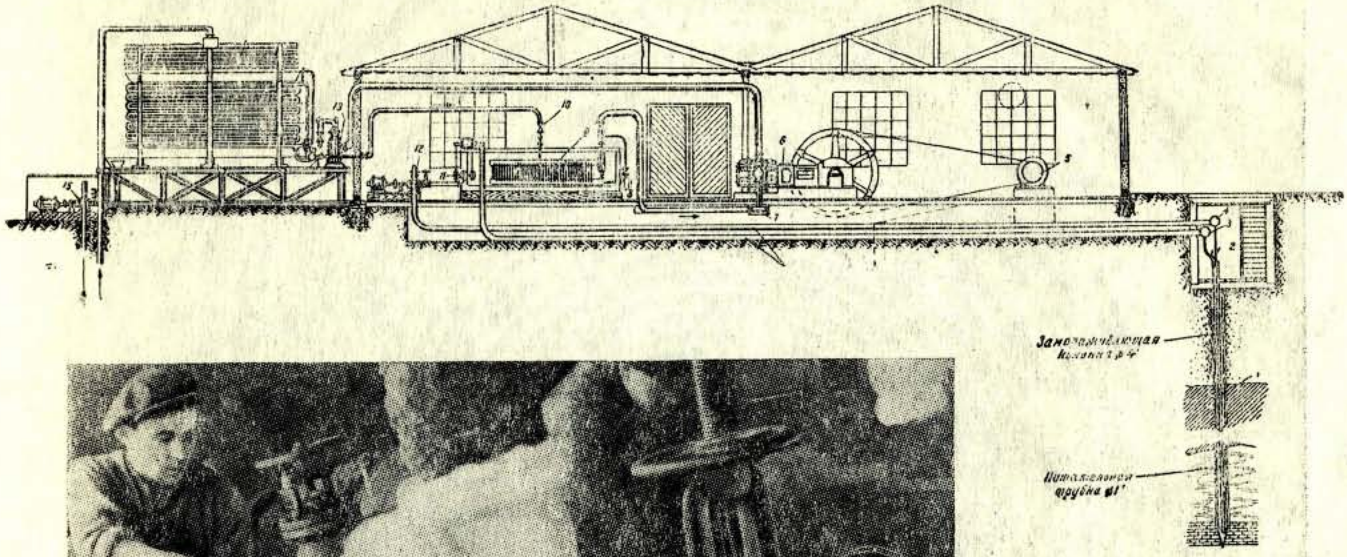


Рис. 215 а. Схема замораживающей установки: *1* — грунтовой массив, *2*—форшахта, *3*—коллекторное кольцо, *4* — распределительное кольцо, *5*—электромотор, *6*—компрессор, *7*—грязеуловитель, *8*—маслосборник, *9*—испаритель, *10*—регулирующий вентиль, *11*—рассоломешалки, *12*—рассольные насосы, *13*—маслоотделитель, *14* — конденсатор, *15* — водяной насос, *16*—рассолопроводы

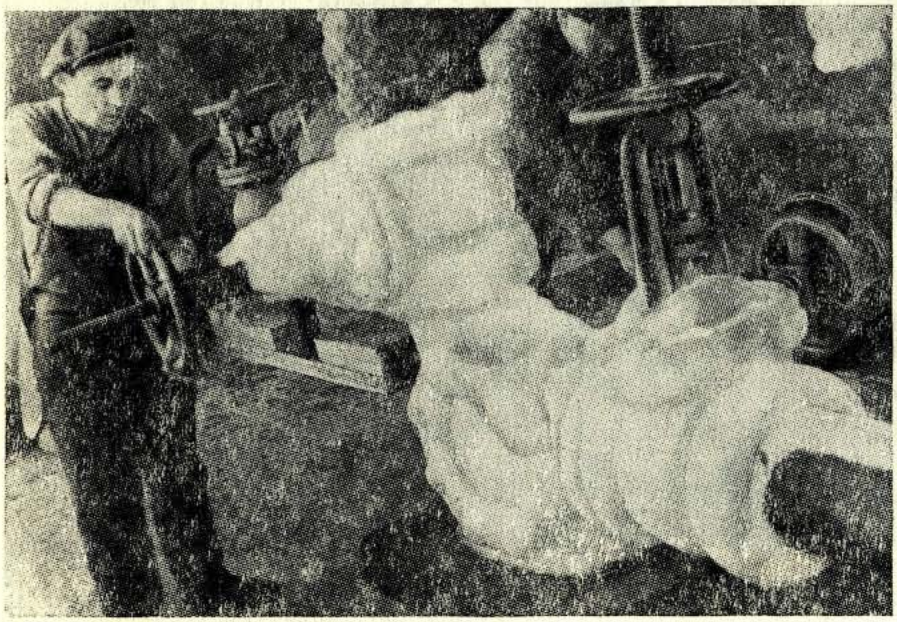


Рис. 215 б. Образование „шубы" в процессе замораживания

окружающей среды, что является первоосновой холодильного процесса. Для замораживания применяются растворы солей хлористого кальция или магния, обладающие свойством не замерзать при температуре от —25° до —30° С.

В практике Метростроя принят раствор хлористого кальция; обычно рабочая температура рассола принимается — 20—25° С. Раствор нагнетается из испарителя непосредственно в рассолопроводы по распределительным трубам и далее через питательные трубки по замораживающим колонкам. Хладоагент (раствор хлористого кальция), пропускаемый через питательную трубку, поднимается по замораживающей колонке, отдавая свой холод через стенки колонок окружающей породе, и затем по обратному трубопроводу поступает на станцию для повторного охлаждения. Собственно замораживающая станция оборудована компрессорами (аммиачными или углекислыми), служащими для сжатия газа, конденсаторами для охлаждения этих газов и испарителями, в которых газ испаряется при одновременном охлаждении хлористого кальция. Имеются насосы для нагнетания замораживающего раствора в колонки и насос для нагнетания воды в конденсатор (рис. 215 а, б).

В процессе замораживания грунтов образуется ледяная стенка, которая в состоянии



Рис. 217. Вид тюбингового ствола

оградить разработку от прорыва вод, насыщающих окружающий массив. При этом необходимо учесть температуру воды окружающего массива и ее химические свойства, а в особенности теплопроводность самих пород.

Присутствие солей в воде в значительной степени снижает эффект замораживания, а сам ледяной массив становится хрупким. Особенно опасным является присутствие в окружающем массиве соляных включений, образующих места («мешки»), через которые в период проходки возможны прорывы слабых грунтов.

Большое значение в процессе замораживания следует придавать фактору движения подземных вод. При текучей воде процесс замораживания чрезвычайно осложняется.

Проходка шахт замораживанием грунтов связана со следующими операциями: с бурением скважин вокруг шахтного ствола, с замораживанием грунтов вокруг ствола, с проходкой шахтного ствола и креплением его и с оттаиванием пород (рис. 216, 217).

При бурении скважин вокруг шахтного ствола для замораживания грунтов особо важное значение имеет сохранение их вертикальности. Отклонение скважин от их проектного направления в 2—3% длины может привести к образованию окон и прорывам водоносных грунтов в разработку.

Замеры отклонения скважин от вертикали производятся специальными приборами в виде телеклинографа системы Фораки или крайзель-компаса системы Мартинсена. После выявления характера и величины отклонения скважин надлежит принять в определенных случаях соответствующие меры в виде забуривания ряда дополнительных скважин (рис. 218).

* * *

При проведении калорического расчета искусственного замораживания пород учитывают, что с 1 $м^2$ поверхности замораживающих труб передается непосредственно породам около 200—260 кал. в час при температуре рассола — 25°С.

Поскольку пересекаемые грунтовые напластования обладают отличающимися физико-механическими свойствами (теплопроводность, водоносность, теплоемкость и т. д.), естественно, что очертания замороженного массива по вертикали чрезвычайно разнообразны. На форму замороженного массива влияет также и то обстоятельство, что температура рассола по замораживающей трубе переменная: в нижней части более низкая, а в верхней части, вследствие того, что рассол отнимает тепло окружающих пород, повышенная. Это приводит к конической форме замороженного массива вокруг трубы.

Одним из важнейших вопросов при проходке глубоких шахт методом замораживания является процесс оттаивания замороженного массива после проходки и устройство постоянного крепления шахтного ствола. Процесс оттаивания глубоких шахт должен протекать с исключительной осторожностью, искусственным путем. При этом может произойти неравномерное местное давление на шахтную крепь, на которое она не рассчитана, и привести к значительным деформациям ее, а иногда и к полному разрушению.

В последнее время в практике проходки шахт замораживанием принят метод оттаивания, заключающийся в том, что по замораживающим трубам дают циркулировать рассолу

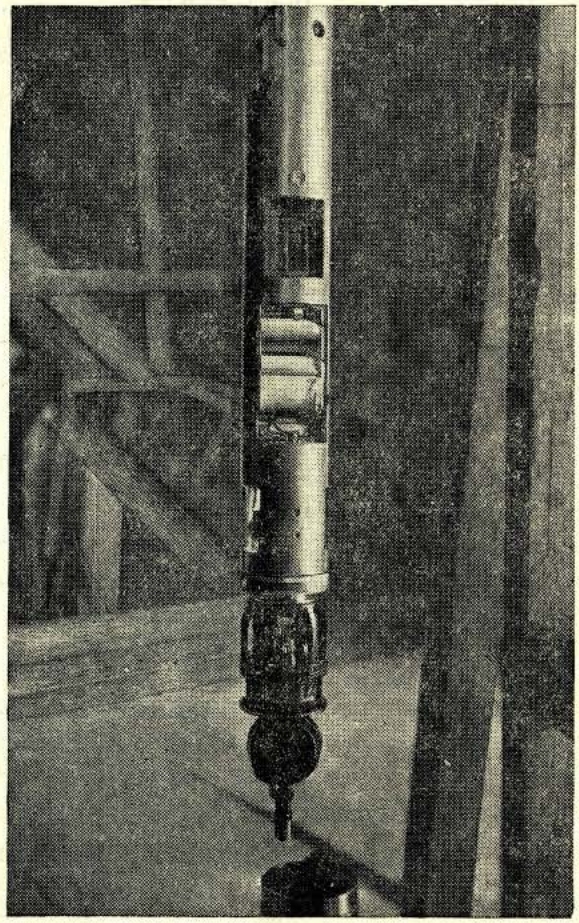


Рис. 218. Крайзель-компас перед спуском в скважину

с положительной температурой до +20° С. Во избежание резкого повышения температуры обычно регулируют повышение ее примерно на 2—3° в сутки. После окончания всех работ замораживающие трубы удаляют или тампонируют цементным раствором.

В практике проходки шахт замораживанием встречаются случаи, когда водоносный пласт лежит настолько глубоко, что нет никакой технико-экономической целесообразности вести буровые работы непосредственно с поверхности. В этом случае бурение скважин начинают непосредственно из забоя

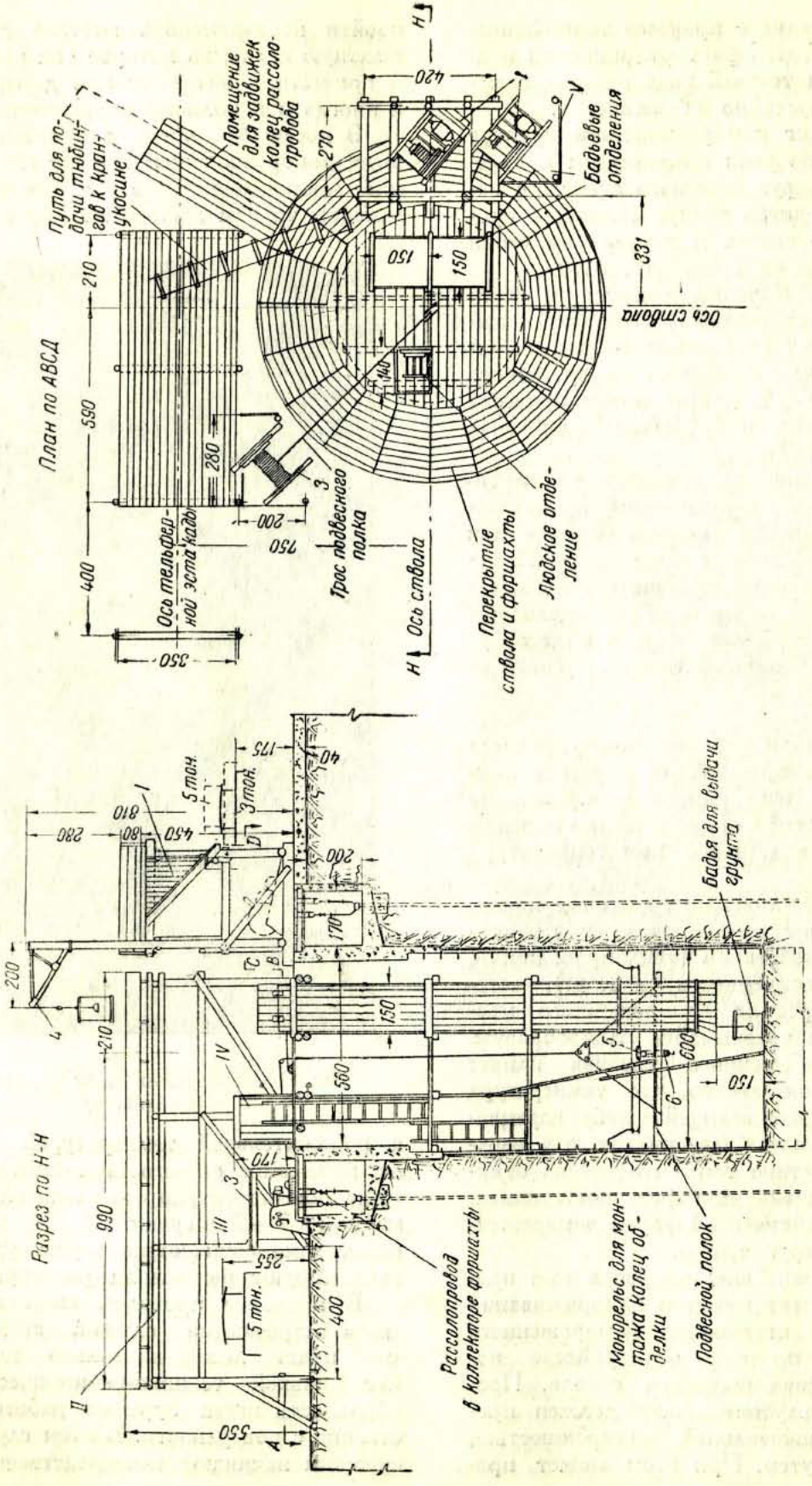


Рис. 216. Производство работ по устройству тюбингового ствола при методе замораживания грунтов

пройденной на определенную глубину шахты, ствол которой имеет уже постоянное крепление. В забое шахты устраивают кольцеобразную бетонную подушку, в которую закладывают кондукторы из обсадных труб, и впоследствии начинают буровые работы. Сам шахтный ствол в месте устройства бетонной подушки увеличивается в диаметре соответственно условиям, обеспечивающим удобство буровых работ, а равно устройству камеры для укладки рассолопровода.

* * *

Проходка шахты № 20-бис явилась на первой очереди строительства первым опытом применения замораживания грунтов на Метрострое. По периметру шахты был забурен ряд замораживающих скважин и начат процесс замораживания. При этом вокруг ствола шахты было образовано ограждение из замороженного грунта. При проходке ствола разработка породы велась с применением отбойных молотков, причем среднее незамороженное ядро удалялось пневматическими лопатами. Приток воды в шахту был незначительный. Следует отметить, что в процессе проходки шахты проверялась толщина замороженной зоны, и оказалось, что через 30 дней толщина замороженной стены составляла уже примерно 2,3 *м*. Замораживание грунта производилось при температуре рассола — 20° С. Крепление шахты было проведено с помощью железобетона. Одним из неблагоприятных факторов при производстве работ по сооружению железобетонной обделки ствола являлся сам процесс бетонирования, который должен был происходить при низкой температуре в — 10°С. С целью обеспечить доброкачественный бетон при такой температуре был применен метод электронагрева бетона. Замороженная стена была изолирована шевелином. Затем непосредственно в тело бетона был уложен ряд штырей, присоединенных к электропроводам. Пропуская электрический ток по этим проводам, довели температуру бетона до +70 — 80° С. Бетонировка ствола производилась отдельными кольцевыми секциями длиной в 1,1 *м*. Между внешней опалубкой и разработкой замороженного грунта производилось нагнетание цементного раствора под давлением. Во избежание замерзания цементного раствора к последнему прибавлялся хлористый кальций. В дальнейшем в практике Метростроя при проходке шахт замораживанием применяется крепление стволов исключительно чугунными тюбингами.

Расчет стенки замораживающего цилиндра, ограждающего шахтные разработки от прорыва плывунов из окружающего массива, определяется по формуле Кегеля:

$$l = \frac{Dp}{2(R-p)},$$

где l — толщина стенки в см. D — диаметр шахтного ствола в *см*, R — временное сопротивление замороженной породы сжатию в *кг/см*^{2}, p — величина давления окружающих пород в *кг/см*^{2}.

г) Проходка шахтных стволов тампонажем

При проходке шахт в трещиноватых скальных породах обычно приходится вести борьбу с чрезвычайно обильным притоком воды, который сильно затрудняет, а иногда и приостанавливает продвижение забоя. Большие трещины в породах являются теми путями, по которым вода притекает в разработки под большим напором.

Одним из методов борьбы с подземными водами является способ искусственного тампонажа — заполнения имеющихся трещин карстов и пустот в зоне проходки различными материалами в виде цемента, глины и т. д. Нагнетание различных тампонирующих растворов под давлением производится через буровые скважины. К методам тампонажа относятся цементация, глинизация, битумизация. Тампонажем удается заглушить приток воды в подземные выработки и вести проходку без водоотлива.

Метод цементации при проходке водоносных шахт был впервые применен Пойтером во Франции (1864 г.), чтобы закрыть все поры и водопроводящие трещины массива для возможности проходки и закрепления шахтного ствола.

При цементации пробуривают скважины и через них вводят цементный раствор в трещины; после твердения раствора происходит закупоривание всех пор, что и дает возможность вести дальнейшие работы. Однако следует отметить, что метод цементации дает определенный эффект лишь в тех случаях, когда имеются незагрязненные пески, гравий и т. п. При наличии глинистых примесей процесс цементации — схватывания цемента — затрудняется. В таких случаях приходится через буровые скважины производить вымывание глинистых частиц водой под давлением,

с последующим заполнением скважин цементным раствором. При наличии трещиноватых и карстовых известняков, где процент пустот

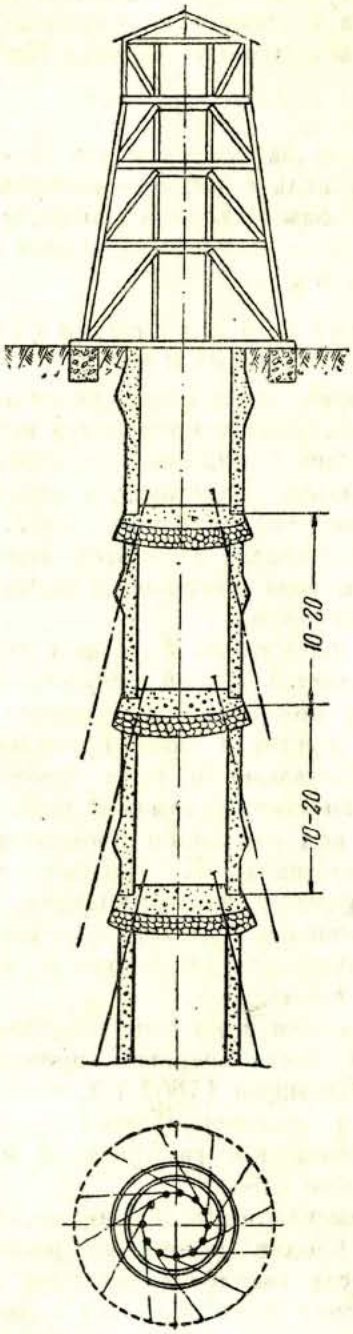


Рис. 219. Проходка шахты тампонажем

значительный (15—20), процесс цементации связан с огромным расходом цемента до 100—200 *т* на 1 *пог. м* шахтного ствола, что значительно удорожает работы.

С целью снижения стоимости работ было предложено заменить дорогостоящий цемент другим, более дешевым материалом, а именно глиной. Это и привело к методу *глинизации* (рис. 219) — заполнению под давлением существующих пустот и трещин окружающего массива глиной жидкой консистенции.

При проходке шахтных стволов *методом глинизации*, в зависимости от местных условий — проектной глубины шахты, мощности пересекаемых трещиноватых и карстовых пород, устанавливается система глинизации: при бурении скважин непосредственно с поверхности или при бурении скважин отдельными участками в 10—20 *м*, проходимых последовательно.

Метод проходки буровыми скважинами непосредственно с поверхности употребляется при заложении водоносных трещиноватых пород на 10—30 *м* от поверхности. Наибольшее распространение в практике глинизации получил *метод глинизации отдельными участками*. В этом случае в зависимости от размеров участка устраиваются водонепроницаемые перемычки, через которые производится процесс бурения и глинизации массива, прорезаемого шахтным стволом.

Порядок производства этих работ следующий: после устройства водонепроницаемой перемычки, в которую заделываются направляющие трубы-кондукторы, производятся бурение скважин и процесс инъекции глиной — *глинизация*. Затем проводится бурение контрольных скважин. В случае удовлетворительного результата начинается углубление шахтного ствола после разборки перемычки.

По мере углубления шахты производится крепление ствола бетоном или тюбингами. За 3—4 *м* до конца укрепленного инъекцией участка и шахтного ствола устраивается следующая перемычка, через которую производится бурение. Таким образом работы по глинизации продолжаются.

Водонепроницаемая перемычка должна быть запроектирована и рассчитана не только на величину ожидаемого напора вод, но и на максимальную величину давления, под которым производится инъекция глины.

Следует указать, что величина давления, под которым нагнетается глинистый раствор, обычно выше величины гидростатического давления. Глинистый раствор, устремляясь по линии наименьшего сопротивления, будет растекаться по трещинам и порам окружающих пород и заполнять их.

Обычно форма перемычки выбирается в виде обратного купола.

Приступая к процессу глинизации водоносного массива участками, предварительно устраивают перемычку на 2—3 *м* выше горизонта подземных вод. Если проектное положение перемычки намечается ниже горизонта вод, прибегают к подводному бетонированию. В зависимости от величины гидростатического напора толщина перемычки принимается от 2 до 6 *м*.

При пользовании методом глинизации большое распространение получили кирпичные перемычки, главным образом потому, что после окончания инъекционных работ разборка их не вызывает тех затруднений, которые связаны с разборкой перемычек бетонной конструкции. Разборка бетонной перемычки в каждой зоне требует применения пневматических инструментов и даже взрывных работ. Следует учесть, что процесс взрыва может отрицательно повлиять на закрепленный глинизацией окружающий массив.

При сооружении перемычки, как указывалось выше, в нее закладываются кондукторы в виде обсадных металлических труб диаметром в 50 *см*, выступающие над перемычкой на 0,4—0,5 *м*. В зависимости от местных условий и глубины шахты закладка скважин производится с таким расчетом, чтобы достигнуть максимального заполнения глиной трещиноватых пород. Обычно скважины бурятся под небольшим углом к оси шахты и в виде лучей, которые расходятся под определенным углом по отношению к радиусам шахтного ствола.

В зависимости от размеров поперечного сечения шахты и характера трещиноватых пород закладывается от 10 до 50 инъекционных скважин, по двум или трем концентрическим окружностям по отношению к шахтному стволу.

При установлении величины давления, под которым производится инъекция глинистым раствором, приходится считаться с геологическими условиями напластований уплотняемых пород, с величиной гидростатического напора и скоростью движения подземных вод. По окончании глинизации ведется контрольное нагнетание под большим давлением, выше применяемого обычным порядком, с целью проверки качества проведенной глинизации.

Особое преимущество глинизации перед цементацией и химическим закреплением заключается в том, что при закреплении массива глиной последующая проходка не вызывает тех затруднений, какие наблюдаются в массиве, закрепленном указанными методами. Действительно, проходка массива, закрепленного этими методами, чрезвычайно затруднена вследствие высокого коэфициента крепости закрепленного материала, который представляет конгломерат, требующий применения отбойных молотков, а иногда и взрывчатых веществ.

На шахте треста Кизелуголь (1930 г.) глинизация проводилась под давлением 60—80 *ат* при густоте раствора 60%. На 1 *пог. м* шахтного ствола было израсходовано до 1 000 *т* глины. Глинистый раствор принимался некоторыми буровыми скважинами объемом до 70 $м^3$. Применение метода глинизации водоносных трещиноватых пород позволило вести проходку шахтного ствола обычным порядком.

Как указывалось выше, *метод цементации пород* для уменьшения и даже полного приостановления притока вод в подземные выработки применялся в тоннельной и в особенности в горной практике в 70-х годах XIX столетия.

При проходке шахт методом цементации, если водоносные породы залегают относительно близко от поверхности, производится бурение скважин непосредственно с поверхности, на глубину от 10 до 40 *м*. Скважины бурятся на взаимном расстоянии примерно в 1 *м* по нескольким концентрическим кругам по отношению к шахтному стволу. Направление скважины ведется с уклоном до 80°, при этом дается еще дополнительный радиальный уклон.

Все трубопроводы и коммуникацию в зависимости от местных условий рассчитывают на высокое давление. После того как произведено контрольное бурение, указывающее, что массив закреплен, производится проходка в цементированной зоне. Оставляя в забое 2—3 *м* закрепленной цементацией породы, устраивают перемычку, через которую повторяют процесс бурения и цементации породы. И так последовательно проводятся цементация и проходка шахты отдельными участками.

д) Проходка при химическом укреплении пород

При проходке шахт методом химического укрепления грунта до горизонта подземных вод устраивается бетонная подушка — перемычка, которая рассчитывается на давление больше гидростатического. В бетонной перемычке закладывается ряд обсадных труб,

через которые производится забивка перфорированных трубок длиной 2—3 *м*, через которые инъектируются химикалии (рис. 220) (см. Главу X).

Химическим укреплением грунта была проведена опытная проходка шахт в Подмосковном бассейне, а равно проходка участка

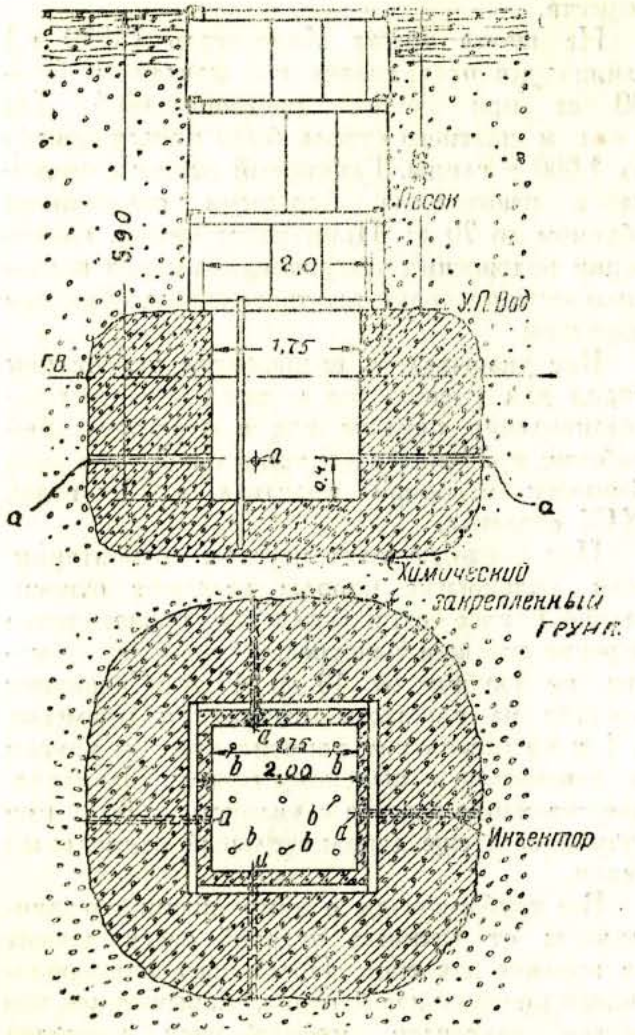


Рис. 220. Проходка при химическом укреплении грунта

тоннелей Московского метрополитена. Ствол шахты Михар (Румыния) был изолирован от напора вод применением химического метода (рис. 221).

е) Проходка шахт при искусственном водопонижении

При проходке шахт может найти эффективное применение метод искусственного понижения уровня подземных вод. Пробурив вокруг шахтного ствола ряд скважин, производят через них насосами откачку воды из водоносных напластований. При этом создается кривая депрессии, понижения горизонта вод, благодаря чему возможно производить проходку без особых осложнений в условиях осушенных пород. При наличии песчаных грунтов, где возможен вынос грунта при откачке и «обыгривание» шахтного ствола, необходимо устра-

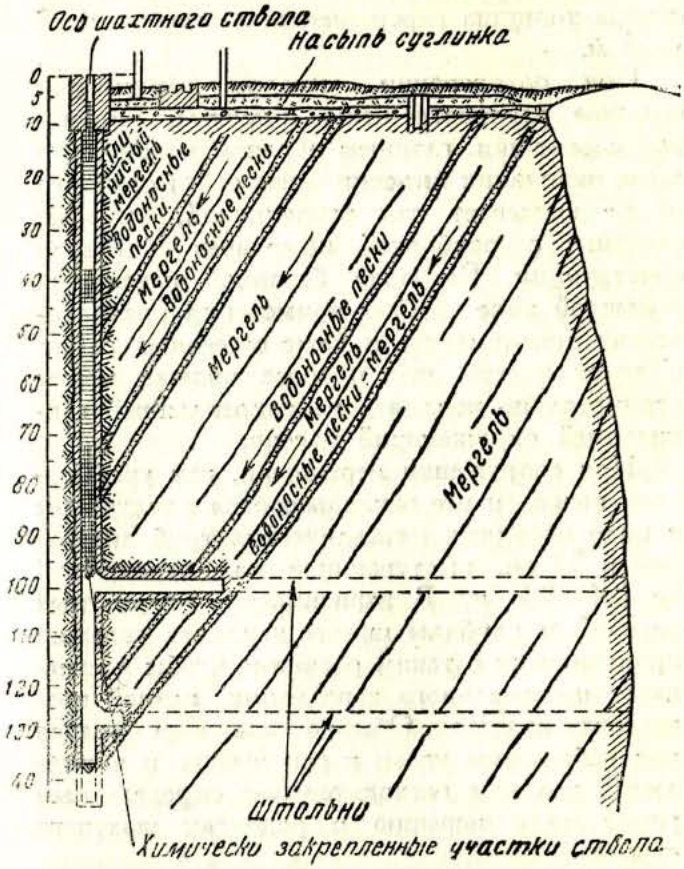


Рис. 221. Шахта Михар в Румынии (химическое укрепление ствола)

нить эти явления применением специальных фильтров.

Метод искусственного понижения нашел свое применение при проходке двух шахт Матодор в Зенфтенберге (рис. 222).

Шахты Матодор диаметром 5 *м* необходимо было пройти в условиях водоносных пород мощностью до 20 *м*. Горизонт грунтовых вод находился на 14 *м* от поверхности. До этого горизонта проходка шахты велась обычным порядком. На глубине 12 *м* от поверхности по контуру шахтного ствола были пройдены штольни размерами в свету 1,6 × × 1,2 *м* в сухих песчаных грунтах. Из этих штолен были забурены водопонижающие скважины. Была устроена коммуникация трубопроводов по штольням и поставлены центробежные насосы. После включения в работу

установки удалось провести понижение уровня подземных вод на 5 *м*. Шахта была углублена на 4 *м*. Затем на этом горизонте были пройдены новые штольни, из которых вновь были пробурены скважины, уложена коммуникация и произведено понижение уровня грунтовых вод второй ступени.

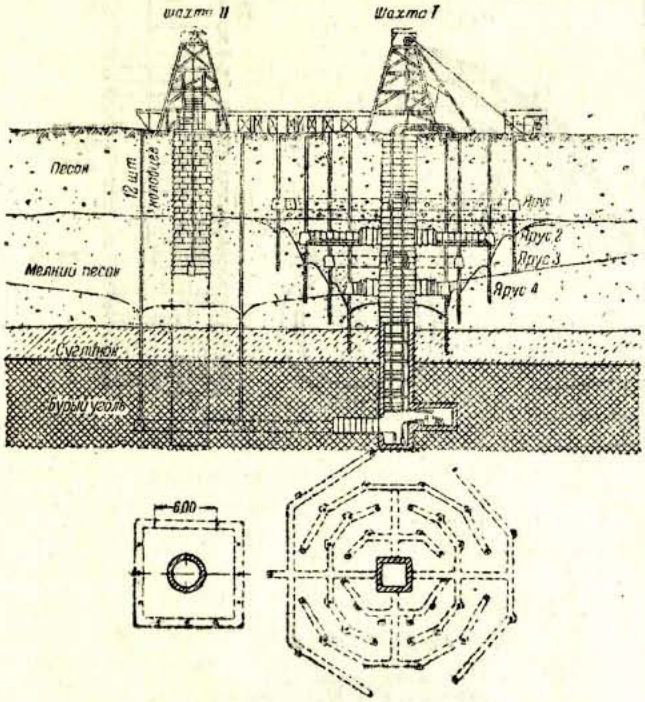


Рис. 222. Шахта Матодор (применение искусственного водопонижения при проходке шахтного ствола)

Применением четырехступенчатой системы водопонижения удалось осуществить проходку шахтного ствола через мощный слой водоносных песков.

Применение многоступенчатой системы водопонижения вызывало значительное удорожание и замедление производства работ. В настоящее время применением глубинных насосов вопрос водопонижения при проходке шахт в условиях отдающих воду песков может быть эффективно разрешен. Применением метода понижения грунтовых вод была успешно осуществлена проходка ряда шахтных стволов на 3-й и 4-й очереди строительства Московского метрополитена.

ж) Проходка шахтных стволов вертикальным щитом ВЛМ-2 системы В. Л. Маковского

В стремлении к техническим приемам, механизирующим процессы проходки и крепления шахтного ствола, к методам, исключающим применение сжатого воздуха, создающего особый, тяжелый «кессонный» режим для рабочих, автором для проходки шахтных стволов запроектирован *вертикальный щит* ВЛМ-2. Этот щит с двойной защитной грудью позволяет при пересечении плывунов удалять дозируемый грунт рефулированием, не прибегая к применению сжатого воздуха (рис. 223). Регулированием грунта в диафрагме можно добиться проходки без «обыгривания» и осадок грунта вокруг ствола шахты. Попадая в устойчивые породы, грудь щита раскрывается, и работы ведутся обычным порядком, возможно с механизацией процесса экскавации породы. Материалом крепления ствола шахты должны быть тюбинги или бетонные блоки, что дает возможность избавиться от трудоемких, связанных с железобетонными и изоляционными процессами работ.

Щит ВЛМ-2 монтируется в вертикальном положении в форшахте и системой гидравлических домкратов продвигается вниз. Исключительная технико-экономическая целесообразность проходки ствола вертикальным щитом выявляется при проходке глубоких шахт как для горных тоннелей, так и в горной промышленности.

При этом нож щита обращен в сторону забоя. В начальный период опирание щитовых домкратов осуществляется через систему опорных балок форшахты. По мере углубления шахты опирание щитовых домкратов происходит непосредственно на тюбинги ствола. При встрече с плывунными грунтами щитовые работы ведутся открытием нижних затворов в период поступательного щита вниз, и под нажимом щитовых домкратов слабый грунт впускается в дозирующие камеры. После заполнения последних грунтом нижние затворы под действием гидравлических домкратов закрываются; затем открываются верхние затворы и грунт выдается на поверхность. При этом осуществляется полная дозировка грунта пройденного объема в камерах, не допуская впуска избыточного объема грунта, что имеет место при других методах проходки. В этот период при помощи эректора осуществляется монтаж обделки ствола из тюбингов или из блоков.

При строительстве метрополитена, в зависимости от местных условий, устраивается: а) щит ВЛМ-2 облегченной конструкции, демонтируемый после проходки ствола в зумпфе шахты, или б) щит нормальной конструкции, служащий для проходки тоннелей.

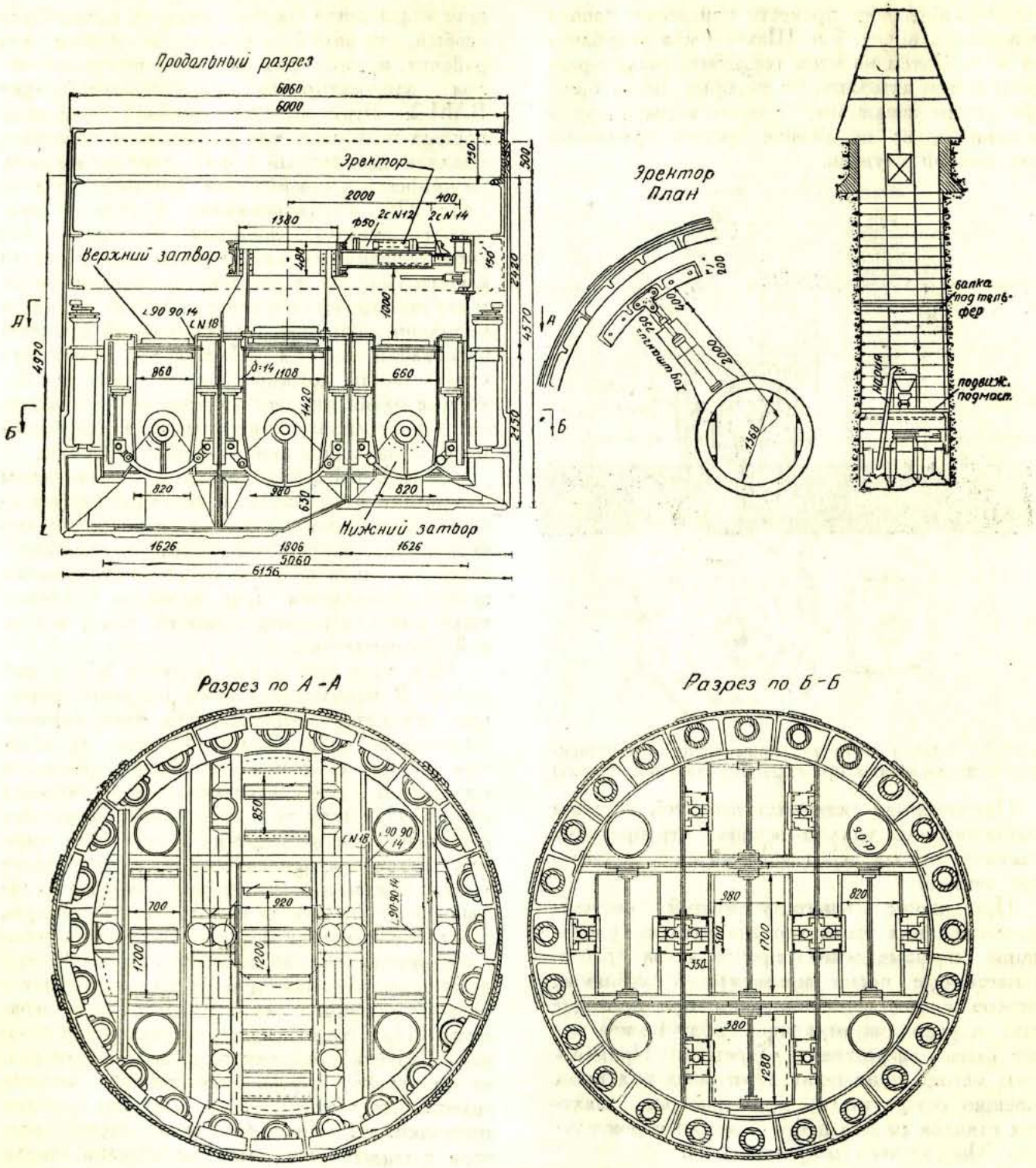


Рис. 223. Проходка шахты вертикальным герметическим щитом ВЛМ-2 системы В. Л. Маковского

В последнем случае щит, дойдя по вертикали до места сопряжения с вентиляционным тоннелем, в подготовленной заранее выработке поворачивается в вертикальной плоскости на 90° и выпускается на трассу. При этом отпадает надобность в щитовых камерах и в за-

трудительном подземном монтаже щита. Разрешением поставленной задачи обеспечивается значительный прогресс в области комплексного и неразрывного ведения механизированного процесса шахтного и тоннельного строительства.

з) Проходка шахтных стволов методом бурения

Способ бурения шахт ведет свое начало с того момента, как Гейн (в Вестфалии) пробурил вентиляционный ствол диаметром 0,4 *м* (начало XIX в.).

В 1854 г. Кинд и Шодрон применили бурение при проходке шахт в скальных породах в Вестфалии (рис. 224).

Бурение ствола диаметром до 5 *м* проводилось в два приема. Начиналось бурение первым долотом малого сечения, составлявшего одну треть полного сечения ствола. Вторым долотом по полному сечению ствола бурили несколько наклонный кольцевой уступчатый забой. Вес долота малого сечения ($D = 2{,}5$ *м*) из стали составлял до 1 *т*, а второго долота ($D = 5$ *м*) до 25 *т*. Подъем долот в процессе бурения составлял от 20 до 40 *см* (10—25 ударов в минуту) при одновременном повороте долота на несколько градусов. Измельченная порода из забоя ствола в процессе бурения удалялась желонками емкостью до 5 $м^3$.

После бурения шахты на мощных лебедках опускалась чугунная крепь, состоявшая из отдельно сболченных между собой колец со свинцовыми прокладками. Вес крепи в процессе опускания достигал 5 000 *т*. Для облегчения процесса опускания крепи последняя снизу оснащалась днищем сферической формы с патрубком в центре.

Крепь, опускаясь в воду, заполнявшую пробуренный ствол, приобретала плавучесть, а через указанный патрубок вода проникала внутрь цилиндрической крепи, играя роль водяного балласта.

Кольцевое пространство между породой и внешней поверхностью крепи в 20—40 *см* заполнялось цементным раствором. Средняя скорость проходки ствола бурением метода Кинда и Шодрона составляла 3,0—3,5 *м* в месяц.

Следующим этапом развития метода бурения при проходке шахт можно считать появление способа Хонигмана, предложившего вести проходку стволов в условиях неустойчивых, плывунного характера пород вращательным бурением при заполнении выработки глинистым раствором. Последний, производя давление на стенки ствола шахты, предохраняет от обрушения породы. Глинистый раствор, проникая непосредственно между частицами породы, образует оболочку по контуру ствола, поддерживаемую давлением, превалирующим над напором подземных вод. Буровая мука в процессе бурения непрерывно выносится маммут-насосом (сжатым воздухом), удачно размещенным в теле полой штанги по центру бурового агрегата. При этом производится непрерывная циркуляция глинистого раствора. Бурение ствола осуществляется по отдельным фазам, последовательным переходом от начального диаметра в 0,7 *м* к диаметрам в 2—3—5 *м*.

Крепь шахты из металлических колец. В нижней части цилиндра крепи бетонируется днище временного характера, и крепь начинают погружать в выработку, заполненную глинистым раствором. Последний вытесняется по мере погружения крепи, внутрь которой накачивается водяной балласт. Когда днище погружаемой цилиндрической крепи дойдет до 1—1,5 *м* до забоя пробуренного ствола, дальнейшее погружение прекращают. Через трубы, расположенные в кольцевом пространстве между крепью и породой, производят под давлением нагнетание цементного раствора, который постепенно вытесняет глинистый раствор из-под днища через кольцевое пространство (рис. 225).

После затвердения цементного раствора приступают к откачке воды из ствола и к удалению временного днища, в случае если требуется дальнейшая проходка ствола обычным способом. Скорость проходки бурением по методу Хонигмана составляет 10—15 *м* в месяц. В карстах, где можно ожидать значительной утечки глинистого раствора и обрушения стенок шахты, метод бурения Хонигмана непригоден.

В Советском Союзе на основе богатейшего опыта бурения нефтяных скважин метод бурения шахтных стволов начал за последнее десятилетие применяться в угольной промышленности. Инженерами Щепотьевым и Ивановым были пробурены стволы диаметром 3 *м* в Подмосковном угольном бассейне.

По методу Г. И. Маньковского на шахте № 14 Бельшезерской в Подмосковном бассейне (в мае 1941 г.) был начат бурением ствол диаметром 3,5 *м* на глубину 40 *м* через двадцатиметровую плывунную толщу (рис. 226).

Проходка велась с применением стандартного нефтяного бурового оборудования, при резцовых, дисковых и шарошечных расширителях с обратной промывкой глинистым раствором с помощью эрлифта. При трех ступенях расширения диаметры расширителей составляли последовательно 600, 2000 и 3500 *мм*.

Проектная скорость проходки шахтных стволов методом бурения в слабых породах составляет до 100 *м* в месяц.

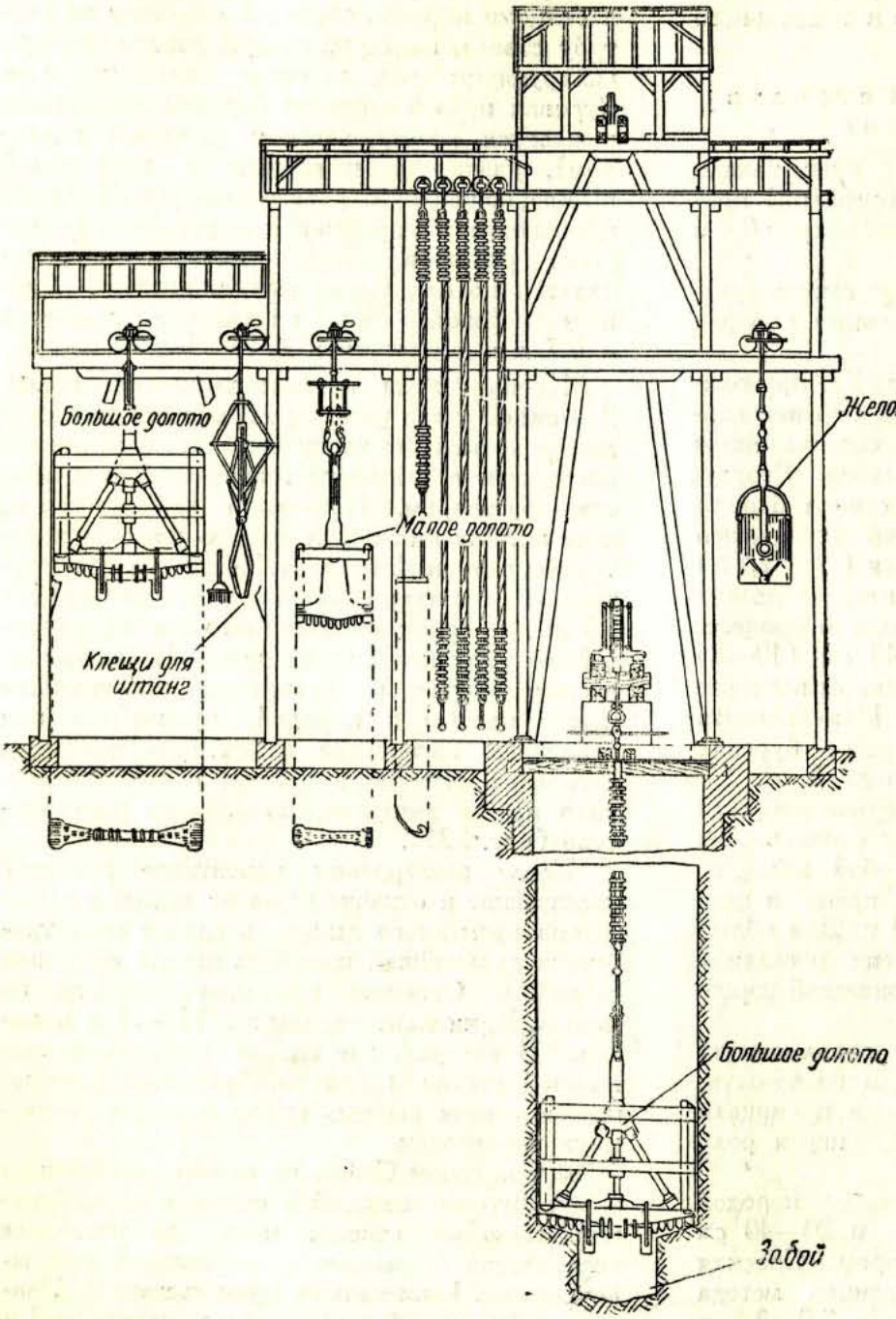


Рис. 224. Бурение ствола по методу Кинда—Шодрона

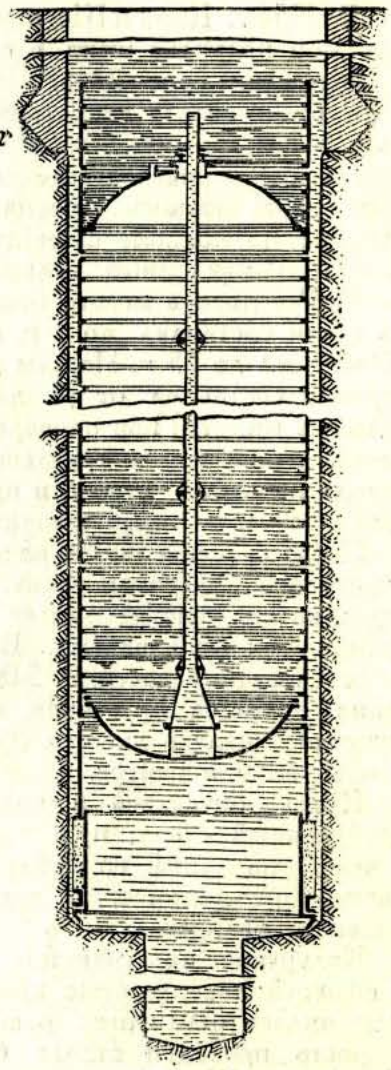


Рис. 225. Опускание крепи в глинистый раствор при проходке ствола бурением по методу Хонигмана

Выявлено, что скорость бурения ствола обратно пропорциональна коэфициентам крепости пород. Это усматривается из таблицы Г. И. Маньковского (табл. 12).

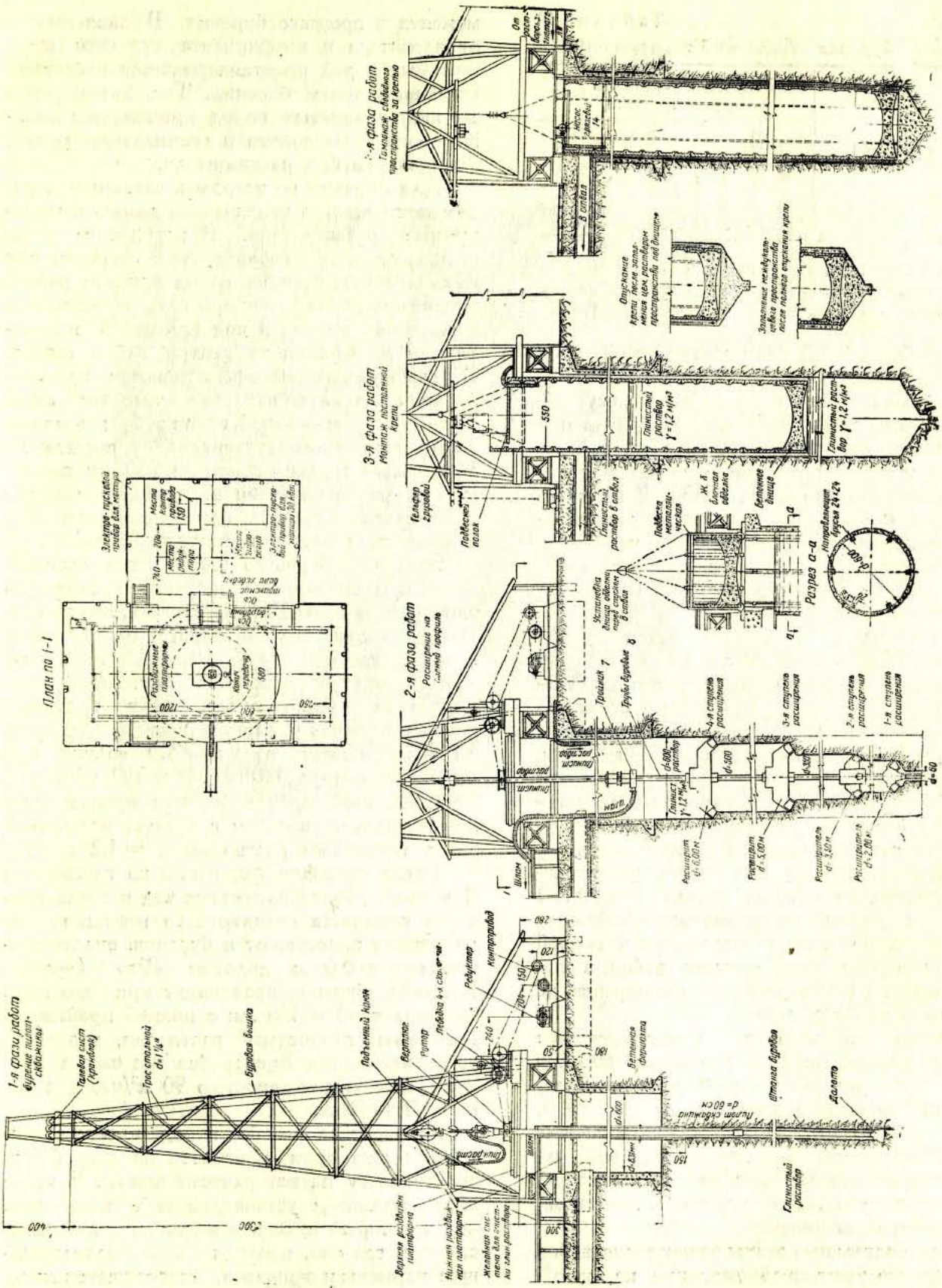


Рис. 226. Фазы бурения шахты агрегатом МОМ системы инж. Г. И. Маньковского

Таблица 12

Скорость бурения ствола по Маньковскому

Породы	Машинная скорость бурения *м/час*		
	Скважина $D_1 = 600$ *мм*	Ствол $D_2 = 2\,000$ *мм*	Ствол $D_3 = 3\,500$ *мм*
Пески и глины . . .	2,46	0,58	0,12
Глины	1,38	0,31	0,07
Известняки	0,34	0,07	0,025

Рассматриваемый механизированный метод проходки шахт бурением дает особенный эффект при пересечении водоносных, неустойчивых пород, требующих обычно применения специальных методов (сжатый воздух, замораживание и т. д.) при ручном труде в забое (разработка породы и погрузка). В этом направлении в СССР в настоящее время ведется большая экспериментальная и научная работа и положено начало внедрению этого метода работ в практику шахтного и тоннельного строительства.

В настоящее время агрегатом МОМ (системы Маньковского) на Метрострое ведется опытное бурение двух шахтных стволов диаметром 6 *м* по трассе большого кольца строительства метрополитена 4-й очереди при мощности плывунной толщи до 25 *м*.

Проходка шахтного ствола агрегатом МОМ, независимо от встречаемых геологических и гидрогеологических условий, осуществляется методом бурения по пилот-системе.

Учитывая, что бурение забоя значительного поперечного сечения ствола (до 30 $м^2$) связано с рядом технико-производственных осложнений, по центру выработки в первой фазе проходится ядро сечения забоя, а последующими фазами ведется расширение до проектного контура ствола.

Вначале проводится предварительное бурение пилот-скважины диаметром 600 *мм* при последующих фазах концентрического расширения барами диаметром 2 000, 3 500, 5 000 и 6 000 *мм*. Пилот-скважина носит разведывательный характер, является направляющей ствола и выполняет первую функцию по удалению ядра сечения забоя, подлежащего расширению.

Последовательные этапы расширения забоя имеют целью уменьшить давление на забой, а равно ограничить величину крутящего момента в процессе бурения. В зависимости от характера и коэфициента крепости пересекаемых пород предусматривается и соответствующий прием бурения. Так, для бурения мягких, глинистых пород применяется резание — резцовое долото и специальные резцы, оснащающие бар расширителя.

Для бурения по твердым, скальным породам применяются шарошечное долото и шарошечные расширители. В породах с резко отличающимися коэфициентами крепости при выклинивании крепких пород принята работа шарошками. На расширителе размещаются 6 шарошек, из них 3 под углом 120° на различном расстоянии от центра забоя ствола. С целью увеличения эффективности процесса бурения принята наплавка твердым сплавом — рэлитом —одной грани зубца; при этом достигается самозатачивание последнего. Бурильные трубы диаметром 250 *мм* принимаются равнопрочными в резьбовой части и в нормальном сечении, при марке стали «Д», с временным сопротивлением 6 500 $кг/см^2$.

Вращение бурового инструмента производится при помощи специального ротора (по типу ротора Р700-Ш2, изготовляемого Бакинским заводом), рассчитанного на крутящий момент до 600 000 *кг/см*. Максимальное число оборотов стола 60 *об/мин*. Для редуцирования оборотов мотора и вращения ротора принят четырехскоростной редуктор $V_1 - 36$ *об/мин* и $V_4 - 219$ *об/мин* при мощности мотора 130 л. с. и 730 *об/мин*.

Собственно процесс бурения производится вращательным способом с прямой промывкой забоя глинистым раствором ($\gamma = 1{,}2$ $т/м^3$).

После проходки форшахты по глубине на 1 *м* выше уровня грунтовых вод и после монтажа комплекта стандартного нефтяного оборудования приступают к бурению пилот-скважины $d = 0{,}6$ *м* долотом «Рх» («рыбий хвост»); бурение производят при диаметре буровых труб в 150 *мм* с прямой промывкой скважины глинистым раствором, для чего устанавливаются 2 центробежных насоса типа АРС производительностью 90 $м^3/час$ при напоре $H = 50$ *м*.

Разбуренная в забое порода вместе с глинистым раствором выносится по затрубному пространству на поверхность шахты. В устье пилот-скважины устанавливается кондуктор, через который пульпа выводится к желобной системе, где она, проходя породоулавливающие карманы и очищаясь, возвращается вновь в скважину.

Работа по бурению ствола с помощью расширителей начинается после заполнения форшахты глинистым раствором.

Бурение расширителями производится с обратной промывкой глинистым раствором с помощью эрлифта. Внутри бурильных труб (диаметром 250 *мм*) находится воздушная труба (диаметром 200 *мм*) с форсункой. В процессе бурения расширителем порода по внутреннему уклону забоя устремляется к всасу пульпы. Сжатый воздух, смешиваясь с пульпой, создает эмульсию с меньшим удельным весом, поднимающуюся вверх и далее через улиткообразную конструкцию в очистную систему. Расход воздуха на эрлифт 13,5 $м^3/мин$; давление $P = 8$ *ат*. Консистенция пульпы глинистого раствора 1 : 7 по объему.

Регенерация глинистого раствора, очистка его от породы (учитывая, что вместе с раствором выдается порода из забоя до 12 $м^3/час$) производится с помощью желобов и вибрационных сит.

Расширение забоя осуществляется в четыре приема, при этом последовательно вводятся в работу расширители большего диаметра $D_1 = 2$ *м*, $D_2 = 3{,}5$ *м*, $D_3 = 5$ *м* и $D_4 = 5$ *м*. Возможен и непосредственный переход с диаметра расширителя 3,5 *м* сразу на 6 *м*, минуя промежуточную фазу в 5 *м*.

По окончании бурения шахты на полную проектную глубину приступают к устройству

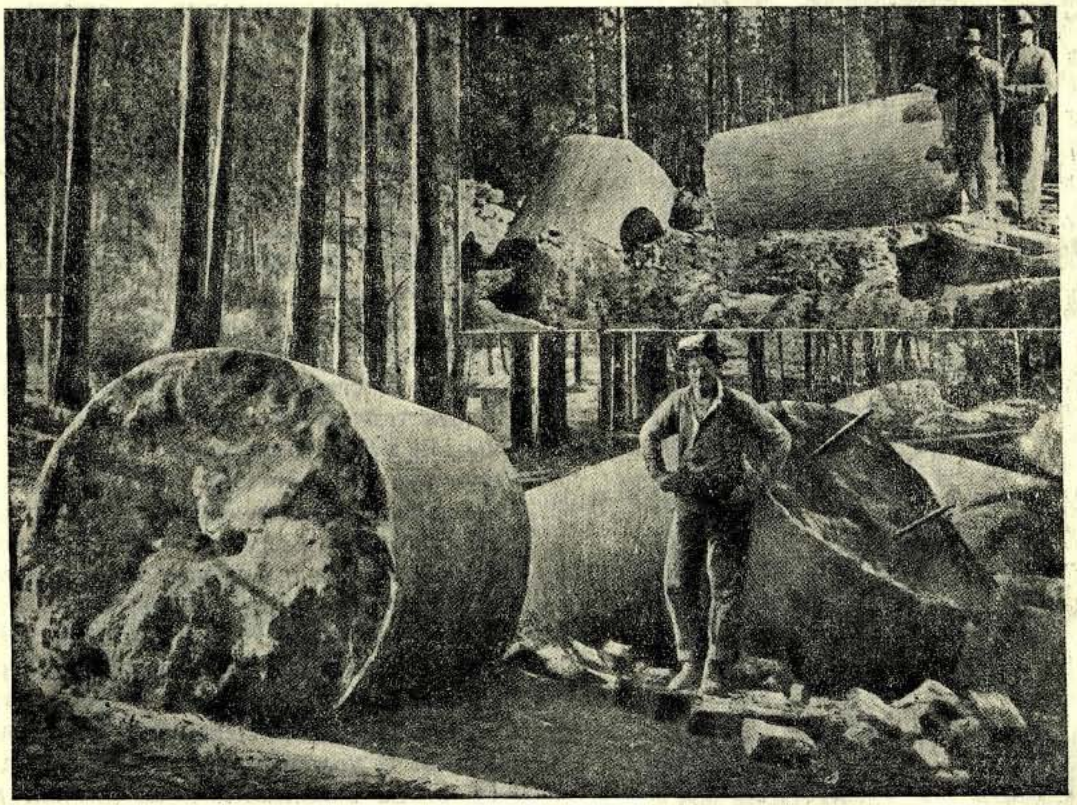


Рис. 227. Извлеченный керн при бурении шахтного ствола по скальным породам методом Ньюсона

постоянного крепления ствола в виде цилиндра металлической конструкции из чугунных тюбингов. Опускание металлического цилиндра крепи в выработку, заполненную глинистым раствором, осуществляется двухметровыми звеньями, стыкуемыми между собой на месте в устье ствола по мере опускания и наращивания крепи. Швы между тюбингами тщательно расчеканиваются, при этом в нижней части колонны тюбингов устраивается днище.

Для облегчения спуска в выработку металлического каркаса крепи диаметр последней устанавливается на 0,80 *м* менее диаметра ствола в проходке. При этом учитывается возможное отклонение ствола от вертикали в процессе бурения. При опускании в глинистый раствор крепи последняя приобретает

пловучесть и вытесняет глинистый раствор из выработки по мере погружения. Вытесненный глинистый раствор поднимается вверх через кольцевое пространство между крепью

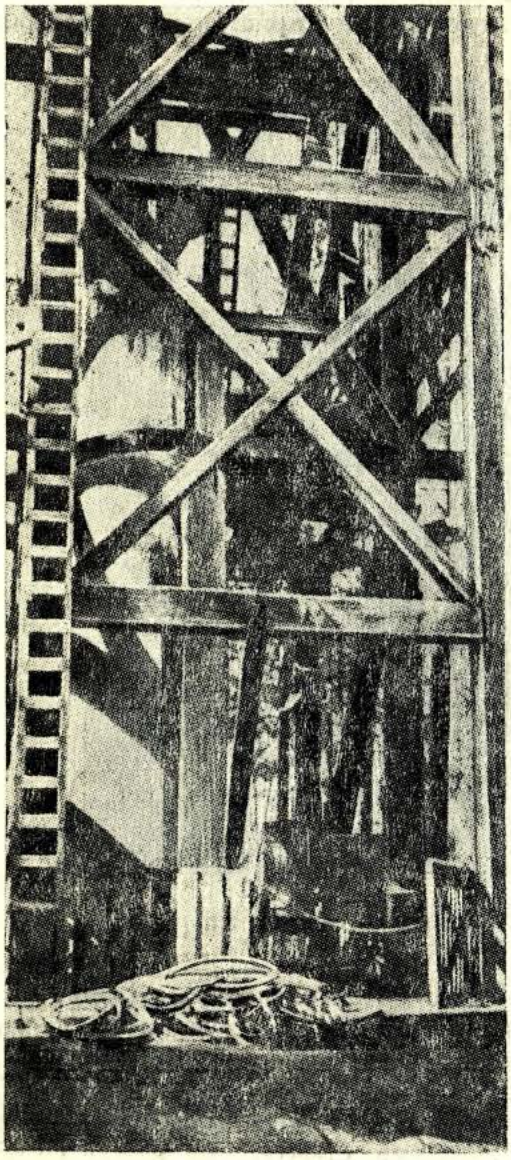


Рис. 228. Копер буровой установки по методу Ньюсона

и породой, после чего через специальный отводной канал выводится в отвал.

Остановив днище крепи за 1 *м* до забоя, производят нагнетание цементного раствора под давлением, вытесняя им полностью глинистый раствор через специальные трубы, которые поднимаются вверх по мере производства инъекционных работ.

Бурение шахтных стволов диаметром до 6 *м* имеет исключительное значение в тоннельном деле и в горной промышленности. Учитывая, что метод бурения дает особенно скоростной эффект по мягким и неустойчивым породам, следует ожидать, что он сможет в дальнейшем заменить в определенных случаях искусственные приемы закрепления грунтов в виде замораживания и сжатого воздуха. В условиях карстовых пород, где можно ожидать провала инструмента и утечек глинистого раствора, этот метод не следует считать приемлемым. Принцип концентрической пилот-системы, принятый при бурении шахт крупного диаметра, является целесообразным. Концентрическая пилот-система широко и с успехом применяется и в тоннельной практике Америки и Англии при проходке тоннелей больших профилей.

Метод разрушения пород в забое, принятый в агрегате МОМ в виде резания мягких, глинистых пород, следует считать правильным и эффективным. Бурение по скальным породам дает значительно меньший технико-производственный эффект. В этом отношении заслуживает внимания метод Ньюсона, заключающийся в бурении по крепким породам кернами больших размеров (Engineering and Mining Journal, № 19, сентябрь 1936 г.).

В Грас-Валей (Калифорния) рудничная компания Идахо-Мериленд пробурила шахтный ствол диаметром 1 524 *мм* на глубину 343 *м*. В условиях скальных пород методом Ньюсона вынимался керн длиной до 2,13 *м* и весом до 11 *т* (рис. 227, 228). При этом методе устраняется абразивный процесс породы в массиве, и в определенных случаях от него можно ожидать большего эффекта, чем от применения взрывных работ.

При бурении агрегатом МОМ обращается особое внимание на возможное закручивание бурильных труб в процессе бурения расширителями, учитывая параметры по резанию и дроблению пород, в особенности при работе бурового инструмента в забое, содержащем породы с отличающимися коэфициентами крепости. Связанное с этим явлением изменение нагрузок существенно влияет на величину крутящего момента, обусловливающего необходимость усиления конструкции установки.

В этом отношении в более благоприятных условиях может работать буровая установка, имеющая герметический мотор вблизи режущего агрегата, по типу турбобура.

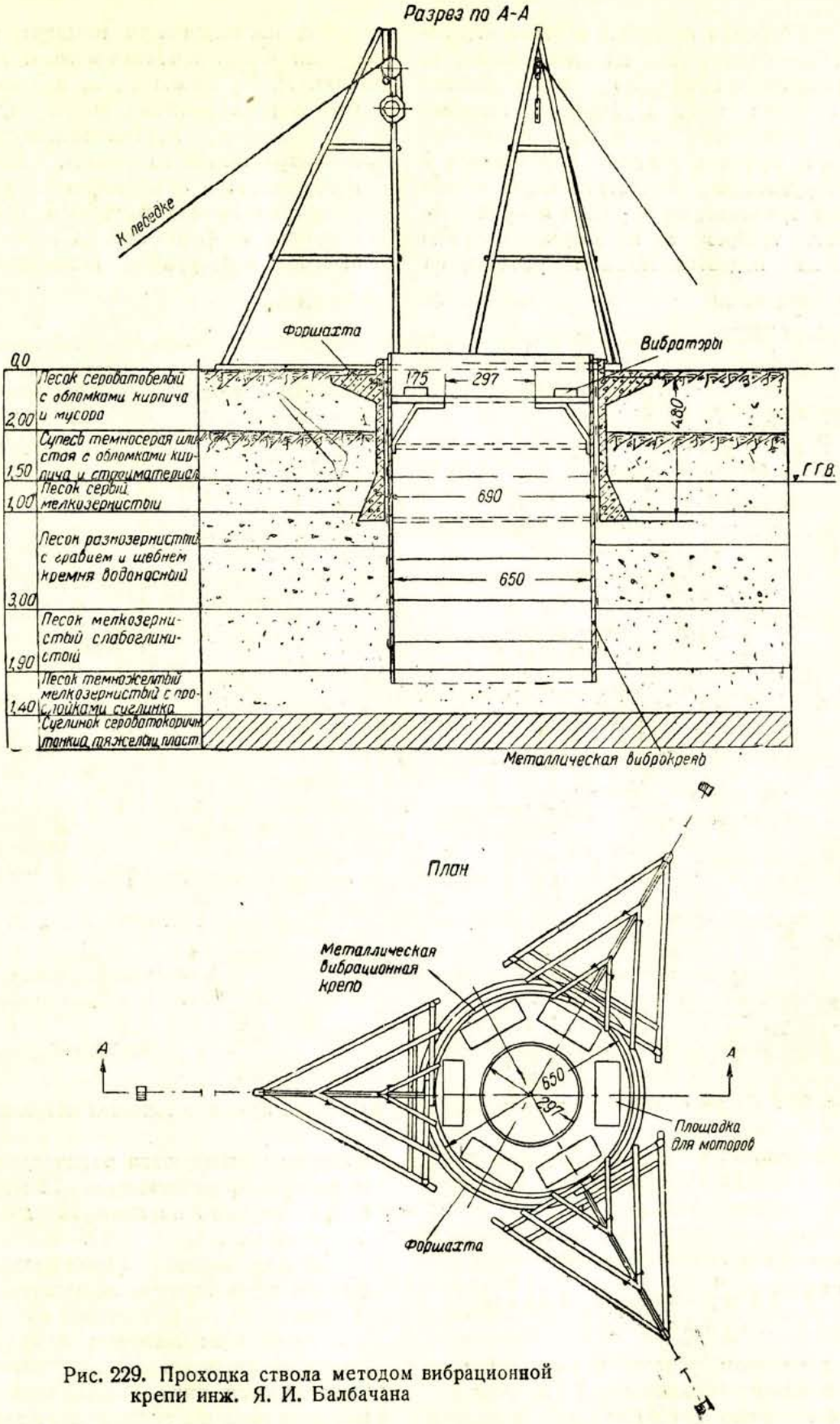


Рис. 229. Проходка ствола методом вибрационной крепи инж. Я. И. Балбачана

Процесс бурения шахтных стволов агрегатом МОМ базируется на использовании существующего нефтяного оборудования

Для бурения шахт в условиях тоннелестроения необходимо с целью получения скоростного эффекта создать портативное и легкое оборудование, соответствующее технологическим требованиям буровых и проходческих работ, требующее минимума затраты времени на подготовительные работы, на монтаж и демонтаж установки. Бурение шахт по системе инж. Г. И. Маньковского, совершенно исключающее наличие людей в забое, является одним из наиболее прогрессивных методов советской техники шахтостроения.

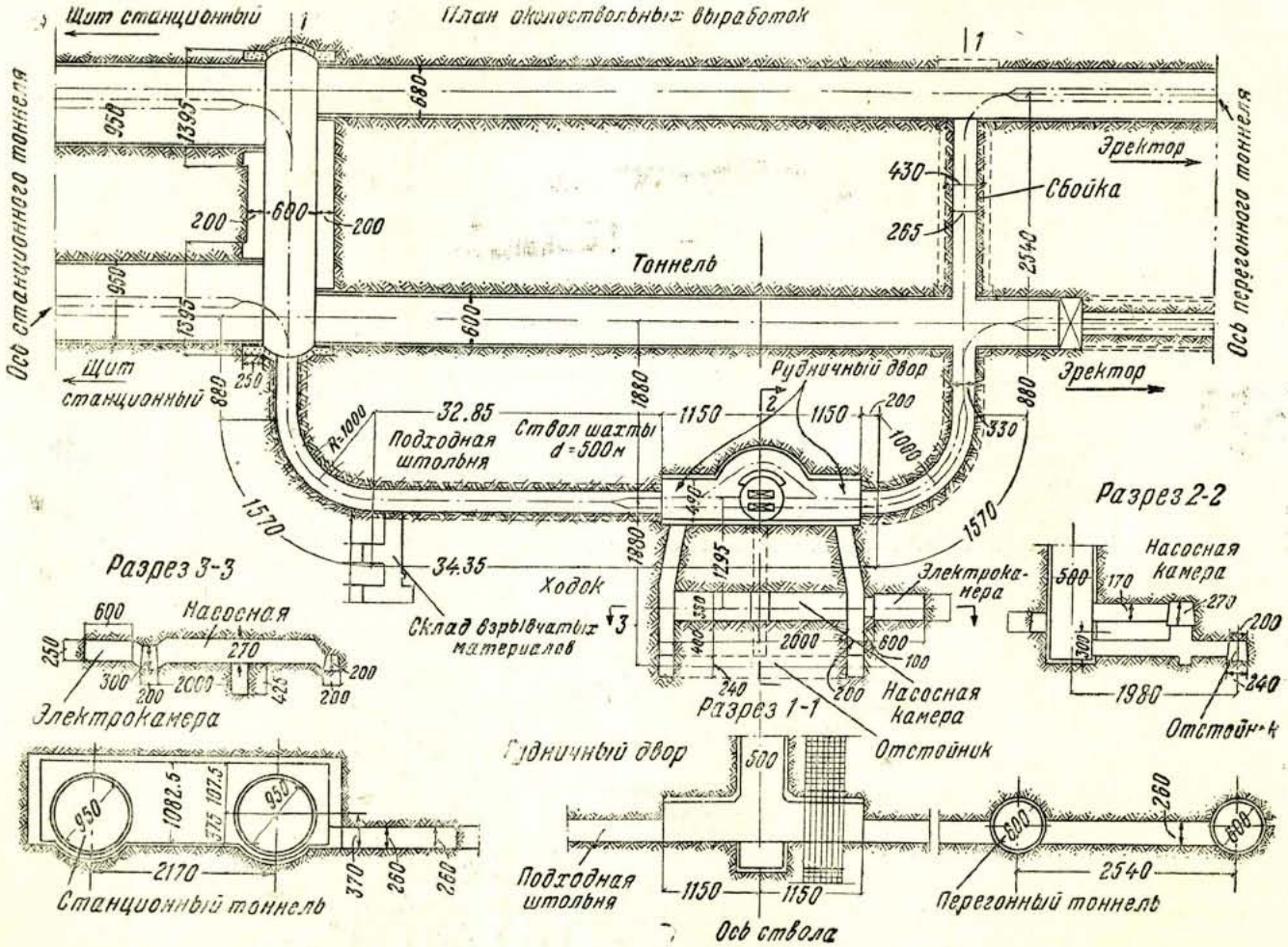


Рис. 230. Схема околоствольных выработок при щитовой проходке тоннелей метрополитена

и) Метод проходки шахты вибрационной крепью

В Подмосковном угольном бассейне при проходке шахтного ствола через плывунные грунты мощностью до 20 *м* был применен метод проходки при помощи вибрационной крепи. Сущность этого метода, предложенного инж. Я. И. Балбачаном, заключается в том, что под влиянием вибрации, сообщаемой тонкостенному металлическому цилиндру по диаметру шахтного ствола, последний легко погружается в плывунную толщу. Полый цилиндр из железа толщиной 10—15 *мм* монтируется в форшахте. Сверху укрепляется жесткая конструкция кольцевого стола, на котором монтируются расположенные попарно и синхронно работающие 12 моторов. Мощность каждого из моторов до 14 *kw*, при 1 500 *об/мин.* (рис. 229).

Между каждой парой моторов размещается эксцентрично насаженный дебаланс. Таким образом, при работе моторов цилиндру и окружающим частицам плывунного грунта сообщаются колебательные движения. Грунт устремляется внутрь цилиндрической крепи, которая сама погружается. После достижения

водоупора грунт из цилиндра удаляется, устраивается постоянная конструкция крепи и продолжается проходка обычным способом в условиях устойчивых коренных пород. Для шахтного ствола диаметром 6 *м* организуется опытная проходка методом вибрационной крепи на трассе 4-й очереди строительства Московского метрополитена. От внедрения указанного метода в практику шахтного строительства можно ожидать определенного технического эффекта при проходке стволов через плывунные грунты.

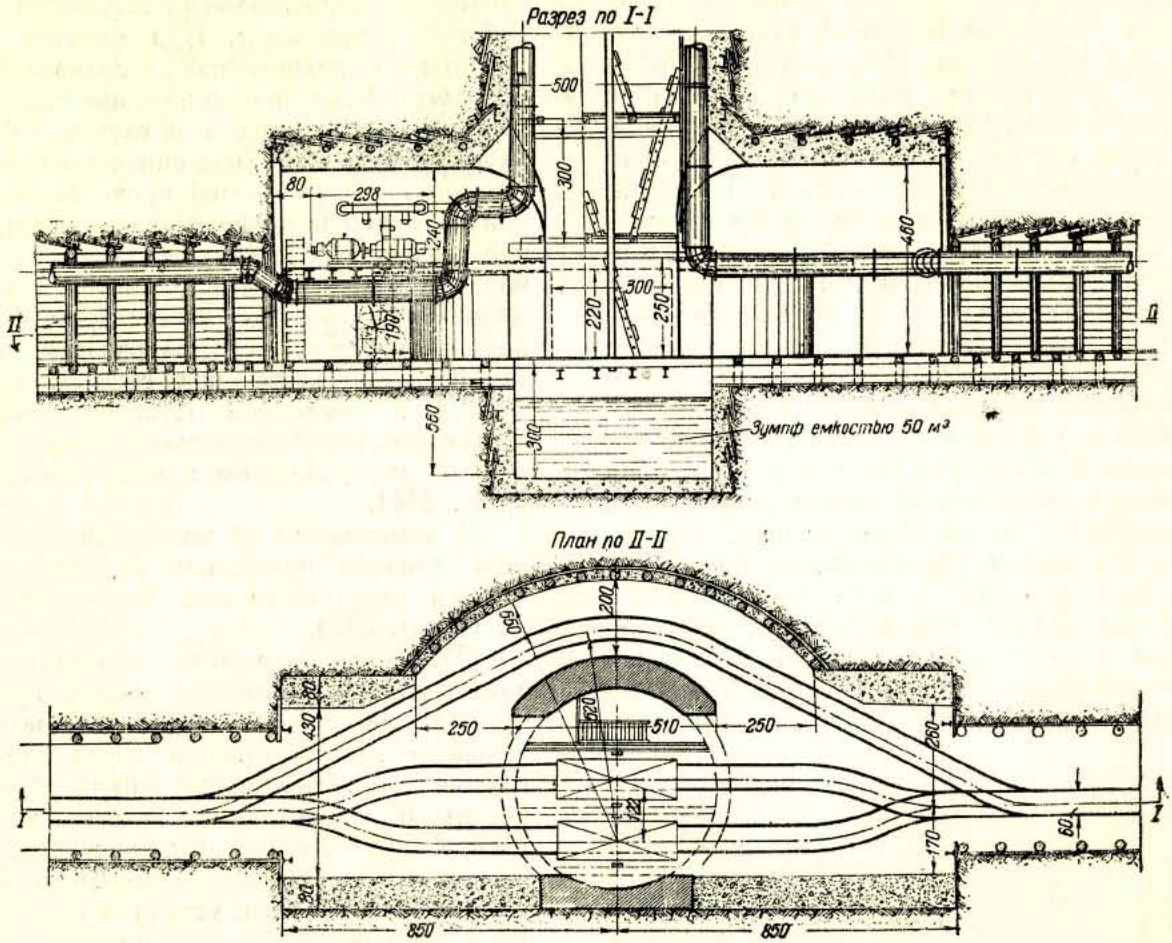


Рис. 231. План и разрез рудничного двора

ОКОЛОСТВОЛЬНЫЕ ВЫРАБОТКИ

Для подхода от ствола шахты к основной трассе сооружаемых тоннелей создается система околоствольных выработок и подходных штолен (рис. 230). В комплекс околоствольных выработок входят: рудничный двор, подходные штольни, насосная камера, электрораспределительная камера, камера для хранения взрывчатых материалов. Тип околоствольных выработок зависит от принятой системы разработки тоннеля, расстояния шахт от основной трассы, заданных темпов производства работ, объема тоннельных работ и организации внутритоннельного транспорта. Надобность в околоствольных выработках отпадает в тех случаях, когда шахта располагается непосредственно на оси тоннеля; в городских условиях застроенности территории это не всегда достижимо. В таком случае шахта располагается обычно в стороне от трассы, дабы обеспечить необходимую свободную площадку для расположения всех поверхностных шахтных устройств. До проходки подходных штолен делается рассечка ствола шахты, устройство сопряжения и рудничного

двора. Рудничные дворы представляют собой горизонтальные выработки, расположенные непосредственно у шахтного ствола, и служат для выдачи через ствол породы и приема в шахту необходимых материалов (рис. 231).

В практике тоннельного строительства создаются рудничные дворы: а) двухстороннего типа для обеспечения непрерывного потока грузов при работе шахтного подъема и б) рудничные дворы односторонние тупикового типа, где не ожидается значительного грузооборота. Размеры сечения, крепление рудничного двора и сопряжение его с шахтным стволом и с подходными к основной тоннельной трассе штольнями увязываются в каждом отдельном случае с будущими притоннельными сооружениями вентиляционного комплекса (рис. 232). Недалеко от шахты устраивается насосная камера. В зависимости от принятого способа производства работ для обеспечения подземной откатки и устранения встречного движения вагонеток устраивается специальная система приствольных штолен. От ствола шахты иногда засекается нижняя подходная штольня, а в нужных случаях и (верхняя) направляющая штольня, обслуживающие самостоятельно верхний и нижний горизонты основных тоннельных работ. В некоторых случаях, когда околоствольные выработки должны пройти непосредственно под ответственными сооружениями и зданиями, производится заглубление этих околоствольных выработок в устойчивые коренные породы. При этом для подъема на верхний горизонт устраиваются специальные бремсберги или гезенки (рис. 233). В тех случаях, когда околоствольные выработки должны стоять весьма долгое время на временном креплении (например, на все время производства тоннельных работ), что может вызвать осадку поверхности, некоторые околоствольные выработки берутся в бетонное крепление. При рабочих шахтах, которые в дальнейшем используются как вентиляционные, проектирование околоствольных выработок ведется в увязке с будущим направлением вентиляционных каналов. Там, где сооружение тоннелей предполагают вести при помощи щита, околоствольные выработки представляют систему подходных тоннелей, которые должны иметь габарит для пропуска наибольших размеров частей щита и шлюзовых аппаратов. Когда разработку тоннелей предполагают вести под сжатым воздухом, иногда в подходной штольне устраивают шлюзовые железобетонные камеры, состоящие из материального и людского отделения (рис. 234).

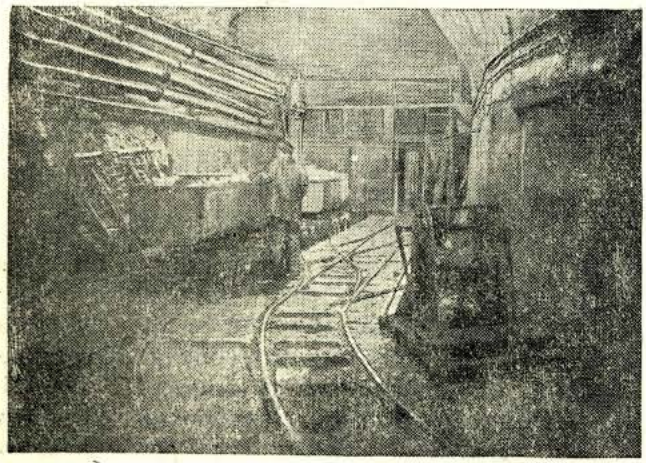


Рис. 232. Вид рудничного двора

В зависимости от интенсивности подземной откатки подходные штольни устраиваются двухпутного или однопутного сечения (рис. 235).

Обгонная штольня проходится при двухстороннем рудничном дворе, предназначенном разгрузить основную подходную штольню непосредственно перед стволом, и служит для откатки порожняка и пропуска бетона и тюбингов из шахты в тоннель (рис. 236). Обгонные штольни устраиваются на всех основных шахтах, имеющих большой грузооборот, где они, устраняя встречные потоки, дают положительный производственный эффект. Сечение обгонной штольни 2,4×2—2,2 *м*, каковые размеры являются достаточными для размещения двухпутной колеи. Крепление обгонной штольни делается из деревянных рам, устанавливаемых через 1 *м*, или сплошняком, в зависимости от величины горного давления (рис. 237). Радиус закругления на поворотах принимается до 10 *м*. Отвод воды осуществляется канавкой, проложенной под одним из путей с уклоном 3‰ в сторону рудничного двора для стока воды в зумпф шахты.

Для примера приведем данные оборудования насосных и других камер, а равно шахтных площадок, примененных при строительстве тоннелей Московского метрополитена.

Насосная камера для откачки воды на время проходки тоннелей устраивается в расстоянии 5 *м* от ствола шахты, а уровень

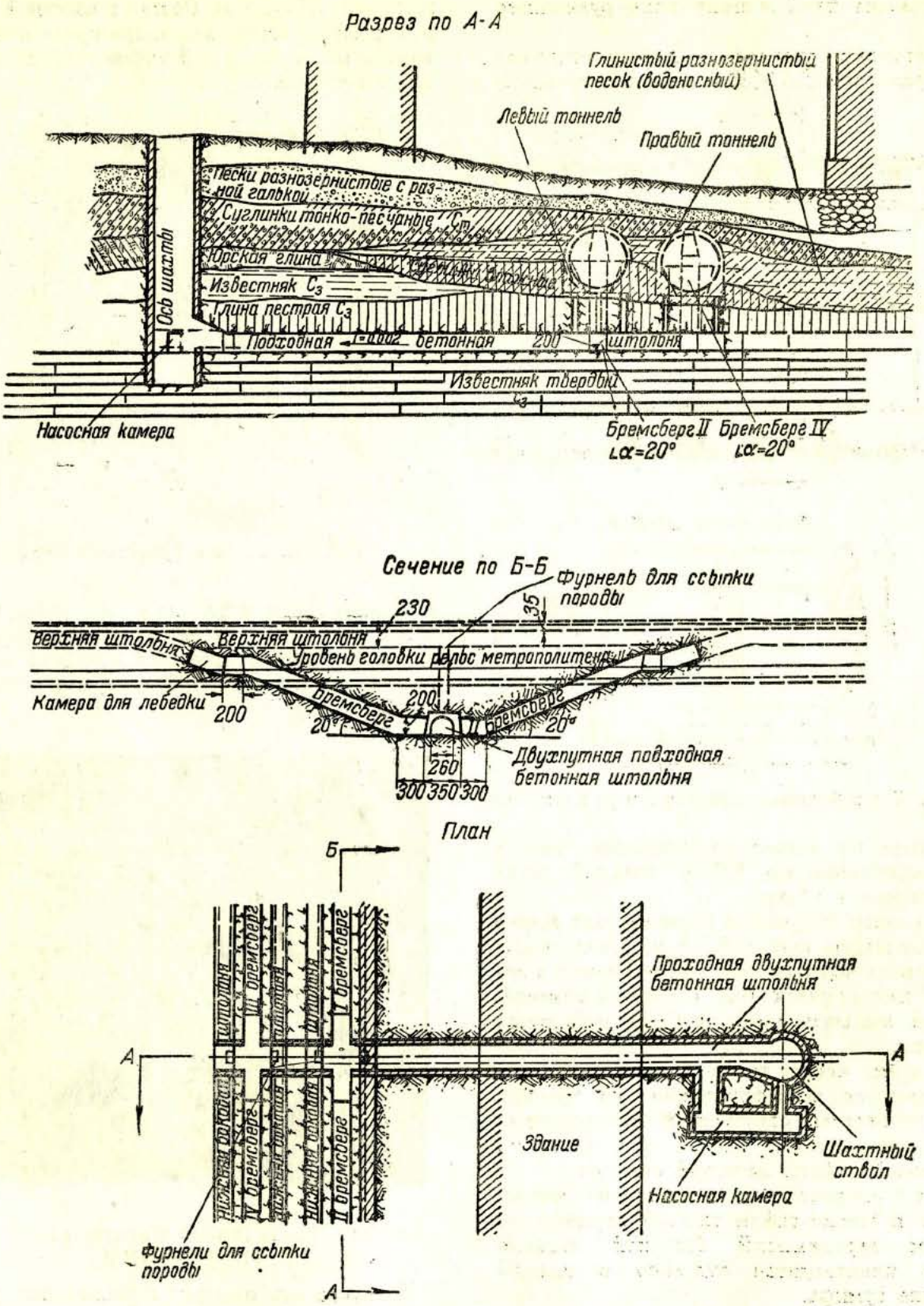


Рис. 233. Открытие фронта тоннельных работ из бремсбергов

пола камеры на 1 *м* выше низа рудничного двора.

Насосная камера для основных шахт размером 3,6 × 9 *м* и высотой 2,5 *м*

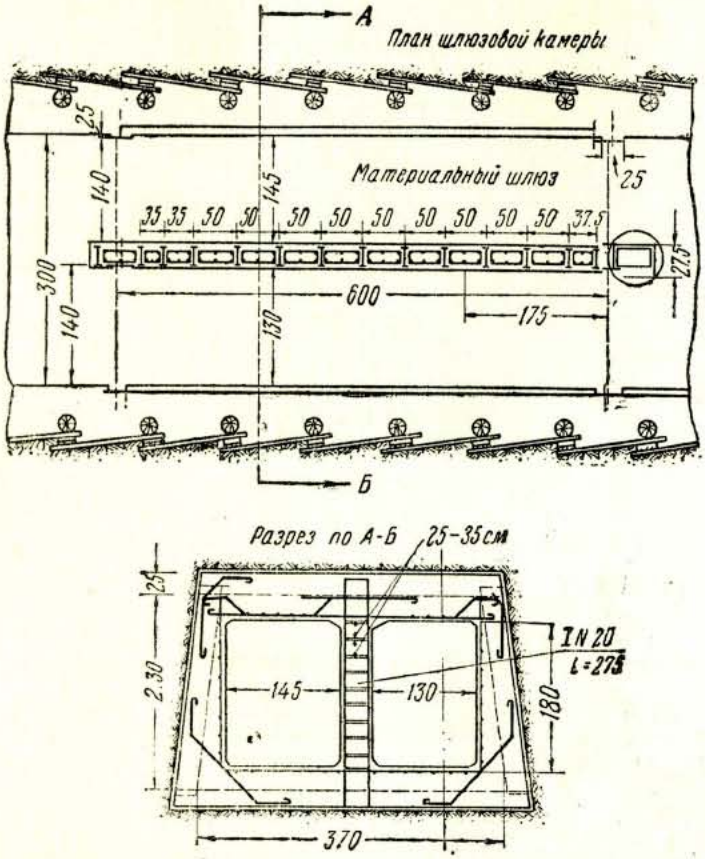


Рис. 234. Железобетонная шлюзовая камера в штольне

рассчитана на четыре центробежных насоса производительностью 108 $м^3$ каждый, устанавливаемых в камере.

Основным сборником воды служит зумпф в стволе шахты глубиной 3,5 *м*, откуда осветленная вода через особый ход поступает в колодец, находящийся под насосной камерой, и далее всасывающими трубами забирается в насосы.

Во время чистки колодца всасывание воды переключается непосредственно из зумпфа, куда проведены ответвления всасывающих труб, перекрываемые задвижками на время нормальной работы насосной станции.

Для осуществления успешной чистки зумпфа в стволе шахты таковой перегорожен пополам вертикальной бетонной стенкой. Чистка производится отдельно в каждой половине зумпфа.

Насосная камера соединяется с рудничным двором посредством штольни высотой 2,2 *м*, шириной 1,1—1,5 *м*. Рядом с насосной камерой располагается электрораспределительная камера размером 6 × 3 *м*, высотой 2,5 *м*, на том же уровне.

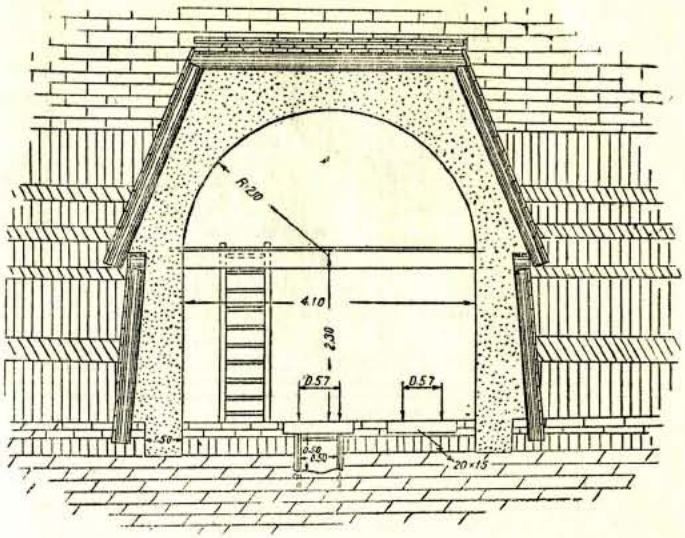


Рис. 235. Сечение рудничного двора

Насосная камера для вспомогательных шахт рассчитана на два насоса, размеры камеры 3,6 × 5,5 *м*, высота 2,5 *м*, в остальном устройство аналогично с камерами основных шахт.

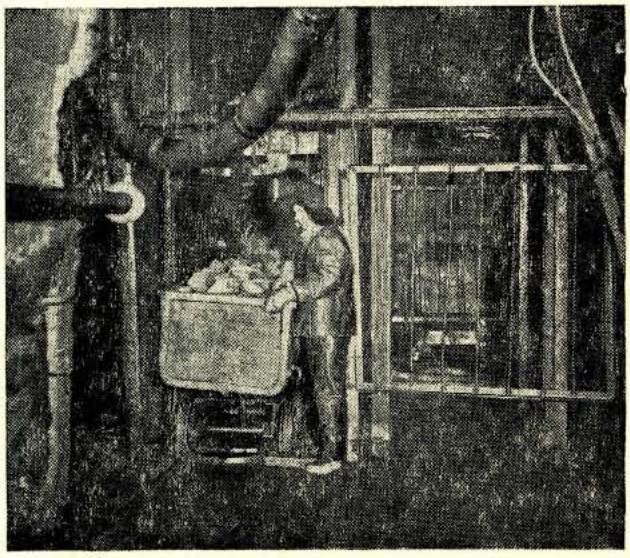
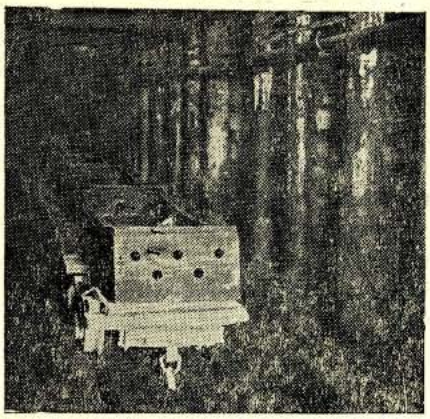


Рис. 236. Подача вагонов в шахтную клеть через рудничный двор

В случае необходимости увеличения мощности насосной станции дополнительными насосами камера может быть разработана

в длину на величину, необходимую для размещения насосов.

Разработка насосной камеры производится из штольни, соединяющей камеру с рудничным двором; разрабатывается камера на полный профиль на деревянном креплении; в перекрытие укладываются металлические двутавровые балки № 30 взамен верхняков путем перекрепления на временные стойки. Потолок камер между двутавровыми балками заполняется бетоном по армированной сетке. Промежутки между стойками заполняются бетоном.



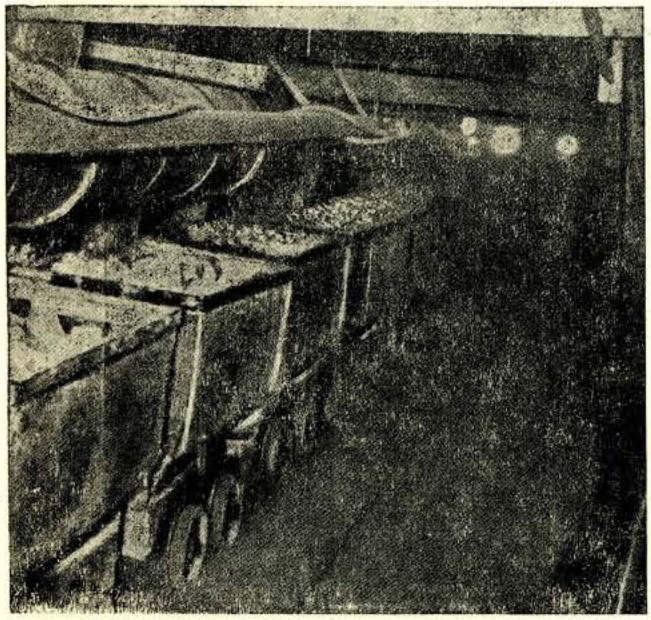


Рис. 237. Подходные штольни

Пол стены и потолок оштукатуриваются цементным раствором.

Электрораспределительная камера представляет собой штольневую выработку, в которой устанавливаются распределительные устройства для снабжения энергией всех электродвигателей шахты.

Для хранения взрывчатых веществ разрабатывается специальная изолированная выработка с учетом предохранительных целиков, ограждающих остальные разработки в случае взрыва. Этот склад взрывчатых веществ рассчитан на хранение запаса аммонала и капсюлей и располагается возможно дальше от основных сооружений (ствола шахты и тоннеля) и во всяком случае не ближе 25 *м*.

Для хранения необходимого инструмента у рудничного двора устраивается кладовая размерами 3 × 5 *м*, высотой 2,5 *м*, соединенная с рудничным двором при помощи штольни шириной 1,5 *м*, высотой 2,2 *м* и длиной 2 *м*.

В подходных штольнях укладываются рельсовые пути шириной колеи 600 *мм*, с минимальными радиусами закруглений 5 *м*; переход с одного пути на другой осуществляется стрелочными переводами.

На основных шахтах с обгонной штольней по главному подходу к стволу подаются вынутый грунт и порожние платформы из-под тюбингов, по обгонному подходу от ствола к забою подаются тюбинги и порожние вагонетки из-под грунта.

ОБОРУДОВАНИЕ ШАХТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ МЕТРОСТРОЕНИЯ

На Метрострое при шахтах организованы шахтные строительные площадки, приспособленные для выдачи породы из забоя и подачи материалов.

При существующем на Метрострое клетьевом подъеме вагонетка с породой поднимается из шахты в клетях на уровень верхней приемной площадки. Из клети вагонетки выкатываются на эстакаду и по грузовому пути следуют к бункерам, в которые выгружаются опрокидыванием. Разгруженная вагонетка переводится на порожняковый путь, откатывается к копру на тупиковый мостик, расположенный с противоположной стороны, и затем поступает в клеть. Наличие тупикового мостика позволяет вести независимо разгрузку и погрузку клети, что сокращает время на маневры (рис. 194).

Из бункеров, снабженных механическими затворами в виде металлических пластинчатых питателей, порода выгружается в автомашины и отвозится к месту свалки.

Тюбинги на шахтную площадку подаются в грузовых автомобилях непосредственно под тельферную эстакаду. Тельфер поднимает тюбинг с автомобиля и укладывает его, передвигаясь по монорельсу, на местный склад, находящийся под эстакадой. Подача тюбингов к стволу производится по монорельсу, который проходит над тупиковым мостиком, находящимся на уровне верхней приемной площадки. На тупиковом мостике тюбинг погружается на платформу, которая загружается в клеть и затем опускается в рудничный двор. Копры и бункерные эстакады приняты металлическими.

Все сооружения на шахтных строительных площадках расположены с учетом наиболее удобных подъездов к ним и обязательным соблюдением противопожарных требований.

Транспортировка материалов и оборудования на шахтной площадке производится по узкоколейным путям в вагонетках и на платформах.

На шахтной площадке оборудованы следующие основные надземные сооружения, включая горный комплекс: копер, машинное помещение, эстакада с бункерами для породы, тельферная эстакада для тюбингов, трансформаторная подстанция, гидроаккумуляторная (при проходке щитом в слабых грунтах), механическая и пневматическая мастерские, компрессорная, кузница, бетонная установка.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ГОРНАЯ ТЕХНИКА СООРУЖЕНИЯ ТОННЕЛЕЙ

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ТОННЕЛЕСТРОЕНИЯ

Вопрос о методе разработки и крепления элементов тоннельных выработок находится главным образом в зависимости от характера грунтовых напластований и режима подземных вод, в особенности от величины и направления горного давления, с которым тоннельщику приходится вести борьбу в первую очередь.

При системе производства работ, состоящей из дробных фаз, в которых создается обычно теснота производства работ ввиду ограниченности профиля, необходимо применять такие элементы крепления, которые имеют простейшие соединения между собой.

Деревянное крепление играет роль временного крепления, до устройства постоянной — каменной или металлической — обделки.

В условиях неустойчивых пород, где проявляется усиленное давление на крепи, предпочтительно иметь лесоматериал эластичный (сосна), но не твердых пород (дуб). Следует учесть, что применение лесоматериала «упругих» древесных пород в слабых грунтах имеет весьма важное значение, потому что до того, как крепь сломается под влиянием нарастающего горного давления, она дает значительный прогиб и тем самым сигнализирует о нарастающем давлении и необходимости дополнительного крепления. Наоборот, лесоматериал твердых пород под действием горного давления претерпевает излом, влекущий за собой иногда полное обрушение крепи.

Методы производства тоннельных работ отличаются большим разнообразием в зависимости от местных условий и в каждом отдельном случае подлежат особому рассмотрению. Если начинает проявляться исключительное по своим размерам горное давление, при котором мощное деревянное крепление начинает деформироваться, переходят на металлическую или каменную временные крепи.

Одним из основных вопросов, связанных с сооружением тоннелей, является правильная постановка геотехнических изысканий и обследования массивов, через которые должен быть проложен тоннель. Геологические данные могут повлиять и на положение тоннеля — должен ли он быть базисного или вершинного типа. Данные геологического прогноза не всегда совпадают с действительными природными условиями, в которых создается тоннель.

При сооружении больших горных тоннелей, несмотря на имеющиеся подробные материалы инженерно-геологических исследований, очень часто приходится встречаться с целым рядом неожиданностей и природных трудностей, настолько разнообразных по своему характеру, что их нельзя заранее предвидеть. Особенно это имеет место при пересечении тоннелем массивов неустойчивых пород. В этом случае прокладка тоннеля требует применения разнообразнейших методов производства работ. Пересекая мощные напластования пород, приходится иногда наталкиваться на ряд сбросов, вследствие различных процессов дислокации пород, завалов разрушенных материалов, насыщенных водой. Встречаются и грунты плывунного характера с большим гидростатическим напором. При этом в зависимости от напластования пород и выклинивания сбросов в тоннеле может проявиться чрезвычайно больших размеров горное давление, с которым нужно вести упорную борьбу в продолжение всего процесса проходки и крепления выработки.

Стахановское движение, охватившее все области строительства Союза, оказывает свое

влияние и на прогресс тоннельной техники. Стахановские методы, несущие высокую производительность труда, обусловливают совершенную организацию производственных процессов, модернизированную механизацию и оборудование работ, выявляют новые высокоэффективные технико-экономические показатели и дают невиданные ранее темпы сооружения тоннелей.

В условиях подземных работ быстрота раскрытия профиля и его немедленное закрепление имеют решающее значение. Известно, что при пересечении, например, тоннельным ходом пласта глины работы в начале обнажения поверхности выработки ведутся без особых осложнений. Но если проходку ведут медленно и на обнаженную глину проявляют свое действие факторы воздуха и воды, то глина начинает «дышать» (пучиться); при этом нарастает такое усиленное давление на крепи, что неизбежны деформации, поломка крепей, осадка, вплоть до строительных катастроф. При стахановских темпах работ фактор времени является строго определенным и приводит в тоннельных работах к минимуму продолжительности нахождения выработки на деревянном креплении, что существенно влияет на правильность технического решения задачи тоннелирования в условиях пород с нарастающим горным давлением.

Высокая производительность труда, обусловливающая быстрое продвижение забоя вперед, настоятельно требует полной перестройки принципов механизации работ. Необходимо конструировать новые типы забойных машин и инструментов, погрузочных машин, тоннельно-транспортных средств, подъемных устройств.

Процессы разработки забоя, погрузки, откатки и подъема должны быть строго согласованы между собой. Цикличное проведение их следует строго обеспечить. Ни один из элементов запроектированной и установленной системы оборудования не может оказаться узким местом, лимитирующим развитие успеха, который обеспечен при условии правильного проведения стахановских методов.

При проходке штолен на строительстве Московского метрополитена стахановское движение существенно повлияло на организацию производства работ и темпы проходки. Организацией цикличности процесса, правильной расстановкой рабочей силы по определенному уплотненному графику, отражающему все отдельные операции, можно обеспечить высокую производительность труда, а равно значительное увеличение скорости проходки. Особое внимание обращается на подготовку необходимых инструментов, в особенности отбойных молотков и перфораторов. Заранее там же заготовляется крепежный материал в виде рам, марчеван, затяжек и т. п., доставляемый затем непосредственно к забою откатчиками. Внимание обращается и на состояние откаточных путей, поворотных кругов, стрелок. Содержание в исправности откаточных путей в значительной степени повышает общую производительность труда. В результате применения стахановских методов проходки штолен средняя скорость продвижения забоев на 2-й очереди строительства Московского метрополитена увеличилась против 1-й очереди на 360%. Средняя выработка проходчика в смену составляла на 1-й очереди 0,47 $м^3$, а на второй — 2,5 $м^3$, что дает увеличение более 500%.

При проходке штолен в карбонных глинах на шахте № 65—69 Метростроя в «стахановские сутки» по забою № 4 была достигнута скорость 7,7 *м*, а по забою № 3 скорость 8,3 *м* при сечении штолен в 7,7 $м^2$.

При проходке взрывным способом штольни в карбонных глинах на шахте № 75—77 Метростроя бригадой тов. Лушника была достигнута скорость проходки 4,22 *м* в смену при площади забоя штольни в 7,8 $м^2$.

Но, несмотря на достигнутые результаты, следует в дальнейшем ввести методы, которые бы усовершенствовали самую проходку. Это касается особенно вопроса механизации погрузки породы в забое. Следует также максимально механизировать откатку породы, улучшить качество откаточных путей, а для крепления штольни применять специальную стандартного типа металлическую систему временного крепления, широко примененную при проходке передовых штолен по трассе 4-й очереди строительства.

Развитие стахановского движения в горной промышленности СССР, особенно в Криворожском и Донецком бассейнах, вызвало к жизни ряд новых систем и приемов производства работ. В частности имеется в виду обуривание за одну смену одним бурильщиком 5—10 забоев. Бурильщик Чемодуров шахты Первомайской Дзержинского рудоуправления, дал проходку 22,5 *пог. м* за смену, по породам средней крепости. Бурильщик шахты Ильичевского рудоуправления дал за смену проходку в 25,1 *пог. м*. При этом

следует учесть, что рост производительности труда при проведении наиболее трудоемкой операции цикла, к которой относится бурение забоя, является кардинальным и решающим фактором, обусловливающим темпы прохождения горных выработок. Указанный прием многозабойного обуривания одним бурильщиком, применительно к условиям тоннелестроения, где форсирование горных работ требует открытия большого числа забоев, может дать значительный технико-производственный эффект.

В результате широкого применения стахановских методов работы уже при проходке штолен 2-й очереди Московского метрополитена достигнуто коренное улучшение организации труда по сравнению с работами 1-й очереди. Это нашло отражение в следующих основных факторах, а именно: в увеличении выработки на одного рабочего, увеличении скорости проходки (продвижение забоя), росте заработной платы рабочих и резком уменьшении стоимости работ.

Сравнение данных по работам 1 и 2-й очереди приведено в табл. 13.

Таблица 13

Сравнительные данные по работам 1 и 2-й очереди строительства Московского метрополитена[1]

Наименование	Показатели		% к 1-й очереди
	до стахановского метода (1-я очередь)	стахановский метод (2-я очередь)	
Средняя выработка проходчика за смену в $м^3$ породы	0,47	2,50	525
Количество $м^2$ сечения забоя на проходчика	1,30	2,50	192
Скорость проходки в сутки:			
сеч. штольни 5—8 $м^2$	1,22	—	360
„ „ 7—8—11 $м^2$	—	4,40	—
Заработок проходчика (среднее за 1936 г.) .	—	—	144
Стоимость 1 $м^3$ грунта .	—	—	26

Непрерывное усовершенствование процессов организации и механизации работ по разработке забоя, погрузке породы, транспорту, монтажу обделки, гидроизоляции и внедрение стахановских методов работ обусловили снижение затрат рабочего времени (в человеко-часах) на комплекс работ по сооружению 1 *пог. м* перегонного тоннеля.

Так, если затрата рабочего времени на 1-й очереди строительства Московского метрополитена составляла 100%, то на 2-й очереди — 38%, на 3-й — 31%, а на 4-й — 27%. Такое снижение затрат рабочего времени между 1-й и 2-й очередью строительства объясняется тем, что на 1-й очереди применяли преимущественно горные способы временного деревянного крепления при бетонной обделке, а на 2-й очереди перешли на механизированный щитовой способ проходки с применением тоннельной обделки из чугунных тюбингов. Подъем производительности труда на последующих очередях строительства вызван внедрением новых тоннельных машин и механизмов и в частности погрузочных машин, электровозного и конвейерного транспорта, а равно совершенствованием приемов производства работ.

Несмотря на успехи, уже достигнутые в области организации труда, на подземном строительстве имеются скрытые резервы для еще большего подъема производительности труда.

Хроно-исследовательский сектор Метростроя проводил наблюдения и фотоучет на шахтах. При этом установлены следующие виды затрат рабочего времени (в %): основные работы 68,2, другие работы 5,6, технический простой и отдых 13,4 и устранимые потери 12,8. Последние 12,8% фактически теряются за счет неполадок в производстве, за счет недостатков в организации рабочего процесса. Таким образом, на базе стахановских приемов работ имеются предпосылки для ликвидации «устранимых» потерь. Тем самым еще выше поднимется производительность труда, обеспечив проведение скоростного тоннельного строительства.

ПРОХОДКА И КРЕПЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТОННЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Процесс сооружения тоннелей горным способом связан с проходкой ряда вспомогательных выработок. Такими выработками являются врезки, штольни, фурнели, бремсберги.

а) Врезки

Первая стадия работ по прокладке горного тоннеля начинается с врезки в лобовой откос припортальной выемки у головной части подземного сооружения.

[1] По данным инж. Таубкина С. Р., ОНТЗ Метростроя.

До начала подземных работ по проведению направляющей штольни следует надлежащим образом укрепить лобовой откос выемки. Крепление откоса становится особенно необходимым при наличии неустойчивых, имеющих тенденцию к оползанию пород. Отсутствие крепления лобового откоса врезки может повлечь за собой сползание породы и завал на определенном протяжении уже пройденной штольни. Крепление врезки обычно состоит из контрфорсных столбов, упирающихся в конструкцию скрепленных между собой распорок, образующих горизонтальную раму. Для предупреждения сдвига последней основные элементы конструкции рамы упирают в забитые свайные кусты (рис. 238, 239 и 240).

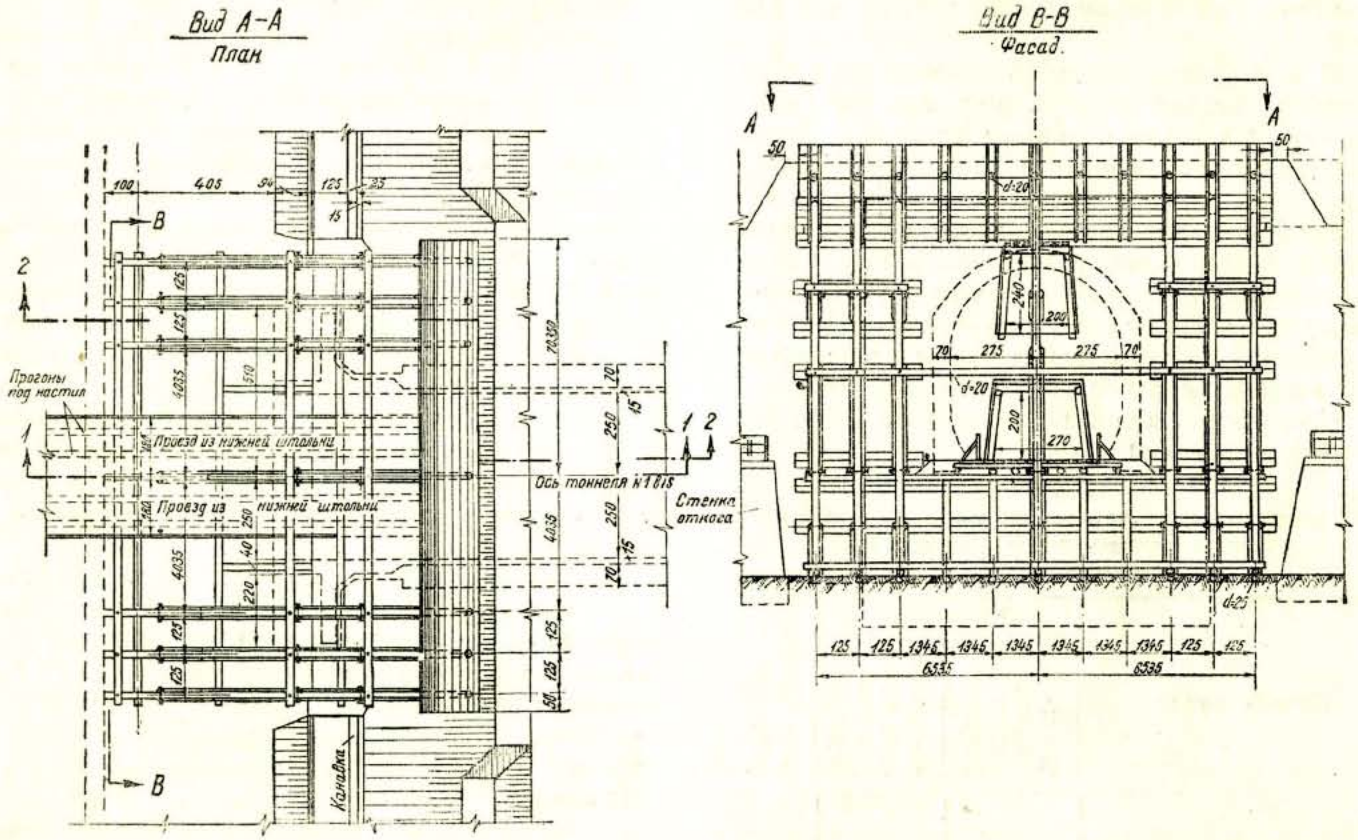


Рис. 238. Укрепление врезки тоннеля

Контрфорсные столбы поддерживают уложенные на лобовом откосе бревна, которые, как и в горизонтальной раме, расперты взаимно скрепленными распорками. Между бревнами заводятся затяжки из досок, которые прижимаются к грунту клиньями, забиваемыми между досками и бревнами. Если контрфорсные столбы имеют большую длину, то против продольного изгиба дается ряд дополнительных распорок, соединяемых с соответствующими элементами крепления врубками и скобами. Бревна горизонтальных рам для крепления врезки употребляются диаметром 20—25 *см*, а контрфорсные столбы, в зависимости от длины их, диаметром до 30—35 *см*.

б) Штольни

В тоннельном строительстве к штольням относят горизонтальные выработки преимущественно трапецоидального сечения, проходимые обычно параллельно оси тоннеля.

Штольни служат главным образом для разработки тоннеля на полный профиль. Расположение штолен по сечению тоннеля зависит от принятого метода разработки его на полный профиль. Месторасположение штольни по сечению тоннеля определяет и название штольни: верхняя, нижняя, боковая.

При сооружении тоннеля проходкой штольни раскрывается путь в грунтовом массиве, по которому производятся выдача породы на поверхность и подача необходимых строительных материалов к забою. Используя штольню для транспортных целей, в ней, кроме того, располагают разного рода трубы

(вентиляционные, водопроводные и для подачи сжатого воздуха), а также электрические кабели для освещения места работ и для подвода энергии к моторам насосов и других машин. В штольне производятся разбивочные работы по определению и поверке положения оси тоннеля как в плане, так и в профиле. В условиях метростроения при закладке шахт

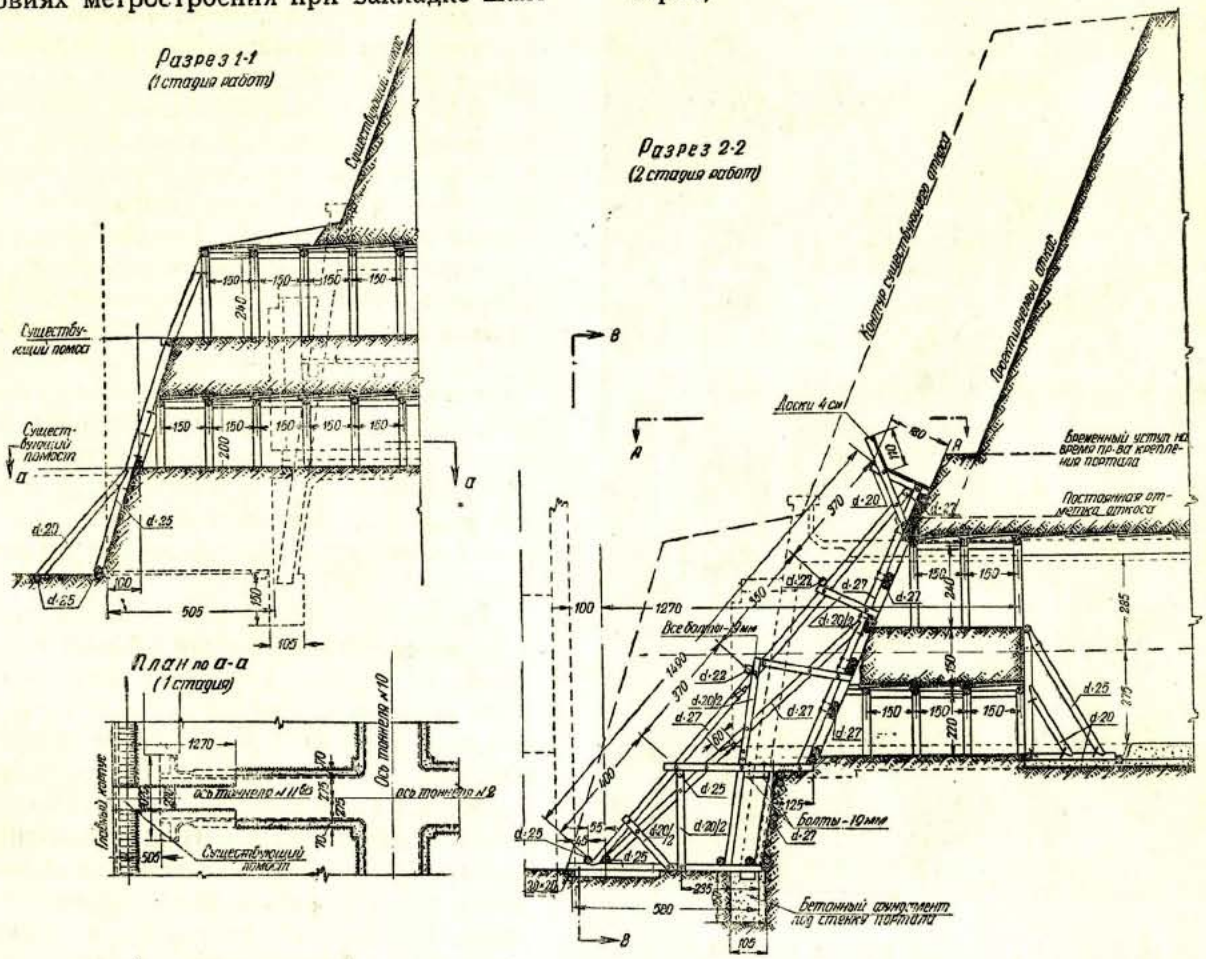


Рис. 239. Укрепление врезки тоннеля

в стороне от оси тоннеля ведется проходка подходных штолен, соединяющих шахтный ствол с основной трассой.

Для исследования геологических условий ведется проходка разведывательных штолен.

В устойчивых коренных породах передовые пилот-штольни в общем комплексе тоннельных работ имеют немаловажное значение:

1) прорезая водоносный грунтовый массив, штольня в значительной мере осушает его и, имея дренирующее значение, облегчает дальнейшие работы по раскрытию тоннельного профиля;

2) передовая штольня имеет рекогносцировочное значение, позволяя изучить массив, а иногда и своевременно предупредить об ожидаемых по трассе выклиниваниях слабых пород, требующих специальных мер при раскрытии тоннеля на полный профиль;

3) передовая штольня в зависимости от местных условий может обеспечить эффективную систему организации подземного транспорта;

4) при наличии сквозных передовых штолен по трассе тоннеля может быть установлена надлежащая облегченная система вентиляции основных работ;

5) в случае ошибочных отклонений штолен от трассы можно своевременно, без ущерба для дела, скорректировать направление основных тоннелей в полном соответствии с проектом трассы;

6) в метростроении при сбойке штолен по трассе устанавливается сообщение между отдельными шахтными стволами; при этом значительно улучшаются условия безопасности подземных работ; в случае какой-либо аварии рабочие имеют возможность сообщения по

передовым штольням к разным шахтным стволам;

7) при ведении в случае необходимости щита по крепким породам (известнякам) в нижней части профиля представляется воз-

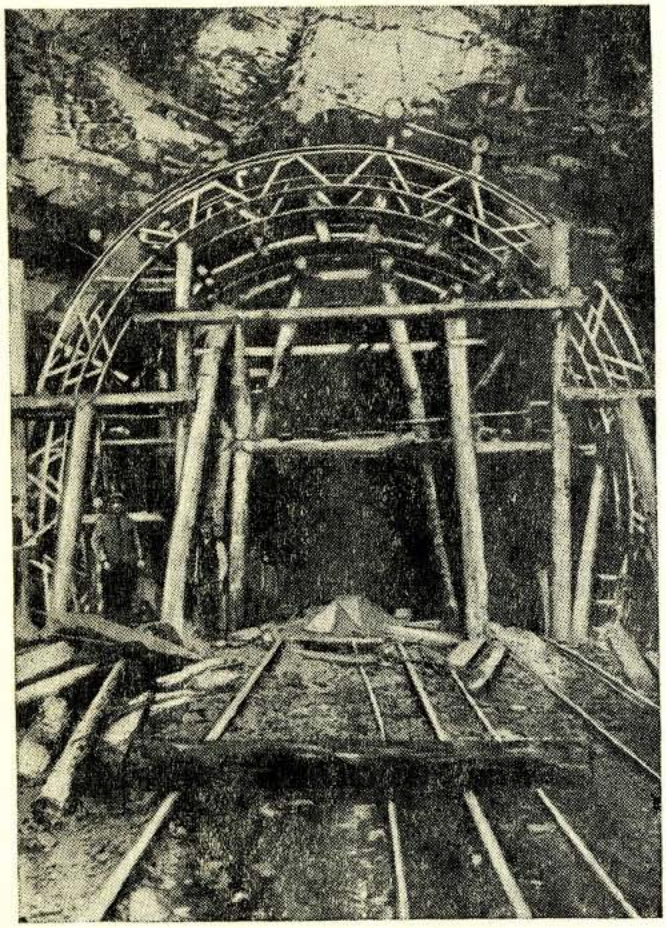


Рис. 240. Укрепление врезки тоннеля

можным уложить в передовой штольне бетонный лоток с направляющими рельсами для продвижения щита вперед;

8) при сбойке штолен по трассе возможна укладка трубопроводов, обеспечивающих резервирование энергии из разных источников.

При пересечении массива слабых, неустойчивых пород проходка передовой штольни нецелесообразна.

Форма сечения штолен зависит от свойств пересекаемых пород (величины и направления, оказываемого породами горного давления на выработку), срока службы и назначения выработки, а равно качеств материала, предназначаемого для крепления. В скальных и вообще устойчивых породах форма сечения штольни может быть прямоугольная, трапецоидальная или со сводчатым потолком. Последняя обеспечивает горным выработкам в коренных породах при небольшой ширине достаточную устойчивость и создает возможность при отсутствии вывалов обходиться без всякого крепления, когда породе в кровле придается сводчатая форма. Давление, возникающее в вышележащих слоях, воспринимается сводом.

При значительной ширине штолен, проходимых в процессе сооружения тоннеля, а равно в неустойчивых породах приходится прибегать к креплению выработок. В этом случае штольневым выработкам придают прямоугольное или трапецоидальное сечение. Прямоугольное поперечное сечение придают штольням сравнительно редко, так как в этом случае крепь может воспринимать только силы вертикального горного давления. Трапецоидальная форма поперечного сечения является весьма распространенной, когда крепь должна воспринимать как вертикальное, так и боковое давление. В тоннельном деле эта последняя форма штольни обычно и применяется (рис. 241, 242).

Поперечные сечения штолен, применяемых в тоннелестроении, имеют обычно следующие размеры: ширина штольни поверху от 2 до 3 *м*, ширина понизу от 2,5 до 3,5 *м*, высота штольни от 2 до 2,5 *м*. При большей высоте штольни разработка породы и постановка элементов временного крепления становятся весьма неудобными и затруднительными.

Размеры поперечного сечения штольни зависят от габаритов и типа подземного транспорта (вагонетки, электровозы, число рельсовых путей, конвейеры), а равно от количества и размеров вентиляционных, водоотливных и других трубопроводов, от способа передвижения рабочих по штольне и от условий работы в забое.

Высоту штольни в свету не рекомендуется назначать менее 1,8 *м*. Устанавливая ширину транспортной штольни по габаритам подземного подвижного состава, принимают расстояние от наиболее выступающих частей вагонетки или электровоза до крепи выработки и между вагонетками — при двухпутных выработках — в 20—25 *см*. При этом для передвижения людей по штольням при назначении размеров последних учитывают данные, принимаемые в горной промышленности (см. табл. 14).

Таблица 14

Размеры свободных проходов и ниш в штольневых выработках

Скорость откатки в *м/сек*	Условия передвижения людей	
	при массовой механической доставке людей к месту работ	при отсутствии массовой механической доставки людей к месту работ
	Однопутные выработки	
До 1,5	Ниши через 50 *м* или свободный проход шириной не менее 50 *см*.	Ниши через 25 *м* или свободный проход шириной не менее 70 *см*.
Свыше 1,5	Ниши через 20 *м* или свободный проход шириной не менее 80 *см*.	Свободный проход шириной не менее 1 *м*.
	Двухпутные выработки	
До 1,5	Ниши и свободный проход не обязательны.	Ниши и свободный проход не обязательны.
Свыше 1,5	Ниши через 25 *м* или свободный проход шириной не менее 80 *см*.	Свободный проход шириной не менее 1 *м*.

Ниши устраиваются шириной не менее 1,5 *м*, глубиной не менее 1 *м* и высоты боковой стенки выработки.

При трапецоидальном сечении штольни ширина по верхняку назначается на 0,5—0,7 *м* меньше, чем внизу по лежану. На криволинейных участках ширина штольни несколько увеличивается. Величина уширения зависит от размеров вагонетки и электровоза и от радиуса закругления.

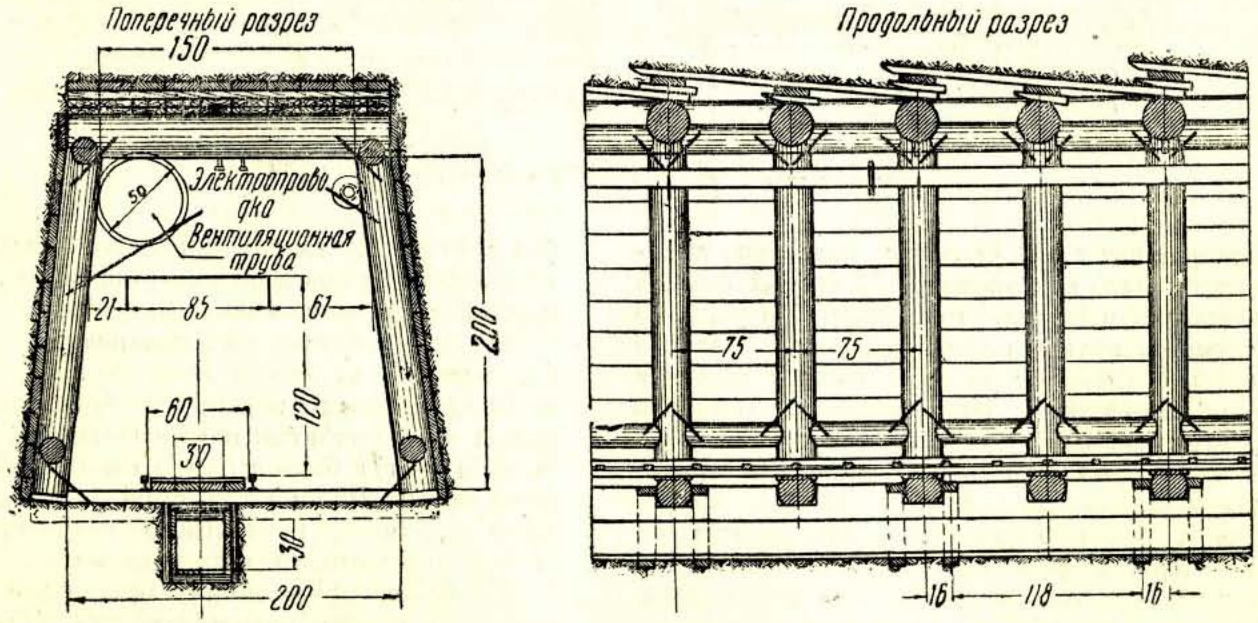


Рис. 241. Деревянное крепление однопутной штольни

Однако в практике тоннелестроения систему выработки с нишами применяют редко и вопрос безопасности прохода по штольням разрешают, учитывая соответствующий зазор, обеспечивающий свободный проход по штольне.

Обычно при разработке тоннеля горным методом скорость движения вагонеток не превосходит 1,5 *м/сек*.

Высота верхнего строения в штольне определяется из высоты рельса (91 *мм*) и шпал (110—120 *мм*), если крепление штольни не имеет порога. Балласт под пути во временных выработках не применяется. При про-

ходке штолен полным дверным окладом шпалами служат пороги штольневых рам.

Применяемые на практике типы крепления штолен весьма разнообразны. Так как штольни служат для последующей разработки сечения тоннеля на полный профиль, тип крепления

Крепление дверным окладом производится обычно в неустойчивых грунтах и там, где грунт хотя и не производит сильного давления, но возможны вывалы отдельных отслаивающихся кусков или камней. В крепких скальных грунтах, где обычно можно обходиться вовсе

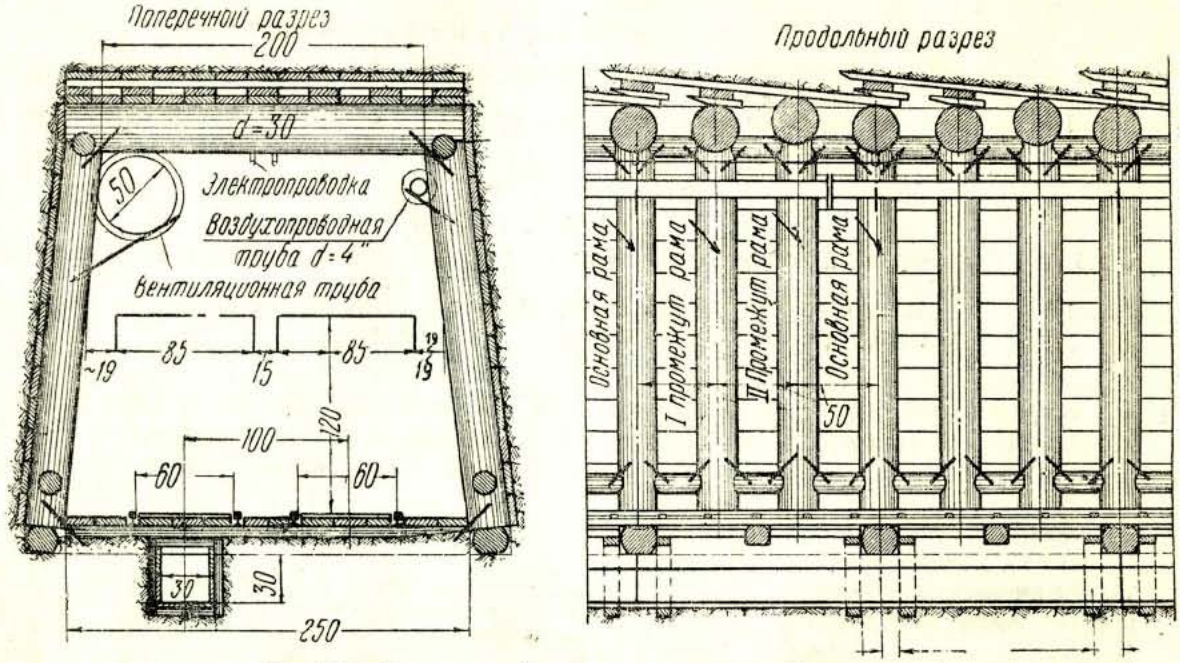


Рис. 242. Деревянное крепление двухпутной штольни

часто связан с общим типом крепления выработки всего сооружения. Основной формой крепления штольни, применяемой в тоннелестроении, является так называемый *дверной оклад*. Он состоит из двух стоек и верхняка (или маточника). Штольневые оклады или рамы ставятся на взаимном расстоянии 0,5—2 *м*, в зависимости от проявляемого горного давления. В промежутках между рамами кровля и бока выработки в зависимости от характера пересекаемых пород затягиваются досками, причем пространство между досками и стенкой выработки заполняется породой. Стойки нижним концом ставятся в лунки, сделанные в подошве выработки, или (в мягких породах) опираются на подкладки из коротких досок с клиньями. Глубина лунок, в зависимости от крепости породы, принимается от 10 до 20 *см*. Указанный дверной оклад называется неполным.

Если порода ненадежная, то стойки дверного оклада ставят на лежень, называемый порогом. Такой дверной оклад называется полным.

без крепления, иногда применяют частичное крепление для поддержания отдельных грозящих падением кусков породы.

В этом случае устанавливают стойки (ремантины) из бревен диаметром 15—20 *см* или же укладывают подхватные брусья, заводя концы их в пробитые в породе гнезда. Если вывалы могут быть с потолка и с одной стороны выработки, то с этой стороны и подставляют под конец подхватного бруса стойку; этот тип крепи называется «глаголем».

Наиболее приемлемым материалом для крепления штолен является дерево. Так как штольня является временной выработкой, то оба недостатка дерева — недолговечность и значительное обмятие врубок при больших давлениях — не имеют существенного значения. По легкости обработки, упругости, незначительному весу и дешевизне дерево является незаменимым материалом для крепления.

Для крепления применяется лесоматериал преимущественно хвойных пород—сосна, ель, пихта. В случае, когда ожидается значитель-

ное горное давление, дверные оклады делаются металлическими (Симплонский тоннель, тоннель Кристина, тоннель Северо-Донецкой железной дороги).

Стандартного типа инвентарное металлическое крепление сборно-разборной конструкции успешно применено при проходке штолен по трассе 4-й очереди строительства Московского метрополитена.

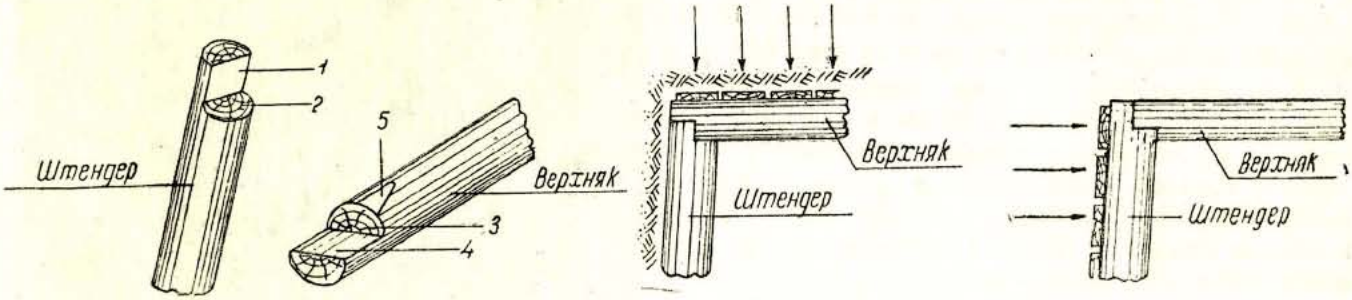


Рис. 243. Детали узлов крепления штольни

Соединение верхняка со стойкой — *замок* — делается различными способами, в зависимости от направления горного давления. Обыкновенным соединением является врубка в лапу. При устройстве последней у конца стойки (штендера), пропиливается плоскость *2* (рис. 243) и затем стойка стесывается по плоскости *1*. Соответственно в верхняке пропиливается плоскость *3* и стесывается плоскость *4*. Кроме того, в верхняке при круглом лесоматериале небольшой подтеской создается плоскость *5*, опирающаяся на плоскость стойки.

В собранном виде соединение в лапу имеет вид, показанный на рис. 243.

На практике зарубка замка производится большею частью до половины толщины дерева. Плоскости замка могут быть скошенными так, чтобы при наклонном положении стойки была обеспечена лучшая передача давления и более плотное примыкание элементов крепления. На строительстве Московского метрополитена применялось соединение, в котором верхняя площадка стойки скашивалась под тупым углом, а боковая площадка образовывалась подтеской; для прочности элементов дверного оклада они соединялись в углах железными скобами. В полном дверном окладе соединение стойки с порогом делается таким же образом, как и сопряжение стойки с верхняком. Леженьпорог для устойчивости и более правильной передачи давления на грунт обтесывается на два канта (рис. 244). Обтеска производится также из соображений уменьшения пространства, занимаемого порогом для образования постели под рельсы откаточных путей.

Более сложное соединение в лапу с зарубкой нескольких уступов не рекомендуется, ибо такое соединение в смысле передачи давления не имеет преимуществ перед соединением с одной зарубкой, подгонка же многих плоскостей затруднительна.

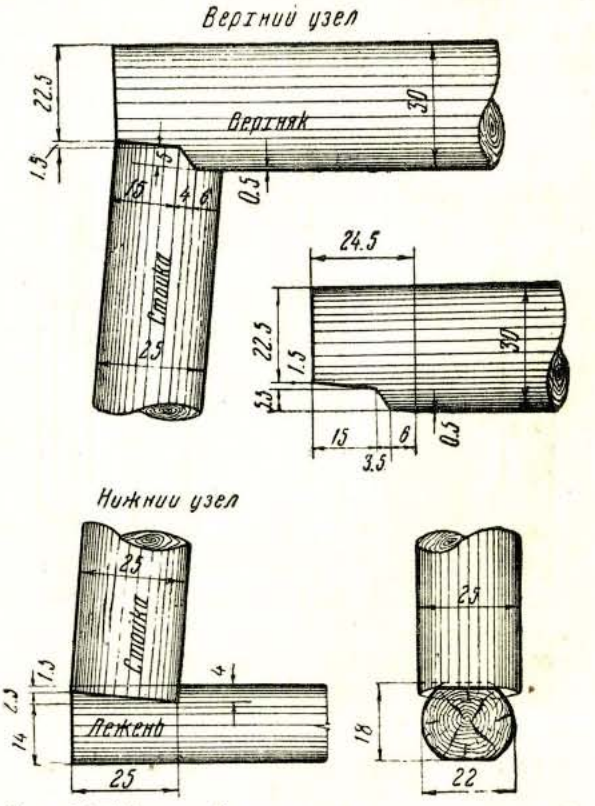


Рис. 244. Верхний и нижний узлы штольневой рамы

При наличии вертикального давления породы очень удобным и простым является соединение круглой врубкой в паз. При этом соединении необходимо следить за тем, чтобы круглая врубка в стойке была шире верхняка;

в противном случае верхняк, надавливая на края выреза в стойке, будет ее раскалывать. При наличии лишь вертикального давления встречается соединение верхняка со стойкой в шип. Связь между частями оклада при таком соединении получается наилучшей, но долбление гнезда и вырубка шипа требуют тщательного выполнения и отнимают много времени. Поэтому такое соединение элементов крепления в тоннельном деле не нашло широкого применения. Пример сопряжения металлических дверных окладов штолен показан на рис. 245.

Для верхняков и порога употребляются бревна диаметром от 20 до 30 *см*, а для стоек от 18 до 25 *см*. В случае увеличения давления породы ставят промежуточные рамы. При очень больших давлениях оклады ставятся вплотную один к другому. Отдельные штольневые рамы распираются между собой распорками-рошпанами из бревен-коротышей диаметром 15—20 *см*. Эти распорки устанавливаются на самом верху оклада около верхняков или на 30—40 *см* ниже и служат элементом связи между дверными окладами, предохраняя

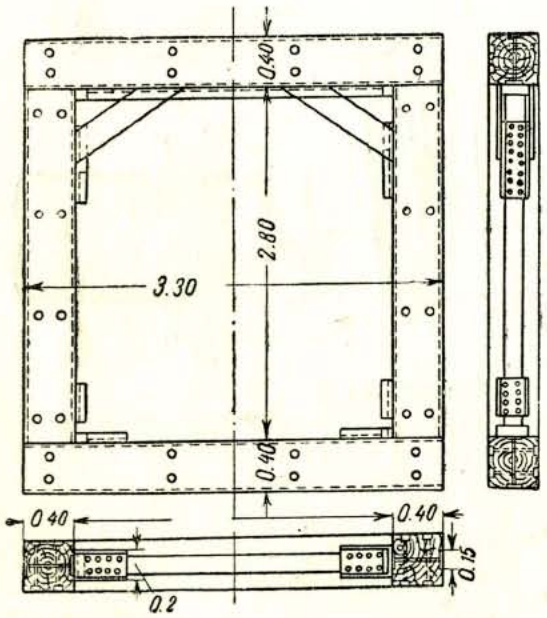


Рис. 245. Металлическая штольневая рама

их от сдвига. При неравномерном давлении породы количество распорок увеличивают. Дополнительные распорки ставятся на некоторой высоте от порога и против верхняка. Для плотного соединения рошпана с дверным окладом в торцах его делают круглую врубку — *чашку*.

Закладка досками (*затяжка*) пространства между дверными окладами производится различно, в зависимости от устойчивости разрабатываемой породы. На затяжки применяются преимущественно горбыли. Вместо



Рис. 246. Работа в забое штольни

горбылей можно употреблять доски, дающие равномерное и более прочное перекрытие кровли и бортов выработки. Длина затяжек берется на 40—50 *см* больше расстояния между дверными окладами. Концы затяжек опираются на дверные оклады и прижимаются к породе плотно при помощи клиньев. Вместо подклинки иногда применяется заполнение породой пространства между креплением и плоскостью выработки.

Перекрытие затяжками промежутка между дверными окладами производится в тех породах, которые способны держаться, не обваливаясь, во время проходки до постановки дверных окладов.

Когда разрабатываемые породы во время проходки не могут держаться без крепления (мягкие и сыпучие породы), перекрытие промежутка между дверными окладами производится досками, забиваемыми в породу во время разработки породы. Такое закрепление пространства между дверными окладами называется *забивной крепью*.

Проходка штольни в коренных породах (в глинистых сланцах, песчаниках, известняках), т. е. в породах, позволяющих на некоторое время оставлять кровлю и бока штольни незакрепленными, начинается с разработки породы на полный профиль штольни (рис. 246).

При разработке лба забоя, в зависимости от коэфициента крепости пород, отбойными инструментами проходка штольни может быть организована следующим порядком:

Забойщики в забое разрабатывают породу, а сзади на некотором расстоянии от забоя крепильщики одновременно устанавливают дверные оклады и затягивают, если это требуется по состоянию породы, бока и кровлю досками; при этом производится механическая погрузка и выдача породы на подземный транспорт. При разработке забоя взрывным способом совмещение крепежных работ с разработкой забоя может быть осуществлено во время бурения шпуров.

Установка дверного оклада начинается с подготовки лунок или подкладок. Если крепильщиков двое, то один вставляет стойку нижним концом в лунку и держит ее, а другой заводит верхняк сверху или сбоку.

Наиболее трудоемкая операция по подъему верхняка может быть механизирована применением специального подъемного приспособления.

Подготовка элементов крепления дверного оклада, резка бревен и выделка замка должны, как правило, производиться заблаговременно на поверхности.

Когда стойки установлены и верхняк заведен, проверяется правильность установки при помощи отвеса и рулетки.

Проверяются наклон стоек и положение оклада в вертикальной плоскости. При наклонной штольне проверяется перпендикулярность оклада к оси штольни.

Проверенный оклад расклинивается на породу. После закрепления оклада заводятся затяжки по поверхностям кровли и боков штольневой выработки.

В зависимости от состояния породы затяжками закладывают пространство между дверными окладами сплошь или с промежутками.

При сплошном затягивании выработки концы затяжек на стойке или верхняке перекрываются внахлестку. При креплении с промежутками концы затяжек одного пролета входят в промежутки между концами соседнего пролета в шахматном порядке.

Проходка штольни в неустойчивых породах, в которых кровля и бока выработки не могут держаться без крепления даже короткое время, осуществляется применением забивной крепи. В этом случае работа по проходке штольни ведется следующим образом. Вначале перед забоем устанавливается дверной оклад, а затем в промежуток между дверным окладом и породой заводят доски и забивают их в породу. Для облегчения забивки конец доски, обращенный к грунту, заостряется. Такие доски, служащие затяжками кровли и бортов выработки, принято называть марчеванами.

В первую очередь ведется забивка верхних марчеван кровли, лежащих на верхняке. По мере забивки грунт под защитой марчеван выбирается, но с таким расчетом, чтобы концы марчеван не обнажались, а находились всегда в грунте на 20—30 *см*.

Когда все марчеваны забиты на полную длину, а грунт из забоя вынут, под концы марчеван подводят следующий дверной оклад. Марчеваны забиваются не параллельно оси штольни, а под некоторым углом во внешнюю сторону для того, чтобы между вновь устанавливаемым дверным окладом и концами марчеван образовалось пространство, в которое можно было бы забить марчеваны следующего пролета. Концы марчеван опирают на вновь установленный дверной оклад при помощи поперечных досок, так называемых *филат*, заведенных над верхняком и за стойки, и клиньев, которые забиваются между дверным окладом и филатами. Клинья, располагаемые на некотором расстоянии друг от друга, плотно прижимают филату к марчеванам, а марчеваны к грунту. Эти клинья временные; они выбиваются, когда в том месте, где стоит клин, между филатой и дверным окладом нужно завести марчевану следующего пролета.

Для разработки следующего пролета заводят марчевану в просвет между временными клиньями и забивают ее. Между филатой и вновь забитой марчеваной вставляют постоянный клин. Затем вынимают временный клин и на этом месте забивают следующую марчевану. Так, постепенно, убирая временные клинья, забивают новый ряд марчеван. При этом филату всегда держат плотно прижатой к верхним марчеванам, заменяя временные клинья постоянными. После забивки всех марчеван ставится новый дверной оклад, и цикл повторяется далее.

Доски для марчеван и филат принимаются толщиной 5—7 *см* при ширине 18—20 *см*.

Длина марчеван берется на 40—50 *см* больше расстояния между осями смежных штольневых рам. Последние в неустойчивых породах ставятся полным дверным окладом. Установка рам начинается с укладки лежня-порога. Порог

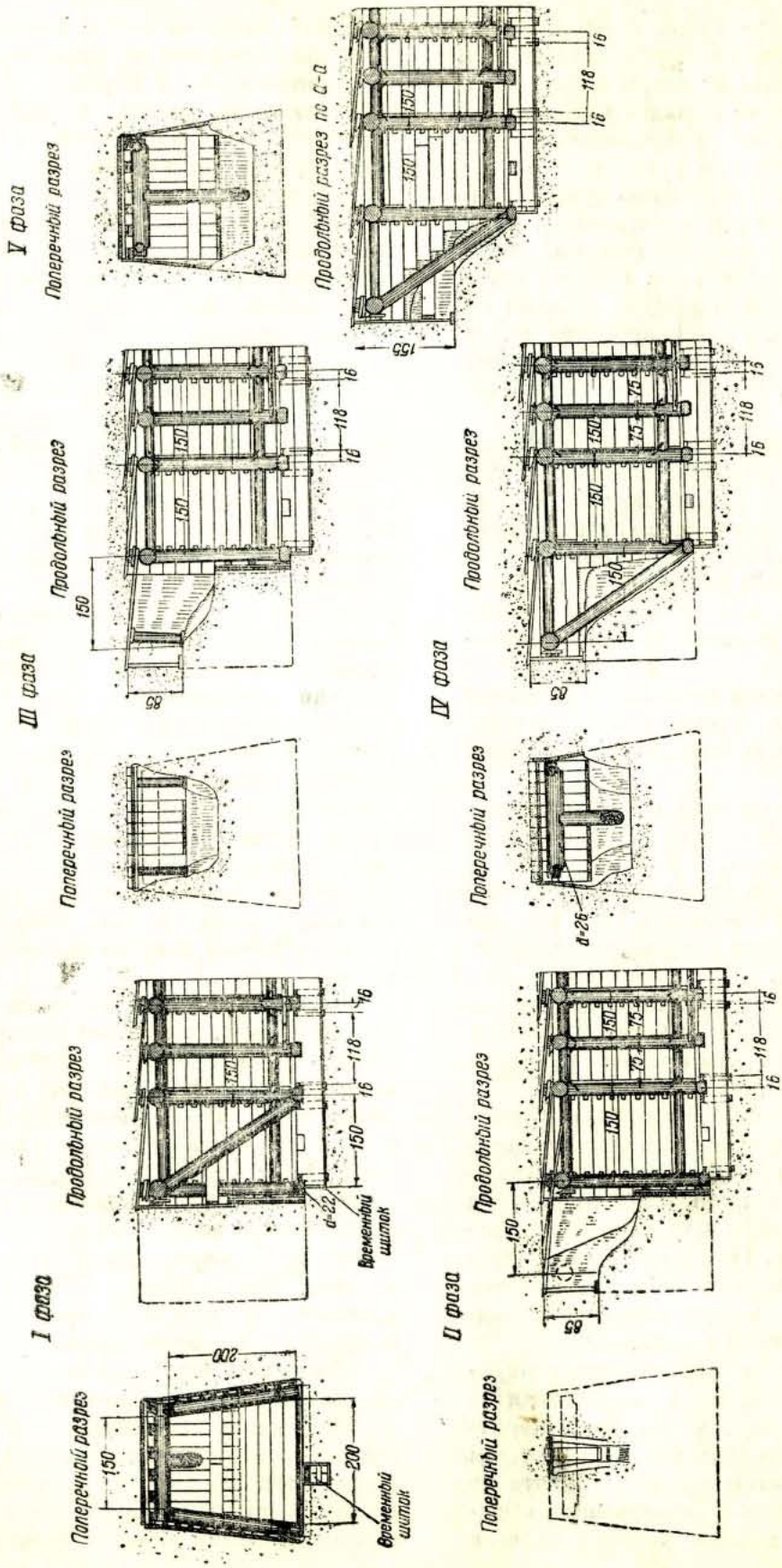


Рис. 247. Крепление штольни в сыпучих грунтах

центрируется так, чтобы середина его приходилась точно по оси штольни, и выверяется по уровню. На концы порога устанавливаются стойки, а затем заводится верхняк. Для сохранения высоты штольни без разработки всей подошвы штольни на высоту порога часто порог втапливают в подошву выработки, устраивая для него поперечную канаву. Порог укладывается в канаву так, чтобы верх лежня приходился на уровне подошвы штольни. Для отвода воды вдоль штольни в подошве прорывается водоотводная канава шириной 30—50 *см* и глубиной от 30 до 80 *см*, в зависимости от дебита подземных вод. Стенки водоотводной канавы крепятся досками, дно оставляют незакрепленным, так как вода все равно размывает дно под полом, если последний уложен по дну канавы. Водоотводную канаву устраивают обычно посредине однопутной штольни под откаточными путями.

При двухпутной штольне канава проводится под одним из путей. Сверху водоотводная канава закрывается настилом из досок, уложенных по порогам между путевыми рельсами. Расположение канавы сбоку у стены не рекомендуется, так как в этом случае происходит подмыв основания стоек, вызывающий осадку крепления штольневых рам.

В неустойчивых породах часто настил укладывается не только между рельсами над водоотводной канавой, но и по всей подошве штольни, главным образом в тех случаях, когда в подошве имеется слабая, в частности «дующая» порода. Когда можно ожидать выпучивания породы снизу вверх, доски пола заводятся снизу, под лежаны.

При проходке штольни в мягких породах (глинах, суглинках и т. п.), когда забой держится некоторое время отвесно, лоб забоя не крепится, а проходка ведется забивной крепью. В этом случае часто забивную крепь применяют только для крепления потолка выработки, а бока ее забираются затяжками. В более слабых породах приходится крепить не только потолок и бока выработки, но и лоб забоя. Лоб забоя при разработке держат ступенчатым. Сначала вынимают породу в верхней части забоя, а потом подрабатывают низ штольни (рис. 247). После того как в верхней части забоя марчеваны забиты до отказа, к забою прижимают с некоторым промежутком несколько вертикально поставленных досок и подхватывают концы их поперечными досками — филатами, которые подпирают распорками из досок или из круглого тонкого лесоматериала, опирающимися на первый от забоя дверной оклад. Затем подрабатывается нижняя часть забоя, которая крепится досками, заводимыми за нижнюю филату в промежутки между досками верхнего крепления. Нижние доски своим нижним концом забиваются в подошву штольни. Когда лоб забоя закреплен, устанавливают новый дверной оклад. Для разработки на следующий пролет снимается верхнее крепление забоя и забиваются марчеваны верхней части штольни.

При проходке в водоносных подвижных породах (например, глинистый песок, насыщенный водой) лоб забоя крепится сплошь досками, уложенными по забою горизонтально. При встрече подвижной породы за стойки дверного оклада, установленного у забоя, заводятся горизонтально доски, которые прижимаются к породе клиньями, забиваемыми между досками и стойками дверного оклада.

Разработка забоя ведется следующим образом. Сначала марчеваны, закрепляющие кровлю и бока выработки штольни, забивают на некоторую глубину в грунт. После этого вынимают верхнюю доску лба забоя и выбирают грунт на нужную глубину. Эту доску после этого снова ставят на место и распорками поддерживают ее через стойки дверного оклада. Затем вынимают следующую доску, переставляют на новое место под верхней доской и подпирают ее распорками. Последовательно поступают таким путем со всеми досками, поддерживающими забой. Передвинув все лобовые доски вперед на возможную по состоянию грунта величину, снова продвигают марчеваны вперед. Процесс с перекреплением забоя повторяется. При каждом новом перекреплении забоя распорки, поддерживающие доски, меняются на более длинные. После забивки марчеван на полную длину и соответственной подвижки забоя устанавливают новый дверной оклад.

При пересечении грунтов, сильно насыщенных водой, лобовые доски не вынимаются, а продвигаются вперед, предоставляя жидкой породе выливаться в выработку через щели между подвигаемой доской и остальным креплением. Чтобы предохранить выработку от выноса части породы, щели между досками крепления конопатятся паклей или мохом; в этом случае применяют кольевую крепь *(пикотаж)*. При этом грудь забоя покрывается сплошь забитыми в грунт плотно

друг к другу короткими круглыми кольями толщиной 8—12 *см* и длиной 40—60 *см*. Так же иногда крепится и подошва. Крепление потолка и боков выработки производится обыкновенной забивной крепью. Назначение кольев — уплотнение грунта и уменьшение текучести породы (рис. 248).

Подвижка забоя производится постепенной забивкой кольев, начиная сверху. По мере забивки грунт между кольями убирается. При забивке в сильно водоносных грунтах принимаются меры против выноса частиц породы водой. Для этого между кольями прокладывается мох, сено или другой волокнистый материал. С помощью пикотажных работ удается успешно проходить такие разжиженные грунты, в которых проходка с креплением забоя досками делается почти невозможной. Этот метод с успехом применяли французы при постройке ряда железнодорожных тоннелей и некоторых коротких участков Парижского метрополитена.

Метод пикотажа требует тщательности при забивке кольев и выемке грунта. Небрежное ведение работ приводит к выпуску грунта, расстройству крепления и осадке поверхности. Давление проходимых этим методом пород бывает настолько значительным, что приходится или усилять дверные оклады или переходить к постановке окладов сплошняком. Работа по проходке штольни в плывунах как методом пикотажа, так и с помощью крепления забоя досками является очень трудной

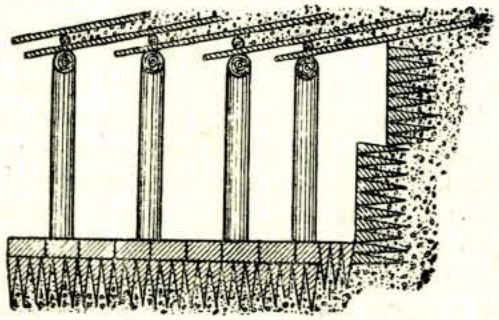


Рис. 248. Проходка штольни пикотажем

и медленной. При проходке плывунов эффект возможно получить только с применением специальных мероприятий (например, в виде сжатого воздуха, силикатизации, замораживания).

Усиление крепления штольни применяется при проходке в нарушенных породах с наростанием горного давления на крепь, когда проявляются деформации, а иногда и поломка элементов штольневого крепления. В таких случаях крепление немедленно приходится усиливать или заменять новым.

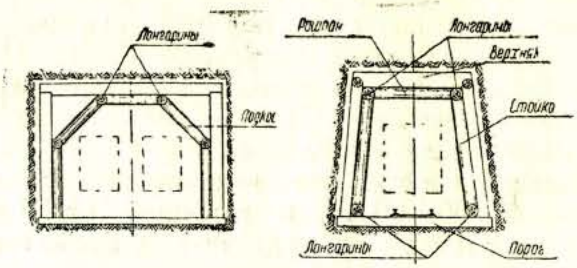


Рис. 249. Крепление штольни унтерцугами

Усиление дверных окладов может производиться заводкой дополнительных дверных окладов или постановкой в существующих дверных окладах подкосов, упирающихся в верхняк и стойки. Но все эти усиления не настолько прочны, чтобы предохранить крепление от перекосов. Наиболее надежным усилением, особенно в неустойчивых породах, следует считать систему, широко применяемую в тоннельном деле, а именно подхваты, или унтерцуги (рис. 249, 250). Унтерцуг представляет собою конструкцию из четырех длинных бревен (так называемых *лонгарин*), уложенных по углам вдоль штольни, с распорками между ними.

Верхние лонгарины передают вертикальное давление от верхняков на подошву штольни через наклонные стойки — *штендера* — в нижние лонгарины. Горизонтальное давление от стоек передается верхними лонгаринами на горизонтальные распорки — *рошпаны*.

Обычные, употребляемые в практике лонгарины имеют толщину 25—30 *см*, а штендера и рошпаны 20—25 *см*. Сопряжение штендеров и рошпанов с лонгаринами производится круглыми врубками и закрепляется железными скобами.

В сильно водонасыщенных грунтах, кроме усиления штольни, принимаются меры против увеличения давления, вызываемого выносом частиц грунта водою. За креплением выработки образуются пустоты, вследствие чего происходит обрушение вышележащей породы на крепление. Для предотвращения такого вымывания породы внутри штольни устанавливается вторая опалубка с устройством фильтра. Внутренняя опалубка поддерживается унтерцугами. Потолочные доски опа-

лубки поддерживаются верхними лонгаринами, а боковые — штендерами. Для более плотного прилегания к круглым лонгаринам концы доски подтесываются. Толщина досок второй опалубки берется 5—7 *см*. Пространство между марчеванами и второй опалубкой забивается сеном или соломой; швы опалубки тщательно проконопачиваются паклей. Набивка за опалубку и конопатка не могут со-

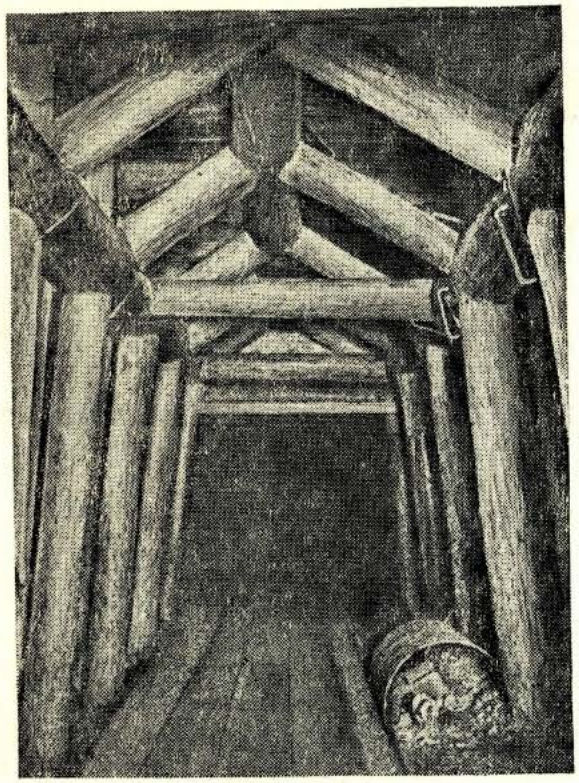




Рис. 250. Крепление штольни унтерцугами при проходке Хаунштейнского тоннеля

здать непроницаемого для воды крепления, но они служат фильтром, удерживающим частицы грунта от опасного выноса их внутрь штольни.

* * *

Когда несколько штольневых выработок группой проходят параллельно в одном горизонте, на близком друг от друга расстоянии, размеры целиков между этими выработками рекомендуется рассчитать; целик должен предотвратить обвал выработки в случае происшедшего обвала в соседней выработке (рис. 251). Очертания и размеры штолен, характер напластований, физико-механические свойства пересекаемых пород, условия горного давления являются факторами, влияющими в совокупности на размеры целиков между выработками. Эти факторы определяют взаимовлияние одной выработки на другую, вблизи проходящую, что приходится учитывать как в процессе проходки, так и в период эксплоатации.

В горной практике при нарезке по определенной плоскости ряда штолен на глубине до 300 *м* можно воспользоваться следующей формулой:

$$T = 5{,}2\left[\sqrt{\frac{\gamma a H}{f}} + \sqrt{\frac{\gamma a_1 H_1}{f}}\right] + (b + b_1)\operatorname{tg}\frac{90-\varphi}{2},$$

где T — толщина целика грунта между соседними выработками;

a и a_1 — полупролеты соседних подземных выработок;

b и b_1 — высоты выработок;

H и H_1 — мощность налегающей толщи породы над кровлей выработок;

γ — объемный вес породы;

f — коэфициент крепости породы.

Минимальную толщину целика грунта между смежными штольневыми выработками одного горизонта принимают равной 3 *м*.

в) Бремсберги

Для обеспечения сообщения между верхней штольней и нижней проходится наклонная выработка, которая служит для спуска грунта и главным образом для подъема крепежных и других строительных материалов при помощи механических приспособлений. Такая наклонная выработка в тоннельном деле называется внутритоннельным бремсбергом.

Бремсберги встречаются различных типов. Уступчатый бремсберг часто применялся в практике тоннелестроения. При таком типе бремсберга выработка закрепляется с помощью деревянного сруба из брусьев. Брусья каждого венца сруба соединяются врубкой в лапу. Размеры выработки могут быть определены графически в зависимости от размеров бревен, протаскиваемых лебедкой через бремсберг. Ширина бремсберга берется равной ширине нижней штольни поверху. Спуск и подъем людей по такому бремсбергу совершается по приставным лестницам. Уступчатый бремсберг выгоден по объему работ, но сложен в проходке (рис. 252 а).

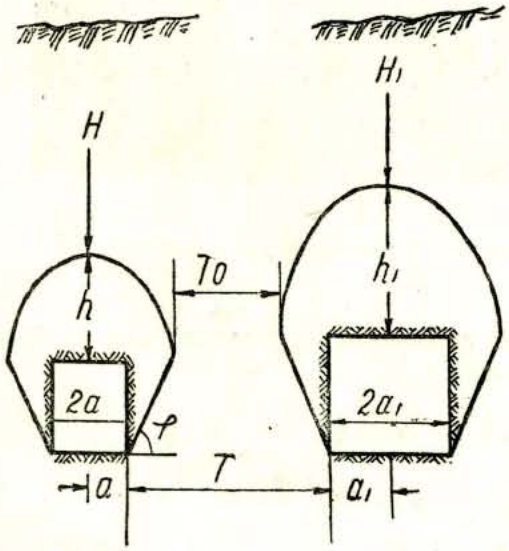


Рис. 251

Практически наиболее приемлемым является наклонный штольневый бремсберг (рис. 252 б). Проходка такого бремсберга производится так же, как и проходка обычной штольни. Дверные оклады наклонного штольневого бремсберга укрепляются унтерцугами. Для прохода людей из нижнего горизонта на верхний в бремсберге дается приставная лестница.

Бремсберг делится на два отделения: одно отделение для подъема материалов, другое

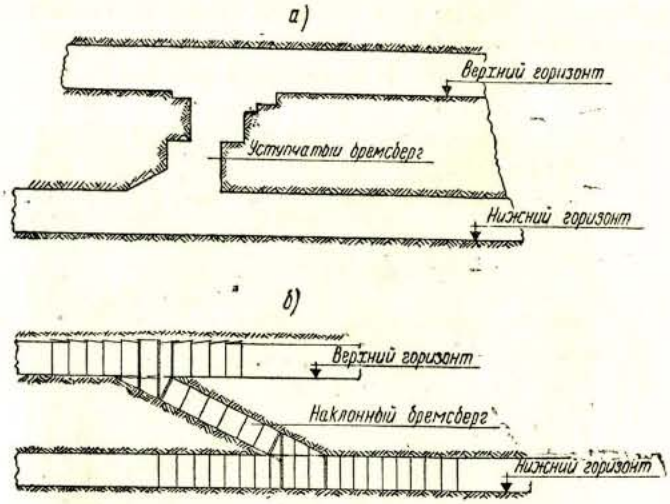


Рис. 252. *а* — внутритоннельный уступчатый бремсберг, *б* — внутритоннельный наклонный бремсберг

отделение служит для прохода людей. Бремсберг, соединяющий готовую часть тоннеля с той частью, где разрабатываются элементы тоннельного профиля, представляет собой наклонную эстакаду, по которой уложены вагонеточные пути для подъема и опускания груза в вагонетках. В этом случае для прохода рабочих параллельно бремсбергу должен быть устроен ходок шириной не менее 1 *м* и высотой не менее 1,5 *м*.

Для соединения нижней штольни с верхней устраивается подъемный бремсберг. Последний представляет собой балочный деревянный или металлический мост, вращающийся в вертикальной плоскости вокруг шарнира, устроенного на одной опоре в верхней штольне. Другой конец моста свободен и по мере надобности может опираться на подошву нижней штольни или на опору в уровне пола верхней штольни. К подвижному концу моста, когда нужно поднять или опустить его, присоединяется трос или цепь от лебедки, обслуживающей подъем вагонеток. На балках этого бремсберга уложены поперечины, к которым пришиты рельсы. Таким образом получается непрерывный путь из нижнего горизонта выработок на верхний.

Пропуск вагонеток по одной из штолен, верхней или нижней, может быть произведен

при поднятом бремсберге. Перед подъемом бремсберга вставки из фасонных рельсовых рубок снимаются. Когда бремсберг поднят, пути бремсберга соединяются рельсовыми вставками с путями верхней штольни, и в месте разрыва путей нижней штольни вставляются короткие звенья рельсов (рис. 253).

Большим достоинством такого бремсберга является возможность, когда нужно, производить одновременное перемещение вагонеток как по нижней, так и по верхней штольне. Для устройства подъемного бремсберга выработка должна быть значительной длины, в зависимости от размеров разрабатываемого профиля тоннеля.

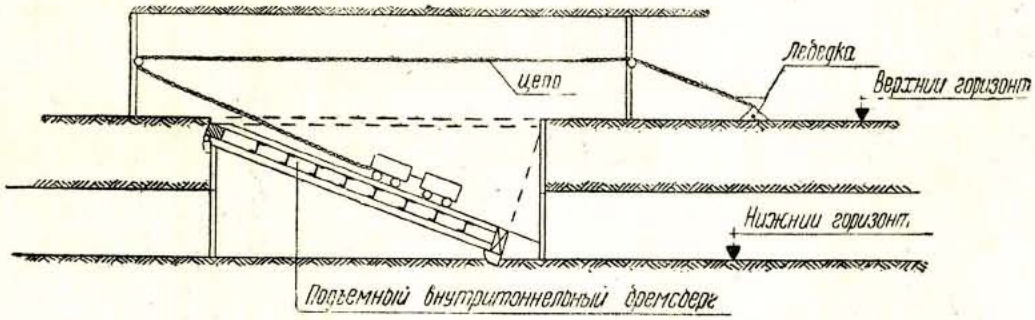


Рис. 253. Внутритоннельный подъемный бремсберг

г) Фурнели

Сообщение верхней штольни с нижней может осуществляться также при помощи вертикальных выработок, служащих для ссыпки породы из верхней штольни в вагонетки, курсирующие по нижней штольне. Такие выработки-воронки называются *фурнелями;* в горной промышленности их называют *гезенками*. Фурнели могут служить и для подачи в верхнюю штольню крепежного материала (рис. 254, 255).

Фурнели делаются небольшого поперечного сечения, обычно квадратного — 0,7 × × 0,7 *м*. В породах, которые некоторое время могут держаться без крепления, стенки фурнели сплошь крепятся рамами из досок. Рамы заводятся после выработки грунта на высоту рамы. Доски рамы соединяются в углах врубками в полдерева.

Проходка фурнели начинается с вырубки потолка в нижней штольне. Отверстие в потолке вырубается меньшим размером, чем сечение фурнели, для того чтобы на доски потолка штольни можно было поставить крепежную раму фурнели.

В слабых породах проходка фурнели представляет собой весьма сложную задачу и ведется с применением забивной крепи. Фурнели, обслуживающие спуск породы, не только при проходке верхней штольни, но и при расширении верхней части профиля тоннеля следует пробивать или в каждом кольце тоннеля или через кольцо, т. е. на расстоянии от 6 до 12 *м*.

Для проходки верхней штольни устраиваются вертикальные ходы из нижней штольни в верхнюю. Эти ходы имеют бо́льшие размеры, чем фурнели, и служат не только для ссыпки грунта, но и для прохода рабочих. Такие ходы носят название *ходовых воронок*.

Воронки по сечению делятся на две части: одна из них, размерами 1,3 × 0,9 *м*, служит для прохода людей, другая, размерами 1,3 × × 0,5 *м*, для спуска породы. Для подъема и спуска людей в людском отделении ходовой воронки устраивается стремянка. Такая воронка крепится срубом из лесоматериала толщиной до 20 *см*.

Фурнели и ходовые воронки во избежание несчастных случаев закрываются сверху деревянными или металлическими щитками, которые снимаются только в период спуска породы. Воронка может быть оборудована для подъема строительных материалов, для кладки свода тоннеля непосредственно в вагонетках.

Подъем последних с материалами производится при помощи лебедки.

Проходка фурнелей относится к разряду наиболее сложных работ и требует исключительной тщательности и осторожности с соблюдением установленных правил техники безопасности. Устройство фурнелей в слабых, грунтах снизу вверх может быть осуществлено с применением сжатого воздуха.

МЕТОДЫ И ПРОИЗВОДСТВО ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

БЕЛЬГИЙСКИЙ МЕТОД ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ (ОДНОШТОЛЬНЕВЫЙ МЕТОД)

Впервые этот метод был применен в Бельгии (1828 г.) и в дальнейшем получил широкое применение в мировой практике тоннельного строительства. Сущность бельгийского одноштольневого метода, применяемого преимущественно в твердых породах, заключается в следующем. В первую очередь проходится верхняя направляющая штольня по оси тоннеля (рис. 256). Далее ведется разработка *калотты* — верхней части профиля. Вслед возводят кладку свода. При этом последний опирают непосредственно на грунт. После того как бетонирование сводов закончено на значительном протяжении, производится выемка *штроссы* (средней части профиля). Затем отдельными участками подводятся стены под свод в шахматном порядке. Последним этапом является устройство лотка или обратного свода тоннеля, замыкающего контур обделки. Для раскрытия фронта производства работ бельгийским одноштольневым способом от шахты к трассе вначале проводится верхняя подходная штольня. Штольня крепится рамами, а кровля и борта — марчеванами или затяжками. Когда забой верхней штольни продвинулся на 30 *м*, приступают к разработке калотты длиной 3—4,5 *м* (рис. 257). При скальных грунтах с высоким коэфициентом крепости, где не опасаются осадки, длина калотты иногда доходит для горных тоннелей до 9 *м*. Однако последняя

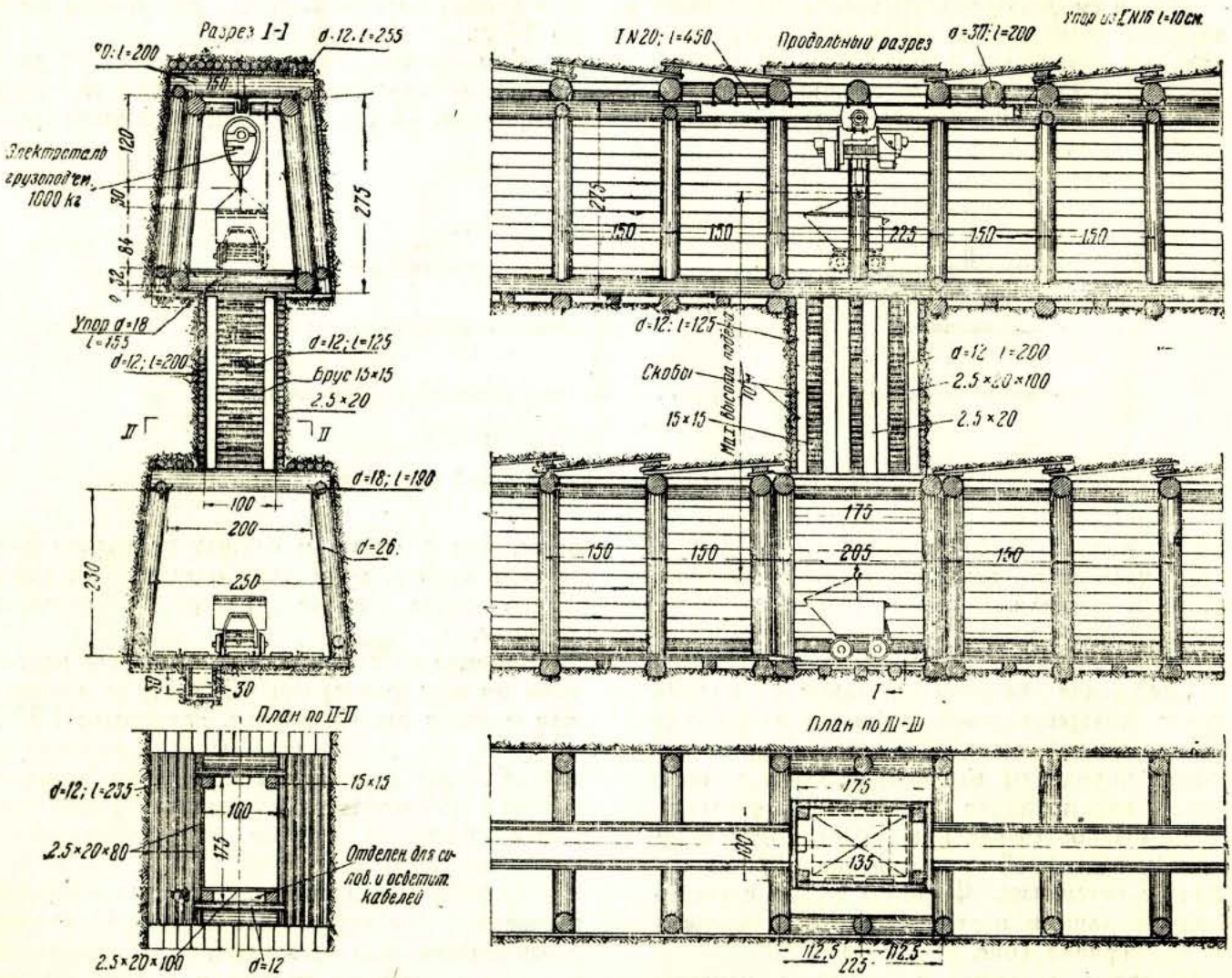


Рис. 254. Материальная фурнель

длина в городских условиях не применяется. Разработка калотт производится в соответствии с очертанием установленного типа тоннельной обделки. Крепление калотты устраивается из лонгарин, устанавливаемых параллельно оси тоннеля и поддерживаемых системой штендеров-стоек. Число и размеры сечения лонгарин и штендеров определяются объемом калотты, а также величиной ожидаемого горного давления на данном участке трассы. Сразу же после окончания разработки калоттного профиля ведется установка кружал, очерченных по внутреннему габариту тоннеля с учетом необходимого строительного подъема, в соответствии с пролетом и стрелой сооружаемого свода. После установки кружал делается перекрепление лонгарин через *мальчики* на кружала и приступают к бетонированию свода симметрично от пят к замку. Кружала устанавливаются на расстоянии 1,2—1,5 *м* одно от другого. На них укладывается опалубка, которая наращивается параллельно с возведением кладки. По мере того как бетон подводят к лонгарине, последняя вынимается, причем кровля выработки поддерживается системой филат, мальчиков и контрфишей. В случае, если на некоторых кольцах грунты в кровле подвижны, выемка лонгарин не допускается. Последние могут быть оставлены за обделкой тоннеля. Однако в этом случае разработку калотты следует производить при завышенном внешнем очертании тоннеля с таким расчетом, чтобы оставленные лонгарины находились вне тела несущей обделки, размеры которой определены расчетом. Лонгарины остаются за обделкой и в том случае, когда хотят избежать осадки поверхности при пересечении встречных выклиниваний подвижных грунтов, ибо удаление лонгарин неизбежно связано с подвижкой грунта.

После окончания кладки сводов и по истечении срока выстаивания бетона производится раскружаливание их. В парижской тоннельной практике выработано следующее мнемоническое правило: раскружаливание каменных тоннельных сводов производится через столько дней, сколько метров в пролете.

Когда своды возведены на значительном протяжении, приступают к разработке штроссы; откосы штроссы при этом устанавливаются в соответствии с углом естественного откоса породы, оставляя берму на уровне пят свода не менее 1,5—2 *м* (рис. 258, 259). К началу разработки штроссы производят углубление шахты с таким расчетом, чтобы вести работы в нижнем горизонте, кроме того, необходимо провести от шахты нижнюю подходную штольню или же устроить бремсберг с нижнего горизонта на верхний и тем самым обеспечить возможность транспортирования породы к стволу шахты. Разработка штроссы

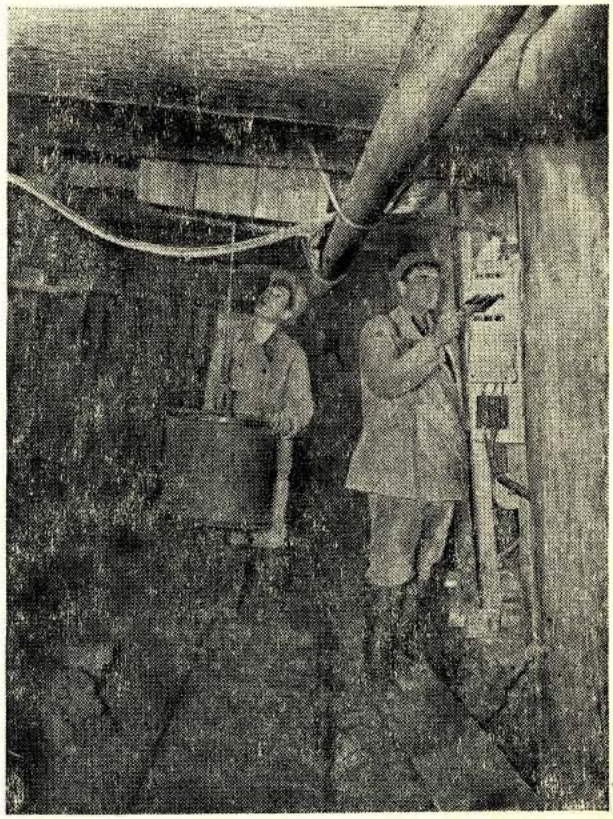


Рис. 255. Подъем бадьи через фурнель

обычно начинается недалеко от ствола шахты и ведется со лба забоя при помощи тоннельного экскаватора. В соответствии с местными условиями удаление штроссного ядра можно вести и методом последовательного опускания и перемещения откаточных путей аналогично приему разработки глубоких железнодорожных выемок. Выемка штроссы производится без крепления, под защитой тоннельного свода.

Вслед за разработкой штроссы производится подводка стен тоннеля. Эти работы должны полностью обеспечить устойчивость и равновесие возведенных сводов на время подводки под них стен. Для этого стены возводятся небольшими участками по 2 *м* (максимум по 3,5 *м*) в шахматном порядке. При бельгийском способе разработок ни в коем случае не допускается одновременная подводка обеих стен под свод в одном кольце тоннеля.

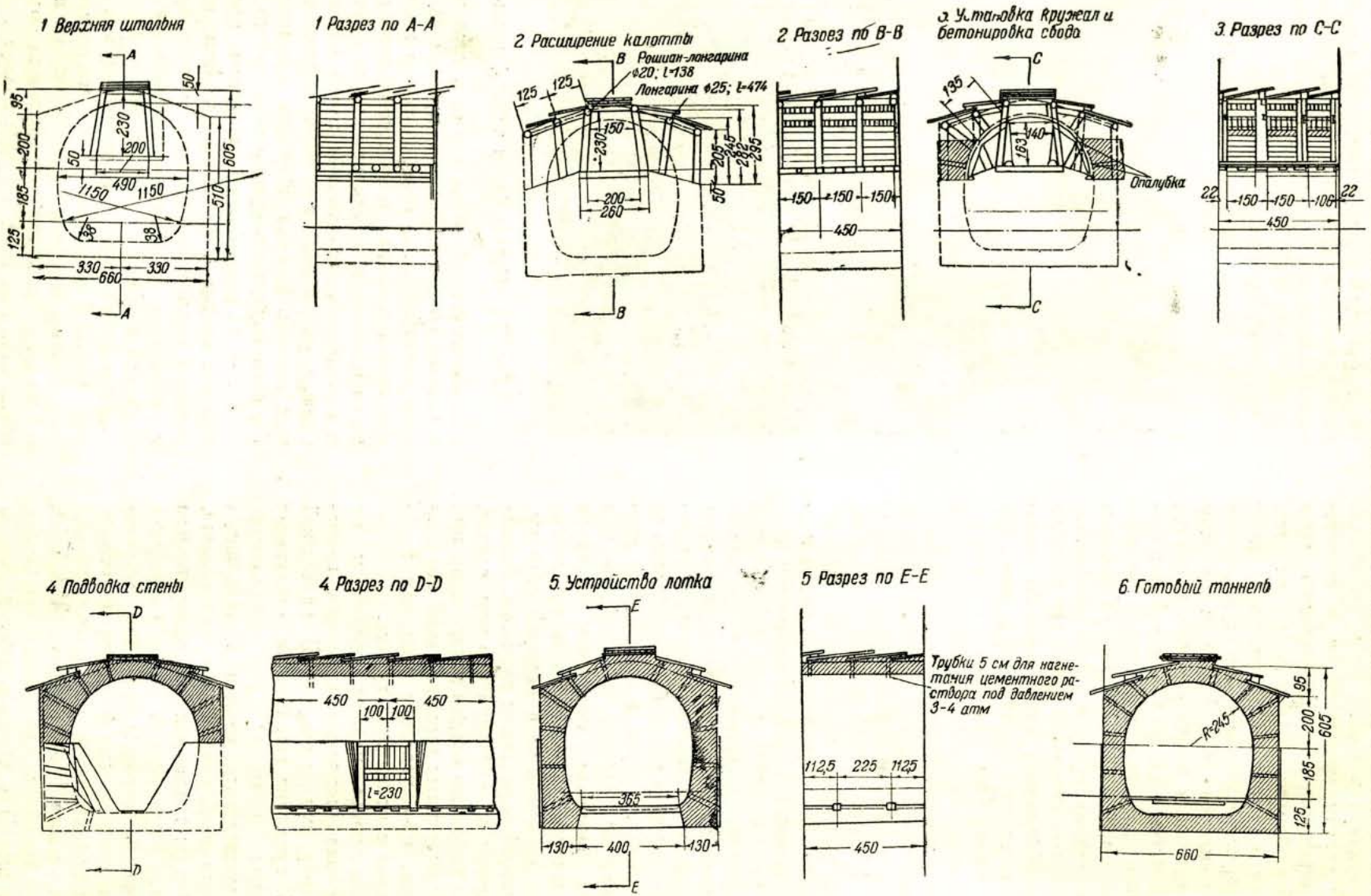


Рис. 256. Бельгийский одноштольневый метод проходки

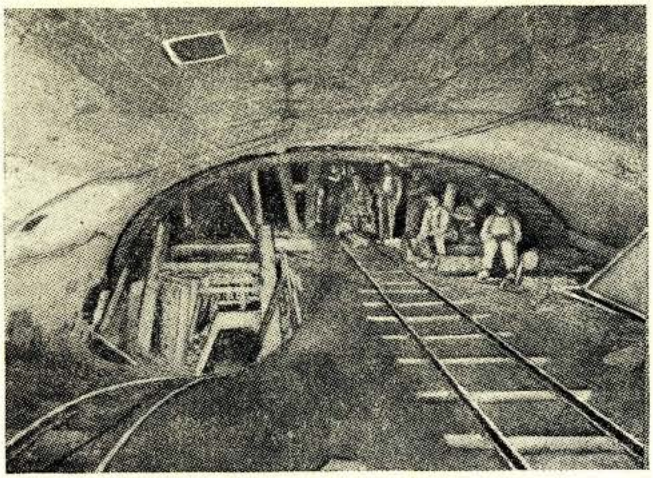


Рис. 257. Работа в калотте

В Париже при строительстве метрополитена по бельгийскому способу в первую очередь принято подводить стены в местах рабочих стыков между кольцами сводов с таким расчетом, чтобы подвести стену снизу одновременно под два соседних кольца, без обнажения пяты свода по всему кольцу. Когда первые столбы стен подведены под швы в шахматном порядке, ведется подводка между ними промежуточных участков стен. В процессе подводки стен под пяты свода подводится система *штребелей* — наклонных столбов. Работы по подводке стен весьма ответственны и должны проводиться с исключительной тщательностью. Наиболее слабые места стыкования стен и пят свода необходимо закрепить нагнетанием цементного раствора под давлением.

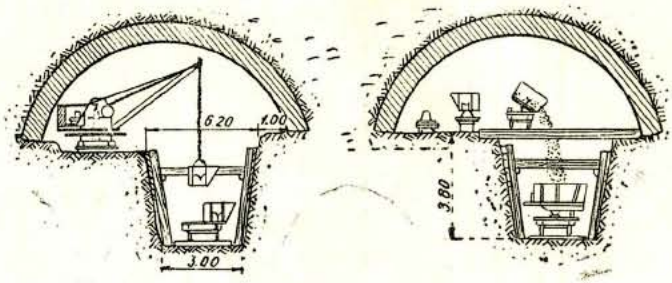


Рис. 258. Разработка штроссы

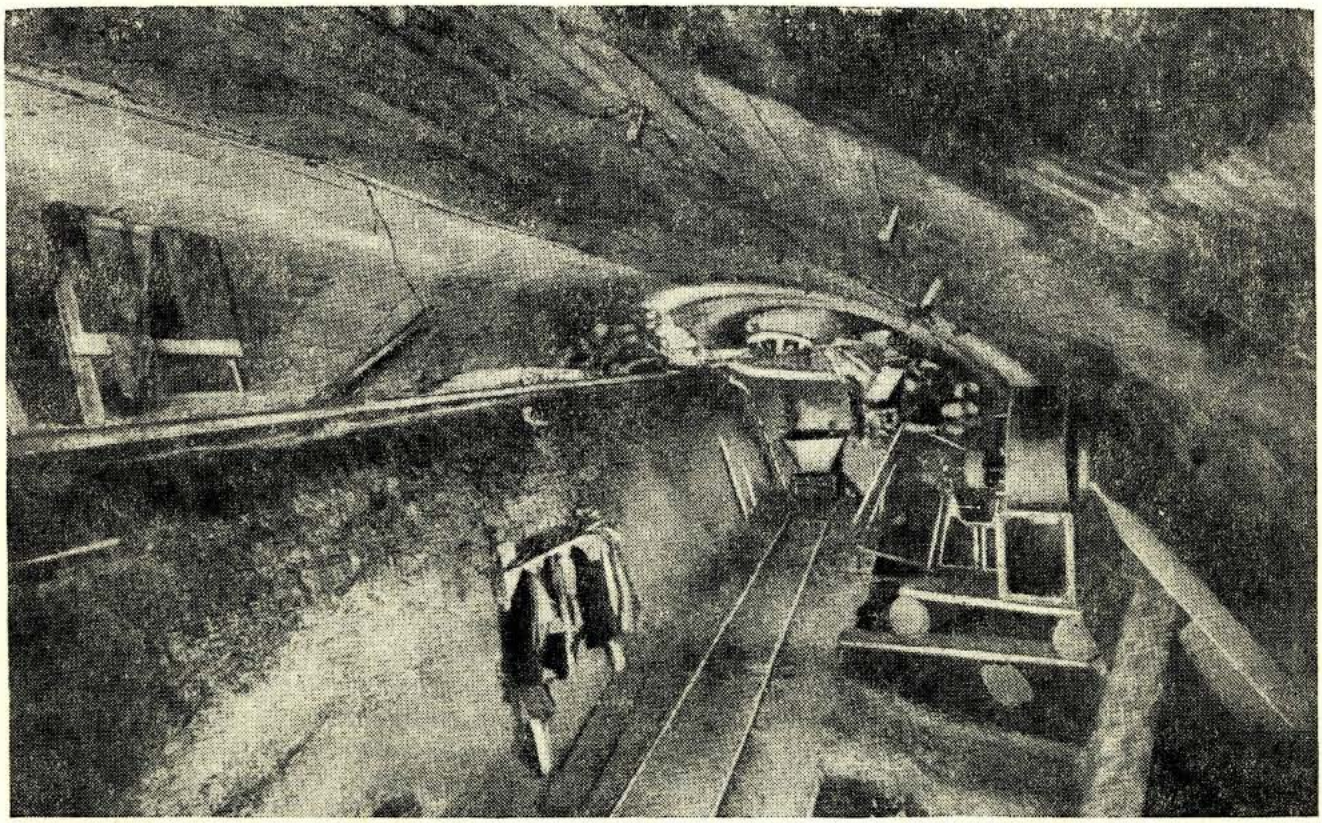


Рис. 259. Разработка штроссы

На участках сооружаемого тоннеля, где полностью окончена подводка стен, приступают к разработке под обратный свод или лоток и к бетонированию его. Во избежание смещения стен тоннеля внутрь профиля в период

удаления грунта под обратный свод устанавливается ряд расстрелов — *тирант*, по которым укладываются пути подземной откатки. В зависимости от гидрогеологических условий в процессе возведения кладки тоннельной обделки в тело последней замуровывается трубки диаметром в 3—5 *см*, через которые под давлением в 3—4 *ат* производится нагнетание цементного раствора. Нагнетание делается с целью заполнения пустот за обделкой, обеспечения пассивного отпора и для предупреждения осадок от нарушенного грунта, могущих распространиться до поверхности.

При правильном ведении работ по нагнетанию цементного раствора вокруг тоннельной выработки заполняются все пустоты и восстанавливается режим грунтов, бывший до момента пересечения тоннелем грунтового массива. Превышение указанной величины давления для нагнетания может привести к деформациям и к появлению трещин в обделках тоннелей. В зависимости от назначения тоннеля и от условий, предъявляемых к нему в эксплоатации, производится его изоляция. Изоляция для обычных тоннелей может быть твердой в виде торкрета или мягкой оклеечной битуминозной при внутренней защитной железобетонной рубашке.

Пример графика производства тоннельных работ по бельгийскому одноштольневому методу см. рис. 260.

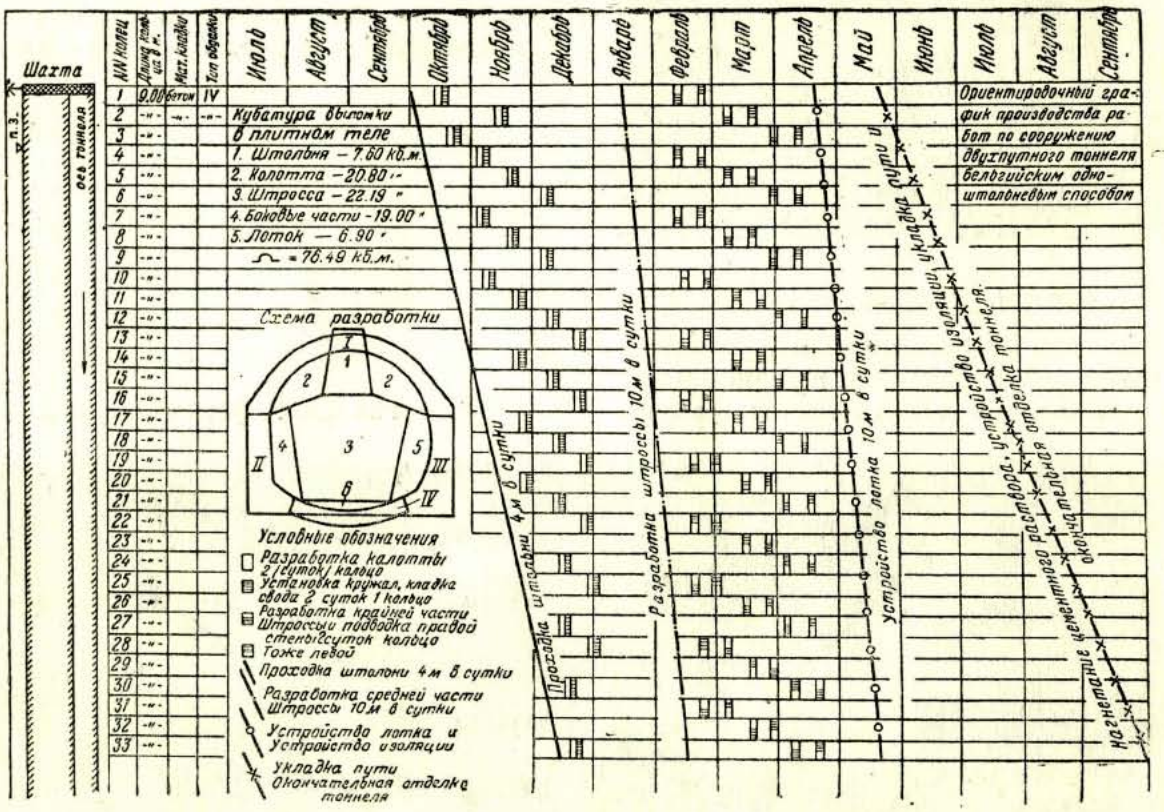


Рис. 260. График производства работ бельгийским одноштольневым методом

ПАРИЖСКАЯ СИСТЕМА ПРОИЗВОДСТВА ГОРОДСКИХ ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

Сооружение городских тоннелей в Париже производится преимущественно по видоизмененному *бельгийскому одноштольневому методу*, при временном деревянном креплении, с последующим возведением бутовых сводов при бетонных стенах и лотке.

Фронт работ открывается одновременно на два рабочих крыла из шахт, которые, в зависимости от объема и сроков работ, закладываются на расстоянии около 300—500 *м*. Там, где намечаются дополнительные работы по подводке фундаментов домов, учитывая мелкое заложение тоннелей, закладываются промежуточные шахты (шурфы).

Проходка тоннелей осуществляется в условиях сухих мергелей, где не проявляется заметного давления на крепи.

Проходится верхний штольневый ход при расстоянии между рамами 1,6 *м*. В углах штольневых рам, в местах рошпанов забиваются планки двумя гвоздями, причем никаких скоб не применяется.

После проходки 30 *м* штольни, а в некоторых участках после сбойки с забоем соседнего рабочего крыла шахты приступают к расширению калотты.

В отличие от бельгийского метода, при котором калоттный профиль содержит первую пару лонгарин, в парижской системе она отсутствует. Забивка боковых марчеван производится непосредственно за рошпанами, причем тоннельные фермы калотты совпадают с плоскостью штольневых рам.

Калоттный профиль раскрывается на кольцо длиной 3,2 *м*, причем тоннельные фермы устанавливаются в числе, кратном количеству штольневых рам. Длина 3,2 *м* выработана парижской практикой. Лонгаринами в 3,2 *м* легко маневрировать и вынимать их из грунта без значительных подвижек при минимальной осадке поверхности.

Вслед за раскрытием калотты ведется установка деревянных или металлических кружал.

Кладка свода с опиранием его на мергель начинается от пят к замку и ведется из бутового камня, на пуццолановом цементе (растворе 1 : 3). Бутовый камень, идущий на кладку сводов Парижского метрополитена, имеет временное сопротивление на сжатие порядка 150 *кг/см*^{2}. Это известковистый, ноздреватый, относительно легкий камень (весом 1 300 *кг/м*^{3}), состоящий из окислов алюминия с включением кварца, углекислой извести и других элементов. Богатая практика применения этого камня из карьеров для общесплавной канализации Парижа доказала большие кислотоупорные качества этого камня.

Сцепление камня с раствором исключительно высокое. Благодаря совпадению величин сопротивления камня и цементного раствора получаются обладающие высоким качеством равномерной работы легкие своды, которыми обычно гордятся французские инженеры. Но до своих легких сводов французы дошли не сразу; в процессе развития тоннельных работ постепенно принимались все более и более смелые решения. Иногда производители работ в погоне за экономией переходили пределы прочности, и своды обрушивались. Но за последние 30 лет установились выработанные практикой и подтвержденные анализом инж. Сюке определенные типы тоннельных обделок, имеющие сопротивление в соответствии с физико-механическими свойствами пересекаемых грунтов и проявляемым ими давлением.

Бутовый камень из парижских карьеров имеет глинистую рубашку. Раньше употребление камня, покрытого глиной, считали вредным для прочности самого свода. Но французская практика последних лет выявила, что глина, наоборот, как активный элемент, вступает в реакцию с цементом и увеличивает силу сцепления раствора с камнем.

Цемент употребляется, как правило, пуццолановый, причем раствор, на котором кладется каменная кладка, составляется в пропорции 350 *кг* цемента на 1 *м*^{3} песка.

В процессе возведения каменного свода в него закладываются гончарные трубки, через которые впоследствии производится нагнетание пуццоланового цементного раствора под давлением, достаточным для заполнения пустот, образованных в процессе тоннелирования, для предотвращения осадок, которые могут распространиться до поверхности. В нормальных условиях трубки закладываются через 2,5 *м* по длине кривой свода на 0,5 *м* ниже пят и через 1 *м* по образующей вдоль оси тоннеля. При водоносных, неустойчивых грунтах трубки закладываются также в стенах и лотке.

Нагнетание цементного раствора производится под давлением 3—4 *ат* из специальных аппаратов системы Гретхэда или Бинье, которыми представляется возможность заводить за кладку от 11 до 22 *т* раствора в течение 8 часов.

Расход раствора, нагнетаемого за кладку, по практическим данным сооружения Парижского метрополитена, выражается:

а) для станций 4 200—5 600 *кг* раствора на 1 *пог. м* тоннеля и

б) для двухпутных тоннелей 2 500—3 200 *кг* раствора на 1 *пог. м* тоннеля.

Весьма часто делается повторная инъекция, причем в водоносных породах нагнетание производится через неделю, до трех раз. В случае закупорки трубок пробивается специальное отверстие перфоратором.

При проходке в устойчивых породах к раскрытию калотты соседнего кольца можно приступить вслед за замкованием данного свода,

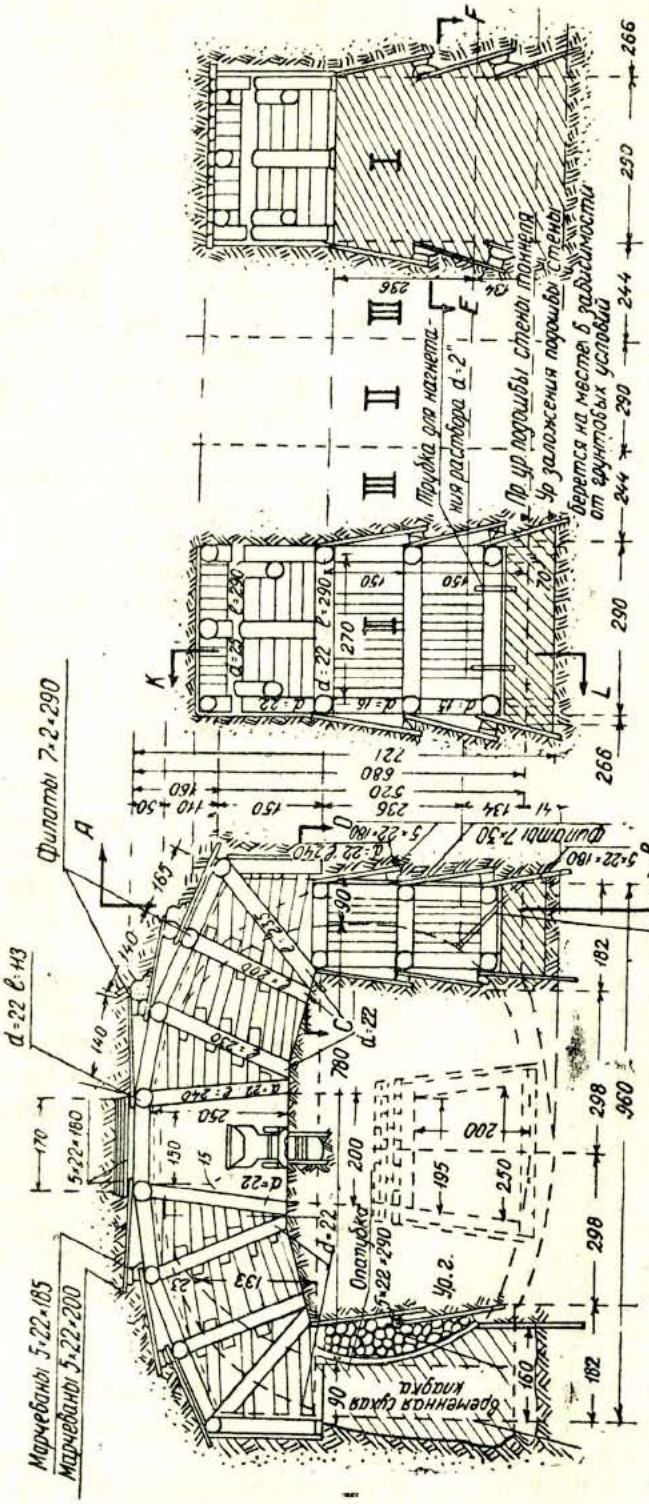


Рис. 261. Метод возведения стен в колодцах из калотты

так как практика подтверждает, что бутовому своду, находящемуся на кружалах, в этом случае ничто не угрожает.

В том месте, где имеется большое гидростатическое давление воды сверху, вода отводится системой дренажей, устраиваемой в процессе сооружения тоннеля. В этом случае до приступа к кладке по кружалам натягиваются джуты из соломы, выдергиваемые после раскружаливания конструкции. В образованные таким путем по внутренней поверхности обделки каналы укладываются резиновые трубки, по которым просачивающаяся из грунтового массива вода дренируется по лотку к пониженной точке профиля, откуда производится откачка ее автоматически действующими насосными установками.

По окончании основных тоннельных работ вчерне дальнейшие работы производятся с двух подвижных подмостей длиной до 5 *м*. С них ведется покрытие внутренней поверхности кладки торкретным слоем в 2—3 *см*, в зависимости от гидрогеологических условий пересекаемого участка.

Изложенная выше классическая парижская система работ с верхним одноштольневым ходом на практике весьма часто подвергается видоизменениям в зависимости от местных условий, обстоятельств геотехнического порядка, дислокации пород, связанной с существующими подземными карьерами, изменения профиля.

Возведение стен в колодцах из калотты. Если при раскрытии калоттного профиля по проектным отметкам пят свода грунт оказывается настолько слабым, что не в состоянии служить основанием даже временного порядка и является неспособным выдержать давление свода тоннельной обделки, то применяется метод возведения стен в колодцах из калотты (рис. 261).

На ширину калотты в 3,2 *м* проходятся колодцы, которые прорезают ненадежные грунты до подошвы фундаментов стен. В дальнейшем производится непрерывное возведение стен от фундамента до замка свода одновременно с двух сторон. Недостаток этого метода заключается в том, что в течение времени проходки колодцев и возведения стен калотта стоит на временном креплении, а это при некоторых условиях приводит к осадкам.

В остальном работы сводятся к удалению земляного ядра и устройству лотка.

Возведение стен в колодцах под готовым сводом. После того как свод выведен по бельгийскому методу на всем протяжении, может оказаться, что грунт нижней части штроссного профиля нельзя разработать откосом. Это имеет место, например, в условиях выклинивания неустойчивых грунтов, когда грунт при выборке среднего штроссного ядра будет выползать из-под пят свода, что может привести к осадкам свода, его деформациям, вплоть до обрушения. В этом случае применяется весьма распространенная во французской практике метростроения система устройства стен тоннеля в колодцах под готовым сводом (рис. 262). В шахматном порядке закладываются через 2 кольца колодцы размерами в плане 2,5 $\times$ 2 *м* до подошвы фундаментов стен тоннеля.

Затем в колодцах производится обычная подводка стен под своды.

Уборка штроссы и устройство лотка производятся обычным порядком.

Проходка тоннелей по видоизмененному бельгийскому методу — со средним колодцем при водоносных грунтах в нижней части профиля. В парижской практике применяется проходка тоннелей по бельгийскому методу даже при наличии в нижней части тоннельного профиля слабых грунтов, не способных выдержать давление от пят свода после его раскружаливания. В этом случае работы производятся следующим образом. Калотта раскрывается по обычному бельгийскому методу при постановке дополнительных лежанов под штендера параллельно оси тоннеля на все кольцо. Производится установка специальных кружал со швеллерами под подкружальные стойки, распределяющие давление по всей площади раскрытого кольца.

Затем ведется обычная кладка свода от пят к ключу. Свод оставляется пока на кружалах. После этого приступают к проходке колодцев в середине штроссы, осушающих нижнюю часть профиля. В дальнейшем эти колодцы превращаются в продольную раскрепленную траншею по оси тоннеля. Из траншеи отдельными заходками производится подводка стен под своды, стоящие на кружалах.

Эта система связана с большим расходом лесного материала, с теснотой рабочего места, почему и применяется лишь в исключительных случаях.

Система опускания столбов с арками на земляных кружалах. В период строительства своды обделки при раскрытой штроссе на участке метрополитена под Рю де-ла Мейн на протяжении 160 *м* начали деформироваться вследствие дислокаций в нижележащих слоях подземных парижских карьеров. Для временного предотвращения дальнейшего развития процесса деформации своды затяжками. Обручи ставились через 1,6 *м*. Скорость проходки колодцев составляла два посада, что равнялось 3,2 *м* в сутки.

Закладка колодцев производится в шахматном порядке (через один).

На участке Рю де-ла Мейн колодцы проходились на глубину около 11 *м* через каверны старых карьеров до надежного грунта.

В результате проведения указанных работ

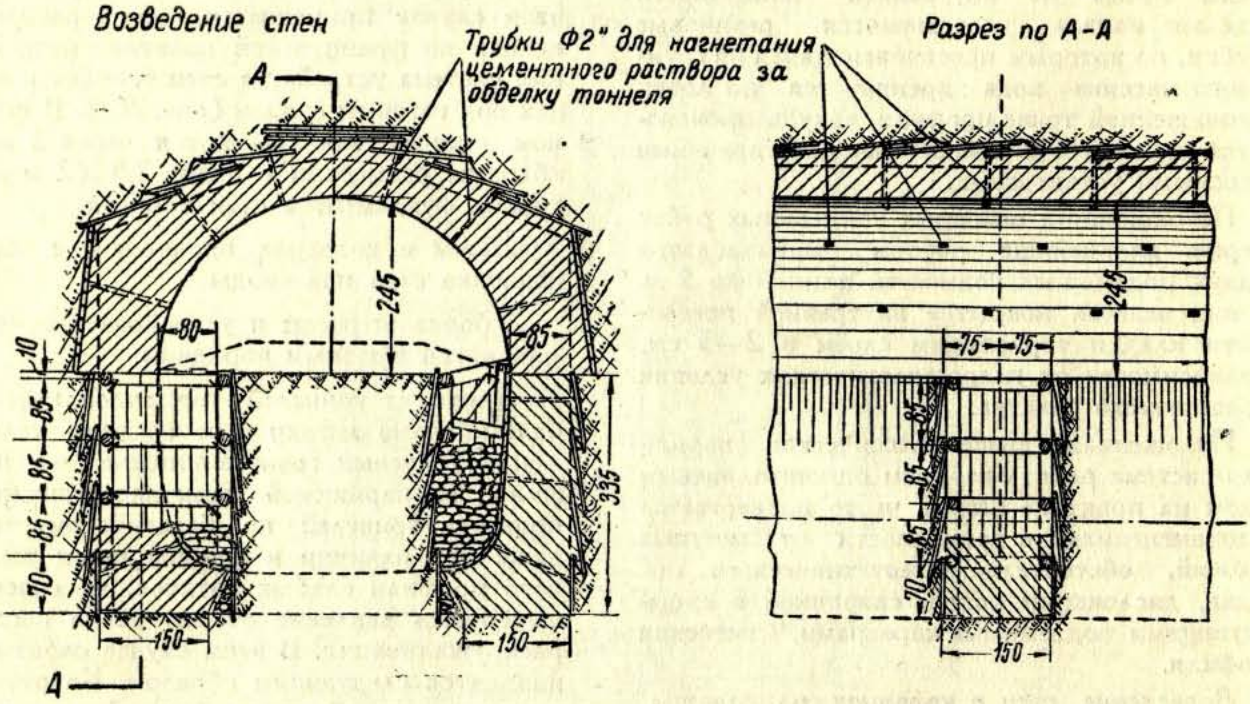


Рис. 262. Возведение стен в колодцах под готовым сводом

были подкреплены системой тирант с подкосами. Однако в дальнейшем своды получали и боковое давление, от которых тиранты изгибались вверх со стрелой подъема до 4 *см*.

Задача была разрешена устройством обделки тоннеля, основанной на столбах, сопряженных арками (рис. 263).

В плане бетонные столбы $D = 1{,}5$ *м* размещались под фундаментами стен через 6,0 *м*. Сверху столбы перекрывались армированными бетонными арками по оси тоннеля и железобетонными балками в перпендикулярном направлении. Имея искусственное основание, уже можно было подводить стены под готовые своды.

В условиях сухих мергелей колодцы под столбы проходились круглыми на обручах из полосового железа 8×2 *см* с деревянными получалось сооружение в виде тоннеля-моста.

Данные о строительной стоимости на участке Рю де-ла Мейн следующие: сооружение двухпутного тоннеля в нормальных условиях в 6 тыс. франков за *пог. м;* дополнительные работы по укреплению столбами и бетонными арками 4 тыс. франков за 1 *пог. м*, т. е. 10 тыс. франков за 1 *пог. м* двухпутного тоннеля.

Изучение элементов французской практики указывает, что установившийся в течение ряда лет парижский способ работ находится всецело во власти тоннельного крепильщика-кустаря, от искусства и умения которого зависит успех предпринимаемых работ. Механизация процессов при заполнении сечения выработки деревянным креплением чрезвычайно ограничена.

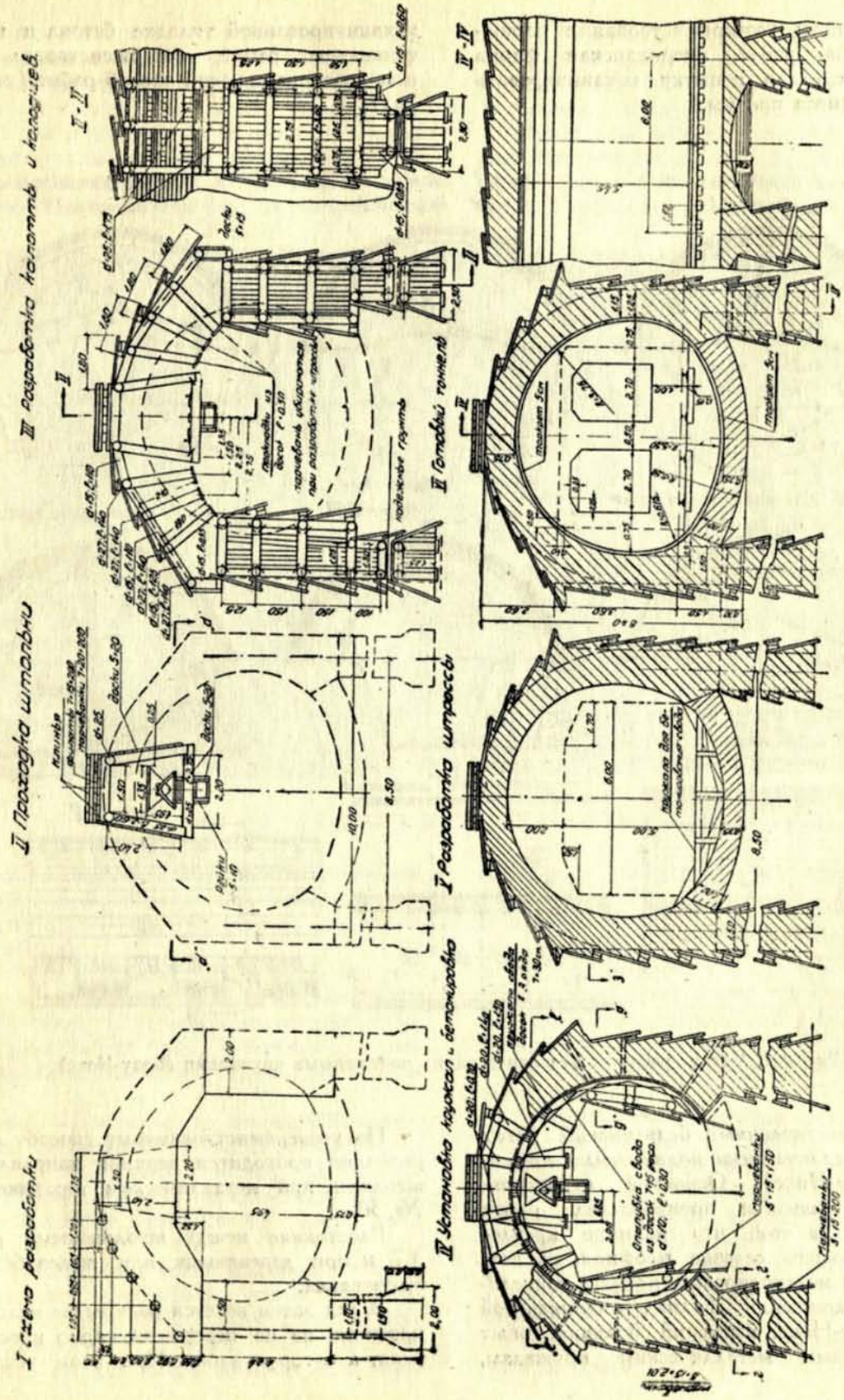


Рис. 263. Система устройства столбов с арками на земляных кружалах

Идя по пути усовершенствования парижского способа работ, американская фирма Блоу-Нокс сделала попытку механизировать практикующиеся приемы.

механизированной укладке бетона и ведению тоннельных работ, усовершенствовал и механизировал парижский способ работ (рис. 264, 265).

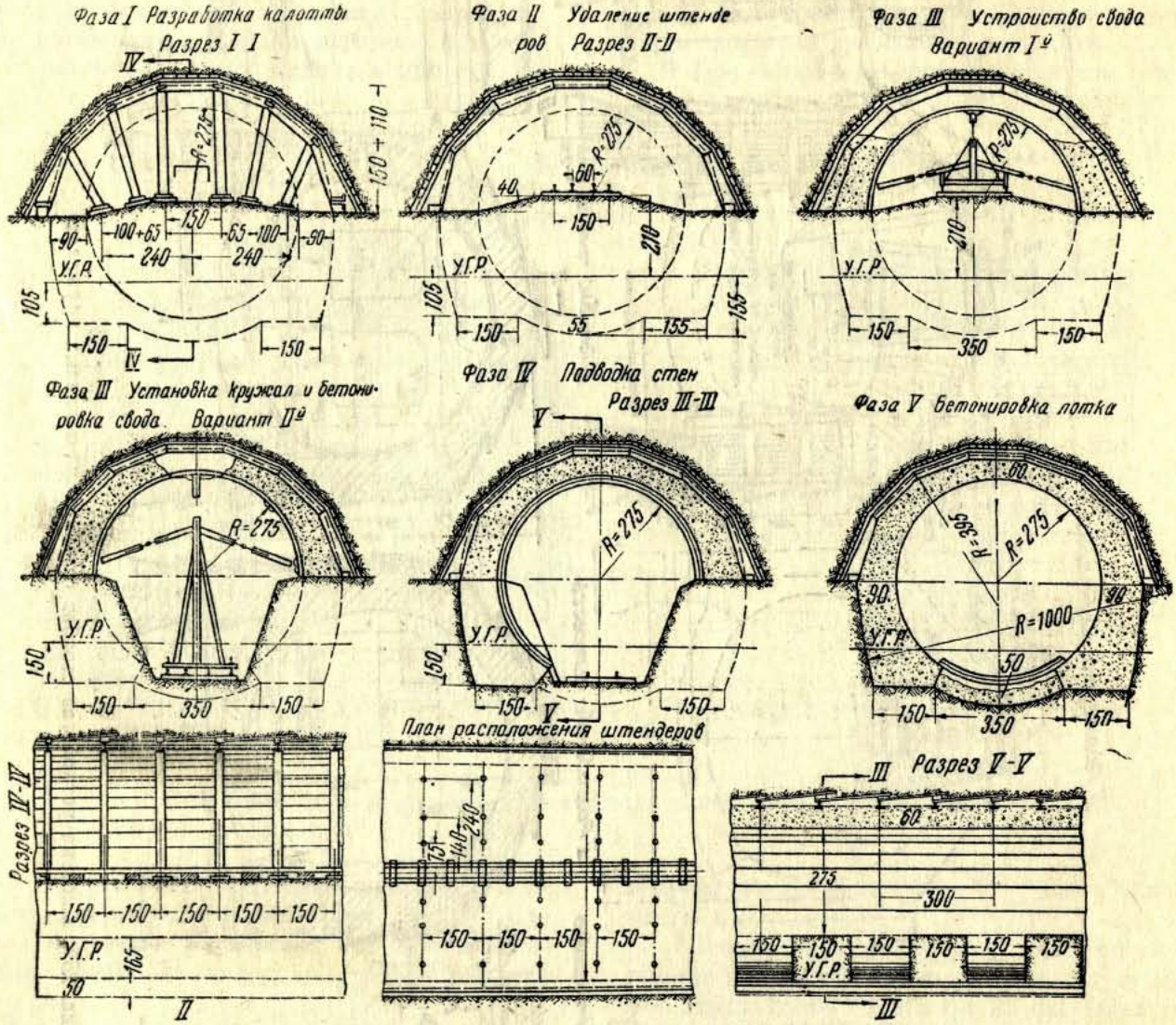


Рис. 264. Метод работ с металлическими подвижными кружалами (Блоу-Нокс)

Усовершенствованный бельгийский метод работ с металлическими подвижными кружалами (Блоу-Нокс). Основной недостаток парижского способа производства работ заключается в том, что наличие крепления, стесняющего сечение профиля, не дает возможности механизировать процесс тоннелирования. Парижский филиал американской фирмы Блоу-Нокс, имеющий большой опыт по подвижным металлическим кружалам,

По усовершенствованному способу предварительно проходится верхняя направляющая штольня при металлическом верхняке из [I] № 30.

Расстояние между штольневыми рамами 1,7 *м* при деревянных или железобетонных марчеванах.

Вслед затем ведется раскрытие калоттного профиля, но не перпендикулярно к оси тоннеля, а с торца забоя. При этом устанавли-

ваются металлические рошпаны из ⌶ № 30, поддерживаемые штендерами. Рошпаны соединяются между собой через металлические накладки болтами. Таким порядком развертывается по необходимому проектному очертанию крепление тоннельной фермы калотты и образуется рама с металлическим ломаным ригелем, способная работать без промежуточных опор в узловых точках. Штендера вышибаются. Получается при закрепленной кровле совершенно свободное пространство в калоттной части профиля.

При этих условиях уже можно пустить в калотту подвижные кружала и приступить к кладке свода. В зависимости от требуемых темпов работ могут быть применены два способа устройства свода на подвижных кружалах:

первый — с оставлением за кладкой металлических креплений временного порядка; в этом случае металлические полукольца из двутавров входят в бетонное тело свода, причем кружала делаются по длине двух колец;

во втором случае металлические крепления вынимаются; подвижные кружала шириной в 1 *м* устанавливаются между креплениями; свод бетонируется; после того как он окрепнет и сможет воспринять на себя окружающее давление породы, вынимается полуполукольцо временного металлического крепления; затем производится бетонирование свода между выведенными арками.

Необходимо отметить, что первый вариант дает возможность развить значительные темпы работ, причем исключаются вредные подвижки грунта, неизбежные при удалении элементов временного крепления, что имеет место во втором варианте.



Рис. 265. Вид работ в тоннеле по методу Блоу-Нокс

Подача бетона производится из бетононасоса отдельными порциями. Бетонирование свода производится с вибрацией.

В условиях скальных пород с высоким коэфициентом крепости эта система видоизменяется — бетонирование свода ведется с забоя уже при раскрытом штроссном профиле.

Временные металлические крепления кровли опираются на породу, причем оставляются бермы с двух сторон около 1,2 *м*.

Металлические подвижные кружала движутся по рельсовым путям, уложенным на отметке верха лотка тоннеля. В зависимости от конструкции подвижных кружал рельсы иногда укладываются дополнительно и по бермам выемки.

Уборка штроссного профиля ведется экскаваторами.

ДВУХШТОЛЬНЕВЫЙ БЕЛЬГИЙСКИЙ МЕТОД РАБОТ

В отличие от одноштольневого бельгийского, двухштольный метод производства работ начинается с пробивки нижней направляющей штольни. После продвижения нижней штольни на 30 *м* ведется верхняя штольня, которая соединяется с нижней системой фурнелей и воронок; через эти последние опускается порода в вагонетки подземной откатки, курсирующие в нижней штольне. Подача крепежных материалов и бетона производится как через фурнели, так и через оборудованные подъемными приспособлениями наклонные или уступчатые бремсберги (рис. 266).

Двухштольневый бельгийский метод, как и одноштольневый, применяется главным образом в крепких породах, где возможно опирать свод непосредственно на грунт. Когда в калоттной части профиля появляется большой дебит воды, ее отвод выполняется нижней штольней, которая играет одновременно роль дренажной галлереи, осушающей верхнюю часть профиля.

Двухштольневый бельгийский метод весьма целесообразен при большом расстоянии между рабочими шахтами и при значительном объеме тоннельных работ, когда для форсирования темпов необходимо развернуть широкий фронт работ. Нижняя штольня в этом случае играет роль основной транспортной галлереи.

Однако следует отметить следующий недостаток двухштольневого метода по сравнению с одноштольневым. При строительстве одноштольневым методом раскрытие калоттного профиля, являющегося наиболее ответственным этапом работ, ведется в совершенно ненарушенных породах, в то время как при двухштольневой системе калотта разрабатывается в грунтах, относительно уже приведенных в движение в связи с проходкой нижней штольни.

Двухштольневым бельгийским методом проходился ряд тоннелей Московского метрополитена. При этом подходные штольни от шахт к трассе велись в некоторых случаях в двух горизонтах. Учитывая, что подходные штольни должны находиться на деревянном креплении в течение всего периода производства работ во избежание осадок поверхности, обычно обделку штольни дополнительно закрепляют бетоном. Уровень нижней штольни определяется в соответствии с грунтовыми условиями и в каждом отдельном случае устанавливается особо. При наличии выклинивания мягких пород в подошве профиля, если штольню заложить слишком низко, то не исключена возможность выдавливания породы из-под фундаментов обделки в штольню, что может вызвать осадку и образование деформаций и трещин в обделке тоннеля. Закладывать нижнюю штольню относительно высоко тоже нецелесообразно, так как при этом теряется преимущество нижней штольни как дренажной. В этом случае приходится вести борьбу с водой при закладке оснований и фундаментов под стены тоннеля. Наиболее благоприятным представляется, когда нижняя транспортная штольня проходится с подъемом в соответствии с профилем прокладываемого тоннеля. При этом вода стекает по водоотводному лотку в зумпф шахты или за портал тоннеля; работы ведутся в сухом забое. Если от рабочего крыла шахты имеется уклон, то ведение штольни в соответствии с профилем тоннеля приводит к мокрому забою, что связано с определенными осложнениями в производстве работ. В таком случае можно прибегнуть к устройству специальной дренажной штольни пробивкой нижнего хода «с восстанием» против уклона проектного профиля тоннеля, даже за счет выхода штольни за проектное очертание тоннеля. Можно применить и систему уступчатого дренажного хода при установке промежуточных перекачечных насосных установок. Необходимо устроить специальные зумпфы для осушения котлованов при кладке фундаментов стен. Таким образом, уровень штольни должен быть установлен в соответствии с местными условиями и профилем тоннеля. Значительный приток воды приводит к необходимости установки мощных водоотливных средств и водосборных резервуаров.

При проходке нижней штольни, как уже указывалось, учитывается ее значение не только как дренажной, но и как транспортной — для откатки породы и материалов. Поэтому необходимо предусмотреть надлежащее число разъездов и стремиться к скорейшей сбойке шахт между собой в целях создания эффективной системы откатки и вентиляции. По мере продвижения забоя нижней штольни через фурнели рабочие поднимаются на горизонт верхней штольни. В зависимости от расположения шахты, типа тоннелей, системы околоствольных выработок иногда представляется возможным вести верхний горизонт непосредственно из шахты вне зависимости от нижней штольни. В боль-

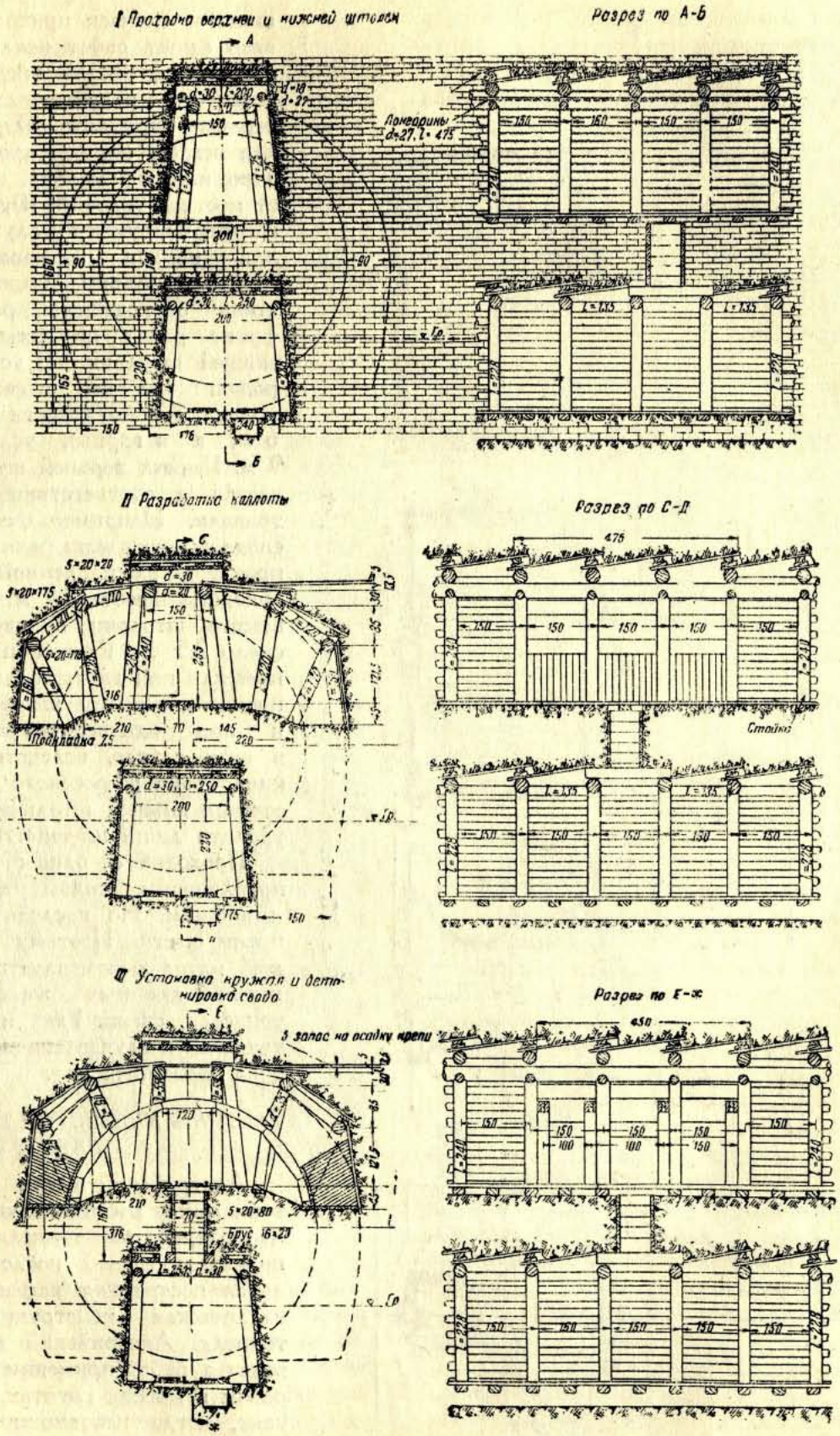


Рис. 266. Бельгийский двухштольневый метод производства работ

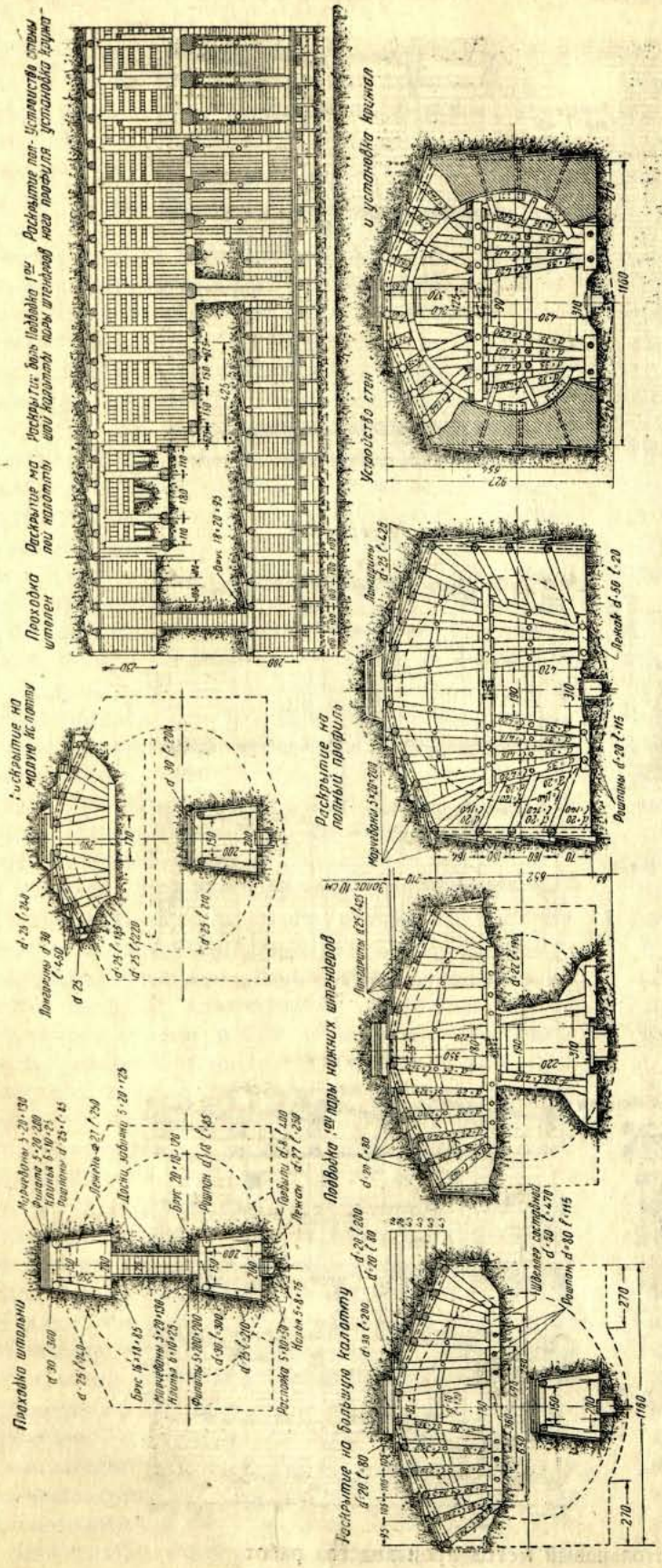


Рис. 267. Австрийский метод тоннельных работ

шинстве случаев приходится раскрывать фронт работ исключительно из ходовых фурнелей вверх и при помощи их развивать фронт работ верхнего горизонта. Фурнели-воронки для ссыпки породы пробивают через одно или два кольца, в зависимости от местных условий. Фурнели обычно специализируются и служат отдельно для подачи материалов, спуска грунта и подъема людей. В соответствии с графиком развертывается фронт работ на всем протяжении нижней штольни. В устойчивых породах, где не опасаются осадок кольца, можно довести длину его до 6 *м*, а в горных условиях и до 9 *м*. Высота верхней штольни назначается в соответствии с профилем тоннеля. Например, если толщина свода с кружалами равна 80 *см*, а для производства подземной откатки необходима высота 1,7 *м*, то требуемая высота штольни в свету составит около 2,5 *м*. Работа по раскрытию профиля при двухштольневой системе производится тем же порядком, что и при одноштольневой системе; в этом случае, вследствие уменьшения объема штроссного ядра за счет сечения нижней штольни, приходится удалять лишь *штроцетту*.

Проходка с одним верхним направляющим ходом дешевле, чем с нижним. Но последняя имеет ряд преимуществ. Поэтому двухштольневый метод рекомендуется при сооружении длинных железнодорожных тоннелей, свыше 1 *км*, и для коротких тоннелей в случае значительного притока подземных вод.

АВСТРИЙСКИЙ МЕТОД ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

Австрийский метод производства тоннельных работ заключается в том, что разработка тоннеля ведется на полный профиль, после чего возводится постоянная каменная или металлическая конструкция обделки тоннеля. Австрийский метод производства работ применим главным образом в мягких грунтах и в тех случаях, когда невозможно применить бельгийскую систему, опирая свод

непосредственно на породу. Вначале проходится нижняя направляющая штольня. Положение нижней штольни выбирается в каждом отдельном случае в зависимости от местных условий. Проходка штольни в неустойчивых породах ведется марчеванной крепью. После продвижения забоя нижней штольни вперед на 30—40 *м* засекаются фурнели, из которых проходится верхняя центральная штольня. Отдельными кольцами начинается расширение малой калотты. Затем, в зависимости от размеров разрабатываемого профиля тоннеля, производится раскрытие калотты в один или два приема сначала на малую, а затем на большую калотту при укладке соответствующих швеллеров (рис. 267, 268). Расширение на большую калотту производится обычно при сооружении больших профилей, в частности при сооружении двухпутных железнодорожных тоннелей, станционных тоннелей, камер для сборки щита, раструбов. За разработкой калоттного профиля ведется выборка штроцетты, боковых штросс, и осуществляется полное раскрытие поперечного сечения (рис. 269).

Форсирование производства работ и развертывание фронта могут быть осуществлены из нижней штольни путем вскрытия верхнего



Рис. 268. Перекрепление на швеллер большой калотты

горизонта из ряда фурнелей. Количество фурнелей и расстояние между ними определяются в соответствии с заданными темпами работ, условиями подземного транспорта и пропускной способностью ствола шахты. Забой верхней штольни должен обычно отставать от забоя нижней штольни на 30 *м*, для того чтобы в процессе разработки нижней штольни не нарушать крепления верхнего горизонта. Крепление верхней штольни устраивается из обычных штольневых рам, которые берут на

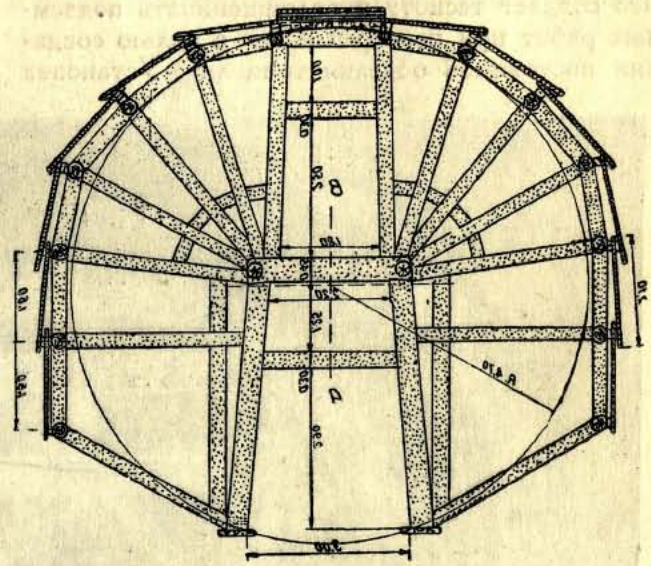


Рис. 269. Крепление на полный профиль при металлической обделке

унтерцуги. Порода, вынимаемая при разработке верхней штольни и из калоттного профиля, транспортируется до ближайшей фурнели, через которую спускается в вагонетки, курсирующие по нижней штольне. Подача материалов на верхний горизонт производится через вертикальные фурнели или бремсберги наклонного или уступчатого типа.

Разработка малой калотты начинается с производства подбоя бортов верхней штольни и укладки швеллера. Швеллер малой калотты представляет собой брус, служащий опорой для штендеров. Положение швеллера обычно назначается ниже подошвы верхней штольни в соответствии с величиной разрабатываемого профиля. Укладка швеллера малой калотты производится между порогами штольневых рам в заранее устроенной траншее.

Следующим этапом является перекрепление лонгарин через штендера непосредственно на швеллер. Расширение калоттного профиля ведется марчеванной крепью, причем лонгарины и штендера раскрепляются рошпанами. Подобным креплением образуются тоннельные фермы малой и большой калотт. Взаимное расстояние между этими фермами устанавливается обычно в зависимости от условий проявляемого горного давления и размеров профиля, а именно в пределах 1,5—2 *м*. При

развитии нарастающего горного давления приходится ставить дополнительные крепления. В этом случае тоннельные выработки иногда заполняются лесоматериалом до 40% сечения, что создает тесноту и осложненность подземных работ при перекреплении с целью создания постоянной обделки тоннеля. Установка сложного временного деревянного крепления неизбежно связана с осадками поверхности, что в городских условиях является недопустимым. Это обстоятельство делает австрийский метод малоприемлемым для сооружения тоннелей метрополитена. В начале строительства Московского метрополитена на шахте № 10 (одной из первых) на некоторых опытных кольцах был применен австрийский метод, но в силу имевших место осадок этот метод был в дальнейшем отменен.

Несмотря на указанные недостатки, австрийский метод имеет то преимущество, что сразу получается замкнутый контур постоянной обделки разрабатываемого тоннельного кольца. При проходке австрийским методом временного деревянного крепления обычно устраивают, как указывалось выше, бетонную или каменную тоннельную обделку. Австрийский метод работ применялся при постройке ряда горных железнодорожных тоннелей в СССР. В практике при австрийском способе применяется обделка и металлическими тюбингами, но в этом случае необходимо оборудовать специальные механические приспособления для монтажа сегментов (рис. 270). Австрийский метод временного деревянного крепления при чугунной обделке был применен при сооружении тоннельных подходов к подводному тоннелю под р. Шельдой в Антверпене.

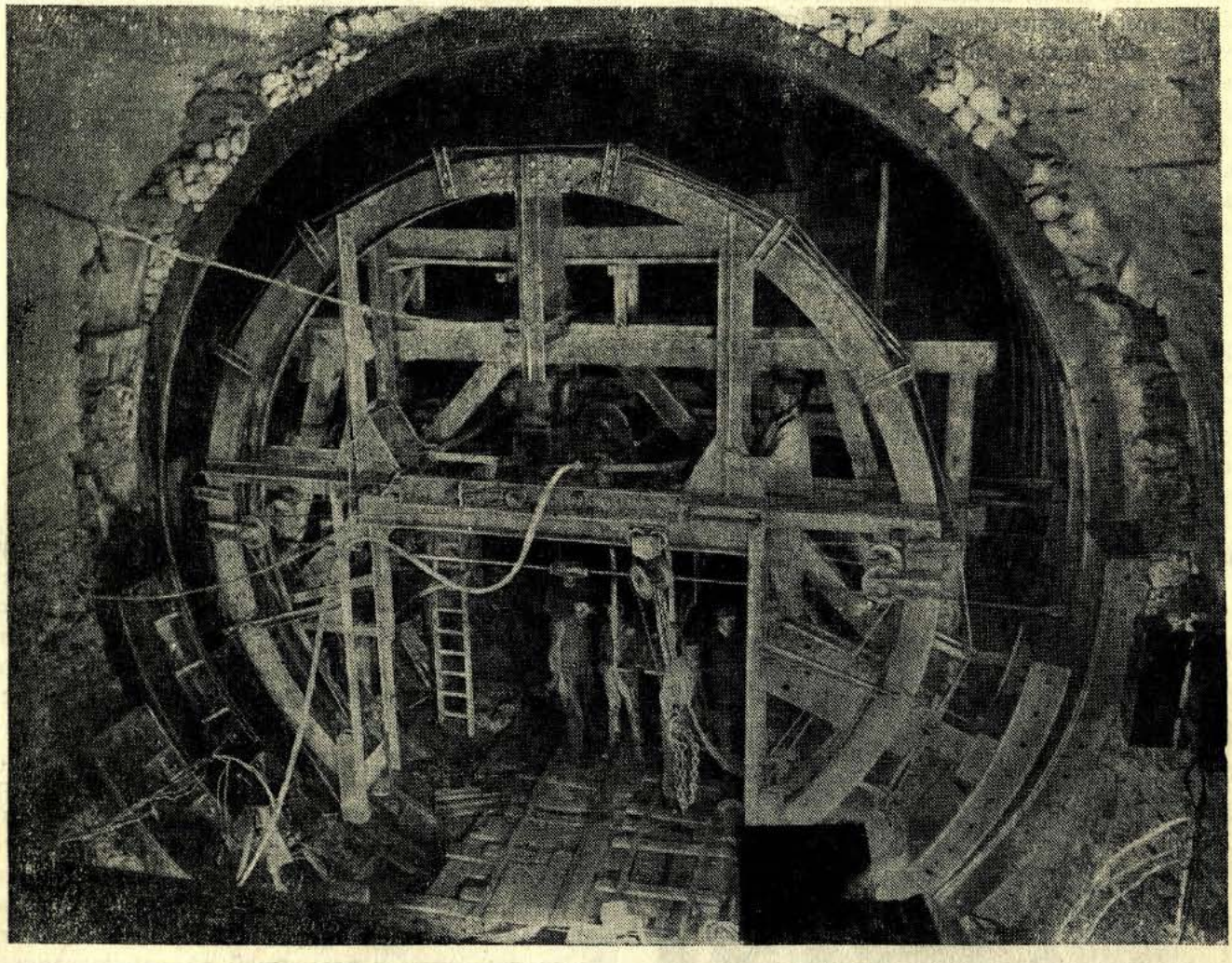


Рис. 270. Монтаж тюбингов укладчиком при австрийской системе разработки на полный профиль

АНГЛИЙСКИЙ МЕТОД ПРОИЗВОДСТВА ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

При английском методе тоннельных работ продвижение забоя вперед производится при раскрытии на полный профиль, причем вслед создается готовый тоннель. Разработка профиля ведется горизонтальными уступами, лонгарины калотты опираются с одной стороны на возведенную уже каменную кладку обделки, а с другой — на временное крепление лба забоя. В зависимости от площади сечения и размеров тоннеля, разработка ведется несколькими ярусами с применением горизонтальных швеллеров. Образующиеся тоннельные фермы содержат штендера между швеллерами, установленные в большинстве случаев вертикально. В некоторых случаях лонгарины перемещаются к вновь раскрываемому забою по специальным каналам, образованным в своде при возведении самой кладки. Обычно лонгарины во избежание подвижек

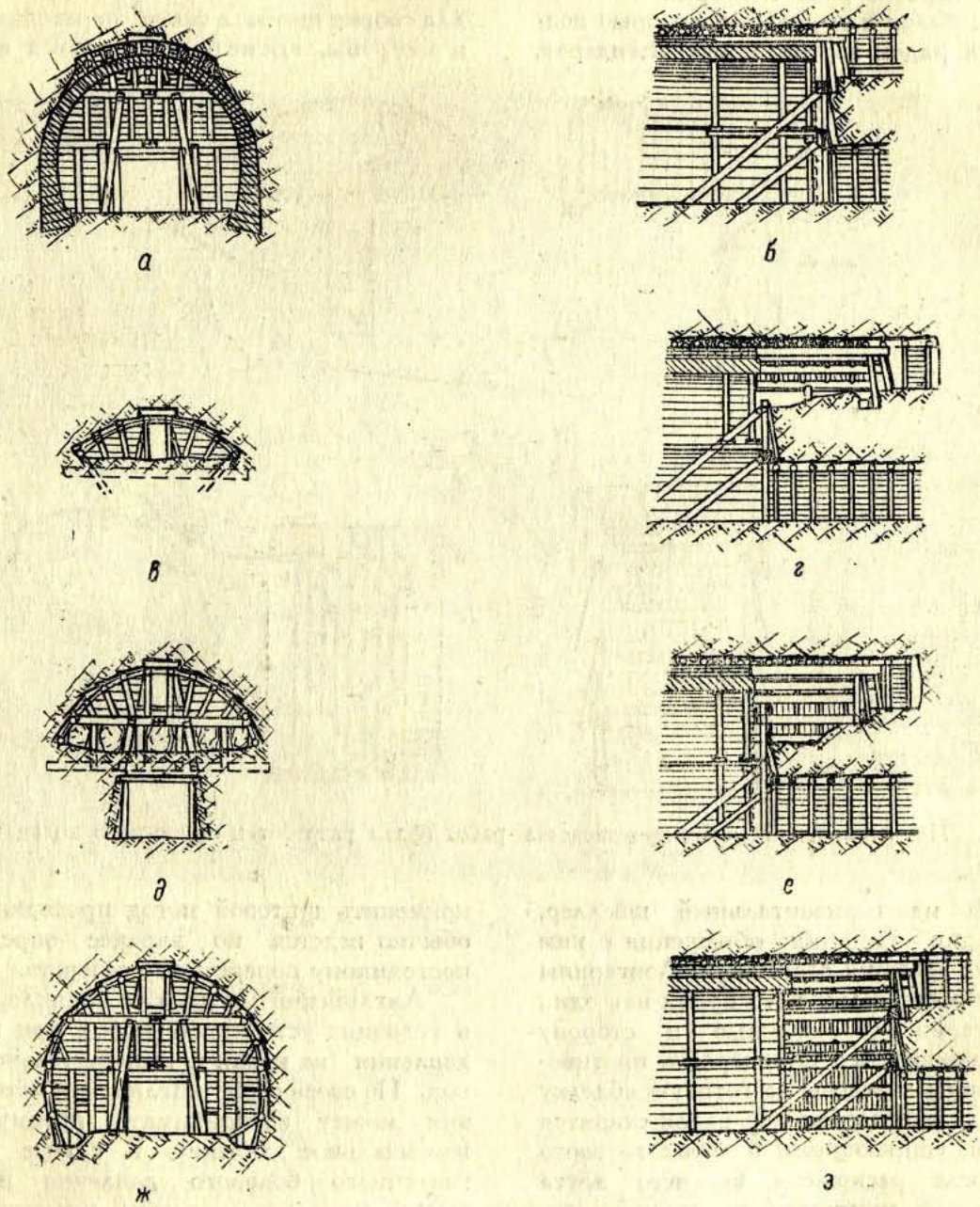


Рис. 271а. Английский метод тоннельных работ (фазы разработки)

грунта не вынимаются, а оставляются за кладкой (рис. 271а).

При английском методе раскрытие профиля тоннеля производится сверху вниз горизонтальными рядами и начинается обычно с установки первого ряда лонгарин часто из двутавровых балок или рельсов, которые поддерживаются рядом вертикальных штендеров, опирающихся на горизонтальный швеллер. Последний для удобства обращения с ним при установке делается составным. Лонгарины распираются рошпанами. В то время как одни концы лонгарин (обращенные в сторону забоя) поддерживаются штендерами, противоположные концы заведены за готовую обделку тоннеля. Для укрепления лба забоя ставится ряд подкосов, упирающихся в лоток готового тоннеля. После раскрытия верхнего яруса профиль тоннеля опускается на второй ярус, причем швеллер первого яруса через вертикальный штендер опирается на уложенные швеллера второго яруса. Аналогичным образом производится раскрытие последующих элементов профиля тоннеля в соответствии с квадратурой данного сечения (рис. 272).

При обделке тоннеля из бетона работы производятся обычным порядком, как и при австрийском методе работ, а именно: сначала возводятся стены, затем свод и в конце лоток или обратный свод. При английском методе бетонная обделка может быть заменена обделкой из металлических тюбингов. В английской практике по этой системе сооружают камеры для сборки щитов, а также переходные камеры и раструбы, где не представляется возможным применить щитовой метод проходки, который обычно ведется по заранее определенному, постоянному поперечному сечению.

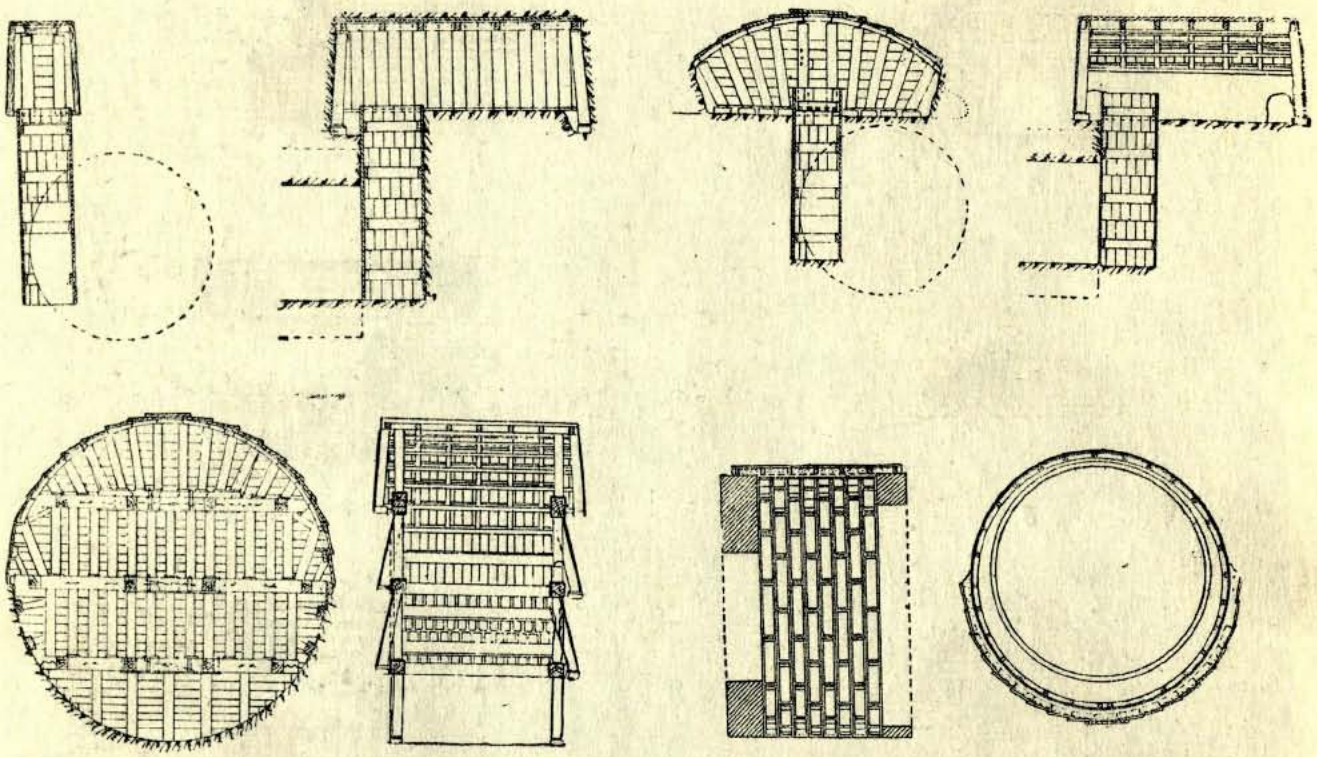


Рис. 271б. Английский метод производства работ (фазы разработки прорезного кольца)

Английский метод, как правило, применим в условиях устойчивых пород при небольшом давлении на крепи и незначительном дебите вод. По своей схеме английский метод крепления может воспринимать преимущественно вертикальное давление. В случае появления усиленного бокового давления и пучения грунта приходится ставить усиленное крепление. Это приводит к большому расходу лесного материала и к загромождению тоннельных выработок. Условия крепления значительно осложняются, а опасность обвала профиля возрастает. В этом случае английский метод уже не представляется целесообразным.

С целью развития фронта тоннельных работ можно не ограничиваться продвижением

лишь одного забоя. Чтобы не создавать простоя рабочих (ибо при английском методе работы по обделке тоннеля начинаются лишь после окончания земляных работ), англичане прибегают к открытию второго забоя из пройденной вперед нижней штольни. Пользуясь последней, можно создать четное число забоев и, таким образом, последовательно чередовать работу проходчиков, крепильщиков и каменщиков, обеспечивая переход бригад из одного забоя в другой без простоев.

Весьма ответственным моментом является разработка начального прорезного тоннельного кольца. Для этого из нижней направляющей штольни проводится фурнель, из которой на длину прорезного кольца засекается и проходится верхняя штольня. Устанавливается первая пара лонгарин, и дальнейшее расширение профиля идет уже обычным порядком.

Перекрепление элементов тоннельных ферм с одного швеллера на другой производится следующим образом. Швеллер в первое время перекрепляется на мальчики и контрфиши, которые ставятся наклонно. Конец их врезается в лоб забоя; рядом с наклонными мальчиками укладываются два швеллера, на которые через вертикальные мальчики перекрепляется верхняя ферма. После этого мальчики убираются. В процессе производства работ по перекреплению элементов тоннельной фермы все швеллера распираются подкосами (рис. 271 б).

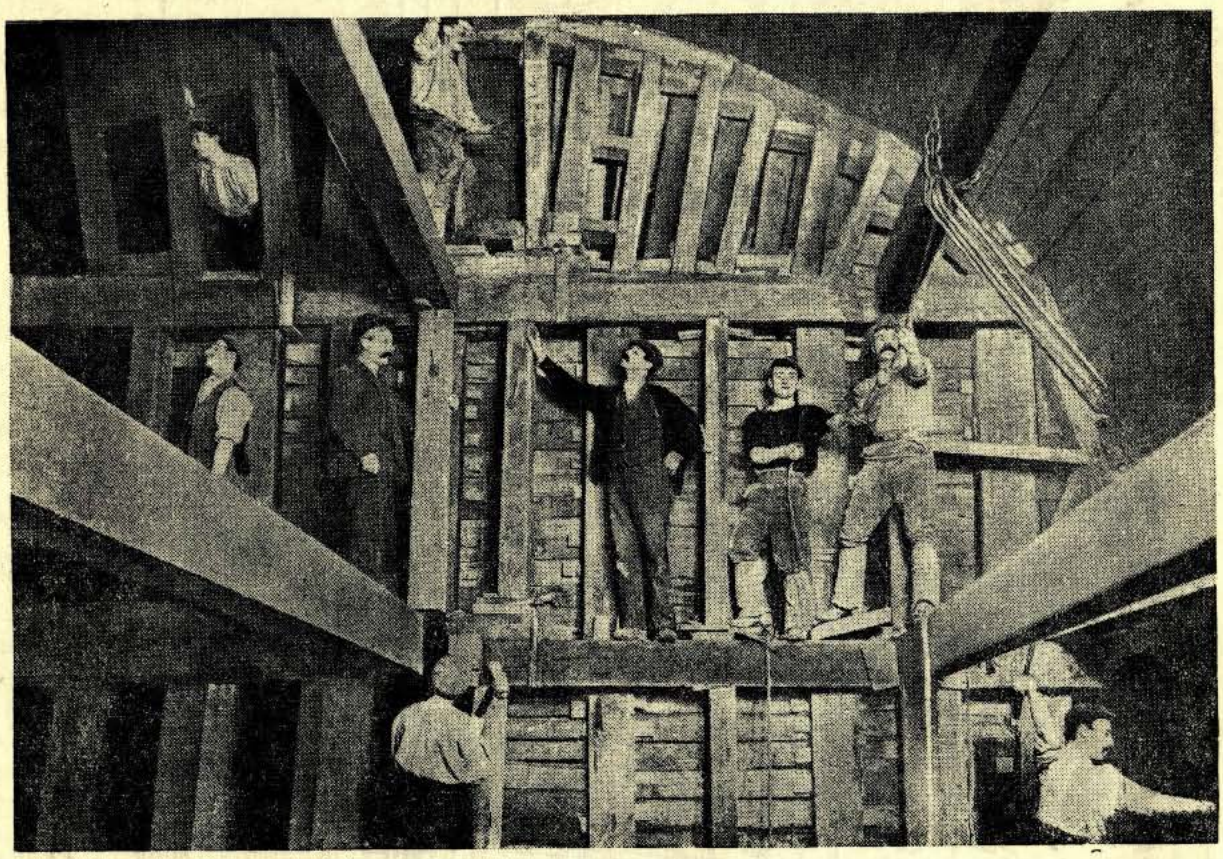


Рис. 272. Английское крепление при раскрытии полного профиля тоннеля

Английский метод наряду с удобством выемки грунта и возведения постоянной обделки тоннеля имеет тот недостаток, что он ограничен применением лишь в условиях устойчивых грунтов, проявляющих незначительное давление на крепи и не требующих усиленного водоотлива.

Применение английского метода временного деревянного крепления в условиях юрской глины, известняков и глин карбонного комплекса — при раскрытии тоннельных профилей, переходных камер, камер для сборки щитов — представляется целесообразным.

При обделке тоннеля из металлических тюбингов необходимо предусмотреть специальное приспособление для монтажа сегментов.

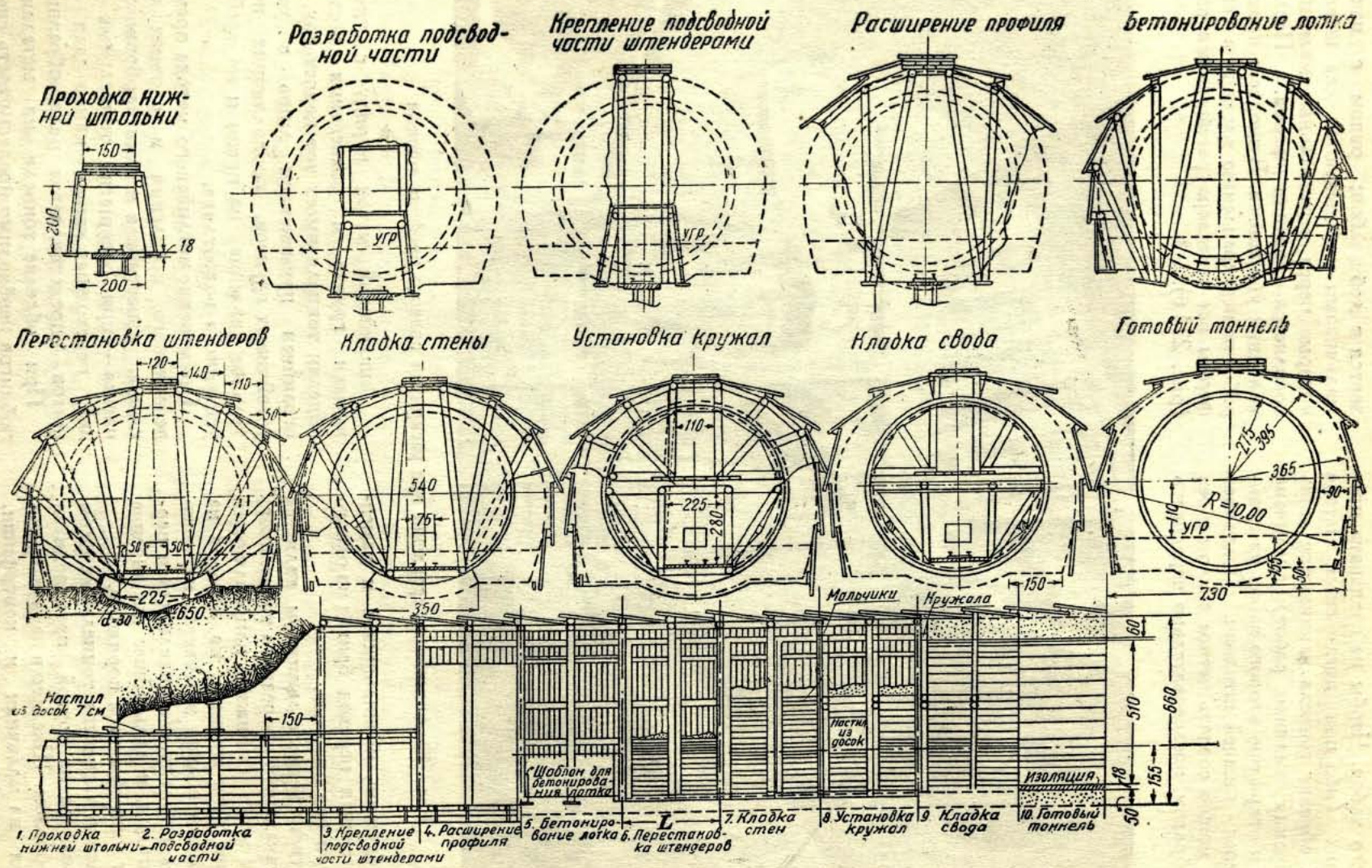


Рис. 273. Фазы разработки подсводным разрезом

Преимущество английского метода применительно к городским условиям перед бельгийским заключается в том, что, имея определенный забой, можно следить за качеством производства крепления и возведения обделки. При бельгийском методе, где тоннельная обделка сооружается в разных местах по отдельным фазам из отдельных элементов рассредоточенно, чрезвычайно трудно проводить надлежащий технический надзор.

Основным недостатком применения английского метода в городских условиях является возможность осадок вследствие раскрытия тоннеля при временном креплении сразу на полный профиль.

МЕТОД ПОДСВОДНОГО РАЗРЕЗА

Способ подсводного разреза в основном проводится следующим порядком. Предварительно пробивают нижний направляющий ход, имеющий назначение основной транспортной и дренажной галлереи. Раскрытие калотты производится не с помощью верхней штольни, как это принято по бельгийскому методу, а ведется снизу вскрытием кровли нижнего хода наподобие проходки снизу вверх фурнели, которая впоследствии расширяется до размеров калоттного профиля. Порода, получающаяся при разработке калотты, сваливается на настил (*полог*), уложенный по верхнякам нижнего направляющего хода. С настила порода грузится в вагонетки. Когда подрез целиком произведен, устраивается временное крепление, которое не носит, однако, характера воспринимающего горное давление, как это бывает в мягких грунтах. Учитывая надежность и крепость породы, крепление ставится лишь в целях предупреждения местных вывалов. Первые штендера верхней части профиля опираются непосредственно на крепления нижнего направляющего хода, после чего укладывается швеллер и производится расширение тоннеля на полный профиль. Возведение постоянной обделки производится снизу вверх с соответствующим перекреплением. Если тоннель имеет небольшое сечение и работа производится в скальных породах, например при проходке вентиляционных тоннелей метрополитена в известняках, то после устройства подреза сразу же устанавливаются сплошные штендера, опирающиеся на лежаны, уложенные непосредственно по подошве тоннеля (рис. 273). Однако это допустимо лишь при сравнительно небольшой длине

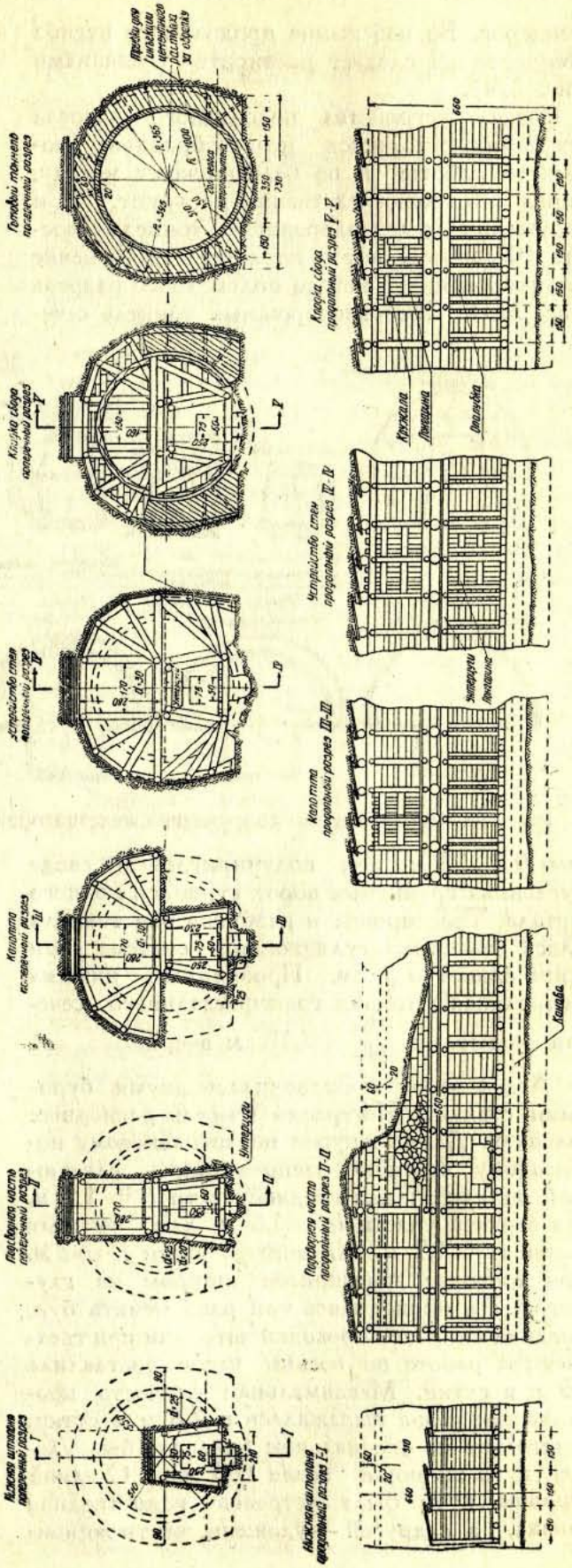


Рис. 274. Фазы разработки подсводным разрезом

штендеров. Во избежание продольного изгиба штендеров их следует распирать рошпанами (рис. 274).

После устройства подсводного разреза иногда представляется целесообразным продолжать работы и по бельгийскому методу, опирая свод непосредственно на грунт. При сооружении железнодорожного тоннеля Бюссанг (Франция) автор наблюдал применение комбинированного метода подсводного разреза (рис. 275). Железнодорожный тоннель сечением 9,8 × 8 *м* при полуциркульном своде в условиях гранитных пород строился с одного портала. Трассировка и разбивка оси тоннеля велась по триангуляционной системе при длине базиса в 3 *км*. Пробивалась нижняя центральная штольня трапецоидального сечения размерами $\frac{3{,}90}{3{,}75} \times 3{,}15$ *м* вчерне.

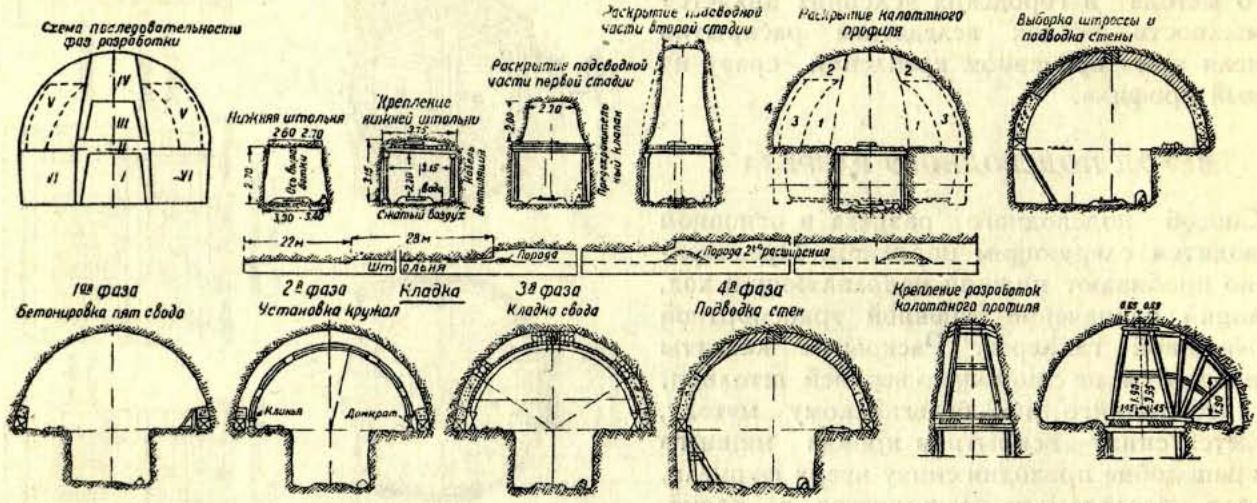


Рис. 275. Фазы работ по сооружению железнодорожного тоннеля Бюссанг методом подсводного разреза

Атака забоя производилась двумя буровыми станками Ингерсоль Рэнд на распорных колонках. Длина шпуров по штольневому поперечному сечению распределялась следующим порядком: для средней части $l_1 = 1{,}5$ *м*, для верхней части $l_2 = 1{,}6$ *м*, для боковых частей $l_3 = 1{,}7$ *м*, для нижней части $l_4 = 2$ *м*. При проходке порфиритов шпуром на глубину 1,5 *м* приходилось три раза менять бур. Средняя скорость проходки штольни при трехсменной работе по восьми часов составляла 4,5 *м* в сутки. Максимальная скорость продвижения забоя выражалась в 7,8 *м* в сутки. В штольне на специальном балласте был уложен путь шириной колеи 600 *мм*. С одной стороны пути была устроена водоотводная канава, а с другой — уложены вентиляционный трубопровод, водопровод, трубопровод сжатого воздуха, электрические кабели. Для предотвращения повреждений все трубопроводы были закрыты объемлющими чехлами из листового железа. По верхним штольням затягивалась кровля из кругляка, и производилась центральная прорезь сначала на высоту 2 *м*, а затем вскрытие профиля по сводам на высоту 5 *м* от уровня верхняка. Порода складывалась на кровлю штольни, используемую как настил. Раскрытие калотты производилось постепенными фазами. Расход динамита на 1 $м^3$ породы калоттного профиля составлял 0,8—0,9 *кг*. После полного раскрытия калоттного профиля подготовлялось основание под пятой свода в виде железобетонной ленты шириной и толщиной по 0,5 *м* с наклоном для пяты свода 30° к горизонту. Производилась установка металлических кружал без штендеров, опирающихся с одной стороны на деревянные подкладки, а с другой — на ручной домкрат. При полуциркульном очертании свода получается хорошая система, дающая возможность регулировать требуемую величину строительного подъема свода. Опалубка деревянная. До угла 35°33′, считая от подошвы железобетонных лент, велась бетонная кладка свода, а затем бутовая кладка на цементном растворе. В дальнейшем крепление нижней штольни убиралось. Подача материалов для верхнего горизонта работ производилась по пути, уложенному по правой бровке штроссы. Отличительной особенностью примененного здесь способа является подводка стен, которая ведется только с одной стороны. В отличие от подводки стен тоннеля по бельгийскому

методу в шахматном порядке, здесь подводилась лишь одна стена тоннеля с целью сохранения имеющегося пути верхнего горизонта. При наличии железобетонных лент, воспринимающих растягивающие усилия по оси тоннеля в момент оголения пяты, имеется полная возможность безопасно производить одностороннюю подводку стен, участками до 6 *м*, что при обычной бельгийской системе считается рискованным. После окончания подводки стен под своды тоннеля полностью с одной стороны начинали подводку с другой стороны тоннеля.

При проходке в скалистых грунтах метод подсводного разреза по сравнению с бельгийским дает экономию на взрывчатых материалах около 30—35%. Применительно к городским условиям метод подсводного разреза пригоден при наличии достаточно мощной кровли крепких пород и небольшом профиле выработки (вентиляционные тоннели). Подсводный разрез тоннельного профиля без крепления содержит в себе элементы технического риска, которые в городских условиях являются иногда недопустимыми.

Метод подсводного разреза применяется главным образом в скальных, с высоким коэфициентом крепости породах, при которых можно ограничиться облегченным временным креплением. Этот метод с успехом применялся в Советском Союзе, Италии, Швейцарии и Франции.

Метод подсводного разреза с успехом был применен также на шахте № 12 Московского метрополитена, при проходке подходного тоннеля к щитовому участку.

МЕТОД ОПОРНОГО ЯДРА

Метод опорного земляного ядра, известный в практике как германский метод, применяется главным образом в тех случаях, когда по геологическим условиям порода не обладает достаточной «носностью» для восприятия давления от пят свода тоннельной обделки. При этом возникает необходимость в предварительной закладке стен, на которые впоследствии уже опирается свод тоннеля.

Порядок работ по методу опорного ядра следующий. В нижней части профиля тоннеля закладываются две боковые штольни размерами, позволяющими производить кладку стен и пропуск вагонеток подземной откатки для выдачи породы и подачи материалов. После проходки боковых штолен в них производится закладка стен (рис. 276 а, б, в, г, д, е). В городских условиях во избежание подвижек грунта и проявления осадок свободное пространство в штольнях после устройства стен обычно закладывается временной бутовой кладкой. После этого работы переносятся на верхний горизонт, где проходится верхняя центральная штольня для разработки калотт. Раскрытие верхней калоттной части профиля производится обычным способом; при этом кружала для бетонировки свода опираются на среднее опорное земляное ядро и стены, возведенные в штольнях. Бетонировка свода начинается непосредственно от возведенных ранее стен к замку. При сооружении германским способом однопутного тоннеля метрополитена для ускорения работ и удобства транспорта прибегают к производству работ по следующей схеме. Одна из боковых штолен для закладки стен делается несколько шире с тем расчетом, чтобы, помимо габарита стены, имелся запас для пропуска вагонетки. Боковые стены соединяются поперечными сбойками. Это дает возможность осуществить одновременно проходку и закладку стен, транспортируя материалы и породу по уширенной части одной из штолен.

Выбирая метод опорного ядра для проходки тоннеля под ответственными искусственными сооружениями, сечение штольни для кладки стен назначают минимальных размеров. Это делается с целью избежания осадок, опасность увеличения которых возрастает с увеличением размеров штольневых выработок. В этом случае штольни проходятся на длину участка, и, отступая от забоя, в них ведется кладка стен. Все пустоты в штольнях, оставшиеся после бетонирования стен, тщательно закладываются сухой бутовой кладкой. Таким путем вынутый грунт при проходке штольни полностью заменяется кладкой. Это мероприятие в значительной степени снижает опасность подвижек грунта и распространение осадок до поверхности.

После того как полностью произведена замена грунта кладкой, переходят на верхний горизонт, проходят штольню, ведут расширение калотты и возводят свод, опирая его на стены, выложенные в штольнях.

Последним этапом является выемка опорного земляного ядра. Одновременно с ядром удаляется вся сухая бутовая кладка. Далее ведется разработка под обратный свод — *лоток*, для кладки которого может быть использован бутовый материал, которым про-

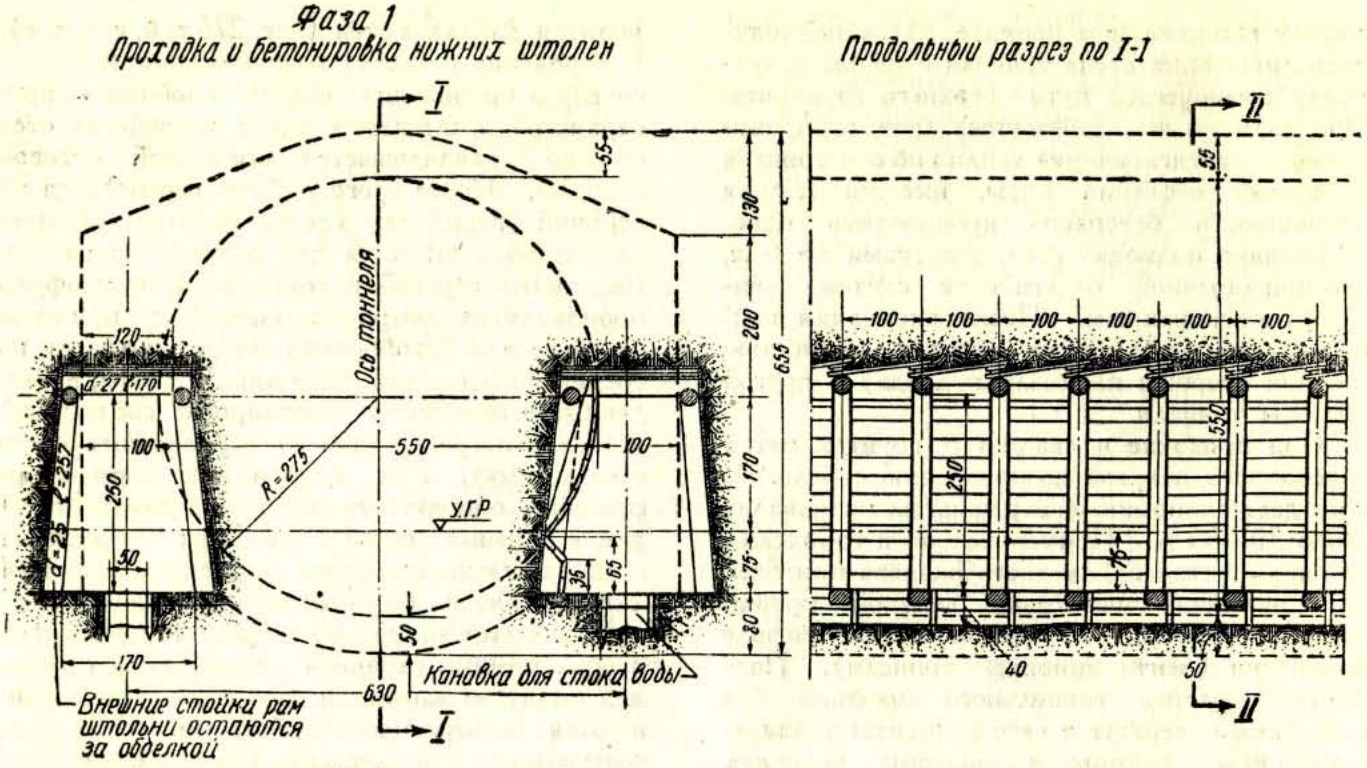


Рис. 276 а

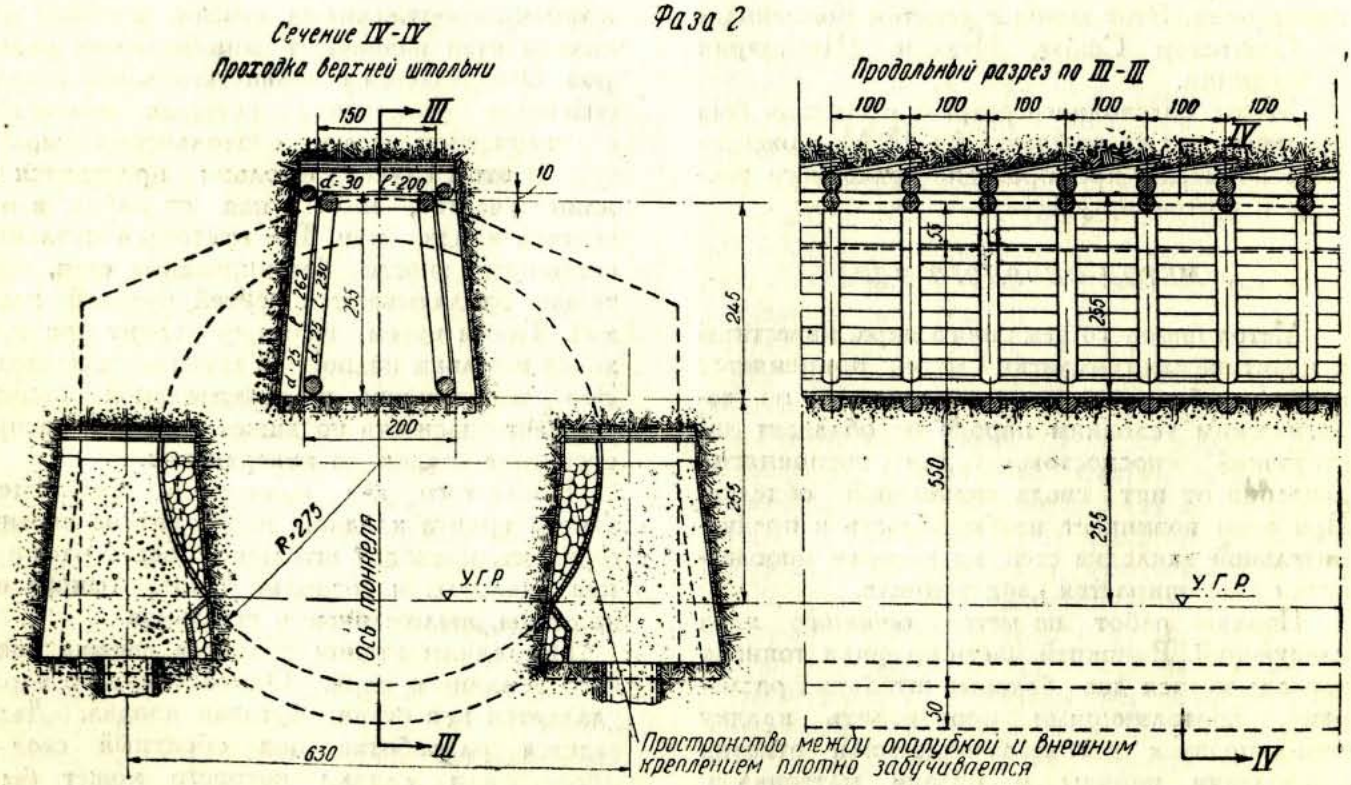


Рис. 276 б

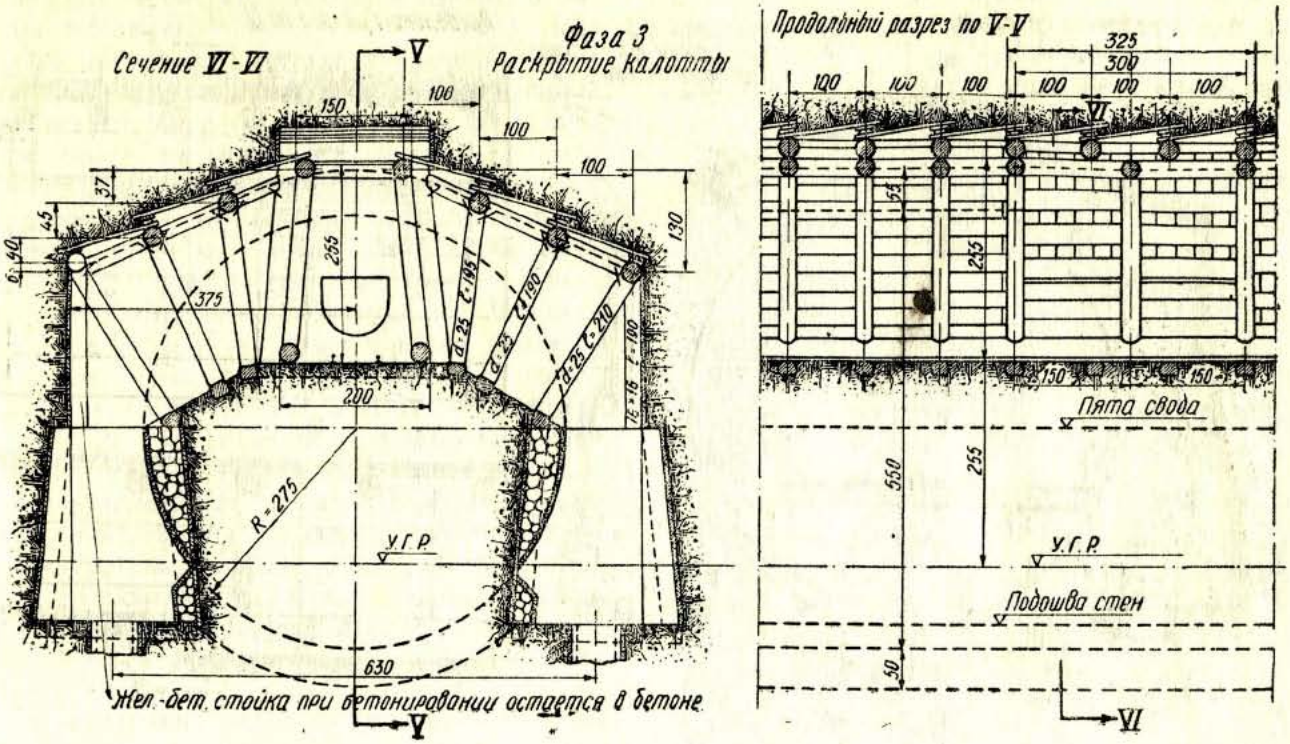


Рис. 276 в

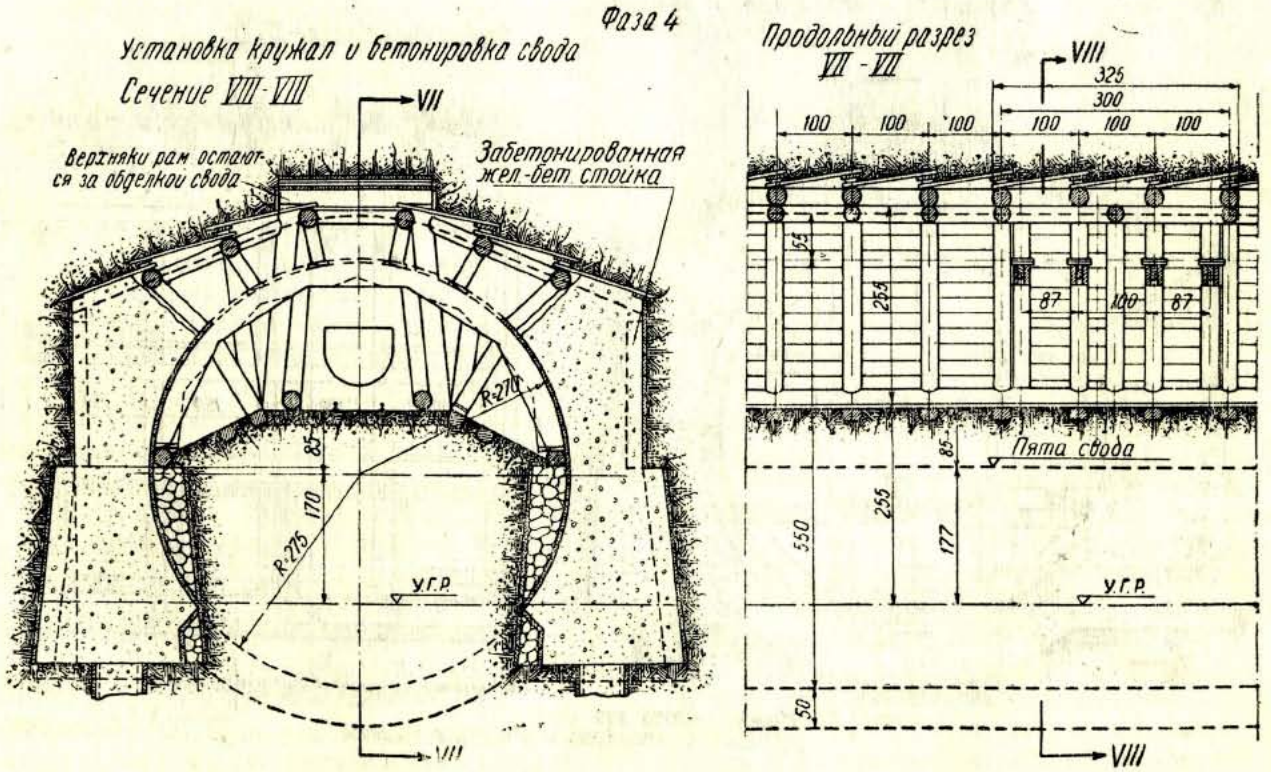


Рис. 276 г

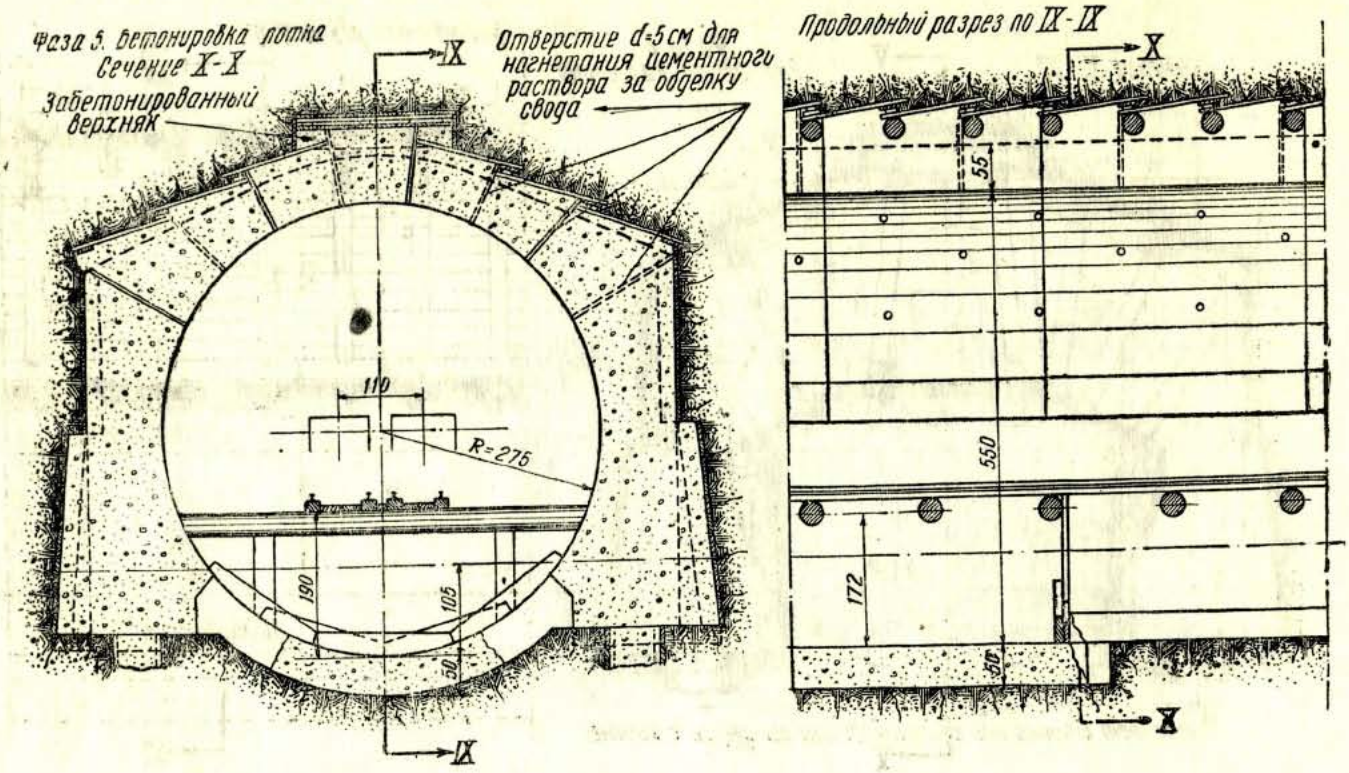


Рис. 276 д

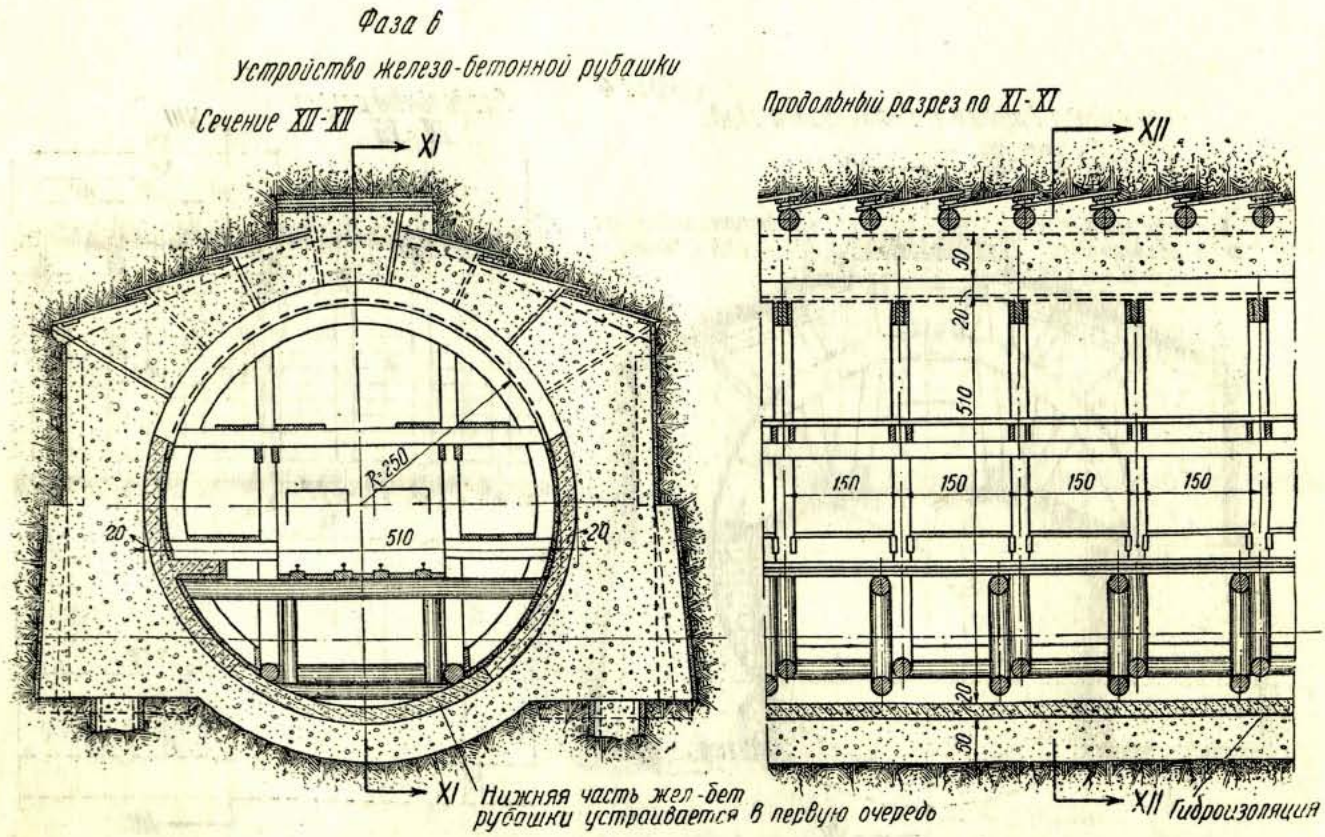


Рис. 276 е. Трехштольневый метод опорного ядра

изводилась временная закладка пустот в боковых штольнях.

Для освоения профиля тоннеля больших размеров, например двухпутного сечения, описанный трехштольневый метод опорного ядра может не разрешить задачи. В этом случае стены тоннеля возводятся в двух ярусах штолен, что приводит к пятиштольневой системе. Нижние части стен возводятся аналогично предыдущей системе в двух боковых штольнях с временным заполнением всех остающихся пространств сухой кладкой. На базе (рис. 277) заложенных нижних штолен проходятся штольни второго яруса, в которых продолжается возведение стен тоннеля. Как и в нижнем горизонте, оставшиеся пустые пространства второго горизонта закладываются сухой кладкой. Когда стены в двух ярусах штольни будут возведены на всем протяжении, начинают проходку верхней штольни, разработку калотт с последующей бетонировкой сводов, опирая кружала на ядро и стены.

В остальном пятиштольневый метод не отличается от обычного трехштольневого метода опорного ядра (рис. 278а, б, в, г).

Для облегчения транспортирования грунта и материалов при проходке большого профиля тоннеля на уровне нижних штолен по оси тоннеля может быть пройдена специальная транспортная штольня (например, при сооружении односводчатой станции Московского метрополитена) (рис. 279, 280). В случае, если вопрос транспорта разрешается укладкой сквозного пути в расширенной части одной из штолен, то в целях сохранения нетронутым опорного ядра и увеличения расстояния между штольнями можно прибегнуть к приему расширения штольни вне пределов габаритов данного профиля. Хотя в этом случае часть выемки грунта является бросовой, все же такая организация работ в значительной мере облегчает задачи подземного транспорта. При этом в конечном итоге сокращается срок строительства данного участка тоннеля. Вообще говоря, наличие транспортной штольни при германском методе проходки в мягких грунтах сокращает срок возведения стен примерно в два раза по сравнению с системой, при которой возведение стен в штольнях производится, отступая от забоя.

Если по местным условиям (наличие слабых грунтов) нельзя производить раскрытие калотты, опасаясь осадок поверхности, то это раскрытие заменяют проходкой системы штолен. Помимо двух ярусов штолен, для кладки стен проходятся еще два яруса штолен, в которых по частям бетонируются элементы свода, а оставшаяся неиспользованной часть

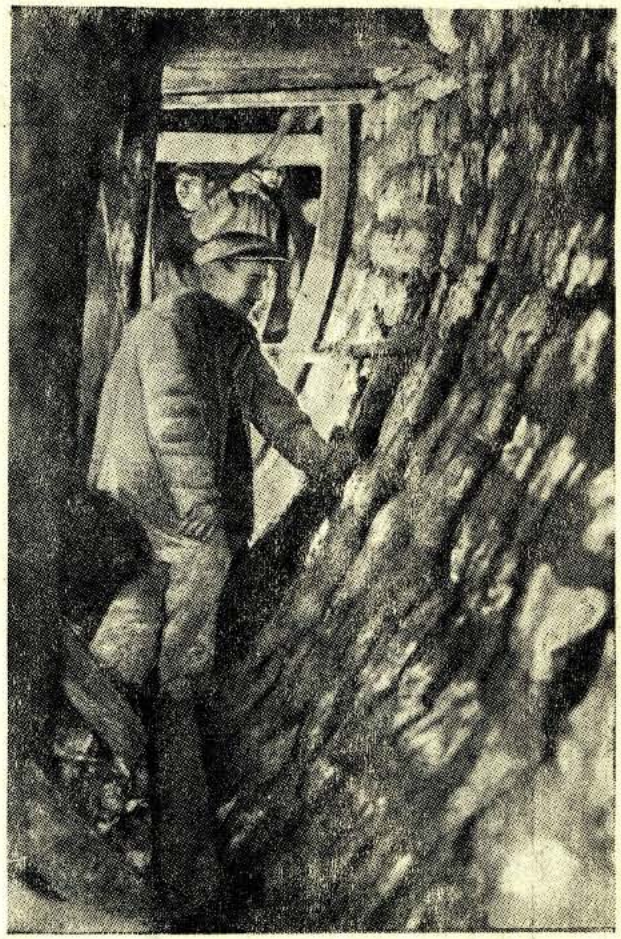


Рис. 277. Кладка стены в боковой штольне

сечения закладывается тощим бетоном. При пересечении слабых грунтов может оказаться, что после выборки ядра грунт выпирает из-под фундаментов стен, возведенных в штольнях. В таких случаях прибегают к закладке и обратного свода в штольнях. В результате такой прием тоннелирования приводит к многоштольневому методу, при котором весь профиль и закладка обделки тоннеля последовательно выполняются в ряде штолен по всему периметру (рис. 281).

Какой бы метод работ ни применялся, но чем большее число требуется при нем штолен, тем стоимость тоннельных работ выше. Поэтому к применению многоштольневого метода прибегают лишь в исключительных случаях.

Необходимость применения многоштольневого метода должна быть в проекте подкреплена надлежащими технико-экономическими обоснованиями.

Учитывая, что германский метод тоннельных работ применяется главным образом в слабых грунтах, естественно, может оказаться, что фундаменты данной тоннельной обделки требуют искусственного основания. В этом случае из боковых штолен, прежде чем приступить к возведению стен, опускают колодцы до горизонта надежных грунтов. Колодцы закладывают бетоном, устраивая опорные столбы, между которыми в штольне можно перекинуть арки на земляных кружалах. Таким образом, все тоннельное сооружение будет в дальнейшем базироваться на надежном основании. В отдельных случаях колодцы могут быть заменены сплошным ленточным фундаментом, заложенным в штольне, пройденной ниже уровня подошвы стен тоннеля. Иногда можно прибегнуть к устройству из штольни искусственного основания из бетонных набивных свай. Для того чтобы использовать преимущества метода опорного ядра и вместе с тем освободиться от необходимости проходки большого количества штолен, удорожающей работы, иногда представляется целесообразным применить комбинированные системы тоннелирования. Например, нижняя часть стены тоннеля устраивается в первом ярусе штольни, затем проводится верхняя центральная штольня, из которой раскрываются калотты с опусканием колодцев до уложенных

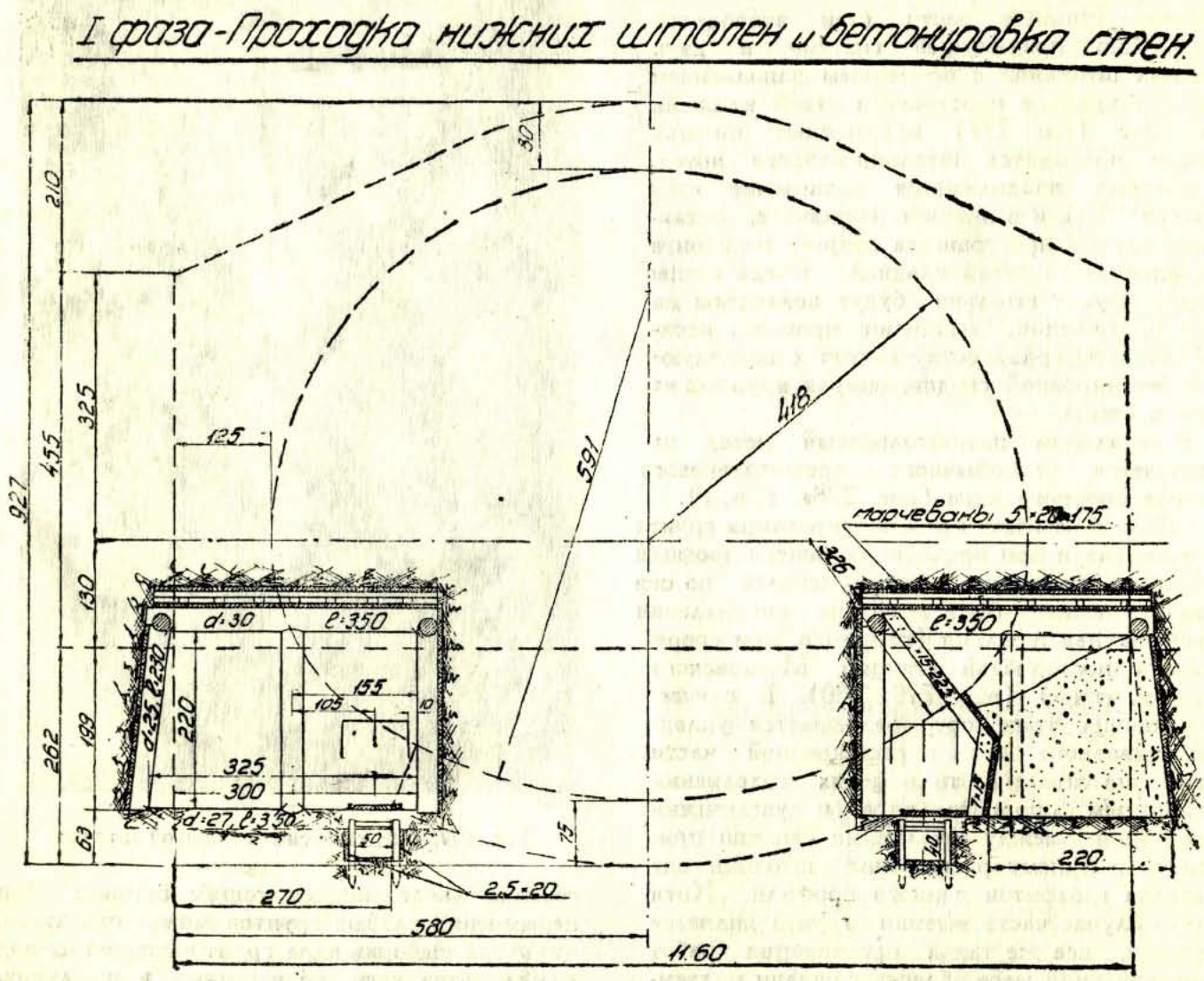
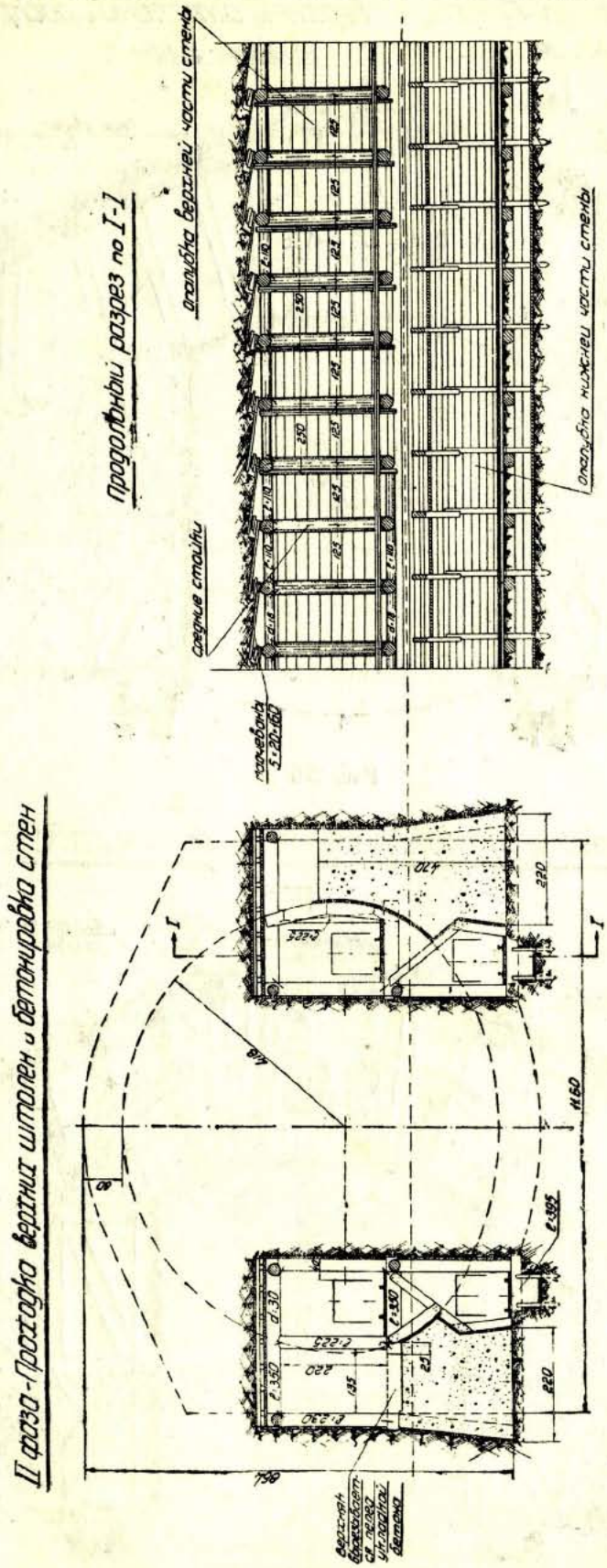


Рис. 278 а. Пятиштольневый метод опорного ядра


II фаза - Проходка верхних штолен и бетонировка стен
Продольный разрез по I-I
Рис. 278 б

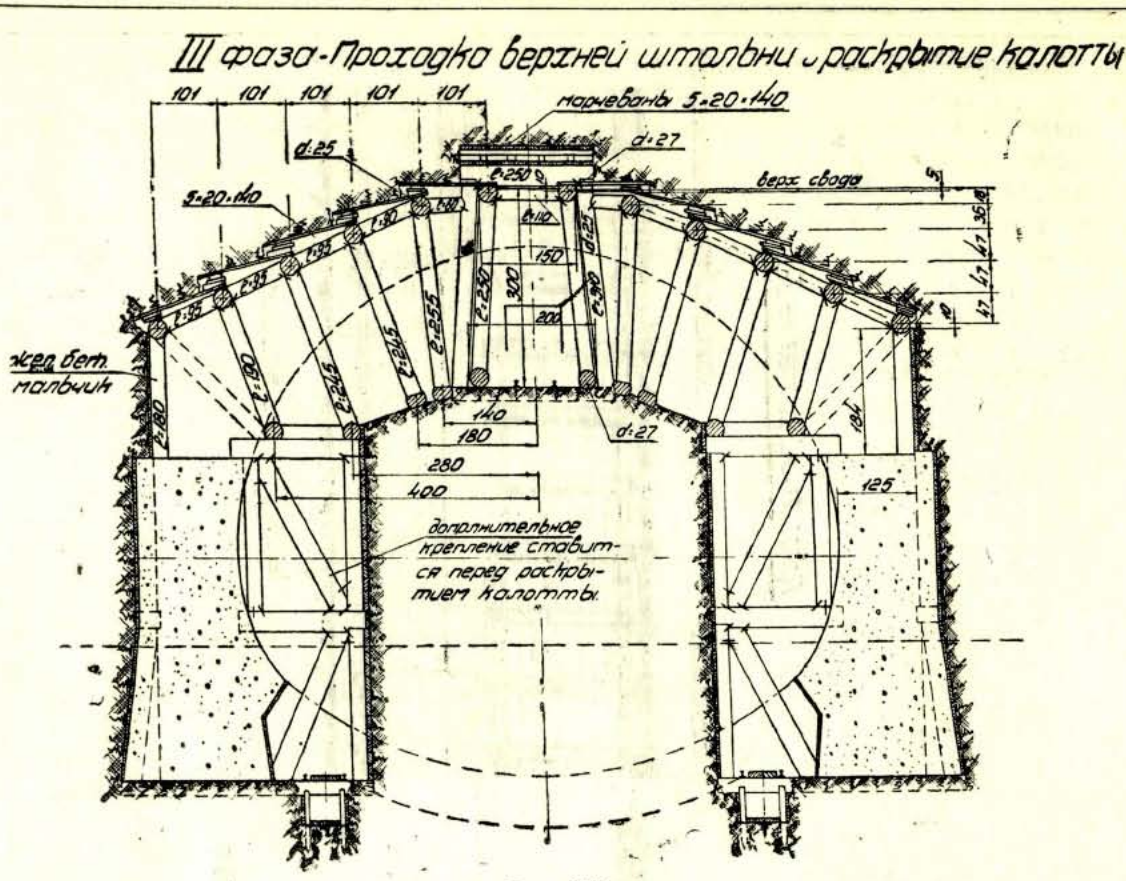


Рис. 278 в

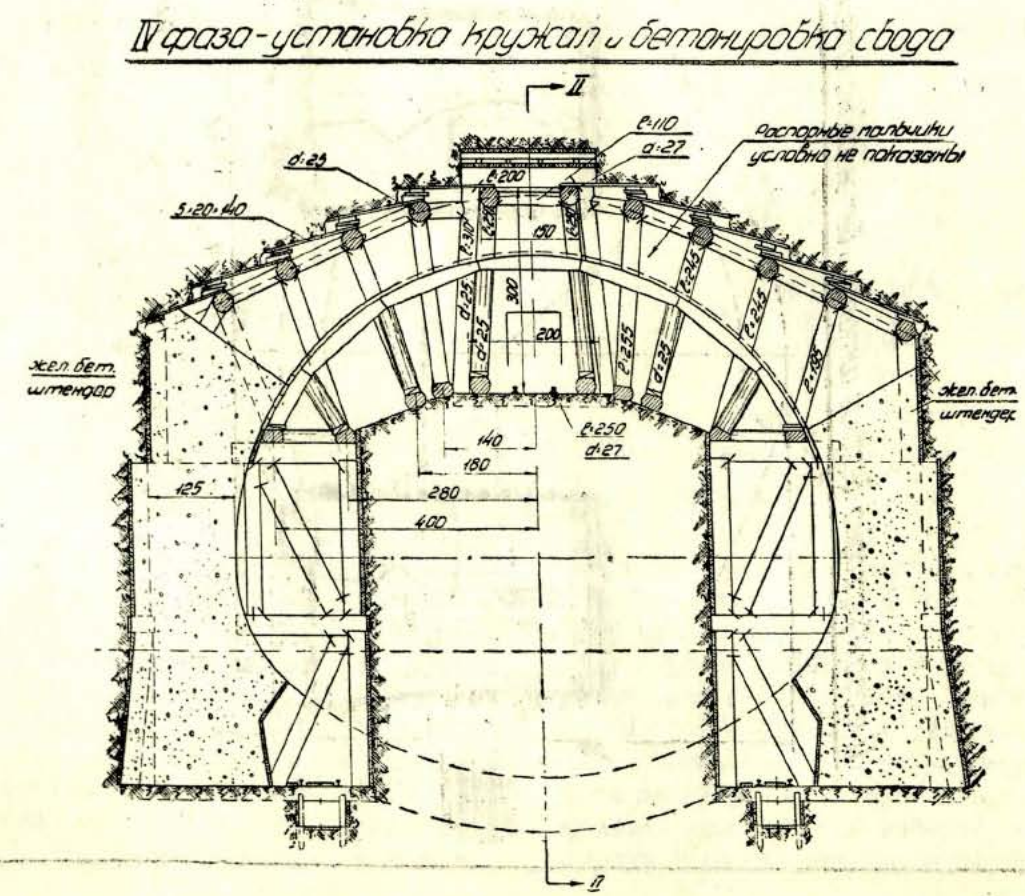


Рис. 278 г

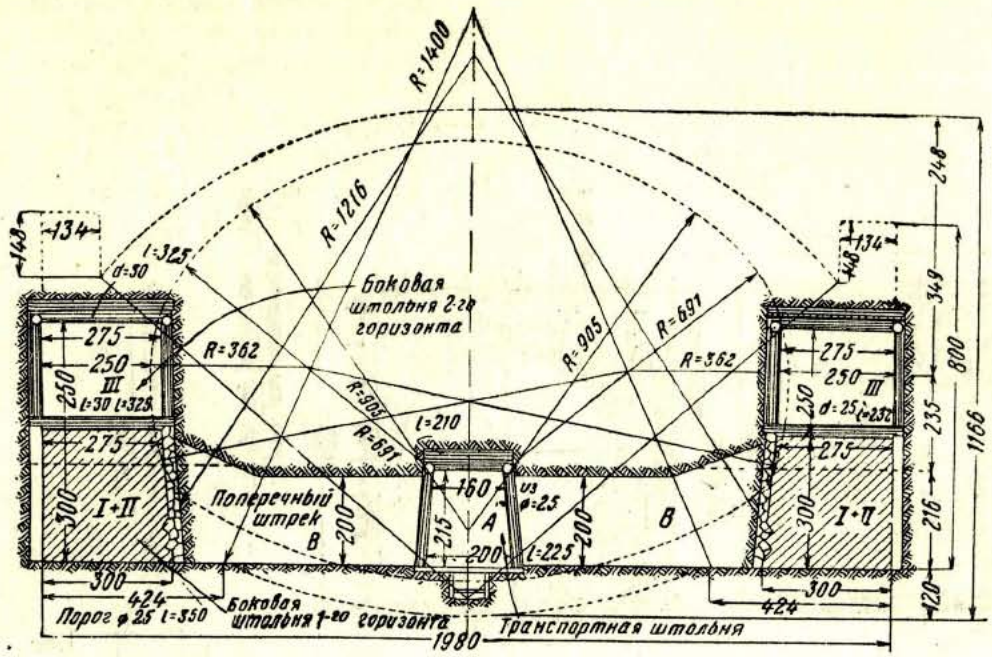


Рис. 279. Закладка стен тоннеля станционного профиля при методе опорного ядра

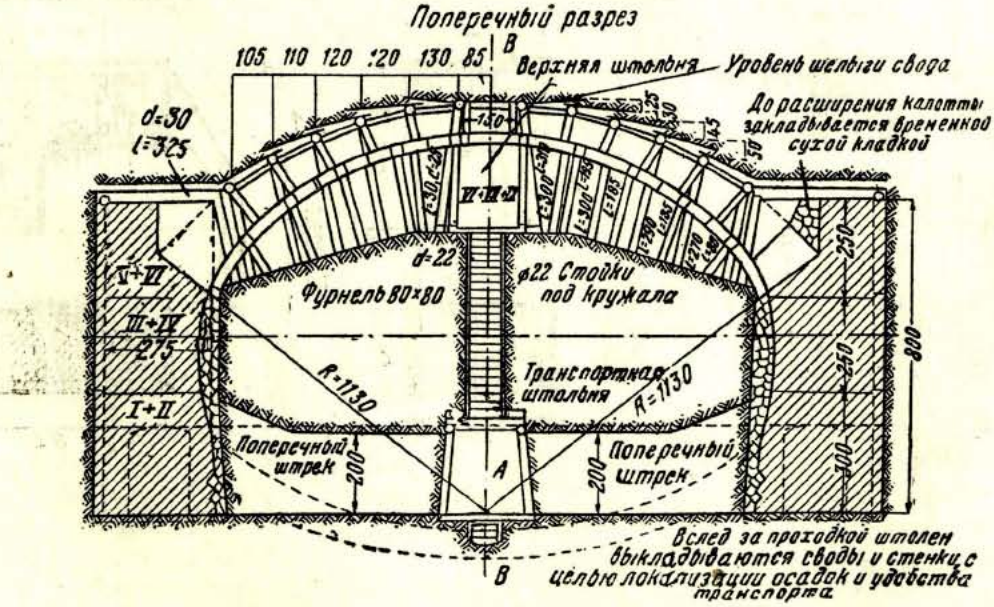


Рис. 280. Раскрытие калоттного профиля станционного тоннеля при методе опорного ядра

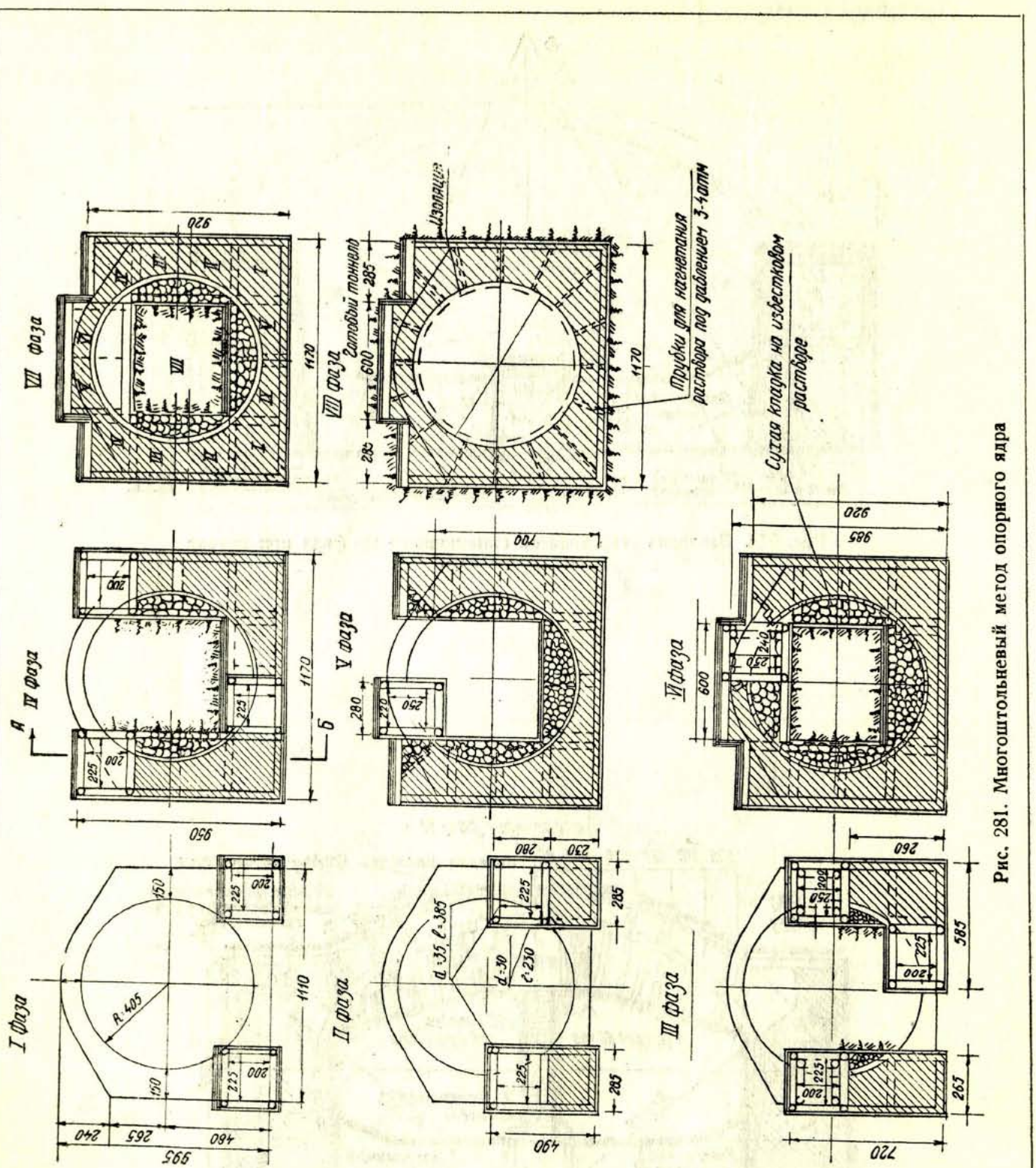


Рис. 281. Многоштольневый метод опорного ядра

частей стен в штольнях. После этого последовательно производится бетонировка верхних частей стен и свода. Иногда местные условия могут потребовать применения комбинированных методов — бельгийского и германского; так, например, при сооружении камеры для сборки щита, которая имеет размеры до 15 *м* Московского метрополитена. Естественно, что этот прием применим в достаточно надежных грунтах, которые допускают непосредственное опирание свода на грунт. Подводка стен щитовой камеры на всю высоту была бы весьма затруднительна. Сооружая же нижнюю часть стен методом опорного ядра, можно тем самым

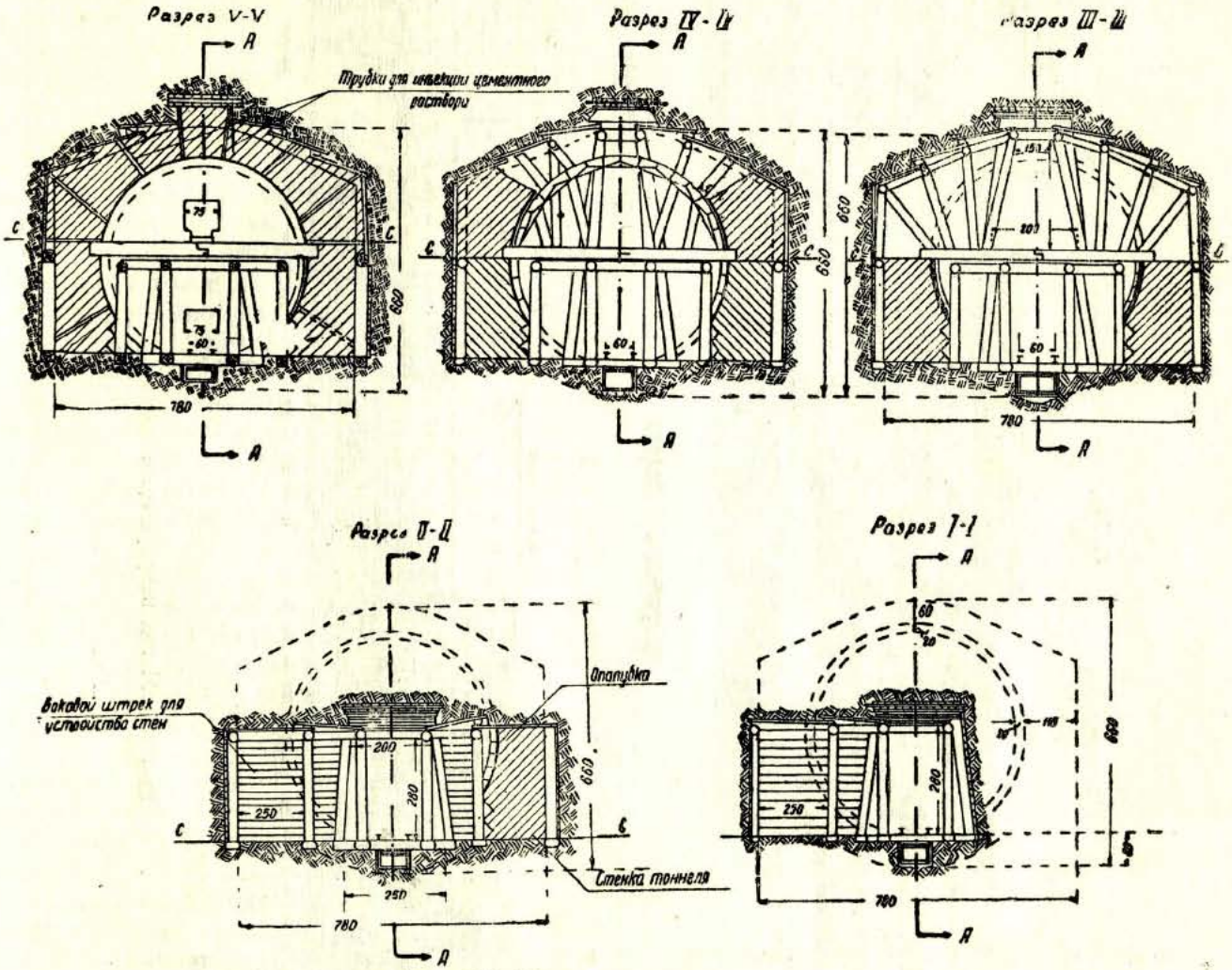


Рис. 282. Метод непрерывного потока

по высоте, может быть применен следующий прием. Нижние части стен, включающие фундаменты, возводят в боковых штольнях. Затем работы переносятся на верхний горизонт, и производится разработка калотт с немедленным бетонированием свода на всем протяжении щитовой камеры. После этого производится удаление штроссы и по бельгийскому методу подводятся части стен между пятой свода и фундаментом, выложенным ранее в боковых штольнях. Этот способ применялся при сооружении некоторых тоннелей станций

сократить высоту подводки бельгийским методом.

Метод опорного ядра применяется также при сооружении тоннелей больших профилей, в частности для станций метрополитена. При большом пролете свода даже в устойчивых породах по расчетным соображениям может выявиться недопустимость опирать свод на грунт непосредственно, и необходимо прибегнуть к предварительной закладке стен в штольнях.

Основным недостатком метода опорного

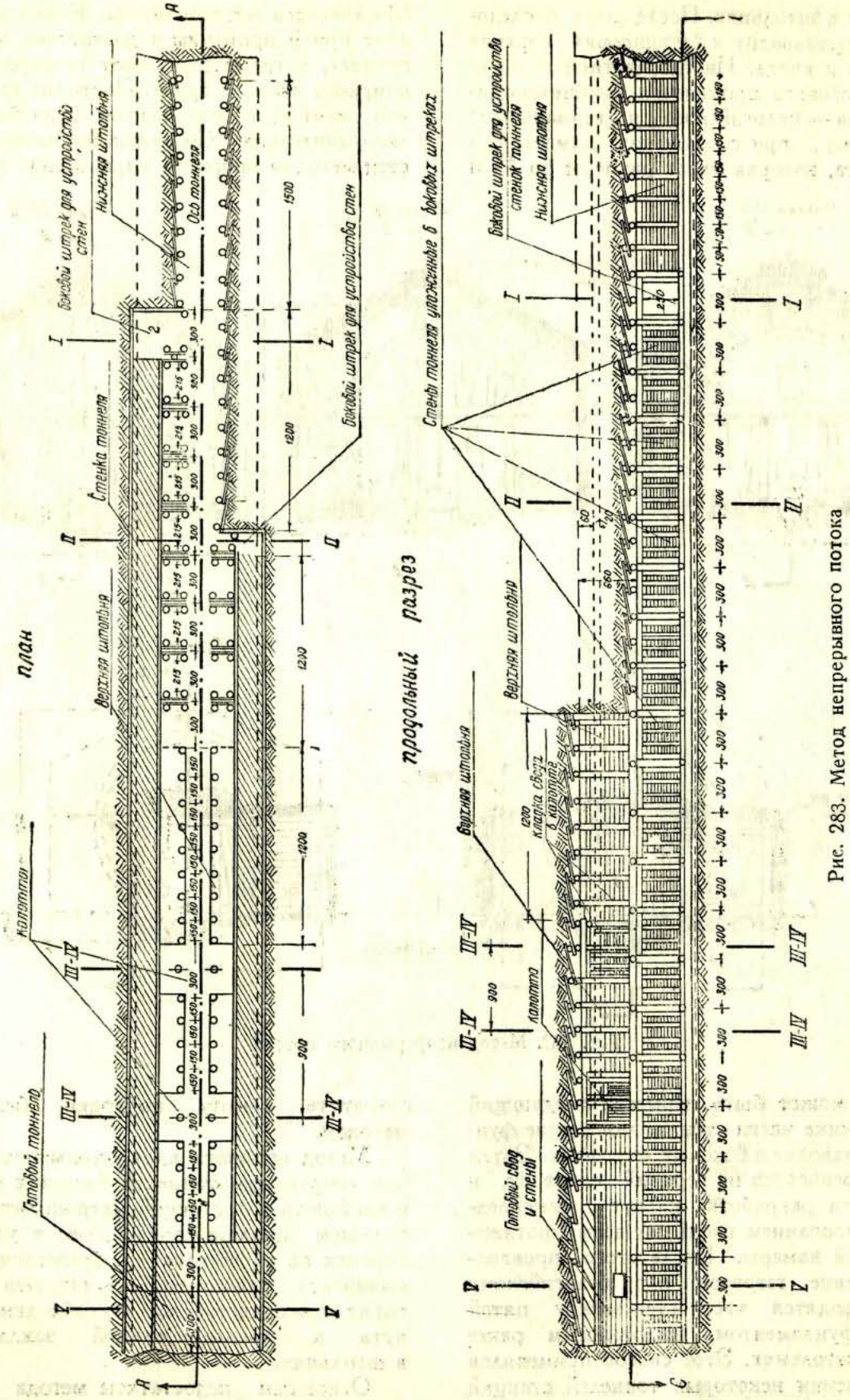


Рис. 283. Метод непрерывного потока

ядра считается то обстоятельство, что в процессе разработки штолен в нижних горизонтах нарушаются вышележащие грунты, чем затрудняются работы по раскрытию и раскреплению верхней части профиля тоннеля.

Отдельные фазы тоннельных работ, производимых по методу опорного ядра, тесно связаны между собой в своей последовательности. Для перехода к следующей стадии требуется полностью закончить работы предыдущей стадии. Это обстоятельство, вносящее значительное неудобство при развертывании фронта работ, может быть в некоторых случаях устранено применением видоизмененного германского метода, так называемого *метода непрерывного потока* (рис. 282, 283). При осуществлении последнего метода в первую очередь нижняя средняя часть сечения прорезается направляющим ходом, одновременно являющимся и транспортным. Пройдя центральную нижнюю штольню на расстояние около 30—40 *м*, начинают делать поперечные «заходки» по обе стороны оси тоннеля, из которых возводятся отрезки стен тоннельной обделки (рис. 284). Параллельно с производством заходок и бетонировкой стен сзади на участке, где стены уже забетонированы, проходится верхняя направляющая штольня, и из последней раскрываются калотты и возводятся своды с опиранием на стены, заложенные из заходок. Так как в процессе проходки в нижней части профиля грунт верхней части уже значительно нарушается, необходимо элементы крепления тоннельных ферм калотты базировать на специальных швеллерах, опирающихся непосредственно на готовую кладку стен.

При этом методе непрерывно по заранее составленному графику продвигается забой нижней направляющей штольни, ведутся заходки под стены, производится бетонировка стен, продвигается забой верхней штольни, раскрывается калотта и ведется кладка свода.

Применением метода непрерывного потока на участке значительного протяжения обеспечивается последовательное развитие всех фаз тоннельных работ, без вскрытия значительных поверхностей выработок. Пример графика производства работ дан на рис. 285.

ИТАЛЬЯНСКИЙ МЕТОД ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

Сущность итальянского метода работ заключается в том, что при сооружении тоннеля в исключительно слабых грунтах предварительно создается искусственное опорное ядро. В первую очередь проходится центральная штольня, обычно располагаемая несколько ниже центра поперечного сечения. При наличии исключительно слабых грунтов



Рис. 284. Кладка стены тоннеля при боковой заходке

крепление этой штольни делается из металлических рам, которые, в зависимости от горного давления, могут быть заложены сплошь и, кроме того, усилены металлическими унтерцугами или шпренгелями. Иногда штольня может быть взята на каменное или бетонное крепление. При сооружении тоннеля в слабых грунтах может оказаться, что давление, передаваемое через подошву фундамента стен, несмотря на заданную значительную ширину подошвы, является для данного грунта чрезмерным. В этом случае необходимо с самого начала ввести в работу обратный свод. При этом достигается уменьшение давления на грунт до пределов допускаемого. Для этого из пройденной штольни в обе стороны, при

весьма тщательном и усиленном креплении, делаются небольшие засечки, после чего постепенно производится заходка под штольневые рамы, которые снизу соответственно подкрепляются. Разработка ведется небольшими участками, после чего приступают к кладке нижней части обделки, закладывая при этом

выводится небольших размеров временный свод, внешние очертания которого соответствуют внутреннему очертанию, например, двухпутного профиля железнодорожного тоннеля. Опираясь на этот временный свод, как на опорное ядро, как на кружала, выкладывается несущий свод сооружаемой тоннельной

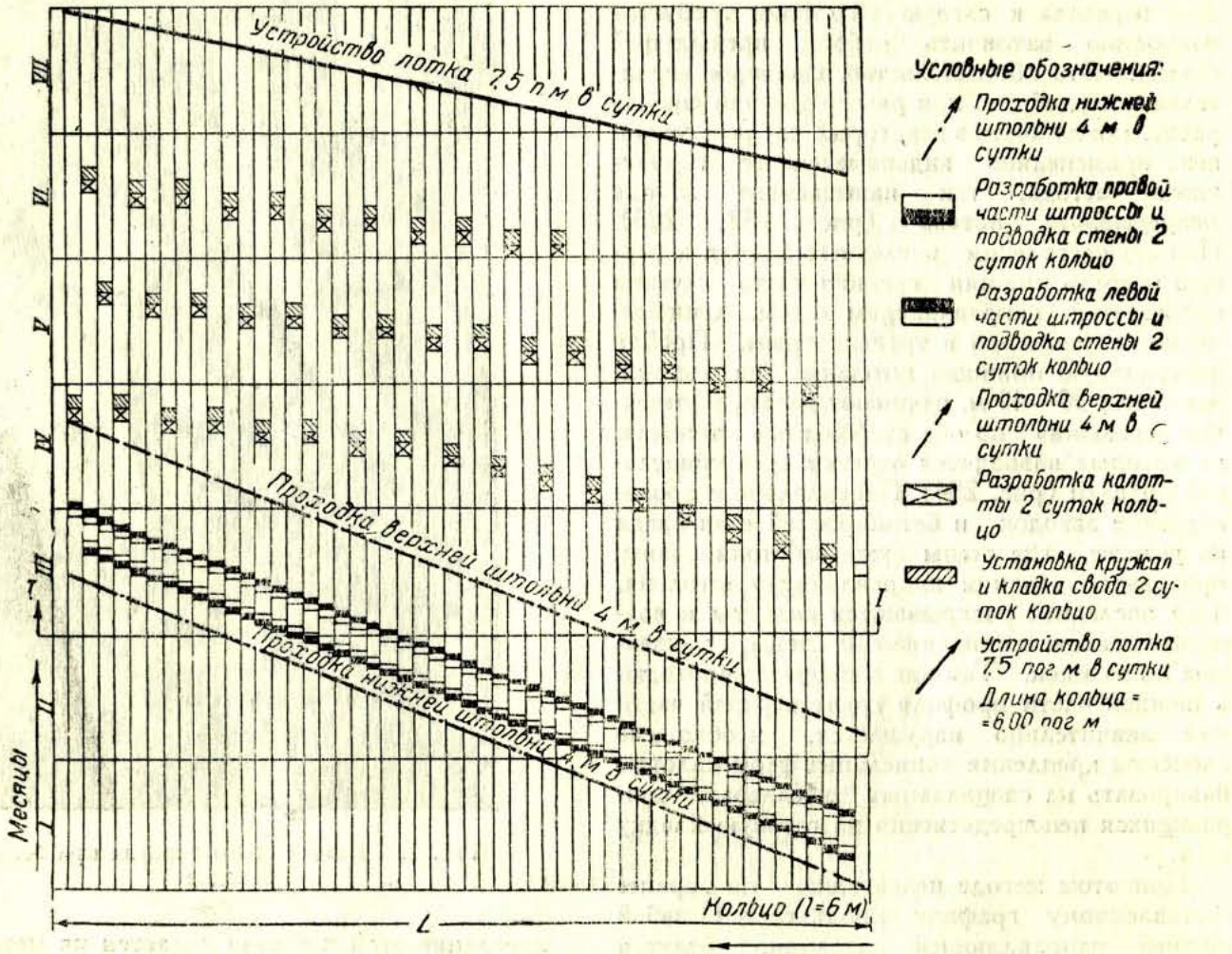


Рис. 285. График производства работ при методе непрерывного потока

тщательно все пустоты, а также внутреннее сечение тоннеля. Таким образом вынутый объем грунта полностью заменяется во избежание подвижек кладкой. К моменту начала разработки верхней части профиля уже имеется, таким образом, надежное основание, на котором должно базироваться последовательно устанавливаемое временное крепление. Дальнейшее раскрытие профиля производится небольшой калоттой, крепление которой опирается непосредственно на рамы основной штольни. В калоттном сечении предварительно

обделки. Если размеры тоннеля значительны, то подобное раскрытие объемлющего свода может быть произведено повторно (рис. 286).

Последним этапом является удаление внутреннего ядра и временной кладки пневматическими инструментами или путем взрывных работ. Для более легкого отделения временного внутреннего свода от постоянного внешнего между ними иногда прокладывается соответствующая мягкая изоляция.

В городских условиях итальянский метод является чрезвычайно опасным и связан

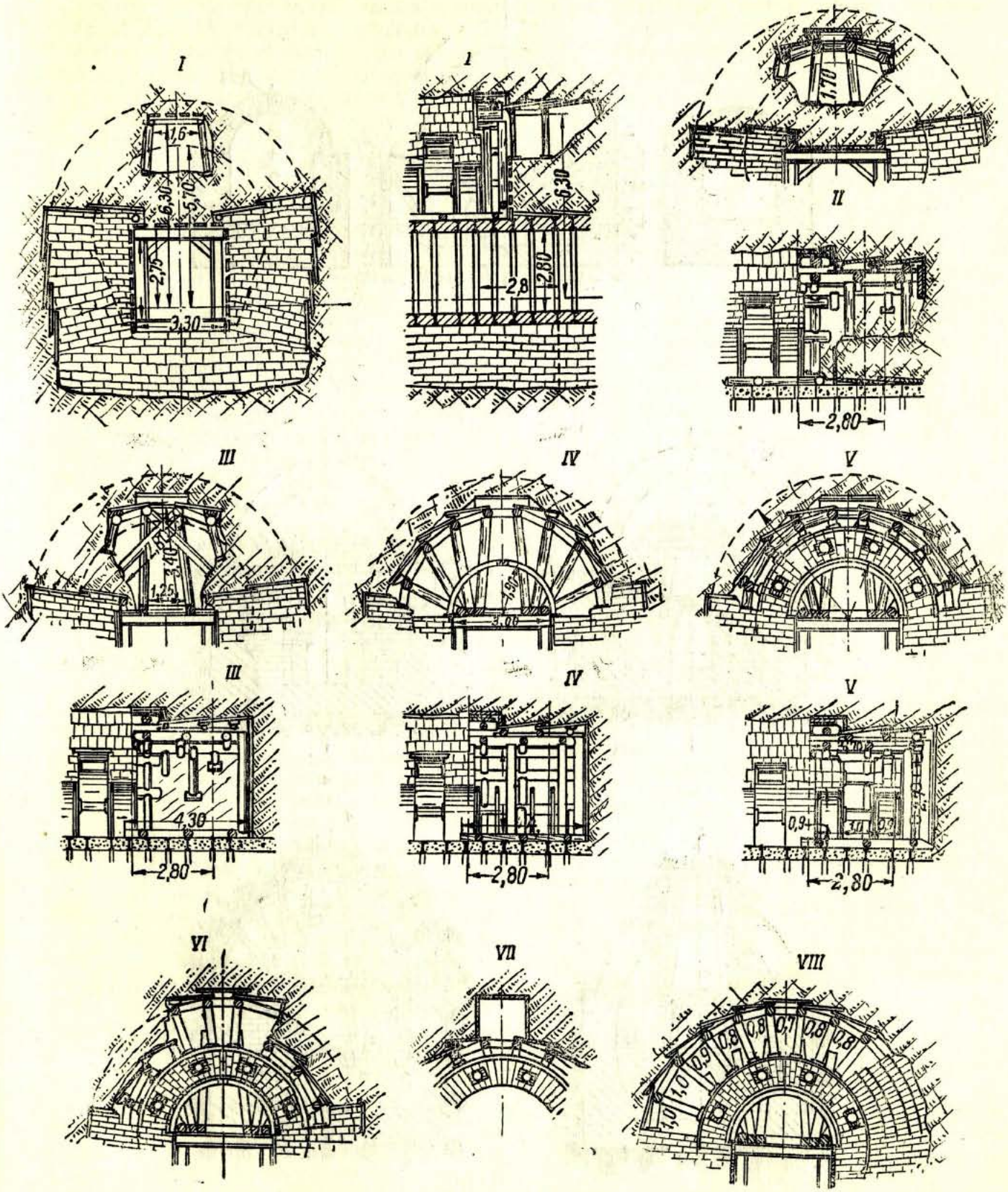
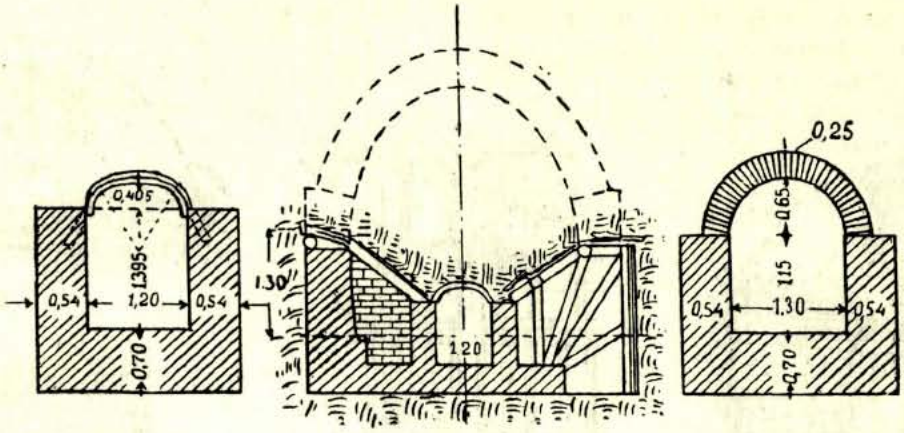
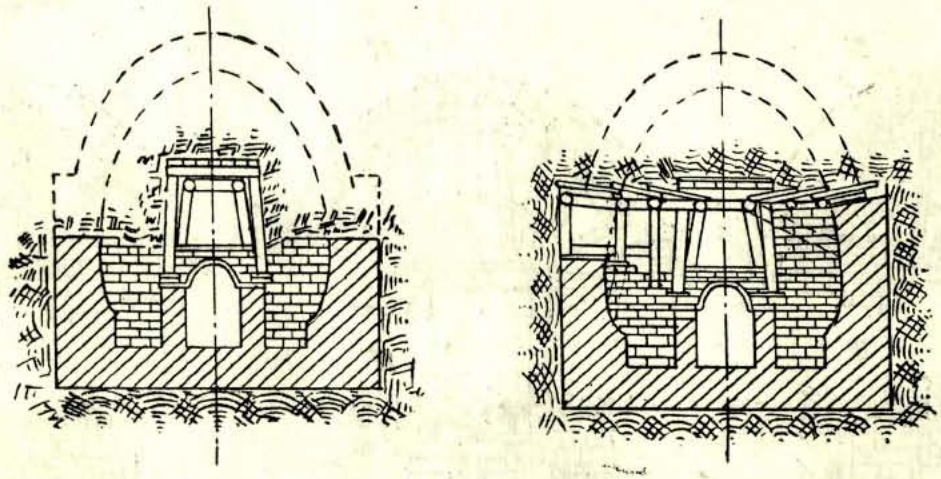


Рис. 286. Фазы разработок по итальянскому методу работ





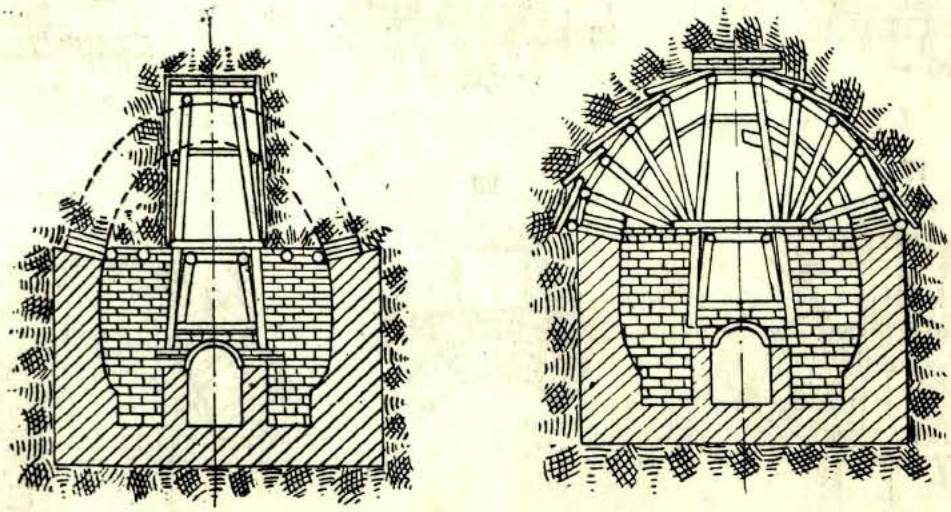


Рис. 287. Фазы разработок по итальянскому методу работ

с неизбежными осадками при многократном перекреплении. В процессе раскрытия тоннельного профиля возможны выплывы и выпуски грунта. Поэтому итальянский метод в городских условиях можно допустить лишь с применением сжатого воздуха, при котором вода отжимается с поверхности выработок. В этом случае сжатый воздух до некоторой степени разгружает горное давление и помогает работе временного крепления. Вопрос балансирования гидростатического давления воздушным во избежание прорывов требует специального подхода. Применяя сжатый воздух в горизонтальной выработке, необходимо установить шлюзовые аппараты в шахте, в околоствольных выработках или в готовом тоннеле. Должно быть обеспечено шлюзование породы, материалов и людей.

При незначительной кубатуре вынимаемого грунта, например при проходке тоннелей небольшого сечения, достаточно установить обычные шлюзы в стволе шахты. При большой кубатуре выработки, когда проходятся тоннели значительного профиля, необходимо устраивать специальные шлюзовые камеры, которые располагаются в подходном тоннеле, а если возможно, то и на готовом участке трассы тоннеля.

Итальянский метод является весьма тяжелым приемом. Теснота работ и разработка малыми частями вызывают большие трудности и приводят к высокой стоимости работ. Этим методом надлежит пользоваться лишь в тех случаях, когда другие приемы временного деревянного крепления являются на данном участке совершенно невозможными, а равно когда для проходки небольшого участка плывуна невыгодно вести таковую специальным методом щита (рис. 287).

С большими трудностями велась проходка южного участка Симплонского тоннеля через зону слабых пород с сильным горным давлением. На расстоянии 4,42 *км* от южного портала была встречена зона значительного давления, которая чрезвычайно осложняла условия прокладки как направляющей штольни, так и расширения на полный профиль.

Вначале проходка велась нормальным порядком, так как в плотном теле в процессе разработки порода не вызывала никаких осложнений. Через короткий период времени, когда начала скапливаться вода, эта сланцевидная порода, обращаясь в тестообразную массу, начинала усиленно деформировать временное деревянное крепление.

Чтобы иметь возможность в дальнейшем продолжать тоннельные работы, оказалось необходимым отказаться от деревянного крепления и перейти на более мощное металлическое. На одном участке длиной 40 *м* пришлось ставить рамы на взаимном расстоянии 80 *см*, а промежутки между ними заполнять бетоном. Всякое облегчение указанной конструкции приводило к деформации. На тех участках, где металлические рамы были подкреплены еще специальными дубовыми креплениями, происходили значительные деформации. Только применением бетона в промежутках между металлическими рамами удалось преодолеть имевшееся горное давление. Металлические рамы имели размеры в свету $2{,}5 \times 2{,}8$ *м* и были схвачены рядом металлических кронштейнов в углах и системой рошпанов.

В условиях сильного горного давления продвижение забоя штольни велось весьма медленно. В течение месяца было пройдено подобным способом лишь 2 *пог. м* штольни. В дальнейшем за три месяца было пройдено всего лишь 15 *м* штольни. Около шести месяцев потребовалось на проходку галлереи в зоне сильного давления.

Для устройства тоннельной обделки здесь был применен итальянский метод производства работ, а именно: предварительное устройство малыми частями обратного свода тоннельной обделки. Работы осложнялись тем, что через временное крепление в значительной степени просачивались грязь, вода, жидкий грунт. Чтобы облегчить работы по временному креплению, в процессе устройства элементов несущей обделки закладывалась временная каменная кладка, заполнявшая пространство выработок между уложенной каменной кладкой и породой.

Особенно сложно устройство свода тоннельной обделки. Для этого прокладывалась верхняя направляющая штольня, которая расширялась с расчетом устроить временный каменный свод, уложенный на металлических рамах направляющей штольни. Этим же облегчалось устройство несущего свода обделки, так как имелось достаточное опорное ядро для раскрытия калоттной части профиля и устройства свода.

Последним этапом явилась выемка опорного ядра в виде временной каменной кладки и металлических рам центральной штольни.

Надо отметить, что каменный свод толщиной 1,6 *м* был выложен в четыре переката.

Работы по устройству на указанном протяжении тоннеля в слабых грунтах продолжались около 2 лет.

нение мощных металлических рам штольневых выработок в зонах неустойчивых пород при сильном горном давлении оказалось целесообразным. Однако практика сооружения ряда тоннелей в неустойчивых породах указывает,

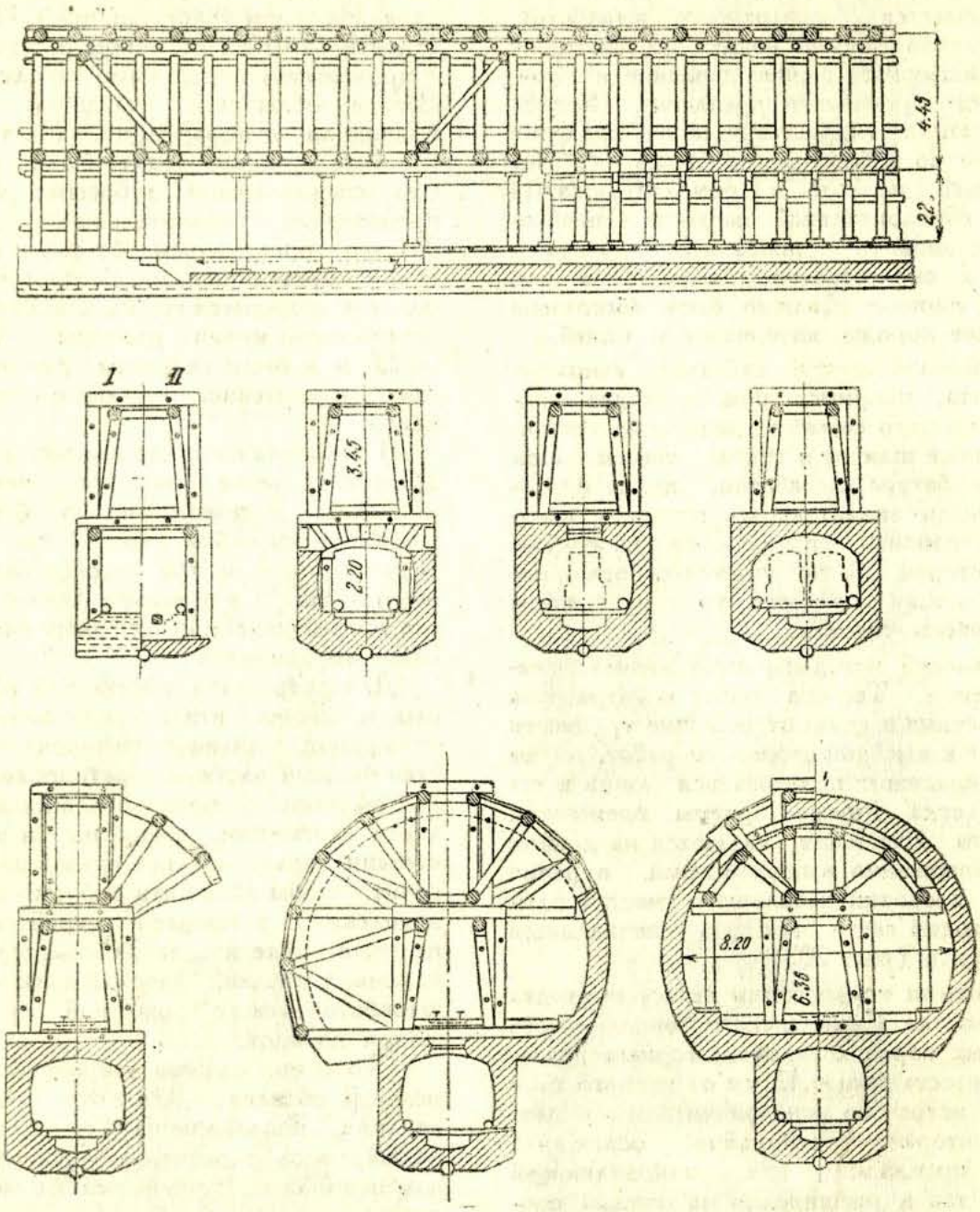


Рис. 288. Фазы разработок по итальянскому методу работ

При проходке участка неустойчивых пород тоннеля Пасси с сильным горным давлением от пикета 4 + 45 работы также велись специальной итальянской системой (рис. 288).

Опыт сооружения Симплонского тоннеля и тоннеля Коль-де-Тенд выявил, что примечто целесообразность применения жестких металлических рам для преодоления сильного горного давления является все же спорной. Применением упругих, податливых деревянных креплений, которые можно в значительной степени усилить, иногда удается с боль-

шим успехом преодолеть проявляющееся горное давление. При этом наличие деревянного крепления облегчает перекрепление и удаление деформированных крепей. В то же время при деформации жесткой металлической крепи ее удаление и усиление представляет большие затруднения в условиях подземных работ и нарастающего горного давления. Отсюда вывод: применение металлических рам должно быть допущено лишь в тех случаях, когда они по своей мощности могут полностью обеспечить пройденную выработку от деформаций в условиях усиленного горного давления.

АМЕРИКАНСКИЕ МЕТОДЫ ПРОИЗВОДСТВА ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

Американские методы производства тоннельных работ разделяются на: а) метод иглы, б) метод летучей арки, в) метод опорной арки, г) пилот-систему и д) метод центральной галлереи.

а) *Метод иглы* в американской практике при сооружении тоннелей используется с большим успехом. При этом методе стойки штендера заменяются металлическими колонковыми домкратами, которые могут воспринять давление до 15—20 т (рис. 289). Временным креплением выработки являются металлические тюбинги облегченного типа. Последние сбал-

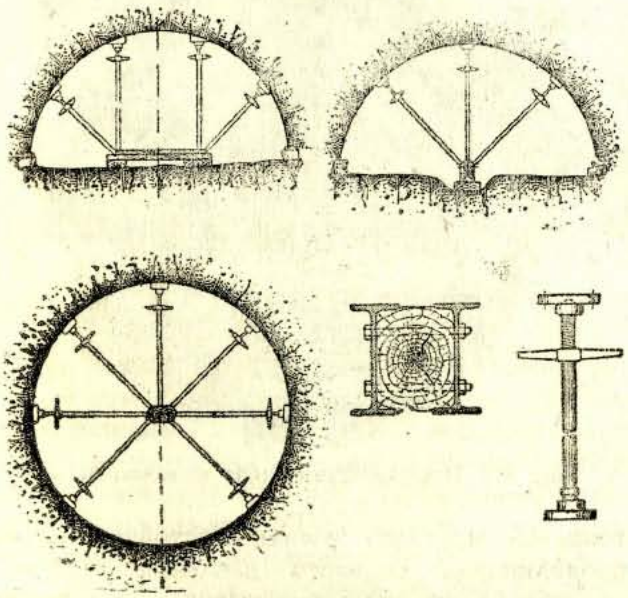


Рис. 289. Производство работ методом иглы

чиваются между собой, образуя сплошное крепление выработки. Вся облицовка рассчитана как временная, могущая воспринять давление породы в течение 24 часов, после чего должно быть устроено постоянное, бетонное крепление тоннеля. Благодаря этому тюбинги при методе иглы делаются очень легкими и не рассчитываются как постоянная

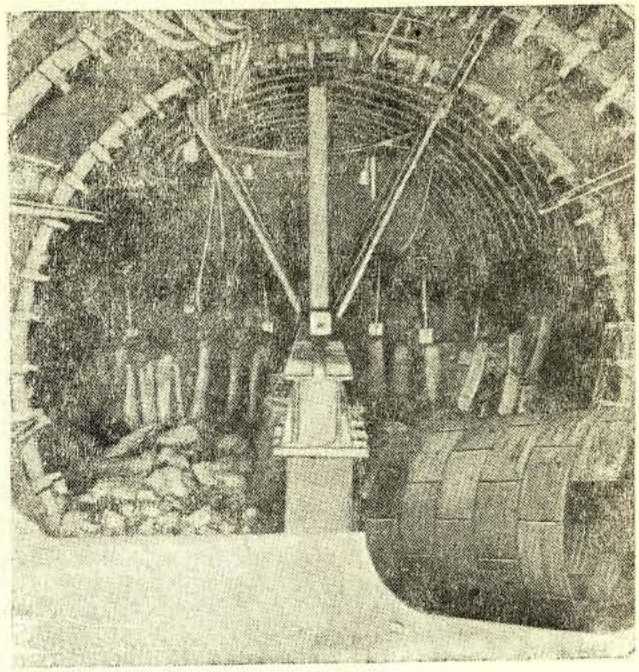
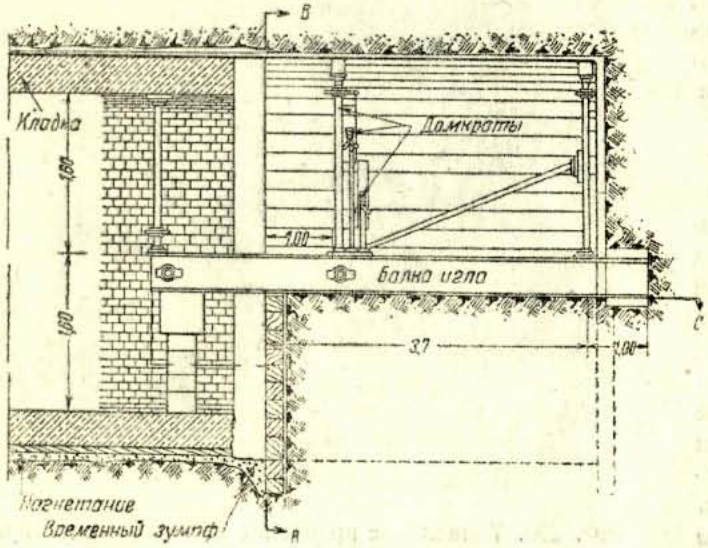


Рис. 290. Тоннельное крепление колонковых домкратов в балку-иглу

тоннельная обделка. Они имеют лишь назначение заменить марчеваны и предохранить выработку на время производства работ от местных вывалов (рис. 290).

Последовательность производства тоннельных работ методом иглы для тоннелей круглого сечения следующая. В верхней части профиля тоннеля производится выемка грунта на величину около 70 *см* с таким расчетом, чтобы по контуру тоннеля можно было установить один верхний тюбинг, который подпирался бы колонковым домкратом. Вслед за первым тюбингом по мере разработки породы к нему прибалчивается второй и т. д. Каждый тюбинг поддерживается отдельным домкратом. Таким образом разрабатывается верхняя половина калоттного профиля. После этого между домкратами в центре сечения тоннеля заводится особая балка, называемая *иглой*. Последняя вводится в небольшую траншею со лба атакуемого забоя (рис. 291). В Америке игла делается из двух $\overline{I}$ № 50 с закладкой между ними древесного бруса. Вся конструкция балки-иглы стягивается болтами. На иглу, которая представляет собой опорное ядро всей системы крепления, перекрепляются путем последовательной замены все домкраты,

поддерживающие тюбинги. Когда перекрепление на балку-иглу закончено, начинается симметричная разработка боковых частей профиля, куда последовательно закладываются тюбинги, распираемые домкратами в балку-иглу. Путем постепенной разработки книзу тоннель вскрывается на полный профиль; по окончании разработки снизу вверх возводится



постоянная бетонная обделка тоннеля. В процессе возведения последней домкраты постепенно вынимаются с перекреплением на внутреннюю поверхность обделки. Тюбинги остаются в бетоне. При незначительном горном давлении тюбинги можно заменить деревянными затяжками, которые поддерживаются через общие филаты домкратами, опирающимися в балку-иглу. Разработка тоннеля методом иглы ведется наступающим забоем. Земляные и бетонные работы производятся непрерывно. Так, например, в одном передовом кольце ведется разработка грунта, а в следующем идет бетонировка и т. д.

Средняя скорость проходки методом иглы составляет в американской практике до 1,5—2,0 *м* в сутки готового тоннеля.

При подобной проходке избегают громоздкого деревянного крепления, заменяя его металлическими крепями стандартного типа, и тем самым облегчают производство тоннельных работ (рис. 292).

Однако следует учесть, что применение этого метода дает особый эффект лишь при раскрытии тоннелей небольших профилей, до 4—5 *м*, в грунтах, где величина горного давления в течение трех суток не может усиленно нарасти. В каждом отдельном случае необходимо провести расчет системы крепления иглы как для момента раскрытия полного профиля, так и по отдельным ответственным фазам периода перекрепления.

б) *При методе летучей арки*, применяемом преимущественно для сооружения

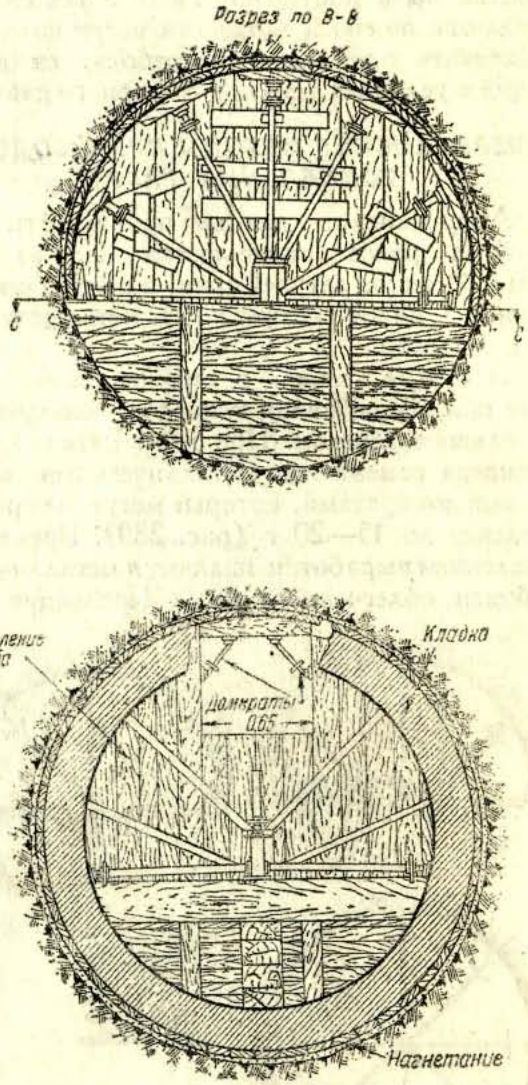


Рис. 291. Производство работ методом иглы

тоннелей круглого сечения в устойчивых, не проявляющих сильного давления породах, разработка профиля начинается с раскрытия верхней половины его. Крепление состоит из легких металлических тюбингов или деревянных затяжек, поддерживаемых колонковыми домкратами. Сооружение тоннеля лобовой проходкой ведется в два приема при устройстве сначала верхнего полукольца, а затем

нижнего полукольца тоннеля при длине кольца около 4 *м* с последовательным возведением временной обделки из тюбингов (поддерживаемых колонковыми домкратами) и бетонировкой свода обделки, опирающегося, как и при бельгийском методе пооизводства работ, непосредственно на грунт (рис. 293). Вслед

ность ведения работ по подводке нижней части тоннельной обделки. Бетонные работы при методе летучей арки выполняются с помощью подвижной металлической опалубки. Работы производятся в одном забое, что дает возможность, концентрируя материалы, рабочую силу и технический надзор, сосредо-

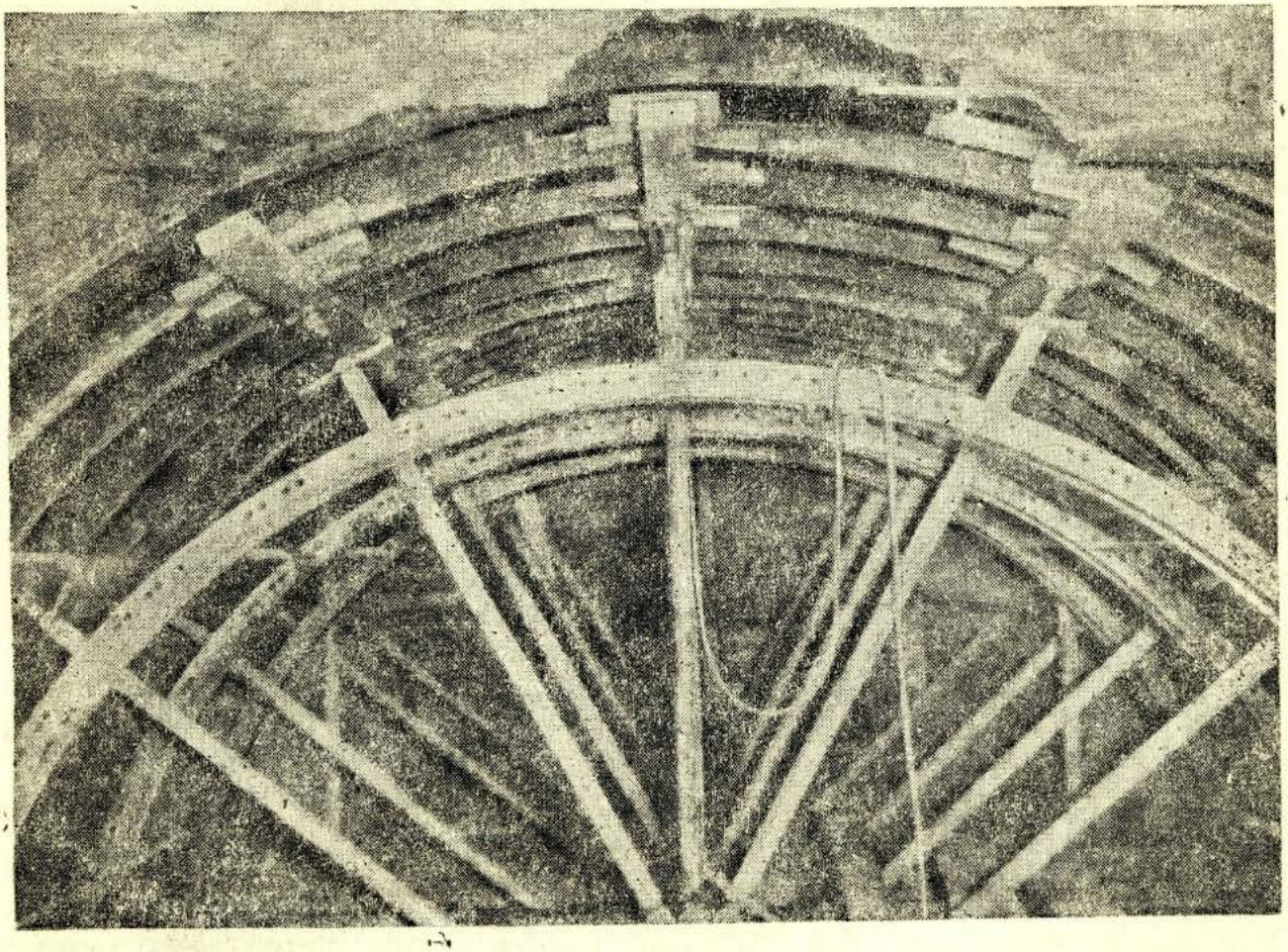


Рис. 292. Поддержание тюбингов колонковыми домкратами при методе иглы

ведут разработку по всему штроссному профилю ниже горизонтального диаметра и бетонировку нижнего полукольца обделки. Подводка нижнего полукольца обделки ведется непосредственно под шов, образуемый верхними полукольцами. При этих условиях ближайшее к забою полукольцо на половину своей длины опирается на грунт. Соседнее полукольцо опирается на половину своей длины на ранее подведенное бетонное полукольцо. Подобная подводка под швы в полукольцах предохраняет их от возможных осадок: при этом обеспечивается их совместная работа. Такое расположение швов обусловливает безопас-

точить внимание в одном забойном пункте чем достигается высококачественная работа.

Откаточные пути при методе летучей арки укладываются по двум горизонтам. Верхний горизонт ведется по подвесным тирантам, нижний горизонт — непосредственно по лотку готового тоннеля.

На участке линии Московского метрополитена метод летучей арки применялся видоизмененным. Сначала проходилась на колонковых домкратах штольня на длину около 4 *м*. Затем раскрывалась калотта полукольцом в 2 *м*, причем крепление производилось винтовыми домкратами, поддержи-

вавшими через бруски ряд затяжек по кровле. Вслед производилась бетонировка свода. При этом кружала устраивались из выгнутых в полуциркульное очертание швеллеров, поддерживаемых домкратами. В дальнейшем выбиралось нижнее полукольцо, причем бетонирование обделки велось на передвижных двухметровых кружалах, состоявших из двух металлических уголков, согнутых в полукольцо. Кружала были снабжены металлическими связями с натяжными муфтами посредине для последующего отрыва опалубки от бетона. Перемещение опалубки производилось на роликах в спаренных швеллерах по оси тоннеля, которые поддерживались тирантами. Сначала проходилась штольня, из которой велось раскрытие верхней половины профиля калотты. Первоначально штольня опережала калотту на 2 *м*. Тюбинги временного крепления были заменены затяжками, штендера — колонковыми домкратами из труб. Кружала для бетонировки свода применялись металлические из швеллеров, которые устанавливались на колонковых домкратах. Нижняя половина профиля раскрывалась полностью, с бетонировкой нижнего полукольца по металлическим кружалам с деревянной опалубкой. Однако метод, применяемый в США, не дал возможности обеспечить темпы работ, диктовавшиеся по графику. Поэтому метод пришлось видоизменить. Для развертывания фронта начали проходить верхнюю и нижнюю штольни, — в результате работы по методу летучей арки велись одновременно в нескольких забоях. Штольня на домкратах проходилась вперед на 20—30 *м*,

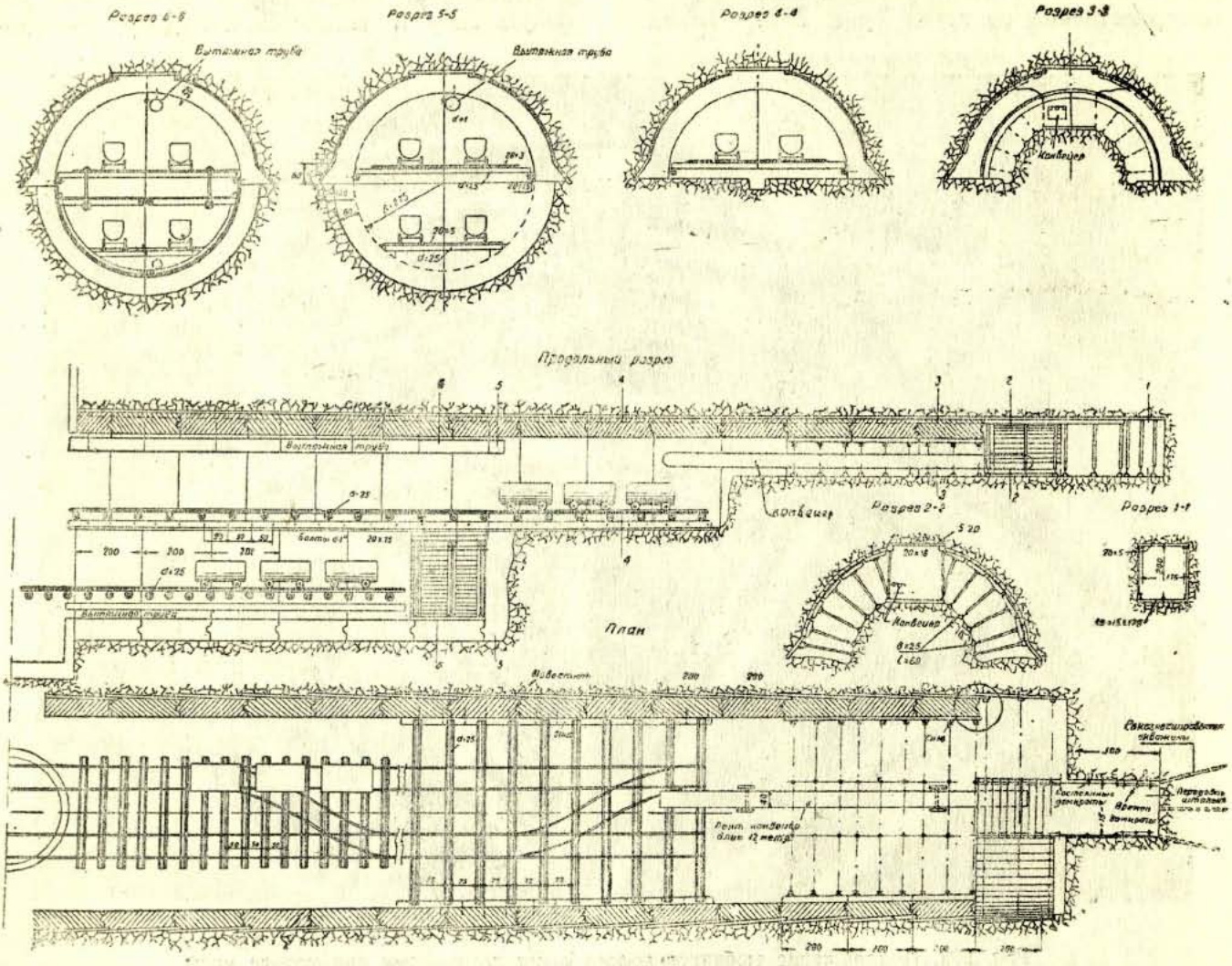


Рис. 293. Производство работ методом летучей арки

чтобы иметь возможность раскрыть одновременно две-три калотты в целях ускорения проходки тоннеля.

в) В американской тоннельной практике получил распространение *метод опорной арки*. Отличительная особенность этого метода по сравнению с балкой-иглой и летучей аркой заключается в том, что закрепленный временным металлическим креплением профиль остается совершенно свободным от колонковых домкратов. Последние являются помехой для механизации тоннельных работ. (рис. 295).

При методе опорной арки проводится разработка профиля с немедленным временным закреплением металлической аркой из согнутого двутавра по радиусу кривизны, соответствующей очертанию свода тоннельной обделки. Эта металлическая арка с помощью деревянных подкладок и клиньев опирается непосредственно на породу. По мере разработки лба калоттного забоя к опорной арке прибалчиваются легкого типа металлические тюбинги и устанавливается следующая опорная арка. Ведется разработка лба калоттного забоя, установка и прибалчивание к арке следующего ряда тюбингов и т. д. (рис. 294).

Несущей конструкцией этого временного крепления является опорная арка, которая рассчитывается на давление породы по длине тоннеля, в соответствии с расстоянием между арками. Это расстояние устанавливается в каждом отдельном случае в зависимости от ожидаемого горного давления и фиксируется шириной тюбингов облегченного типа размерами от 30 до 75 *см* (рис. 295).

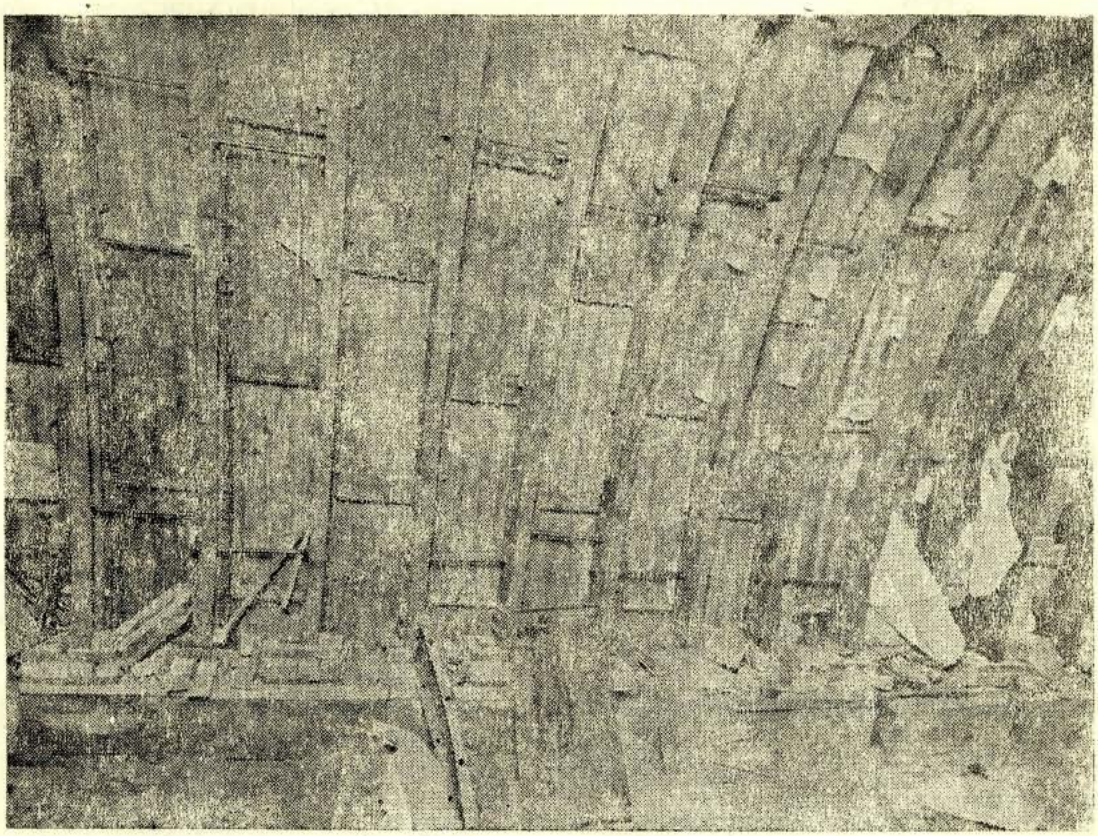


Рис. 294. Элементы крепления при методе опорной арки

После проходки участка в 30—40 *м* производится установка кружал и бетонирование свода, опирающегося непосредственно на породу. Вследствие наличия свободного калоттного профиля можно применить подвижные металлические кружала. Работы по выемке штроссы и устройству нижней части обделки производятся в дальнейшем по методу, аналогичному летучей арке.

Метод опорной арки дает значительный технико-производственный эффект при наличии комбинированных пород, когда, например,

в кровле имеются мягкие грунты, а в подошве калотты крепкие породы, могущие воспринять на себя давление от пят свода. Крепление кровли может осуществляться применением системы металлических выдвижных марчеван. При отсутствии тюбингов легкого типа этот

До начала работ по пилот-системе необходимо обеспечить устойчивость проходимых пород. Если последние являются слабыми, то следует предварительно провести искусственное закрепление их тем или иным специальным приемом (например, силикатиза-

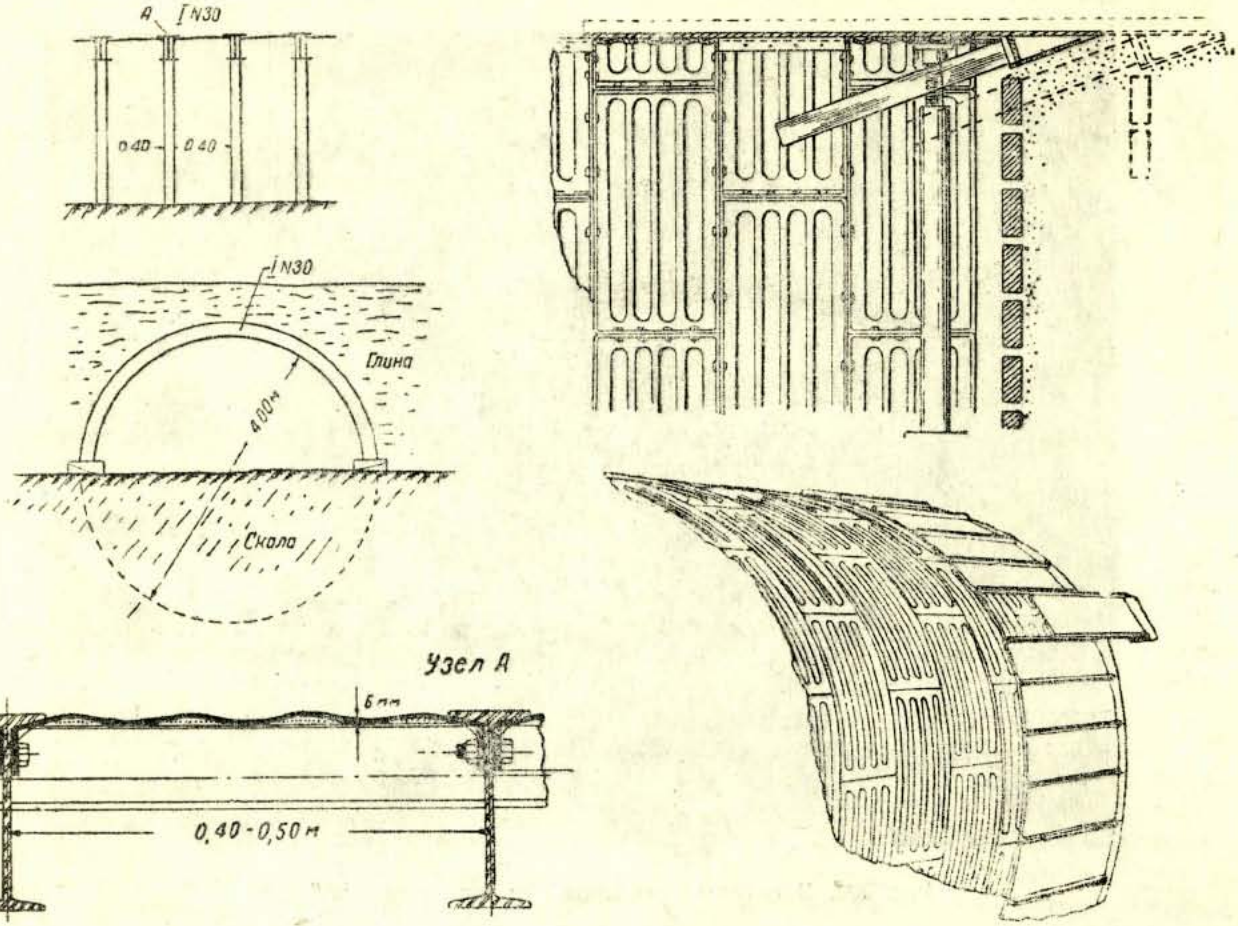


Рис. 295. Метод опорной арки

метод можно применить при деревянных затяжках по кровле калоттной выработки. Метод опорной арки был успешно использован при постройке ряда тоннелей диаметром в 5 и 6 *м* в Чикаго, в условиях комбинированных грунтов (ниже горизонтального диаметра скальные, а выше глинистые грунты).

г) *Пилот-система.* При сооружении тоннелей значительного диаметра в городских условиях часто во избежание осадок не представляется возможным производить раскрытие сразу на полный профиль, даже если крепление тоннеля принято из металлических тюбингов. При пилот-системе вопрос раскрытия профиля решается в последовательном порядке.

ацией, тампонажем). Весьма целесообразно сочетать проходку пилот-системы при сжатом воздухе. Когда проведены технические мероприятия, обеспечивающие устойчивость разрабатываемого горного массива, приступают к проходке направляющего хода — первого пилот-тоннеля, который располагается симметрично по отношению к вертикальному диаметру тоннеля и крепится металлическими тюбингами (рис. 296). Первый направляющий ход пилот-тоннеля имеет диаметр около 2,5—3 *м*. В процессе проходки его возможно проведение рекогносцировочного бурения и дополнительное изучение условий проходки. Проверяется эффективность искусственного закрепления грунта по периметру проектного

профиля тоннеля. Сам пилот-тоннель имеет, кроме того, специальное назначение опорного ядра, вокруг которого производится раскрытие большого профиля с опиранием временного крепления непосредственно на внешнюю обделку пилот-тоннеля. Не всегда, однако, на базе первого пилот-тоннеля удается раскрыть выработку полностью по проектному сечению. При больших профилях пролетом около 8—10 *м* оказывается необходимым ввести промежуточный пилот-тоннель второго порядка, вокруг которого уже можно без особых затруднений произвести раскрытие на полный проектный профиль.

Метод пилот-тоннеля имеет много общего с методом иглы. Здесь также применяются домкраты, которые, опираясь в пилот-тоннель, поддерживают тюбинги второго тоннеля в процессе их монтажа. Но при пилот-системе имеется полый направляющий ход, по которому можно производить откатку и точно фиксировать заданное направление тоннеля. Раскрытие второго диаметра производится с торца первого пилот-тоннеля, тюбинги которого при этом постепенно снимаются по мере возведения крепления большого тоннеля. Иногда для форсирования работ можно производить раскрытие большого тоннеля из нескольких точек первого пилот-тоннеля. Для этого требуются исключительно тщательные геодезическо-маркшейдерские работы, обеспечивающие точное примыкание тюбинговых колец, начатых в разных местах. При несовпадении колец в местах взаимного их соприкасания прибегают к установке специальных колец.

Пилот-система была впервые применена при сооружении подводного тоннеля под р. Гудсон в Нью-Йорке. Эта же система с успехом оправдала себя при постройке Бруклинского тоннельного коллектора диаметром до 5 *м* в условиях мелкозернистого песка и рыхлого сухого гравия. В условиях сооружения коллектора из кирпичной кладки пройденный пилот-тоннель из чугунных тюбингов является надежной опорой при раскрытии профиля тоннеля и базой для кружал в период возведения каменной кладки тоннеля.

Пилот-тоннель был пройден диаметром 1,8 *м*. После продвижения его вперед на 10 *м* сзади уже непосредственно производилось раскрытие на полный профиль. В условиях слабых грунтов работа производилась с особой осторожностью, причем порода вынималась исключительно на ширину одного сегмента пилот-тюба.

Пилот-система особенно эффективно применяется в Лондоне при реконструкции станций метрополитена для прокладки наклонных ходов эскалаторов.

Пилот-тоннели проходятся как концентрически по отношению к окончательному сечению тоннеля, так и при эксцентрическом расположении пилот-тоннеля.

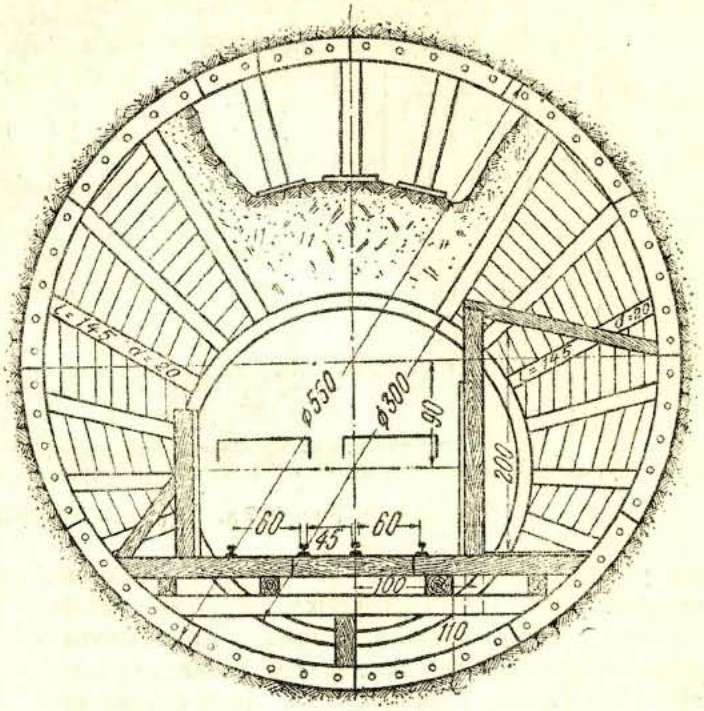


Рис. 296. Пилот-система

Кроме указанной системы, в тоннельной практике применяется разработка круглого профиля методом дробных сечений пилот-тоннелей. В этом случае внутри контура прокладываемого тоннеля проходится целая группа пилот-тоннелей диаметром около 2 *м*. Базируясь на них, создают окончательную обделку большого сечения.

д) *Метод центральной галлереи.* Сущность этого метода, получившего широкое распространение в Америке при сооружении железнодорожных и гидротехнических тоннелей в условиях скальных пород с высоким коэфициентом крепости, заключается в следующем. По центру разрабатываемого профиля тоннеля ведется проходка центральной галлереи, размерами 2,50 × 3,00 *м*, из которой при помощи одного или двух колонковых перфораторов бурятся радиальные скважины по всему контуру плоскости нормальной оси тоннеля. В зависимости от размеров послед-

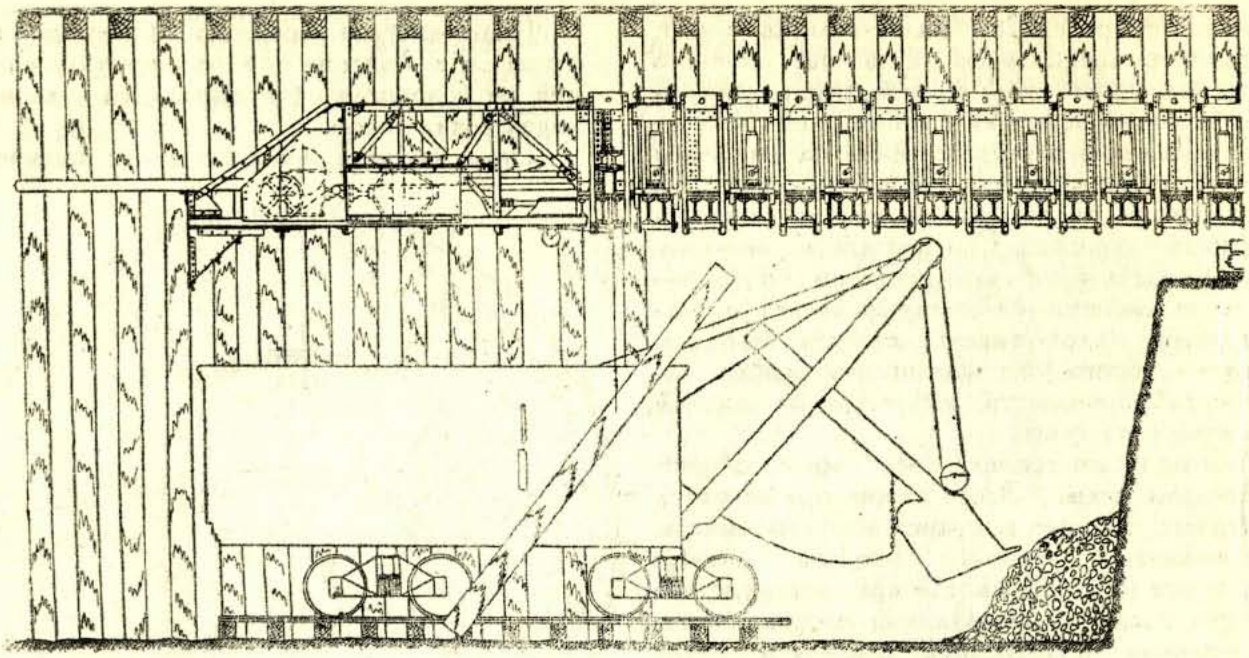


Рис. 297 а. Тоннель Моффат (проходка и крепление)

него задается от 20 до 35 шпуров на одно сечение. Вначале взрывается верхняя, затем нижняя часть профиля тоннеля. Транспортирование породы и материалов, дренаж и вентиляция при производстве работ осуществляются по боковой пионер-штольне, пробитой параллельно в расстоянии 10—15 *м* от оси тоннеля и соединенной рядом поперечных сбоек с центральной галлереей через 200—400 *м*. Такая система позволяет открыть одновременно большое число забоев и широкий фронт работ, обеспечивая при механизации погрузки и транспортировании породы высокие темпы проходки. Для предохранения от вывалов устанавливается временное деревянное крепление полигонального типа. Вслед ведется устройство постоянной монолитной бетонной обделки применением металлической подвижной опалубки и бетоноукладчика.

Метод центральной галлереи был успешно применен при сооружении тоннелей: Каскад, Моффат (рис. 297), Сан-Джасинто (Америка), Коннаут (Канада) и Роджер (Колумбия).

В американской практике при проходке тоннелей в крепких скальных породах широко применяется *уступчатая система разработки*. В зависимости от размеров тоннеля поперечное сечение подразделяется на один или несколько уступов, причем разработка может вестись как с образованием нижних, так и верхних уступов. Преимущество этой системы заключается в эффективности производства взрывных работ, в связи с получением в процессе уступчатой разработки двух плоскостей обнажения.

Примеры из американской тоннельной практики. Большой успех достигается при проведении тоннельных работ *по американской полигональной рамной системе*, сущность которой заключается в том, что крепление

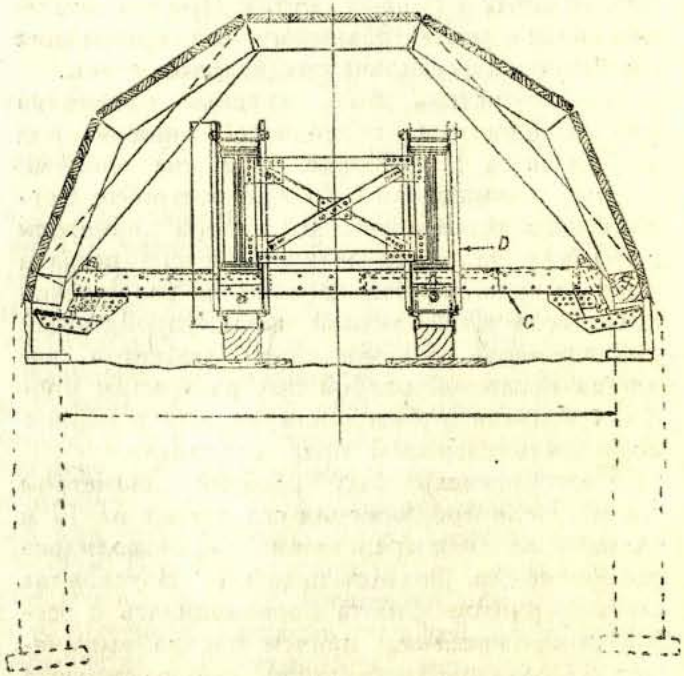


Рис. 297 б. Поперечное сечение тоннеля

ведется по контуру сечения не затрагивая центрального ядра (рис. 297). Последнее удаляется затем под защитой специально установленной рамной крепи (рис. 298). В условиях сыпучего, сухого гравия успешно был сооружен тоннель канадской Тихоокеанской железной дороги.

Сущность американского метода проходки заключалась в следующем: по подошве

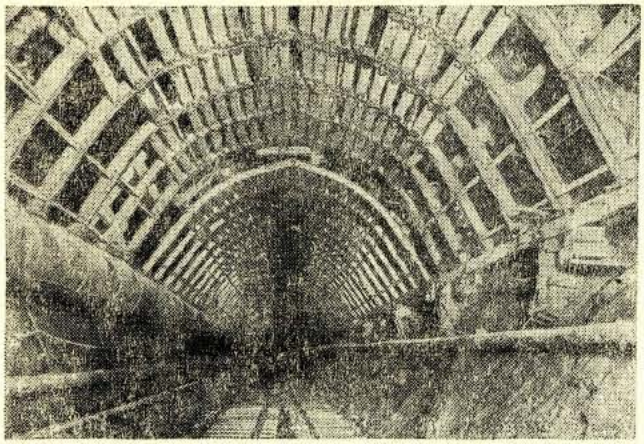


Рис. 298. Полигональное крепление калоттного профиля

калоттной части профиля были заложены две боковые штольни высотой 2,4 *м* в свету и шириной 1,8 *м*. Ширина земляного ядра, остающегося между этими штольнями, равняется 2,4 *м*. Эти штольни были пройдены со сплошным деревянным окладом при полной затяжке марчеванами кровли, боков и пола штольни. Забой, полностью обшитый досками, продвигался вперед с особой осторожностью последовательным продвижением каждой доски в отдельности. После того как забои боковых штолен удалялись на 6 *м*, проходилась тем же порядком верхняя направляющая штольня при боковом расширении на несколько рам. При этом необходима постановка временных средних стоек. В углах по подошве каждой из боковых штолен были уложены лежни, служащие для упора в них деревянных рам — ломаного ригеля, основы американской рамной конструкции деревянной крепи (рис. 299). Размеры поперечного сечения брусьев последней 30 × 30 *см*.

В зависимости от давления рамы ставились на взаимном расстоянии 60 *см* и даже вплотную. Вслед велась выемка штроссного ядра и установка стоек высотой 4,5 *м* под лежни, уложенные в боковых штольнях.

Приведенная рамная система крепления является в американской практике излюбленной. В указанных условиях при наличии неустойчивых грунтов скорость проходки составила около 7 *м* готового тоннеля в неделю. Американская полигональная крепь с успехом применяется в скальных породах (рис. 298).

Американская *шатровая система* крепления была применена при проходке тоннеля под оз. Мичиган в Чикаго на протяжении 3,52 *км*. Проходка велась через перемежающиеся напластования глин, суглинков с включениями песков. Диаметр тоннеля в свету был 3 *м*.

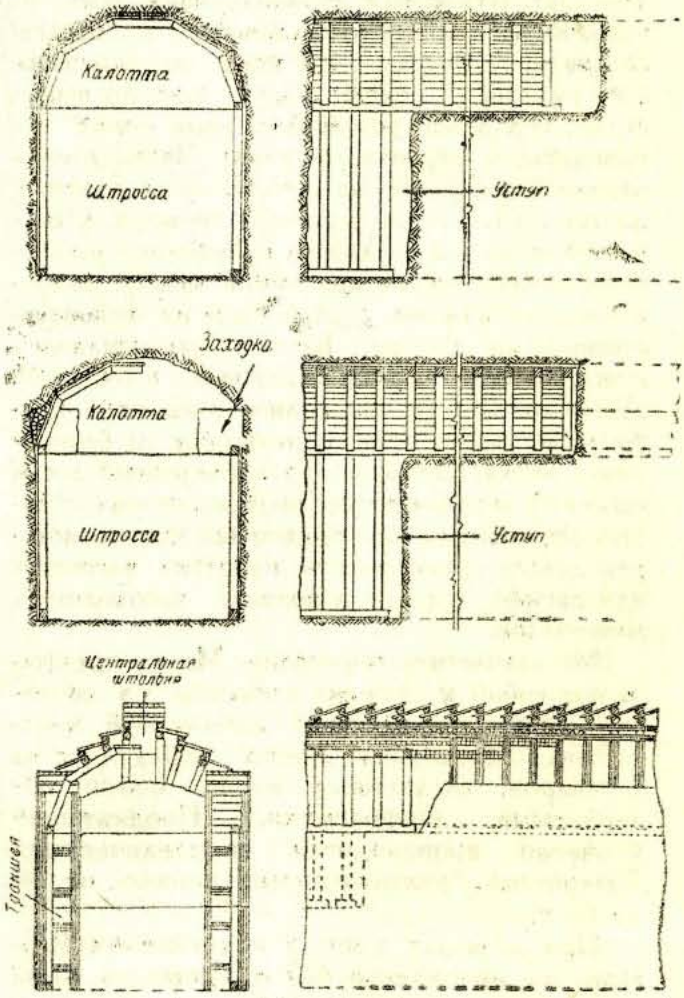


Рис. 299. Американское полигональное крепление

Разработка по указанной системе ведется следующим образом. Предварительно укладываются подкладки под устанавливаемые треугольником брусья размерами 15 × 20 *см*, так чтобы крепление тоннельной разработки калоттного профиля было по форме в виде

опрокинутой буквы V. Системой марчеван, филат и клиньев производится закрепление кровли в указанную основную крепь. Затем устанавливаются кружала и производится бетонировка или устройство каменной кладки тоннельной обделки.

Скорость проходки в условиях неустойчивых пород была 4,2 *м* в сутки.

Метод проходки тоннеля в слабых грунтах с применением металлических марчеван системы Меема. Этот способ работ был применен в Бруклине при проходке в мелкозернистых водоносных песках тоннеля диаметром 6,2 *м*. Была пройдена верхняя штольня и смонтирована сегментная направляющая рама, по которой забивались металлические марчеваны специальной формы. По мере продвижения этих марчеван, ограждающих кровлю выработки, под ними устанавливались новые направляющие деревянные рамы. Затем производилось раскрытие калоттной части профиля до горизонтального диаметра тоннеля. Одновременно велась установка временного ригельного американского крепления между направляющими рамами, с опиранием их непосредственно на брусья. Кровля раскреплялась между этими рамами системой мальчиков. Далее производилось полное раскрытие профиля на небольшом протяжении и бетонировка лотка. Опираясь на возведенный лоток системой вертикальных подшвеллерных столбов, образовывалась тоннельная ферма, которая давала возможность пропуска вагонеток для выдачи породы и подвоза необходимых материалов.

Металлические марчеваны Меема представляют собой клепанные элементы из сортового железа, обладающие достаточной жесткостью. Марчеваны Меема образуются из двутавров, схваченных между собой поперечными диафрагмами. Продвижение марчеван производится гидравлическими домкратами, развивающими усилие от 30 до 60 т.

При проходке тоннеля под каналом Риджент на протяжении 470 *м* пришлось вести работы при наличии кровли слабых грунтов в 1,8 *м*. Диаметр тоннеля в свету 8,6 *м*. Здесь была применена система направляющих рам и металлических шпунтованных марчеван специального профиля. Марчеваны продвигались вперед с помощью гидравлических домкратов, упирающихся с одной стороны в выведенную сзади кладку тоннеля, а с другой — в башмак, прикрепленный к марчеване. Эти металлические башмаки имели специальные штыри, входившие в отверстия, которыми были испещрены марчеваны для постепенного продвижения их вперед. Марчеваны были длиной 3 *м*, шириной 15 *см*. При продвижке вперед увлекался одновременно комплект из трех марчеван.

Сооружение тоннельных коллекторов в Америке в условиях кровли из слабых песчаных грунтов проводится за последнее время исключительно системой подвижных металлических марчеван, которые продвигаются вперед вслед за продвижением забоя (рис. 295). Металлические марчеваны, поддерживающие кровлю в этих условиях, продвигаются вперед при помощи винтовых домкратов с применением ряда консольных брусьев и башмаков. Лоб забоя и бока выработки крепятся деревянными шпунтованными марчеванами с затяжками. Доски забоя продвигаются последовательно по мере выборки грунта одна вслед за другой.

Производство работ с надлежащей тщательностью в условиях песчаных грунтов, отдающих воду, при постановке соответствующих фильтров, позволяет избежать каких-либо осложнений в отношении выпуска породы.

КЕЛЬНСКИЙ МЕТОД ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

Обычная система разработки тоннелей на временном деревянном креплении при каменной обделке применяется преимущественно в горных условиях. Она неминуемо связана с осадками крепления и поверхности, особенно при проходке в слабых грунтах. Сжимаемость деревянных креплений и этапы перекреплений в период подводки элементов постоянного крепления неизбежно приводят к сдвигам грунта и осадкам. При проходке в песчаных грунтах продвижение деревянных марчеван приходится вести с подборкой, что связано с выдачей лишнего объема грунта и образованием пустот. Часть остающегося при разработке профиля крепежного леса гниет, вследствие чего оседание поверхности может произойти через несколько лет после окончания тоннельно-строительных работ. Если обычный способ применяется при сооружении горных тоннелей, где осадка поверхности не имеет существенного значения, то в городских условиях он связан с нарушением сети подземного хозяйства и угрозой сооружениям. В устойчивых породах система деревянного крепления при тщательном ведении работ допустима, но в условиях слабых грунтов применение ее без

специальных мер — силикатизации, замораживания, сжатого воздуха — может привести к аварийным явлениям.

В стремлении свести осадки поверхности 10—12 *м*. Чрезвычайная узость улиц, случайная застройка домов, густота сети подземного хозяйства, насыщенные водой песчаные и гравелистые грунты — все это заставило

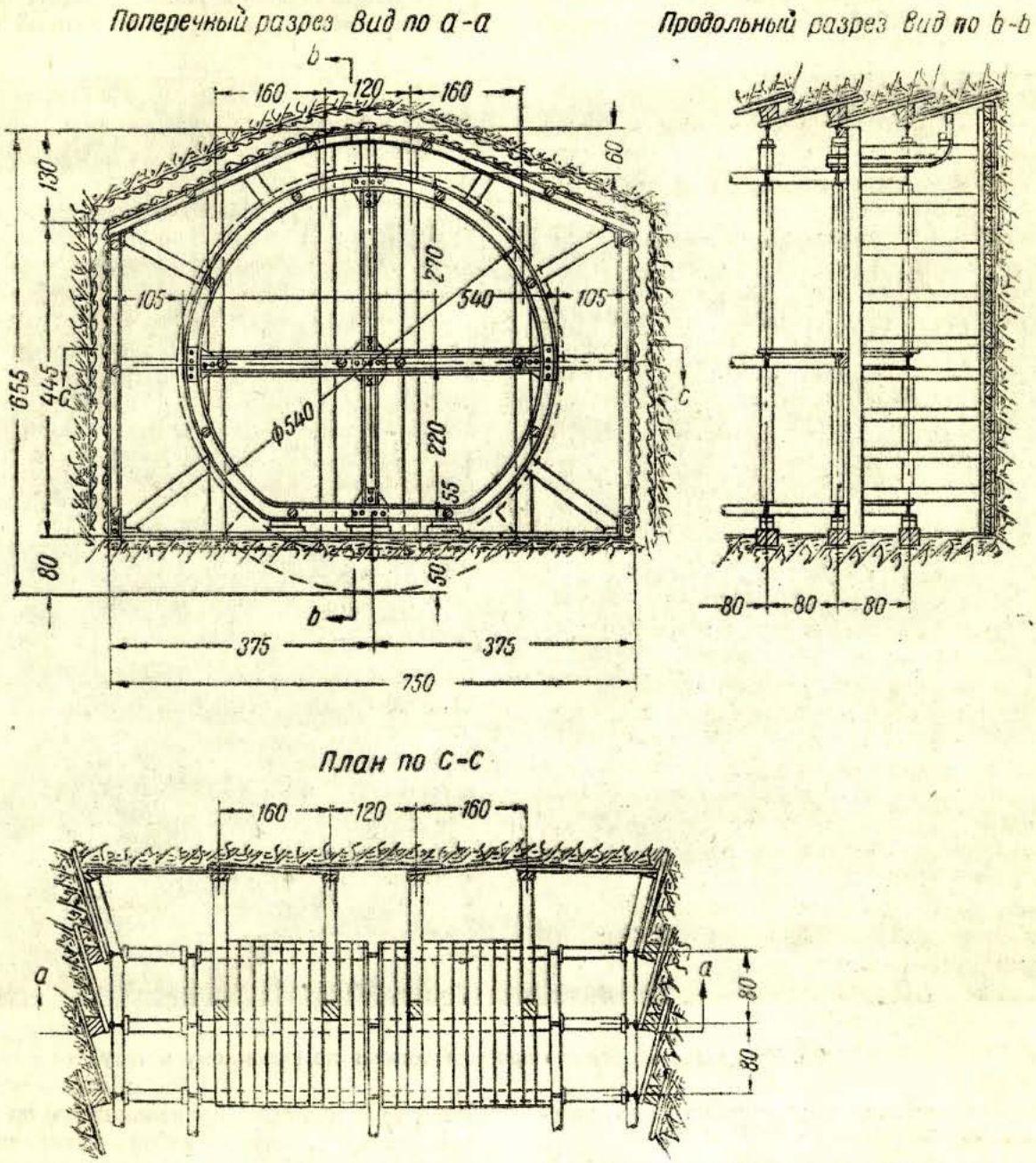


Рис. 300. Кельнский метод производства работ

в период производства городских тоннельных работ к минимуму ввели усовершенствования, которые в целом вылились в так называемую *кельнскую систему* (рис. 300). К этой системе прибегли в Кельне (1925 г.) при сооружении тоннеля-коллектора на глубине

отказаться от открытого способа ведения работ.

Применение обычных тоннельных приемов на деревянном креплении привело бы здесь к сдвигам породы и к неизбежным авариям. Задача заключалась в том, чтобы выборку

породы профиля вести, не нарушая режима вышележащих грунтов, и ни в коем случае не давать выпуска породы. Для этого необходимо было до выборки объема породы заключить его в соответствующее крепление, которое ограждало бы забой, бока и кровлю выработки, не допуская перемещения окружающего грунта.

На этом принципе и основана кельнская система, при которой тонкие, шпунтовые, металлические марчеваны забиваются в плотное тело грунта на полный посад до атаки забоя, в отличие от толстых деревянных марчеван, которые продвигаются вперед с подбором.

Производство работ кельнским методом интересно проследить на опыте постройки указанного тоннеля-коллектора сечением 4,7 × 5,1 *м*, заложенного на глубине 11—12 *м* от поверхности и трассированного под узкими улицами, вокзалом и железнодорожными путями. Фронт работ открывался из рабочих шахт, пройденных ларсеновскими шпунтами длиной в 12 *м*.

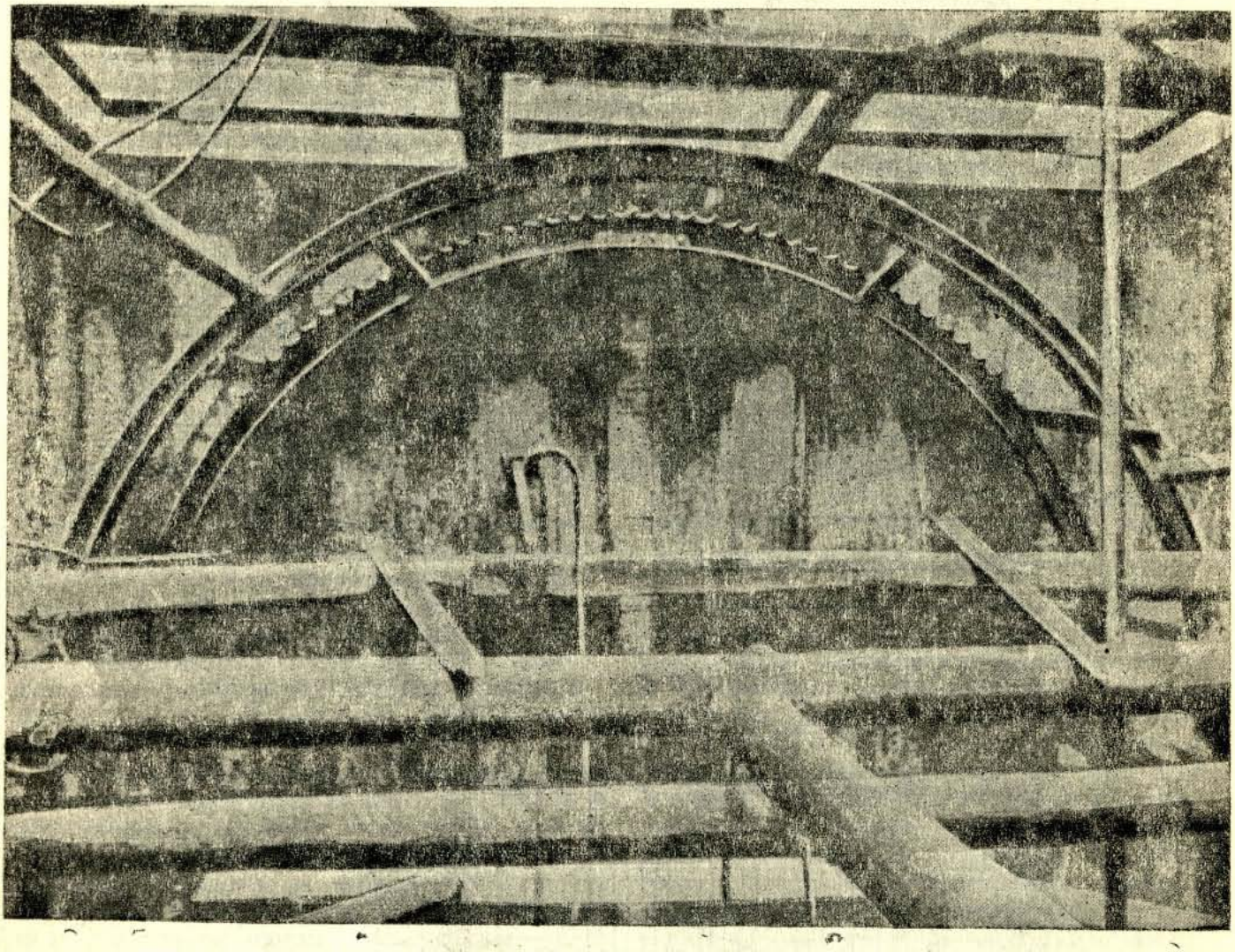


Рис. 300 а. Крепление калоттного профиля тоннеля по кельнскому методу

Засечка тоннеля производилась по всему калоттному контуру забоя металлическими шпунтованными марчеванами специального профиля (рис. 301). Марчеваны забивались пневматическим молотом по направляющим кружалам из согнутых в виде дуги старых железнодорожных рельсов. Забивка марчеван производилась от ключа свода к пятам таким образом, что одновременно двигались вперед две марчеваны. При длине марчеван в 1,8 *м* посад велся на 1,2 *м*. Встреча металлической

марчеваны с валуном не влияла на проходку. В этом случае прекращали дальнейшую забивку марчеван, а при продвижении забоя валун осторожно удаляли. Промежуточные направляющие металлические кружала убирались до бетонировки тоннельной обделки, а основные железнодорожные кружала из рельсов и металлические марчеваны оставались. Лоб забоя крепился с особой тщательностью деревянными брусьями, перенумерованными для последовательного порядка их перемещения вперед (рис. 302). Сотрясение грунта, неизбежное при забивке марчеван пневматическими молотами, уменьшалось применением специальных башмаков.

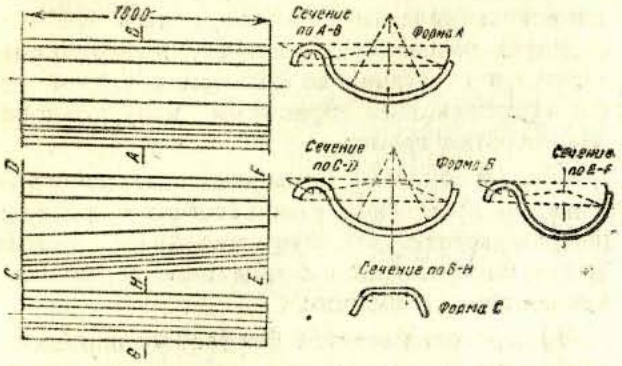


Рис. 301. Формы гофрированных металлических марчеван, применяемых при креплении тоннельных выработок кельнским методом

При подъеме воды в р. Рейн песчаные грунты, в которых прокладывались тоннели, стали настолько водонасыщенными, что установленные 14 глубинных насосов для искусственного водопонижения не в состоянии были справиться со своей задачей. Произошло затопление работ на 2 *м* выше подошвы тоннеля. В то время как при затоплении выработок на деревянном креплении в большинстве случаев происходят катастрофы, в данном случае никаких деформаций и расстройства крепления обнаружено не было, хотя вода стояла в тоннеле в течение двух недель.

При кельнском методе требуется особенная осторожность при сбойке встречных забоев. Во избежание сотрясений небольшого земляного массива — *целика* — при близко расположенных забоях рекомендуется для обеспечения безопасности рабочих при подходе забоев на взаимное расстояние 20—25 *м* прекращать одновременное продвижение их с двух сторон. В одном забое надо вывести близко ко лбу его бетонную обделку тоннеля, а продвижение забоя вести лишь с одной стороны. Основные работы ведутся в строгой последовательности.

Вслед за разработкой профиля возводится бетонная обделка тоннеля по всему сечению от лотка к замку свода. Качество бетонных работ значительно повышается, так как они ведутся совершенно раздельно от земляных работ, не стесненных креплением по сечению тоннеля (рис. 303).

Транспорт организован таким порядком, что порода выдается по нижнему, а подача материалов производится по верхнему горизонту. Применяя кельнскую систему в городских условиях, удалось практически достигнуть желаемых результатов. В процессе строительства не было замечено ни осадок породы, ни трещин в домах и повреждения сооружений подземного хозяйства. Под железнодорожной насыпью линий Эрбельфельд — Кельн шириной 120 *м*, под которой проходили тоннели, никаких осадок не было, и поезда курсировали беспрерывно.

Применение временного металлического крепления удорожает работы, но стоимость в некоторых случаях компенсируется теми огромными преимуществами, которые дает этот метод, позволяющий избежать значительных осадок поверхности.

Кельнский метод применен и к сооружению в слабых грунтах больших станционных профилей при внешней оклеечной изоляции

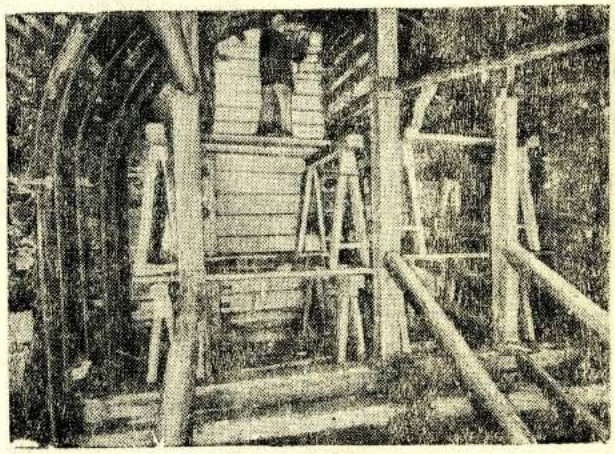


Рис. 302. Крепление лба забоя при работе кельнским методом

(рис. 304 а). В то время как при сооружении однопутных и двухпутных тоннелей разработка ведется на все сечение, при станционных тоннелях она ведется по фазам сначала закладкой стен в «слепых» траншеях на металлическом креплении.

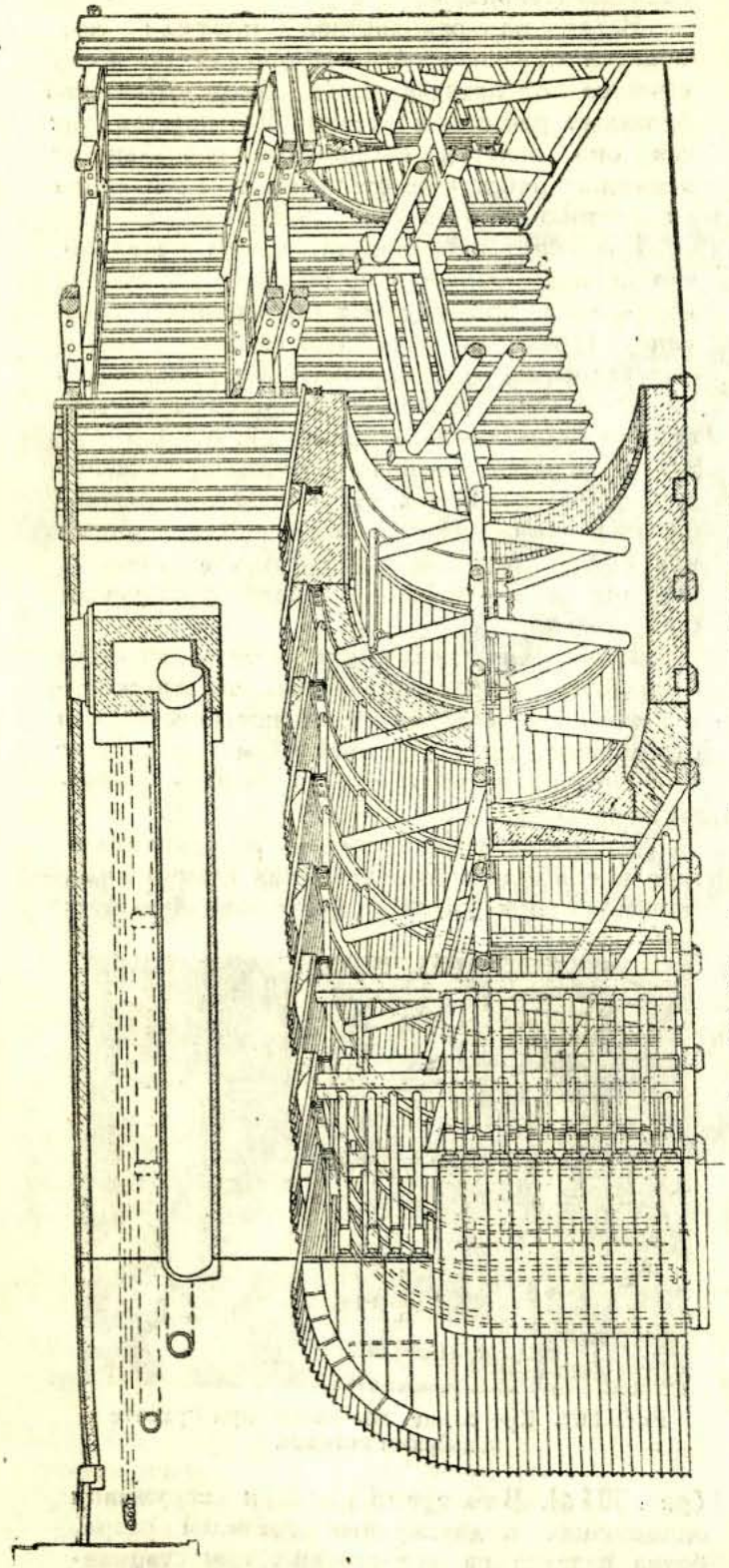


Рис. 303. Общий вид работ по кельнскому методу

По предварительным данным, средняя скорость проходки кельнским методом однопутного тоннеля определяется в 2 *м* в сутки, двухпутного тоннеля 1,5 *м* в сутки.

В некоторых случаях при встрече с особо слабыми водоносными грунтами представляется технически целесообразным вести городскую тоннельную проходку по кельнскому методу в сочетании со сжатым воздухом или со специальными приемами искусственного закрепления грунта.

Таким образом, применение кельнского метода металлической крепи сообщает тоннельной выработке ряд существенных преимуществ по сравнению с обычным деревянным креплением, а именно:

а) проходка ведется без особого нарушения вышележащих грунтов, при этом осадки поверхности сводятся к минимуму, что имеет особо важное значение для городских условий тоннелирования;

б) металлическая крепь сообщает выработке воздухо- и водонепроницаемость, что важно при проходке в условиях водоносных грунтов под сжатым воздухом;

в) отсутствие крепежного дерева в выработках повышает пожарную безопасность;

г) при металлическом креплении выработок достигается опрятность ведения работ, а равно чистота содержания пройденных участков тоннеля.

Аналогичный принцип раскрытия тоннеля на полный профиль заложен в системе, предложенной Ржиха для сооружения железнодорожных тоннелей, как это усматривается из рис. 304 б. Сущность этого метода производства работ заключается в раскрытии забойного пространства на полный профиль, при металлическом, кружального типа, креплении. Последнее устанавливается по внутреннему контуру обделки и является временной несущей конструкцией, воспринимающей горное давление через систему металлических «мальчиков» и косяков. Кроме того указанная металлическая крепь носит функцию кружал для возведения кладки постоянной обделки тоннеля. Процесс возведения кладки ведется вслед за разработкой забоя. снизу вверх, начиная с фундаментов стен к замку свода. По мере возведения кладки обделки мальчики снимаются. В зависимости от размеров проявляемого горного давления, расстояние между кружальными рамами устанавливается от 1 до 1,5 *м*. Разработка забоя

ведется сверху вниз, с раскреплением лба забоя рядом горизонтальных распорок. При наличии слабых грунтов в основании тоннеля каждое кружало замкнутого контура базируется на предварительно уложенный обратный свод обделки. При этом лоб забоя поддерживается дополнительно системой подкосов, упирающихся в каменную обделку. Метод производства работ при металлическом креплении, предложенный Ржиха, содержит ряд определенных преимуществ, использованных при создании Кельнского метода работ. Этот метод применен при сооружении железнодорожных тоннелей.

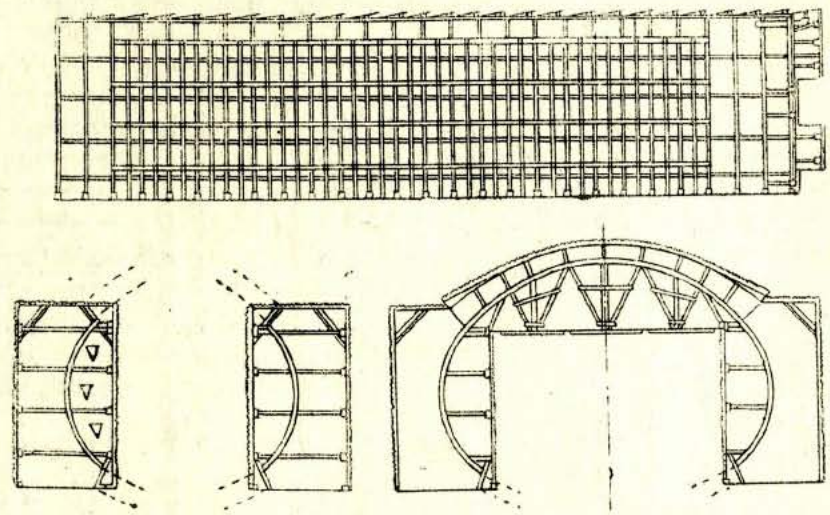


Рис. 304а. Фазы сооружения односводчатой станции метрополитена кельнским методом

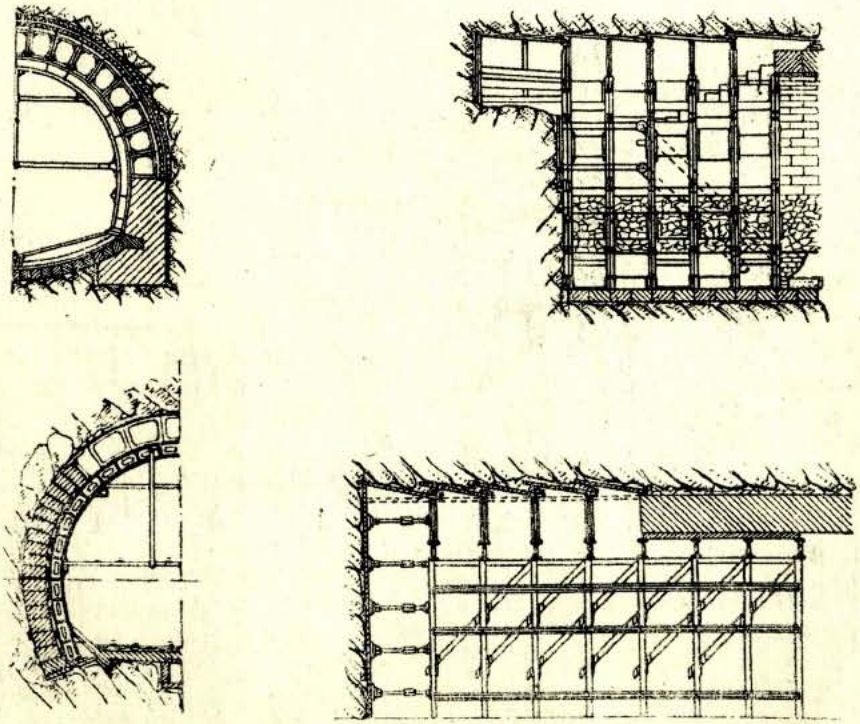
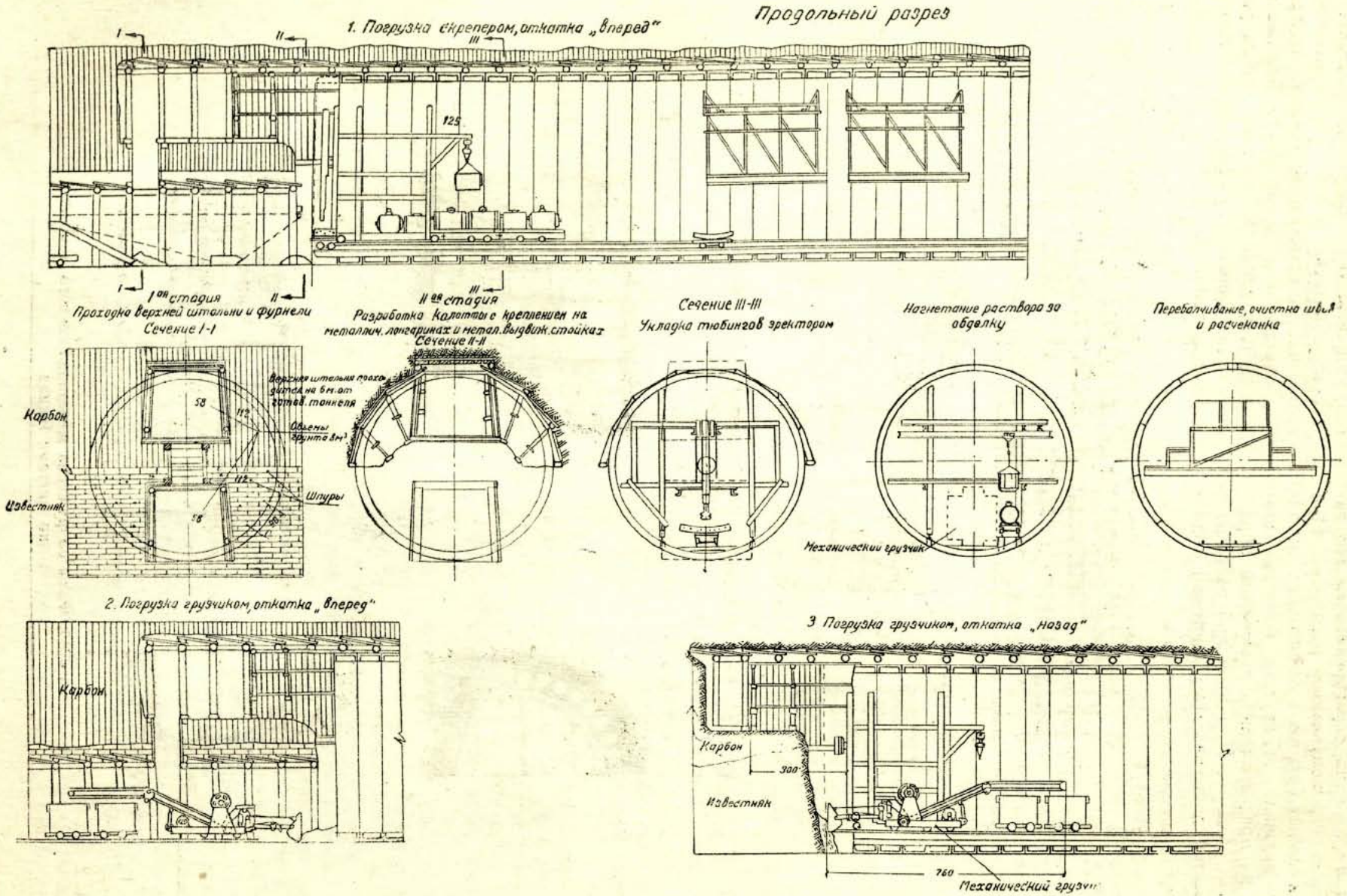


Рис. 304б. Фазы сооружения железнодорожного тоннеля по системе Ржиха



305 Горный способ работ при помощи эректора

ГОРНЫЙ СПОСОБ СООРУЖЕНИЯ ТОННЕЛЯ ЭРЕКТОРОМ

При сооружении тоннелей с обделкой чугунными тюбингами на коротком протяжении трассы, в 100—300 *м*, где применение щита, требующего значительного времени на монтаж и демонтаж, является нерентабельным, возможно рекомендовать применение горного способа работ в сочетании с эректором — механическим укладчиком тюбингов. Впереди забоя проходится передовая калотта (рис. 305). Грунт из забоя может выдаваться вперед по передовой штольне с помощью погрузочной машины или при проходке *слепым забоем* назад, также при механической погрузке породы.

Монтаж тюбинговой обделки производится эректором, а в остальном процессы нагнетания и расчеканки производятся в том же порядке, как и при щитовой проходке (см. главу VIII).

В скальных породах разработка забоя может вестись взрывным способом без применения передовой калотты. Горный способ с эректором удачно применяется на ряде участков строительства Московского метрополитена.

Ниже приводим данные, характеризующие современные скорости проходок штолен при горной технике сооружения тоннелей (табл. 15 а и 15 б).

Таблица 15а

Таблица скоростей проходки штолен в скальных породах

а) Американская практика

Наименование тоннеля	Поперечное сечение выработок (в $м^2$)	Скорость проходки (в *м*)		Год сооружения	Максимальная скорость в сутки (в *м*)
		средняя	максимальная		
1	2	3	4	5	6
Лендж-Майн	3,00 × 3,90	19	в неделю	1929	
Юбисс	3,60 × 3,10	22	„	—	
Гапри	2,70 × 3,10	25	„	—	
Корер-Майн	3,0 × 3,10	32	„	1928	
Уинтон	2,40 × 6,00	34	„	1927—1928	
Юнтингтон	4,30 × 1,50	36	„	1925—1928	
Нью-Хевен	2,40 × 2,40	38	„	1927—1929	
Флоренс	2,40 × 4,50	33	52 в неделю	1920—1925	
Ирека	2,70 × 3,30	80	„	—	
Кейбера	5,10 × 3,90	170	„	1926—1929	
Берл	3,30 × 3,20	156	192 в месяц		
Целла	2,50 × 2,80	220	в месяц		
Паул-Пасс	1,80 × 2,40	120	220 в месяц	1922—1928	13,10
Дивинон	3,90 × 3,90	90	231 в месяц	1917—1925	
Бояты	2,50 × 2,70	—	268 в месяц	1930—1931	
Новый Каскад	2,40 × 2,70	—	350 270	1925—1929	
	3,10 × 3,10	—	в месяц		12,00
Канахт	1,80 × 1,80	270	в месяц	1913—1916	
Моффат	2,40 × 2,70	350	470 в месяц	1923—1928	16,00
Вест Айрон Маунтейн	6,10 × 6,10	313	„	1933	14,20
Форт Пек	4,27 × 4,88	439,6	„	1935	14,80
Коачелла	5,79 × 5,79	287	„	1935	16,50
Уипл-Маунтейн	5,79 × 5,79	330,4	„	1935	16,80
Моно-Бейсен	3,66 × 3,66	371,6	„	1935	21,90
Пассадено-Колорадо	3,66 × 3,66	458,4	664,2 „	1935	24,40
Сент-Поль	4,70 × 4,70	446,8	„	1929	19,40
Коагелла	5,80 × 5,80	287	„	1935	16,60

Таблица 15б

б) Европейская практика

Наименование тоннеля	Поперечное сечение штольни ($м^2$)	Скорость проходки в сутки (в $м$) средняя	Скорость проходки в сутки (в $м$) максимальная	Порода
1	2	3	4	5
Хаунштейн	5,00	8,20	10,40	Известняк
	6,00	11,40	14,70	»
Холливел	6,50	10,00	300 м/мес	Гранит
Кел-де-Кабр	6,00	4,84	9,00	Скала
Караванкен	6,15	4,70	6,50	»
Тауэрн	6,50	4,70	5,60	»
Бюссанг	10,00	4,50	7,58	—
Борэн	8,80	4,50	—	Гранит
Кремалино	6,50	2,97	5,75	»
Шлюхзее	5,50	2,90	—	»
Блей-лах	8,00	2,70	—	Диабазы
Партенштейн	9,00	2,20	—	Гранит
Гаелиталь	3,20	2,00	—	Гнейс

Скорости проходки штолен в слабых, мягких грунтах с забивной крепью приведены в табл. 16.

Таблица 16

Таблица скоростей проходки штолен в слабых мягких грунтах (с забивной крепью)

Наименование тоннеля	Площадь (в $м^2$)	Скорость проходки в сутки	Грунт
1	2	3	4
Берлинский дюкер	5,75	3,60	Песок с галькой
Шор	5,00	2·5—3,5	Морена-песок
Шарлоттенбург	8,00	2,40	Водоносные пески
Парижский метрополитен	5,00	1,60—2,40	Слабые мергели с глиной
Кенигстор	20,00	4,00	Водоносные пески
Нэйкельнский железнодорожный тоннель	32,00	0,50	Осушенные водопонижением пески
Ахензверк	6,20	2,90—3,05	Пески

Приведенные в таблице 15 а, сравнительно высокие скорости проходок штолен, достигнутые в американской практике, относятся преимущественно к работам в условиях горных массивов при отсутствии подземных вод и горного давления, при высоком коэфициенте крепости пород, совершенно исключающих необходимость в применении временного крепления выработок.

В зарубежной практике при проходке штолен с креплением в слабых грунтах (в городских условиях) скорость проходки не превышает 4,8 $м$ в сутки.

В СССР высокие скорости проходок достигнуты в тоннелестроении и в горной промышленности.

На шахте № 4/2 Первомайскугля стахановец тов. Ульянов, в условиях глинистых сланцев, достиг скорости проходки штрека, с креплением, 12 $м$ в сутки, применяя буровзрывные работы, при длине шпура 2,5 $м$.

На шахте № 4 Бруснянская, в глинистых породах, осуществлена проходка штрека со скоростью 12,9 $м$ в сутки.

По углю — на шахте № 201 Челябуголь достигнута скорость проходки штрека 15 $м$ в сутки и на шахте № 64 Товарковуголь 16,2 $м$ в сутки. Применением гидромеханизации на шахте им. Орджоникидзе была достигнута скорость проходки 17,4 $м$ в сутки. Стахановец тов. Тарута, на шахте № 26 Урванковской, достиг суточной скорости проходки штрека 22 $м$.

При сооружении тоннелей Московского метрополитена была достигнута скорость проходки до 4,22 $м$ в смену, что составляет до 13 $м$ в сутки (рекорд стахановца тов. Лушника). Эта скорость проходки, в среде водоносных пород, при наличии горного давления, требующего усиленного крепления выработок, в городских условиях, где работы должны вестись не вызывая осадок поверхности, является непревзойденной в мировой практике. Успешно применяемые в СССР новые методы организации производства и механизации подземных работ в сложнейших геотехнических условиях свидетельствуют о творческой инициативе стахановцев и инженеров, а также о высоком уровне советской тоннельной техники.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ЩИТОВАЯ ТЕХНИКА СООРУЖЕНИЯ ТОННЕЛЕЙ

I. ЩИТЫ И ПРОИЗВОДСТВО ЩИТОВОГО ТОННЕЛИРОВАНИЯ

Сооружение тоннелей обычными, выработанными в мировой практике методами временного крепления при постоянной каменной обделке связано с рядом осложняющих моментов:

1) прокладка тоннеля ведется последовательными этапами по раздробленным элементам (штольни, калотты, своды, штроссы, стены, лоток);

2) проходка на деревянном креплении в водоносных, слабых грунтах неизбежно связана с выплывами породы;

3) сама система деревянных креплений, ввиду загроможденности и тесноты работ, создает в определенных случаях весьма тяжелые условия подземного труда, что особенно ощущается при появлении усиленного давления на крепи в слабых грунтах, где объем крепежных материалов иногда достигает 50% объема подлежащей уборке породы;

4) при наличии разных горизонтов, узкого фронта работ и различных стадий работ в каждом тоннельном кольце механизация работ весьма ограничена и не может быть проведена с надлежащей эффективностью.

Что касается условий городского тоннелирования, то здесь, во избежание появления осадок, могущих отразиться на устойчивости зданий и сооружений подземного хозяйства, необходимо наличие значительных кадров опытных крепильщиков.

Приведенные соображения в достаточной мере характеризуют сущность и кардинальные недостатки обычно применяемых горных методов на временном деревянном креплении.

Проблема сооружения тоннелей полностью разрешается применением щита — универсального механического снаряда, позволяющего беспрепятственно и эффективно вести тоннельные работы в любых природных условиях.

Основной принцип щита заключается в том, что под защитой мощного металлического корпуса представляется возможность производить разработку породы и устройство тоннельной обделки.

Тоннельный щит был впервые создан инженером Брюннелем (1826 г.) при сооружении подводного тоннеля под р. Темзой. В дальнейшем многие инженеры видоизменяли конструктивные элементы щита, но самая его идея, предложенная Брюннелем, осталась неизменной.

Много усовершенствований в конструкцию щита внесли инженеры Барлоу и особенно Гретхэд. Последний настолько оснастил щит, что придал ему значение механического снаряда, дающего возможность с успехом и (при надлежащем ведении работ) безопасно производить работы в тяжелых геологических условиях, в осложненном гидрогеологическом режиме, при значительном давлении пород.

Самый щит представляет металлический цилиндр, соответствующий в поперечном сечении внешнему очертанию сооружаемого тоннеля. Впереди он снабжен режущим краем, образующим в верхней части аванбек, размеры которого зависят от физико-механических свойств пересекаемых грунтов (рис. 306).

Под действием гидравлических домкратов, размещенных по периметру щита в хвосте его, щит врезается в грунт на ход поршня домкратов. В зависимости от условий проходки и пересекаемых пород предварительно, до продвижения щита, производится выборка породы на ширину сегмента тоннельной облицовки, в соответствии с ходом поршня домкрата.

Поступательное движение сообщается щиту при упоре поддонов домкратов в возведенное кольцо тоннельной обделки. При втягивании плунжеров домкратов в цилиндры в хвосто-

вой части щита представляется возможным укладывать сегменты, образующие тоннельную обделку вновь монтируемого кольца.

В зависимости от характера напластований, физико-механических свойств грунтов, а равно вида поперечного сечения тоннеля щит разделяется системой горизонтальных и вертикальных диафрагм и переборок. Элементы диафрагм сообщают щиту конструктивную жесткость, необходимую для преодоления давления породы и для сопротивления деформациям, возникающим в щите при продвижении его вперед.

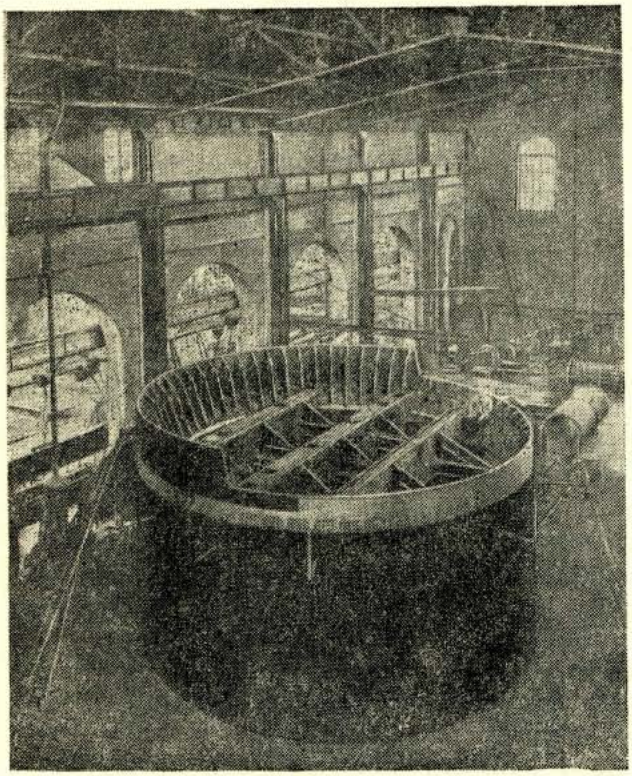


Рис. 306. Монтаж корпуса тоннельного щита на заводе

Щитовые диафрагмы, в зависимости от назначения щита и условий его работы, устраиваются открытыми или закрытыми, с системой окон и дверей. В последнем случае предусматривается кессонирование самого щита и шлюзование через диафрагмы людей и материалов при проходке водоносных, неустойчивых пород под сжатым воздухом. Для удобства атаки забоя переборки в сочетании с горизонтальными платформами образуют рабочие ячейки.

В зависимости от местных условий работа производится с платформ одновременно в одном или в нескольких ярусах. Платформы выдвигаются вперед специальными платформенными домкратами.

Крепление лба забоя по характеру грунта производится при помощи шандор и забойных домкратов.

Щитовой диафрагмой с дверями, для обеспечения от внезапных прорывов, оборудуются преимущественно щиты, предназначенные проходить слабые грунтовые массивы. При работе в относительно устойчивых породах употребляется щит с открытой грудью, где проходчики могут получить непосредственный доступ к забою (рис. 307).

Как указывалось выше, щит продвигается вперед при помощи гидравлических домкратов, расположенных в хвосте его. Мощность этих домкратов устанавливается, исходя из расчета преодоления следующих основных видов сопротивления:

1) трения внешней поверхности оболочки щита и аванбека по грунту;

2) трения внутренней хвостовой части оболочки о внешнюю поверхность выложенной обделки;

3) местного сопротивления породы в лобовой части у режущего края.

С целью уменьшения величины трения оболочки, последняя создается из металлических листов, скрепленных между собой впотай.

В последних конструкциях щита стремятся к сведению толщины оболочки щита к минимуму. Это требование ставится главным образом при проходке городских тоннелей, где вопросу осадки поверхности придается доминирующее значение. Дело в том, что при продвижении щита вперед за выложенной несущей обделкой тоннеля образуются пустоты соответственно толщине оболочки. Хотя вслед и ведется вдувание гравия и нагнетание раствора для заполнения пустот с целью предотвращения тем самым осадок, могущих распространяться до поверхности, тем не менее необходимо стремиться к уменьшению величины пространства за счет доведения толщины оболочки щита до минимума.

Большое сопротивление щит встречает при проходке слабых грунтов без предварительной выборки их в забое, методом выдавливания грунта через диафрагму, «вслепую». В этом случае щит продвигается вперед усилиями гидравлических домкратов, мощность которых доходит до 6 000 т. Щит при своем продвижении вперед раздвигает породу, и часть породы порядка 20—30% от проектного

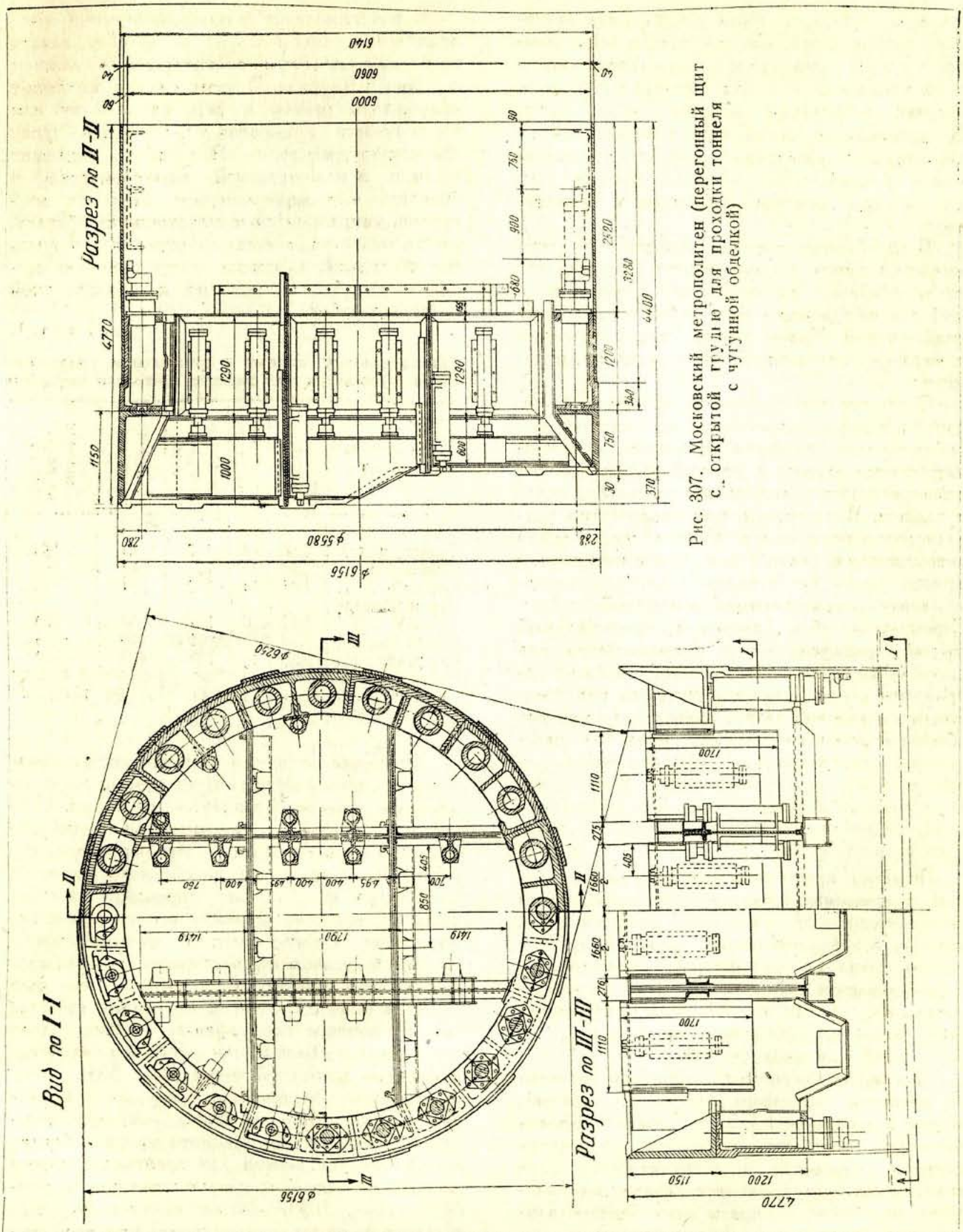


Рис. 307. Московский метрополитен (перегонный щит с открытой грудью для проходки тоннеля с чугунной обделкой)

профиля поступает через специальное отверстие внутрь щита. Способ выжимания илистого грунта приводит к значительным скоростям проходки, так как отпадает основной процесс экскавации породы забоя щита. В дальнейшем, когда щит продвинулся на значительное расстояние, порода, размещенная в нижней части профиля, быстро убирается при помощи тоннельного экскаватора.

В устойчивых породах ручным или механическим путем с применением специального типа забойных экскаваторов производится выборка внутреннего ядра забоя на величину хода поршня. Краем щита под давлением домкратов срезается часть породы по периметру.

Основные затруднения в проходке встречаются в тех случаях, когда по сечению разрабатываемого профиля пересекаются комбинированные грунты с резко отличающимися коэфициентами крепости, как, например, скала и плывун. В частности, при пересечении подводного тоннеля под р. Гудсон имело место затруднение в связи с тем, что в поперечном сечении снизу встретилась скалистая порода и сверху — разжиженный, илистый грунт. Строителями был применен оригинальный способ укрепления этого разжиженного ила путем обжига его. Из брандспойтов были направлены струи горящего керосина непосредственно в илистый забой. Происходил процесс обжига породы до момента, пока она переставала перемещаться. Одновременно из брандспойтов охлаждался водой накаленный корпус металлического щита. Для укрепления илистого забоя указанным методом требовалось около 6 часов.

Пестрота природных условий напластований пересекаемых пород не дает возможности теоретически определить требуемую мощность домкратов. На основании практики работы щитом выявлено пока наибольшее гидравлическое давление порядка 422 *кг/см*^{2} (в исключительных случаях до 650 *кг/см*^{2}). Нормальное рабочее давление принимается до 250 *кг/см*^{2} (см. таблицу 17).

Для первого советского щита было принято 24 домкрата давлением по 56,75 *т* каждый, общей мощностью 1 362 *т*. Обычно гидравлические домкраты располагаются равномерно по периметру, но в специальных условиях, когда щит проявляет тенденцию «клевать» аванбеком, домкраты ниже горизонтального диаметра щита располагаются чаще.

В зависимости от трассировки линии щиту приходится вписываться в кривые, давать требуемые подъемы соответственно данным в плане и профиле. В этом случае надлежит включать в работу и регулировать ту или иную группу домкратов и сообщать щиту требуемую траекторию. Эти работы надлежит вести с исключительной тщательностью и уменьем, ибо неравномерное давление домкратов, упирающихся в выложенную обделку, может вызвать повреждение отдельных элементов последней, а замена поврежденного сегмента или блока приводит к значительной задержке работ.

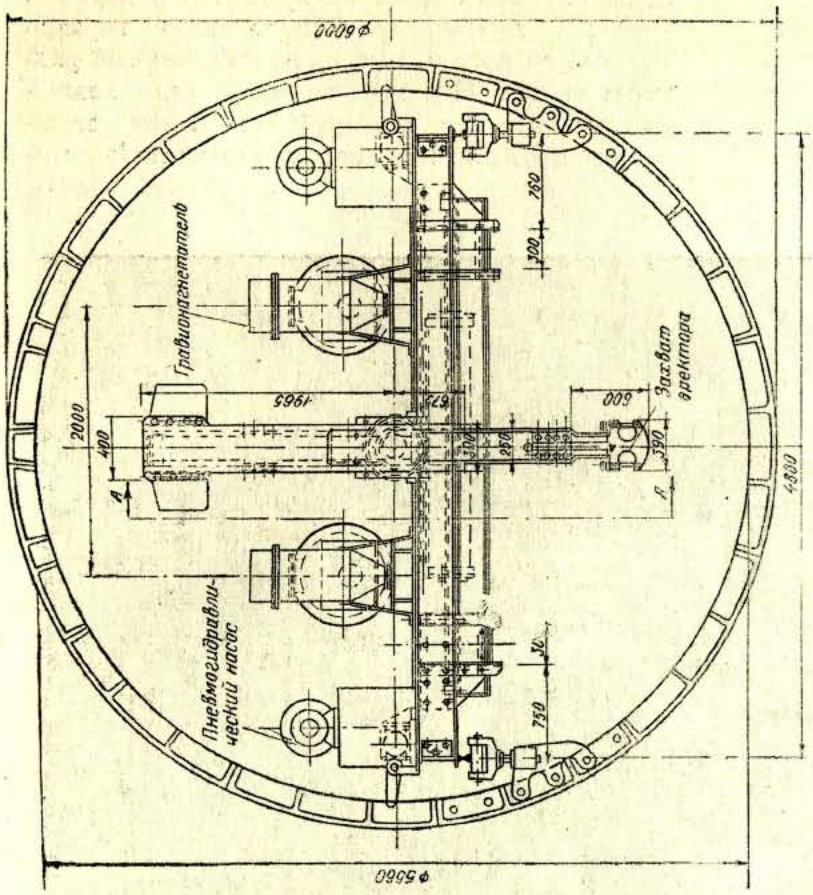
Таблица 17

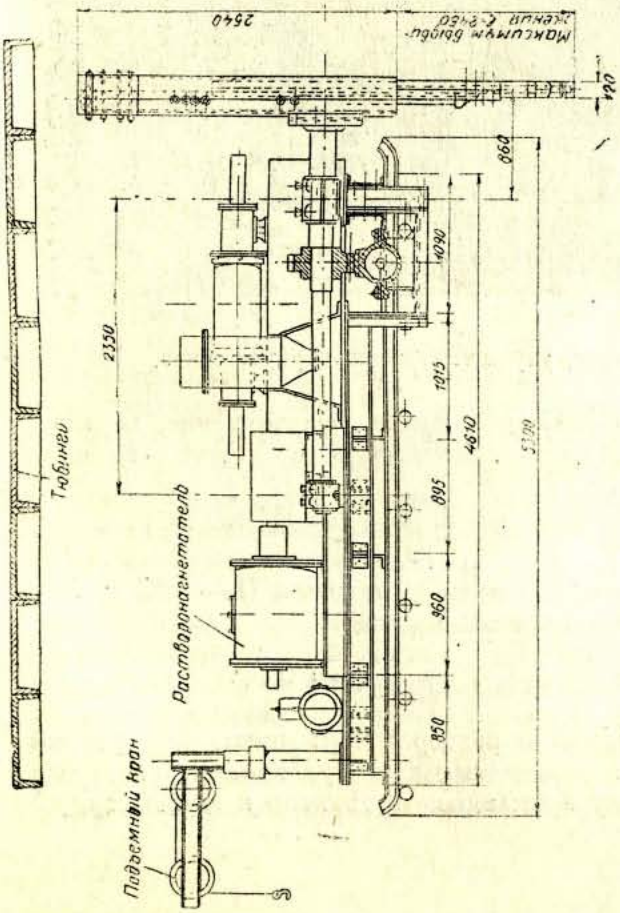
Сравнительные данные о применении гидравлического давления при работах щитовым способом

Наименование тоннеля	Внешний диаметр (в *м*)	Кол. домкратов (в шт.)	Диаметр домкратов (в *мм*)	Давление (в *кг/см*^{2})	Давление на весь щит (в *т*)
Лондон, центр	3,86	6	177	113	186
Гринвичский	3,96	13	177	239	850
Потерло . . .	3,96	14	152	169	475
Мерси (Ливерпуль) . . .	3,12	10	177	281	770
Блекволл . . .	8,43	28/6	203/245	429	5785
Ротергайт . .	9,35	40	228	422	6700
Московский метрополитен	9,50	36	280	140/200	3240/4500
	6,00	24	230	140/200	1272/1800

Установка сегментов в хвосте щита производится механическим агрегатом с захватывающим приспособлением — эректором. Последний обычно прикрепляется непосредственно к корпусу щита и в состоянии вращать сегменты обделки по поперечному сечению тоннеля на 360°, а равно проводить поступательное движение сегмента в радиальном направлении. Иногда эректор располагается и на особой подвижной платформе. В этом случае эректор приобретает третью степень свободы на определенном протяжении, так как при возможном перемещении тележки вдоль оси тоннеля блоки или тюбинги захватываются из требуемой точки (рис. 308).

В целях форсирования укладки тоннельной облицовки при больших размерах поперечного сечения сооружаемого тоннеля к щиту прикрепляются иногда два эректора, причем каждый из них обслуживает свою полуокружность (рис. 309). Двумя эректорами был снабжен полущит, примененный при сооруже-





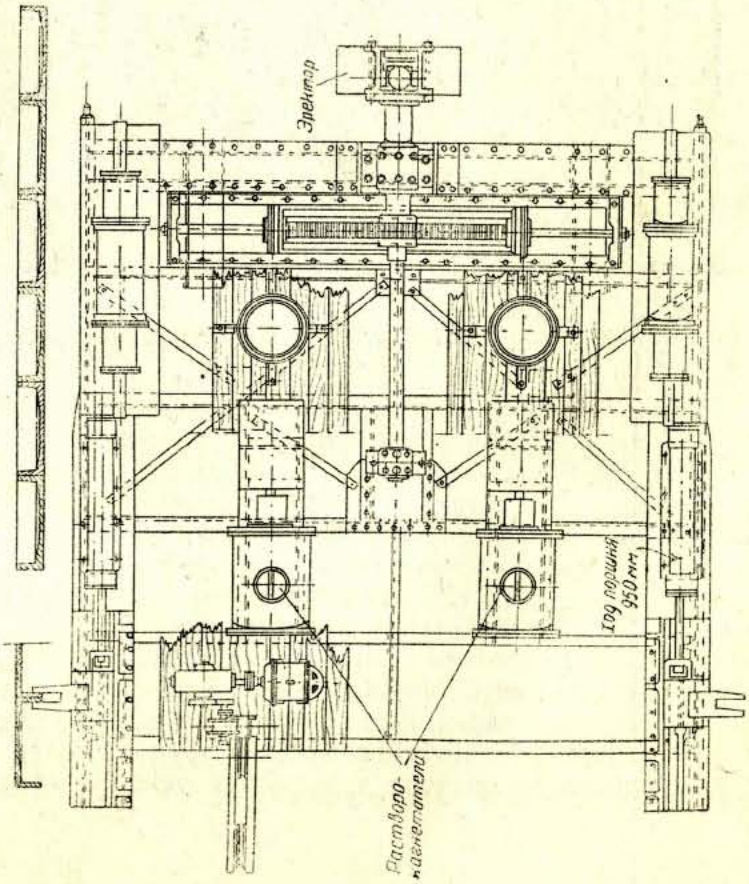


Рис. 308. Московский метрополитен (эректор для монтажа тюбингов обделки перегонного тоннеля)

нии подводного тоннеля под р. Мерси у Ливерпуля полущит для сооружения станции Маяковская Московского метрополитена и ряд щитов станционного профиля (рис. 310).

Хвост щита устраивается обычно такой длины, чтобы полностью оградить от грунта возводимое кольцо и частично возведенное, с тем чтобы при продвижении щита вперед поверхность выработки была полностью перекрыта. В нашей практике применяется щит с хвостом, перекрывающим два сегмента и даже часть третьего, что гарантирует от возможных осложнений в случае поломки возведенного кольца под неравномерным нажимом гидравлических прессов. Вместе с тем нельзя не отметить, что длинный хвост всегда является слабым местом щита, так как изгиб и повреждение оболочки весьма трудно поддаются исправлению в тоннельных условиях. Кроме того, манипулировать и держать курс по требуемому направлению гораздо труднее со щитом, имеющим удлиненные размеры хвоста. Чем меньше отношение полной длины щита L к диаметру его D, тем успешнее его продвижение вперед. Практикой щитового дела установлено соотношение, характеризующее маневренность щита порядка

$$K = \frac{L}{D} = 0\,75.$$

Первый московский щит при $D = 6{,}62$ *м*, $L = 4{,}73$ *м* имеет отношение:

$$K = \frac{4{,}73}{6{,}62} = 0{,}71.$$

Имея в распоряжении щит, оснащенный всем необходимым оборудованием, строитель может прокладывать тоннель в любых гидро-

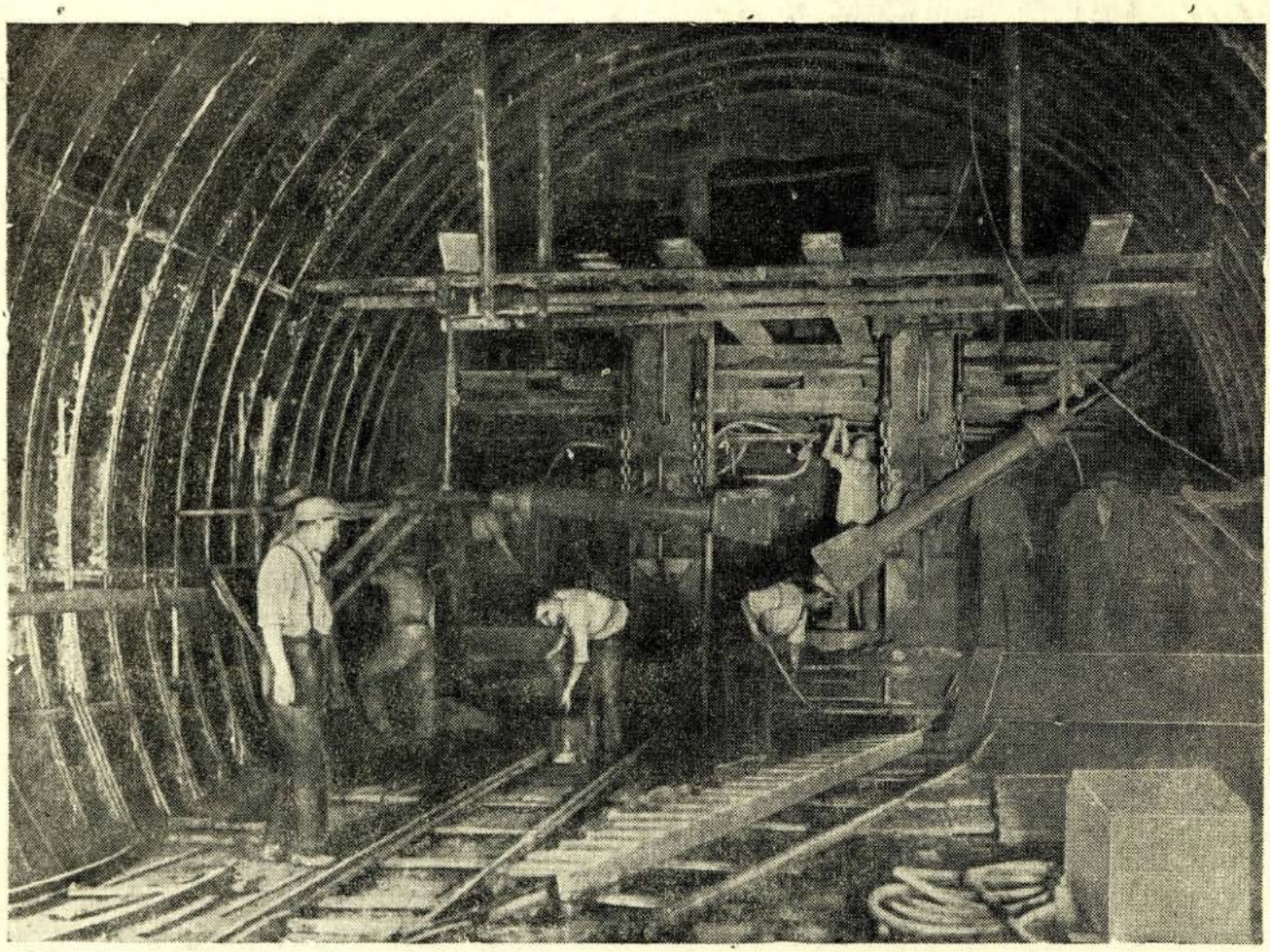


Рис. 309. Монтаж тюбингов тоннеля двумя эректорами, укрепленными на корпусе щита.

геологических условиях, даже при самом сильном гидростатическом и горном давлении.

При щитовой проходке проводится следующий ряд производственных операций.

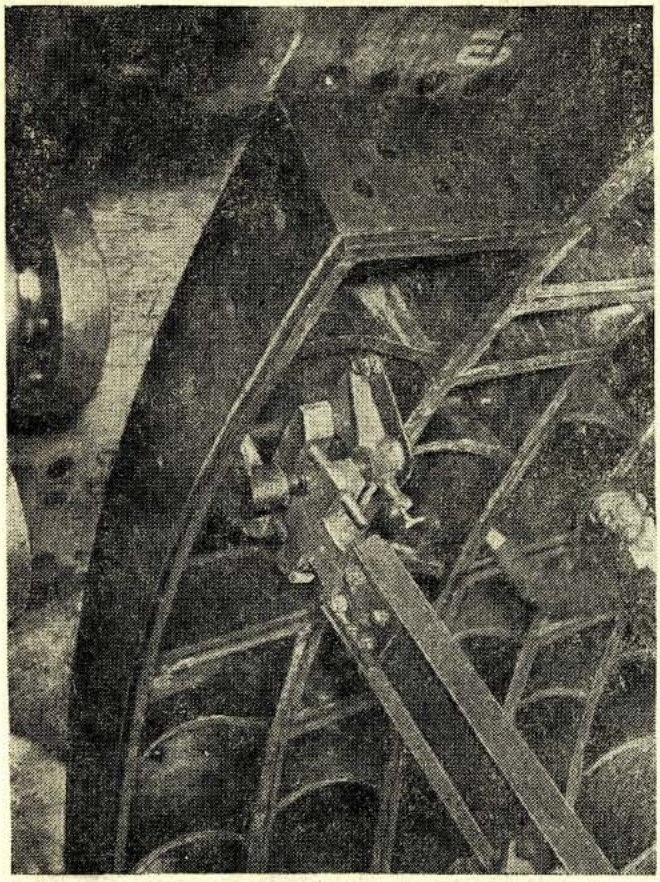


Рис. 310. Установка тюбинга эректором

а) *Экскавация лба забоя щита*, в зависимости от физико-механических свойств, характера и коэфициента крепости пересекаемых пород, производится применением всевозможных отбойных молотков, лопат, скребков, врубовых и тоннельных машин. В скальных породах для разработки лба забоя преимущественно применяются взрывные работы. Если в забое встречаются грунты с резко отличающимися коэфициентами крепости (например, плывуны и известняки), работы приходится вести последовательно, особыми приемами, с учетом крепления лба забоя, ни в коем случае не допуская выплывов. Для предупреждения неожиданностей, которые могут быть встречены при щитовой проходке в отношении выклинивания пород, не предусмотренных данными гидрогеологического прогноза, ведут рекогносцировочное бурение из пилот-штольни или непосредственно со лба забоя щита.

б) *Крепление лба забоя* производится, в зависимости от характера пересекаемых пород, деревянными или металлическими шандорами, поддерживаемыми забойными домкратами (рис. 311), секторными затворами (рис. 312) или специальными барабанами турникетного типа. В условиях слабых, неустойчивых пород возможно применение искусственных методов укрепления в виде силикатизации, химического укрепления, замораживания грунтов, сжатого воздуха.

в) *Погрузка и транспорт породы*. В зависимости от размеров и типа щита, количества рабочих ячеек, метода разработки лба забоя, общего характера организации щитовых работ («слепой» забой или с передовой штольней) устанавливается система организации погрузочных работ. Погрузка ведется непосредственно с площадки щита через течки или внизу непосредственно на транспортер. Применяются специальные погрузочные машины — типа *Джоя, Майерсвалей, Джеффри, Конвейг*, улавливающий погрузочный агрегат системы инж. *М. А. Самодурова* и скреперы (рис. 313).

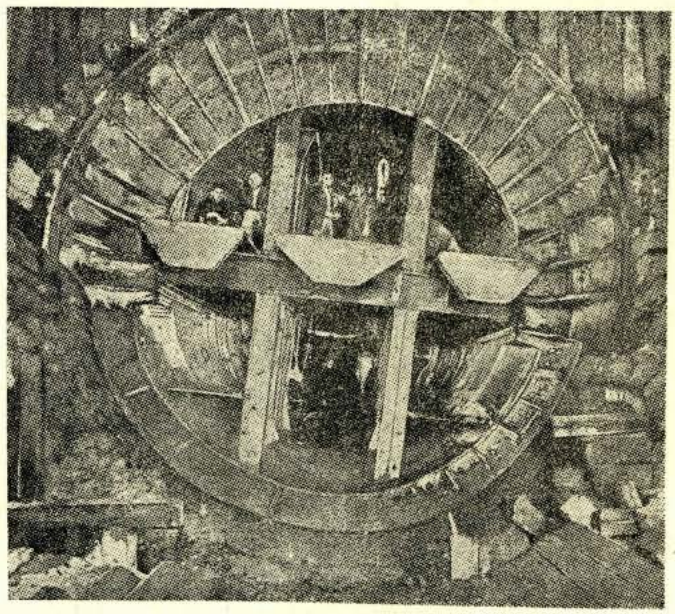


Рис. 311. Вид щита со стороны аванбека

Погрузочные машины производят выдачу породы на внутритоннельный транспорт (конвейерный транспорт, электровозная откатка, канатная откатка). Возможно применение и гидравлического транспорта породы.

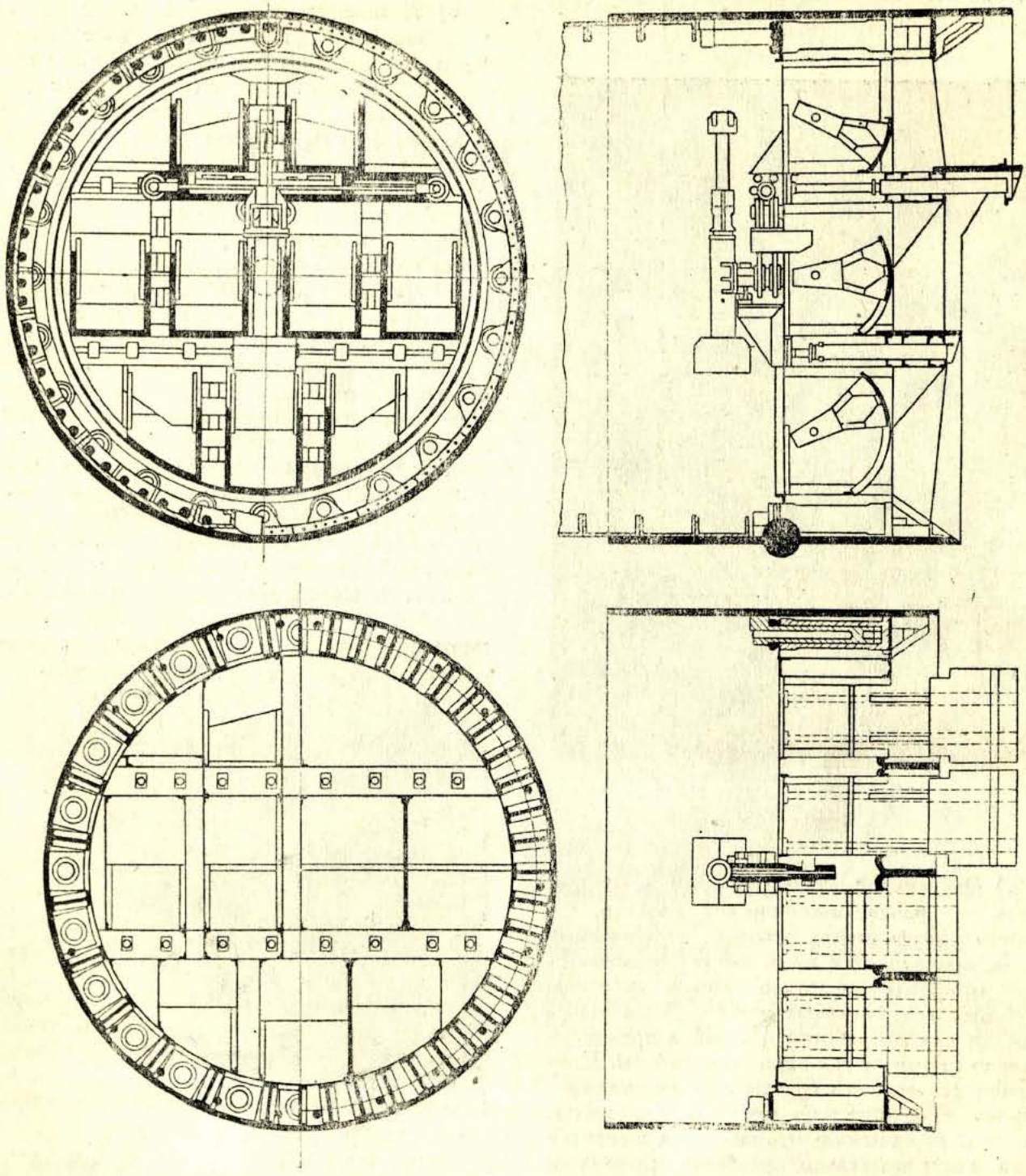


Рис. 312. Тоннельный щит, оснащенный секторными затворами

г) Процесс передвижки щита. В скальных породах впереди щита пробивается штольня, по лотку которой укладывается бетонная подушка со втопленными в нее рельсами. По этим рельсам производится передвижка щита в зоне известняков. До передвижки ведется полная разработка забоя по всему проектному контуру тоннеля. Продвижение щита осуществляется при помощи гидравлических домкратов, упирающихся непосредственно в возведенную эректором тоннельную обделку.

При производстве щитовых работ ведутся необходимые геодезическо-маркшейдерские замеры, фиксирующие положение щита и продвижение его по проектному направлению трассы как в плане, так и в профиле.

д) Монтаж тоннельной обделки. В зависимости от материала тоннельной обделки (бетонные блоки, металлические или железобетонные тюбинги) вслед за передвижкой щита эректором производится монтаж тоннельного кольца из отдельных сегментов. Металлические тюбинги соединяются между собой болтами. Затем производится вдувание гравия и нагнетание цементного раствора для заполнения пустот за обделкой. Далее производится расчеканка швов свинцом и изоляция болтовых отверстий. При значительном горном давлении, где имеется опасность образования эллиптичности, производится установка необходимого по расчету количества металлических стяжек.

ЩИТОВАЯ ПРОХОДКА СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ

При поизводстве щитовых работ в слабых, водоносных породах под сжатым воздухом приходится сооружать шлюзовую перегородку с замурованными в ней шлюзами (материальными, людскими и аварийными) со всеми необходимыми трубопроводами. В зависимости от размеров щита и характера гидростатического давления принимается определенное расстояние между шлюзовыми перегородками при ступенчатой системе давления сжатого воздуха.

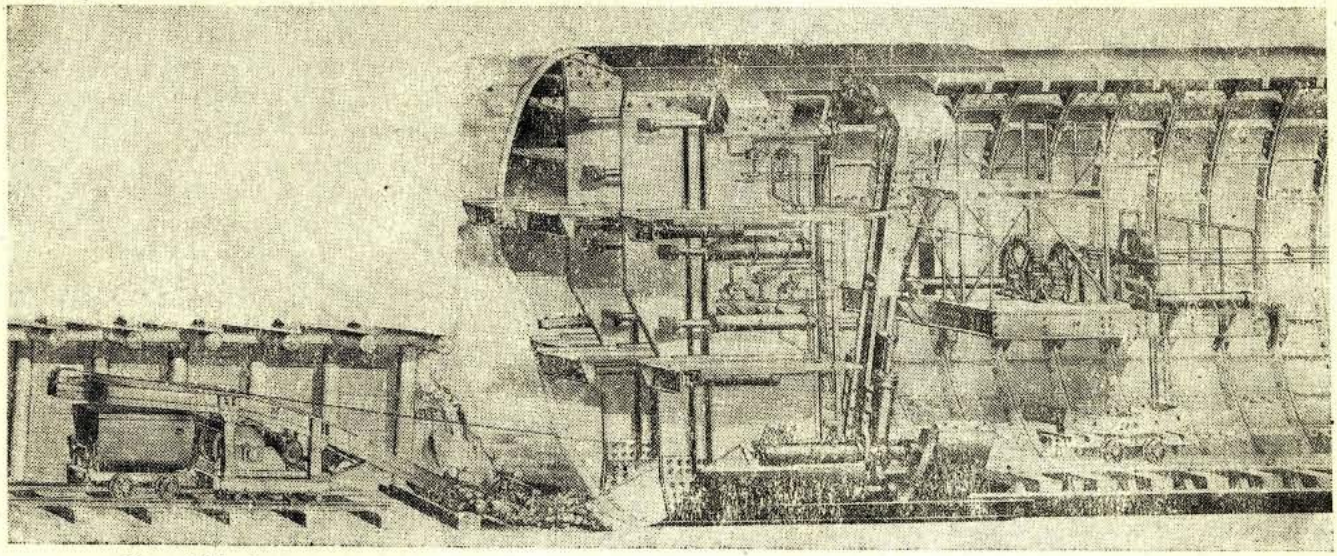


Рис. 313. Проходка тоннеля щитом с передовой штольней на 2-й очереди строительства Московского метрополитена

ПРОИЗВОДСТВО ЩИТОВЫХ РАБОТ

Задача заключается в том, чтобы при заданном геотехническом режиме пересекаемого массива правильно установить систему проходки, выбрать надлежащий тип щита. Практика щитовой проходки показала исключительное искусство ведения щитов по требуемой траектории.

Так, при пуске щитов навстречу на расстоянии 900 *м* друг от друга, при трассе и профиле, содержащих разные кривые, подъемы и уклоны, сбойка встречных щитов осуществлена при расхождении центров сечения на величину меньше 30 *мм*.

Столетняя практика щитовой проходки обогатила тоннельную технику существенно отличающимися друг от друга следующими типами конструкции щитов: щит замкнутого

контура, круглый эллиптический или других очертаний, щит с открытой грудью, кессонированный щит, щит с постоянным и выдвижным аванбеком, неразрывно связанная система щитов и экскаваторов турбинного типа, полущит незамкнутого контура и др.

Решающее влияние на выбор системы щита оказывают геотехнические условия пересекаемого массива, а равно размеры поперечного сечения самого тоннеля.

Щиты двухпутные эллиптического очертания хотя и имеют ограниченную площадь сечения в соответствии с требуемыми габаритами, но обладают тем отрицательным свойством, что в процессе проходки, в силу тенденции щита поворачиваться вокруг своей оси, претерпевают большие деформации. Это приводит иногда к тому, что при проходке щитом не достигается требуемое сечение тоннеля и приходится прибегать к сложным работам по реконструкции обделки.

Другой существенный недостаток эллиптических щитов заключается в том, что тоннельная обделка состоит из сегментов разных размеров и очертания, причем сегменты эти не являются взаимозаменяемыми.

Щиты двухпутного профиля круглого очертания хотя и являются удобными, но чрезвычайно невыгодны в экономическом отношении. При метрополитенных и железнодорожных габаритах получается излишняя выемка породы и излишние размеры облицовки.

Большие круглые щиты выгодно применять при подводных тоннелях для автомобильных дорог, когда нижние и верхние сегменты в мертвой части профиля используются для целей вентиляции. Для тоннелей метрополитена наиболее подходящими являются однопутные круглые щиты замкнутого контура.

Полущиты незамкнутого контура применяются в двух случаях: при продвижении щита по крепкой породе или при перемещении его по стенкам, выложенным в штольнях по системе опорного ядра.

Наиболее приемлемым является щит с открытой грудью замкнутого круглого контура, причем в случае необходимости он может быть кессонирован специальными шлюзовыми диафрагмами раздельного типа, при ступенчатой системе давления сжатого воздуха.

Пересечение щитом скалистых пород технически и экономически нецелесообразно. Но на такую проходку может вынудить природный характер напластований пород (рис. 314). Пересекая слои разнородных образований, можно натолкнуться на скальные участки, которые необходимо пройти, с тем чтобы снова врезаться в слабый грунт (рис. 315). В этом случае атака забоя производится через штольню при расширении профиля обычными тоннельными приемами, в зависимости от коэфициента крепости породы, пневматическими инструментами или методами взрывных работ. В последнем случае надо следить за тем, чтобы разлетающиеся во время взрыва куски породы не повредили корпуса щита, а в особенности гидравлической аппаратуры высокого давления (рис. 316, 317).

В нижней части разработанного профиля укладывается бетонная подушка толщиной около 10—15 *см*, в которую втапливаются два-три рельса, служащие направляющими для продвижения щита вперед на ход поршня.

При проходке щитом глинистых пород работы производятся следующим способом: на величину хода поршня щитовых домкратов вынимается центральная часть поперечного сечения тюба, а режущий край срезает остающуюся по периферии породу в процессе продвижения щита.

В практике применяется и такой метод. В забое ведется выборка породы центрального ядра размерами $1{,}5 \times 2$ *м*. Затем по периметру щита загоняются колья диаметром в 10 *см*, заведенные в лунки породы и упирающиеся в корпус щита.

При пуске в ход щитовых домкратов колья врезаются в глину, и отколотые куски породы падают на специально выдвинутые рабочие платформы щита.

При прокладке лондонских тюбов в глине применяется также и механическая разработка забоя при помощи специальных турбинных экскаваторов Прейса, скреперных экскаваторов системы Томпсона, тоннельной машины системы Уайтекера.

К существенным недостаткам щита, однако, относят то обстоятельство, что при проходке им нужно придерживаться установленного заранее постоянного сечения тоннельной обделки, между тем как неоднородные геотехнические условия требуют изменения элементов конструкции тоннельной обделки.

При сооружении тоннелей щитом в водоносных грунтах, в частности при подводном

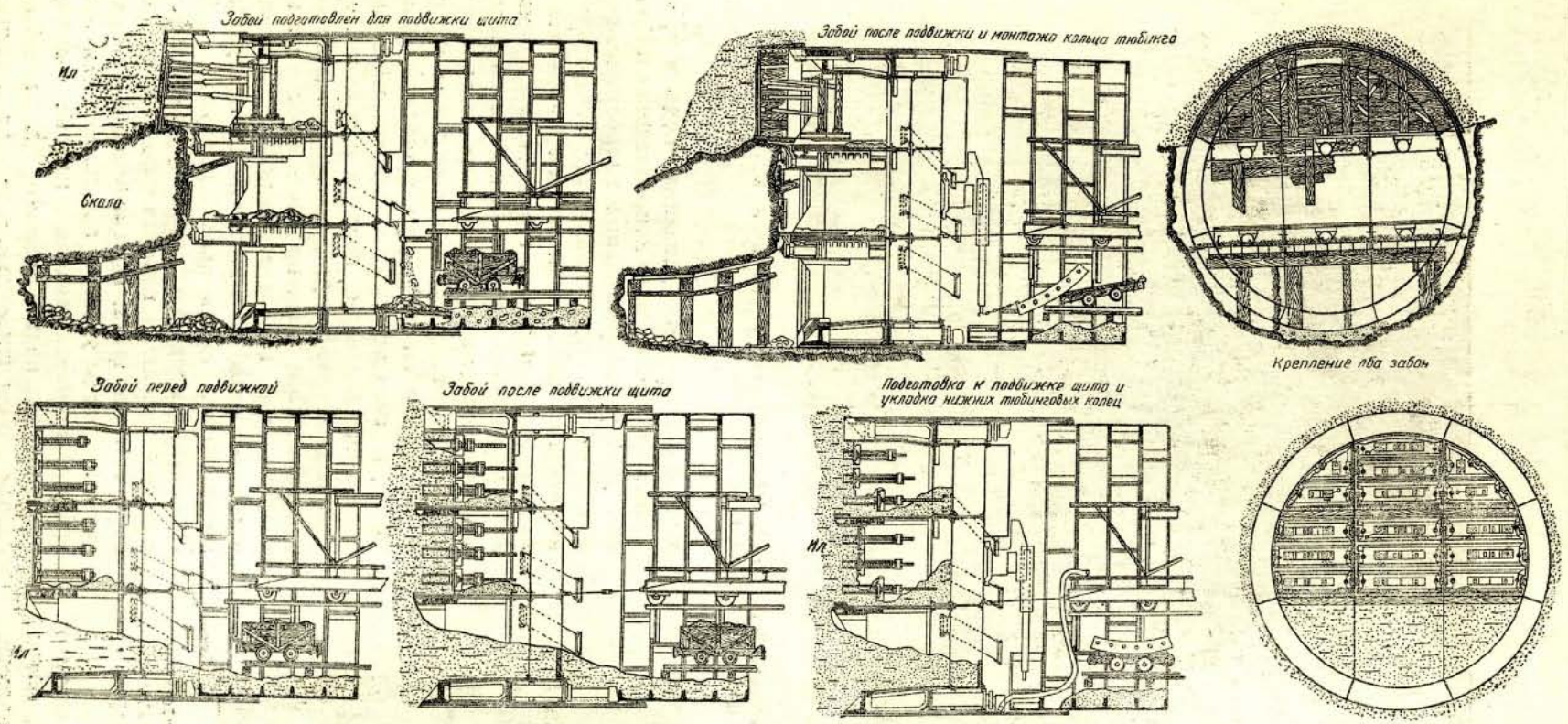


Рис. 314. Проходка щитом в смешанных породах

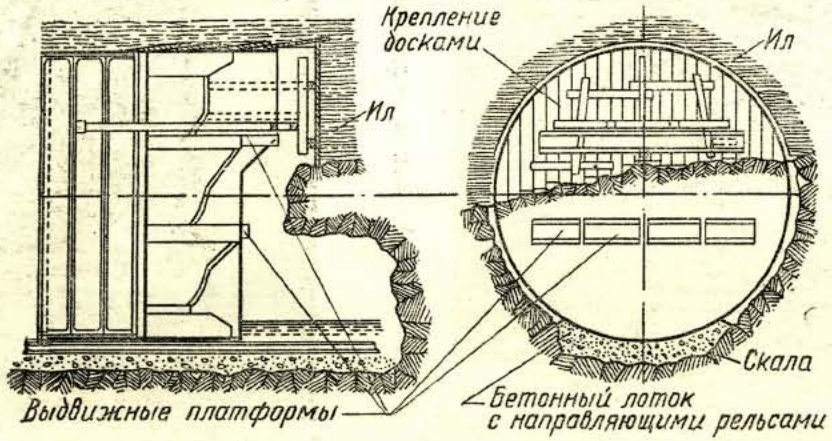


Рис. 315. Образование консоли из скалы при разработке забоя в смешанных породах

тоннелировании, работы ведутся преимущественно под сжатым воздухом. Сущность применения последнего при щитовой проходке заключается в том, что благодаря отжиму под давлением сжатого воздуха воды, поступающей в разработку, оказывается возможным работать в относительно сухих условиях. Учитывая, однако, высоту поперечного сечения проходимого тоннеля, приходится считаться с тем, что давление воды в кровле тоннеля возрастает по направлению к подошве его. Для уравновешивания гидростатического давления сжатым воздухом теоретически необходимо давление последнего изменять по закону треугольника. Практически, однако, это осуществить трудно. При балансировании сжатого воздуха по давлению воды в подошве получается избыточное давление воздуха в потолке, и он приобретает тенденцию прорваться наружу. В этом случае неизбежны понижение давления воздуха в тоннеле, прорыв воды и грунта в рабочие камеры и затопление работ. При ориентировке давления сжатого воздуха по гидростатическому давлению в кровле неизбежно интенсивное поступление воды снизу, при мокром, ползучем забое. В практике проходки принято уравновешивать давление сжатого воздуха по центральной, осевой линии щита. В зависимости от гидрогеологических условий повышают или понижают воздушное давление, идя на некоторое поступление воды снизу. В некоторых случаях воздушное давление балансируется

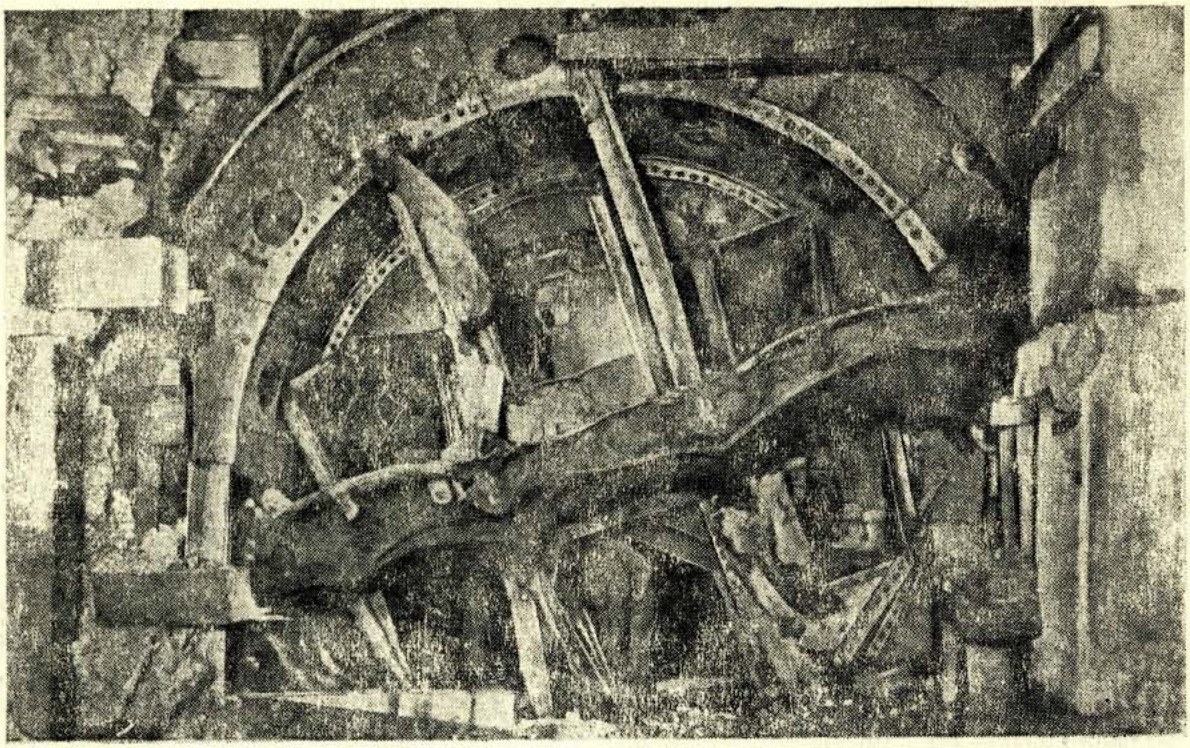


Рис. 316. Деформация подводного тоннельного щита, прошедшего под р. Гудсон в смешанных породах (скала и ил)

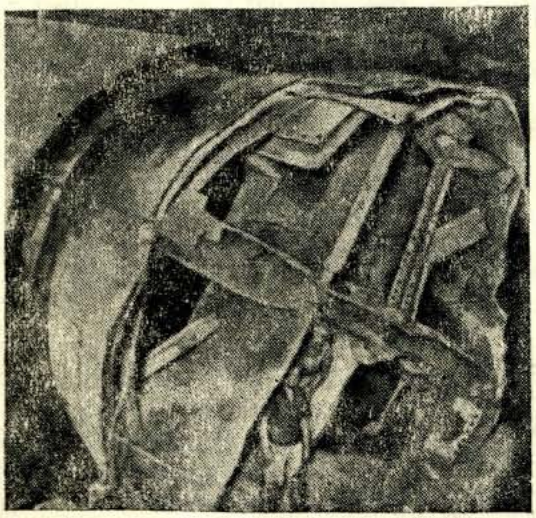
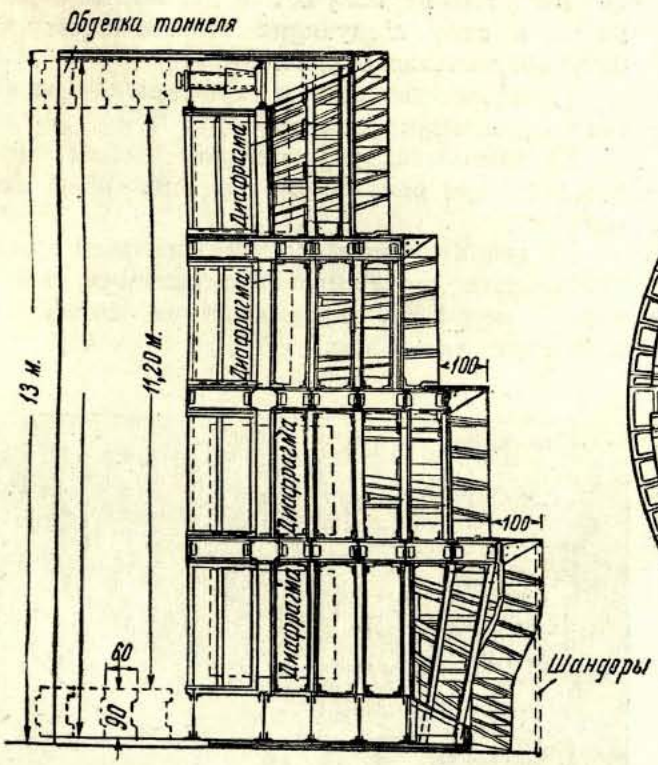


Рис. 317. Деформация щита (щит претерпел воздействие от производства 26 000 взрывов динамитом при проходке тоннеля через скальные породы)

на высоте $^1/_3$ диаметра тоннеля, считая от подошвы его. Для тоннелей больших сечений возможно применение кессонированных щитов при ступенчатом давлении по забою (рис. 318).

Лоб забоя при проходке щитом крепится специальной системой шандор и забойных домкратов. Разработка в этом случае производится с большой осторожностью.



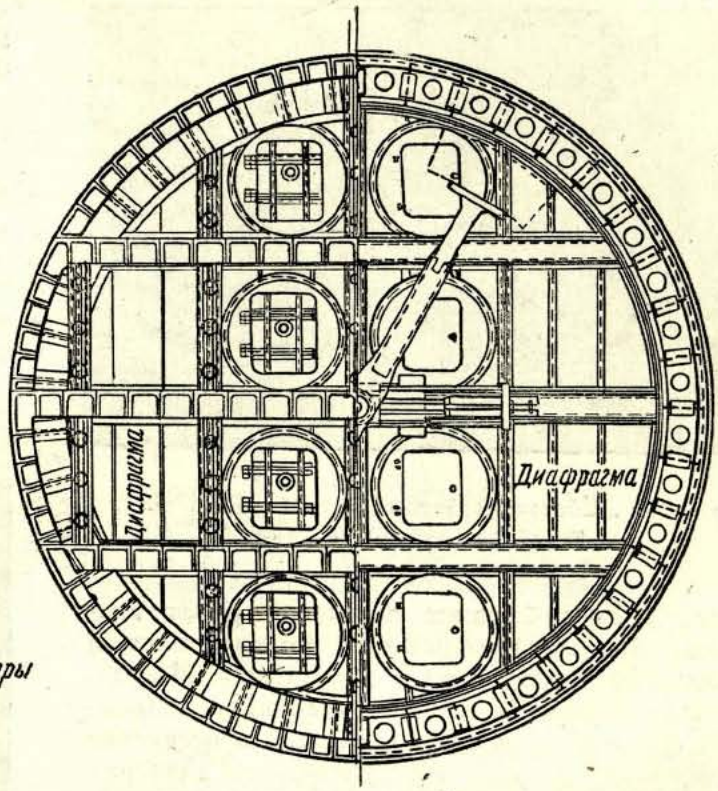


Рис. 318. Кессонированный щит при ступенчатом давлении по забою

Во избежание осадок грунт выбирается постепенно между отдельными шандорными досками.

В случае, когда опасаются значительной утечки воздуха, например в водопроницаемых, песчаных грунтах, прибегают к глине, которой обволакивается головная часть щита в процессе его продвижения. Иногда бурятся скважины, через которые производится глинизация либо нагнетание цементного или известкового раствора с целью уменьшения текучести грунта и сообщения ему некоторой связности.

Рабочая часть тоннеля с повышенным давлением отделяется от атмосферного давления специальными диафрагмами, в которые заделаны шлюзовые аппараты. Диафрагмы устраиваются из бетона, кирпича или металла непосредственно в шахте или тоннеле (рис. 319).

Для шлюзования материалов и породы предусматриваются материальные шлюзы, а для работающих — людские шлюзы (рис. 320). Кроме того, диафрагмы оборудуются спасательными шлюзами, всегда открытыми со стороны зоны сжатого воздуха. Эти шлюзы используются в экстренных случаях (при авариях, затоплении тоннеля); в них устремляются рабочие по специальным спасательным мосткам. Через диафрагму пропускаются трубопроводы низкого и высокого воздушного давления, гидравлические трубо-

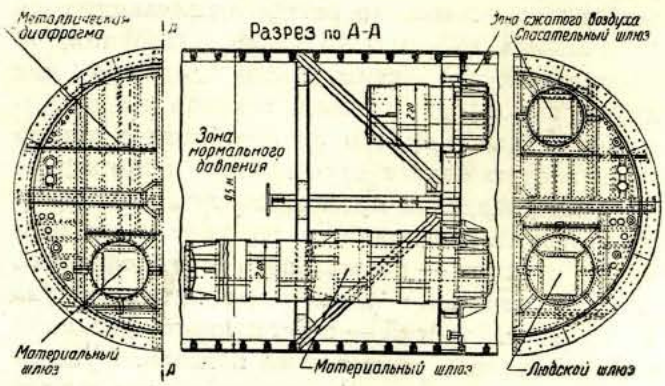


Рис. 319. Металлическая шлюзовая диафрагма

проводы для щитовых домкратов, осветительные и телефонные провода, кабели.

При проходке тоннеля под сжатым воздухом (в зависимости от сечения тоннеля и технических условий) через каждые 150—300 *м* приходится диафрагмы перемещать

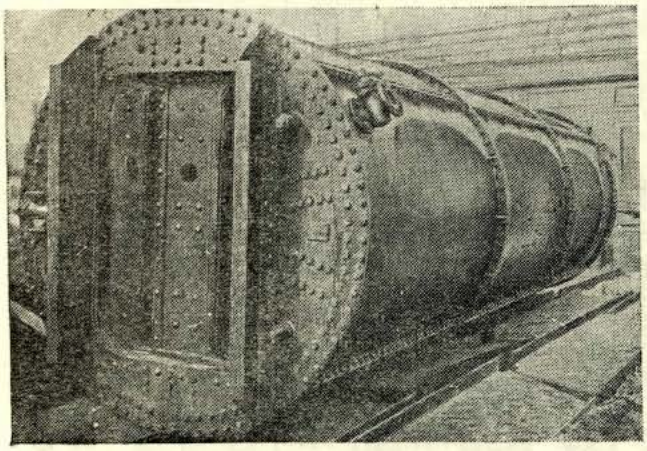


Рис. 320. Сборно-разборный материальный шлюз металлической конструкции

вперед. Во избежание остановки работ впереди заранее укладывается дополнительный комплект шлюзовых аппаратов. Иногда, в зависимости от местных условий и дальности щитовой проходки, устраивается несколько диафрагм при системе ступенчатого давления сжатого воздуха. Систему ступенчатого воздушного давления при щитовых работах легко пояснить на следующем примере: если на участке длиною в 500 *м* прокладка тоннеля ведется в зонах с резко отличающимися величинами гидростатического давления, то представляется невыгодным держать под двумя атмосферами весь тоннель на протяжении 500 *м*. Гораздо целесообразнее применить в этом случае ступенчатое пониженное давление, разделив промежуточными диафрагмами тоннельные работы на три зоны: первый участок — нормального атмосферного давления, второй — давления сжатого воздуха в 1,5 *ат* и третий — повышенного давления в 2 *ат*. Хотя в этом случае несколько увеличивается время на шлюзование, но все же эта система ступенчатого давления дает большой технико-экономический эффект, освобождая значительную часть тоннельных работ от повышенного воздушного давления.

На поверхности находится лечебный шлюз тупикового типа, служащий для помещения в нем людей, заболевших кессонной болезнью (рис. 321).

Опыт уменьшения объема сжатого воздуха в рабочей части тоннеля путем устройства шлюзовых диафрагм непосредственно в теле самого щита, как это применялось на Блэкволлском щите кессонного типа (в 1892 г.), не получил в дальнейшем развития в силу следующих осложняющих работу обстоятельств (рис. 322):

1) ограниченности и скученности забойного фронта щитовых работ;

2) опасности, угрожающей работающим в забое при внезапном прорыве воды или грунта;

3) значительного собственного веса щита, требующего для своего продвижения увеличенной мощности гидравлических домкратов и силовых установок;

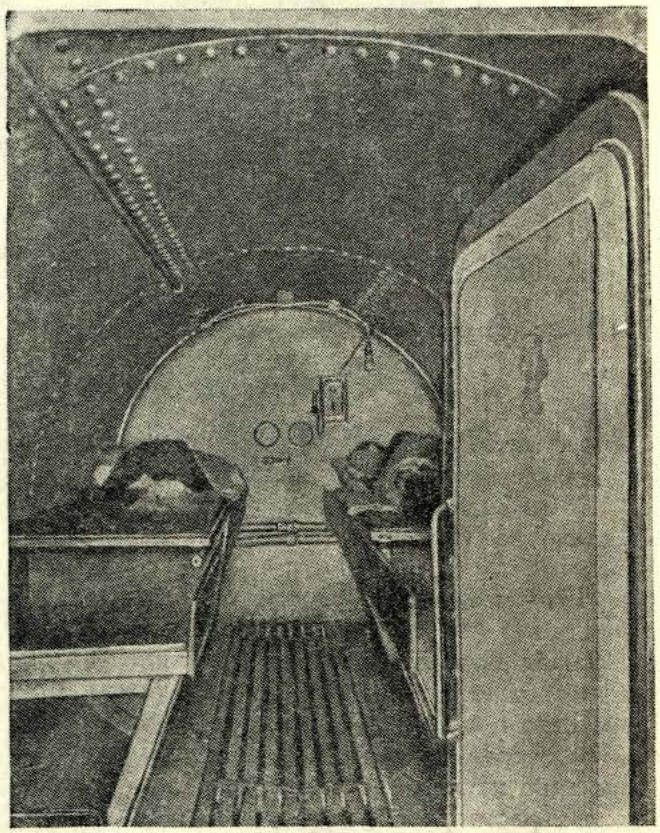


Рис. 321. Лечебный шлюз (внутренность шлюза)

4) необходимости проходить тяжелым кессонным щитом через те участки, где работы могут производиться при поддержке нормального водоотлива щитом легкого типа.

Наоборот, щит с открытой грудью в сочетании с раздельными шлюзовыми диафрагмами представляет гибкую систему, с которой можно проходить через массивы различных геотехнических свойств, однако лишь до величины воздушных давлений, не лимитирующих нормальную работу человека.

Сбойка встречных забоев щитов в водоносных грунтах производится следующим образом. Когда щиты подходят друг к другу на расстояние от 8 до 10 *м*, один из них останавливают, не прекращая, однако, подачи сжатого воздуха. Затем из одного забоя разведывательной штольни в другой пробуривают несколько горизонтальных скважин, через которые происходит постепенное уравнение сжатого воздуха в обоих забоях. Ни в коем случае при сколько-нибудь значительной разности давления нельзя итти навстречу штольнями, во избежание внезапного изменения давления сжатого воздуха, что связано с несчастными случаями.

Дальнейшие работы производятся продвижением лишь одного щита.

После сбойки щитов, в зависимости от характера грунтов, оболочки их хоронятся за обделкой или демонтируются, все оборудование щитов снимается и используется для других работ.

В зависимости от условий проходки щит в состоянии пройти до 2 *км* тоннеля.

Непременным условием при проходке щита под сжатым воздухом является наличие на поверхности резервных компрессоров и силовых установок.

В целях обеспечения безопасности людей, работающих под сжатым воздухом, весьма важно иметь два независимо действующих источника энергии.

В соответствии с гидрогеологическими особенностями пересекаемого щитом земляного массива впереди щита производится специальными бурами горизонтальное рекогноцировочное бурение на несколько метров для определения режима грунтов в забое.

Часто при производстве работ в нормальных условиях водоносные грунты могут внезапно прорвать забой. Разведывательным бурением эти неожиданности предупреждаются, и можно заранее принять все необходимые технические меры предосторожности.

При работе под сжатым воздухом рекогносцировочное бурение еще важнее, поскольку оно может заранее сигнализировать о возможном прорыве сжатого воздуха, с которым неизбежно связаны понижение давления в тоннеле, прорыв воды, грунта и затопление тоннельных работ.

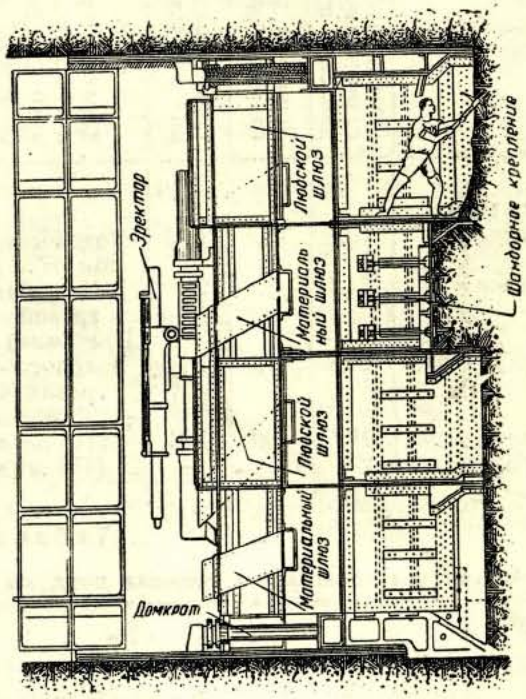


Рис. 322. Блекволлский тоннель (кессонированный щит)

Данные из практики, связанные с производством щитовых работ под сжатым воздухом, приведены в табл. 18, 19, 20.

Таблица 18

Таблица толщин каменных шлюзовых диафрагм при проходке тоннелей под сжатым воздухом

Наименование тоннеля	Внутренний диаметр (D) в *м*	Максимальное воздушное давление в *кг/см²*	Материал диафрагмы	Толщина диафрагмы в *м*	Отношение толщины к диаметру $K = \frac{H}{D}$
Блекволл	7,62	2,60	Бетон	3,81	0,50
Бекер-Уотерло	3,66	2,46	Кирпич	2,45	0,67
Гринвич	3,37	1,97	»	2,36	0,70
Мерси	2,74	1,90	»	1,89	0,69
Глазго (Харбор)	3,35	1,62	»	1,81	0,54
Уотерло-Сити	3,67	—	»	1,76	0,48
Ли	3,37	1,05	»	2,43	0,72

$$H = (0{,}48 \backsim 0{,}72)\, D$$

Таблица 19

Сжатый воздух при щитовой проходке

Наименование тоннеля	Максимальное гидростатическое давление в *м*	Защитная кровля грунта в *м*	Воздушное давление в *кг/см²*	Характер грунта и объем подаваемого воздуха (*м³/мин*)
Сити—южн. Лондон . . .	10,4	12,8	1,02	Водоносный песок (47 *м³/мин*)
Блекволл . .	24,4	1,5	2,40	Водоносный гравий (283 *м³/мин*)
Бекер-Уотерло	21,4	5,5	1,97	Водоносный гравий (46—93 *м³/мин*)
Гринвич . . .	21,3	9,1	1,41	(141 *м³/мин*)
Ротергайт . .	29,5	—	—	(472 *м³/мин*)

Таблица 20

Объем всасываемого в тоннель воздуха

Внешний диаметр тоннеля в *м*	Число работающих тюбистов в зоне сжатого воздуха	Объем воздуха, всасываемого в минуту, в *м³*	Примечание
1,5	7	27	
3,0	11	41	Средняя норма на одного человека — 3,76 *м³/мин*
4,6	19	71	
6,1	30	113	
7,6	44	165	
9,1	61	230	
10,7	82	310	

При производстве щитовых работ необходимо следующее основное оборудование:

1) компрессорная установка низкого давления — до 3 *ат*,

2) компрессорная установка высокого давления — до 9 *ат*,

3) гидравлические установки,

4) шлюзовые диафрагмы и аппаратура,

5) рабочие платформы с приспособлениями для нагнетания за обделку,

6) телефон и освещение,

7) спасательный экран.

Экран является необходимым при производстве щитовых работ по сооружению подводных тоннелей, а равно там, где ожидаются внезапные прорывы воздуха. Экран, состоящий из металлических листов толщиной в 6 *мм*, располагается в верхней части тоннеля и снабжен дверью в месте прохода по спасательным мостикам. При подъеме воды в тоннеле образуется воздушный запор, не позволяющий заливать место у спасательных шлюзов. Экран перемещается в соответствии с продвижением щита, выдерживая расстояние порядка 30 *м* (рис. 323).

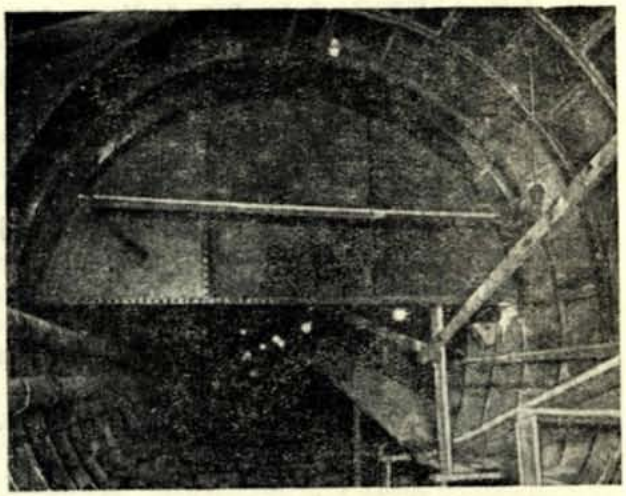


Рис. 323. Спасательный экран в тоннеле

При прокладке подводных тоннелей приходится учитывать и колебание горизонта воды в реке, так как оно влияет на регулирование воздушного и гидростатического давлений. Диапазон колебаний при подводном тоннелировании под р. Темзой был около 3,5 *м*.

Применяемое на практике оснащение щитов особыми приспособлениями в виде дверей, барьерных ящиков, секторных затворов и ограждения работ на случай прорыва воды и затопления тоннеля в процессе работ по экскавации грунта не всегда обеспечивает немедленное плотное закрытие забоя в период прорыва (рис. 312).

При большой воздухопроницаемости пересекаемых грунтов применяется штукатурка поверхностей по сетке известковым или цементным раствором. Хорошие результаты дает в этом случае и запрессовка глиной у аванбека щита.

При работе под сжатым воздухом категорически запрещается применение сена, соломы, пакли и других легко воспламеняющихся материалов. От малейшей искры неизбежны катастрофы, пожары и обвалы уже сооруженной части тоннеля.

Для удобства ведения геодезическо-маркшейдерских работ под сжатым воздухом приспосабливается специальный инженерный шлюз. При ограниченном поперечном сечении тоннеля инженерный шлюз устраивается путем удлинения спасательного шлюза, с оборудованием его дополнительными дверями.

При работе двумя щитами в двух параллельных тоннелях может встретиться ограниченная зона гидростатического давления, при которой нехватает наличной мощности компрессоров. В этом случае целесообразно приостановить работу одного щита и провести другой щит через зону, требующую повышенного расхода воздуха. Желательно только шлюзовые диафрагмы обоих параллельных тоннелей располагать в одном поперечном сечении.

Для иллюстрации щитовых работ приведем данные по сооружению деривационного тоннеля в Детройте (1937 г.), где в процессе производства достигнуты исключительно высокие скорости проходки.

Тоннель размерами 5,7 *м* был пройден щитовым методом при обделке из бетонных блоков. Достигнутая скорость проходки составляла 15 *м* в сутки при четырех сменах по 5 часов. Тоннель проходился преимущественно в слабых грунтах под сжатым воздухом. Почти каждый час собиралось новое кольцо тоннельной обделки из блоков толщиной 45 *см* и шириной кольца по оси тоннеля 75 *см*. В некоторые дни производилось до 22 подвижек щита с укладкой до 27 колец. При этом достигалась максимальная скорость проходки до 20 *м* в сутки. В некоторых случаях впереди щита велась передовая штольня.

Сравнивая проходку этого тоннеля с тоннелем под р. Гудсон, следует указать, что в то время как при проходке Мидтаунского тоннеля слепым методом в забой поступало лишь от 20 до 30% поперечного сечения, в тоннеле Детройта приходилось убирать грунт, поступающий в забой, 100% профиля. Это в значительной степени затрудняло решение вопроса транспортирования породы при одновременной подаче материалов, необходимых для форсированной проходки тоннеля. Задача осложнялась тем, что проходка велась под улицами, где не допускается осадок поверхности.

Общая длина тоннеля составляла более 3 *км*. Обделка тоннеля из бетонных блоков была применена по системе О. Рурка. Щит длиной 4,5 *м* имел впереди аванбек и закрытую грудь с шестью окнами, размерами $0{,}6 \times 0{,}6$ *м*, двери которых имели гидравлический привод. Вслед за щитовыми работами велось нагнетание и внутренняя отделка тоннеля.

За одну подвижку щита убиралось до 40 вагонеток породы. В связи с тем, что щитовые работы велись под сжатым воздухом, необходимо было обеспечить шлюзование породы. Были устроены специальные шлюзы при металлической подвижной перегородке. В зоне нормального давления вагонетки поднимались наверх по шахте; затем поступали в опрокиды.

Следует отметить, что в период щитовой проходки имели место осадки поверхности улиц, которые доходили до 2 *см*. В некоторых местах осадки проявлялись при кровле над шелыгой свода тоннеля в 6—7 *м*.

2. ЩИТЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

В практике тоннельного строительства различаются следующие типы щитов специальных систем.

а) *Система Халингера.* Для сооружения тоннелей железнодорожных, деривационных и канализационных Халингер выработал ряд приемов подводного тоннелирования специальными типами щитов при обделке из бетона, каменной кладки и металла. Первый подводный тоннель под руслом р. Шпрее для трамвайного движения от Шлезишер Банхоф к парку Трептоф (Берлин), протяжением в подводной части 195 *м*, заложенный в водоносных песках, был сооружен щитом. Особенностью примененного здесь щита явился выступающий на 3,6 *м* аванбек при общей длине щита в 6,1 *м* и основного корпуса щита понизу в 5,5 *м*. Аванбек устроен был в соответствии с углом естественного откоса грунта, который можно было выбрать, не поддерживая лба забоя шандорами. В условиях подводного тоннелирования, где вопросу осадок не придают особого значения, такой тип щита тогда не вызывал возражений. Щит передвигался шестнадцатью гидравлическими домкратами, упираясь в выкладывавшуюся металлическую оболочку из стальных сегментов. Строители этого тоннеля отдали предпочтение стали перед чугуном потому, что последний допускает значительно меньшие напряжения и может дать трещины от усиленного не-

равномерного нажима домкратов. (Однако этот взгляд не разделяется полностью в мировой практике.) Для предохранения стали от коррозии устраивался внутренний бетонный слой в 12 *см*, а затем путем нагнетания образовывалась внешняя защитная оболочка в 8 *см*. Среди техников не было, впрочем, уверенности в достижении сплошного внешнего цементного покрова.

Этот тоннель диаметром 4 *м* залегал на 12 *м* от поверхности воды в р. Шпрее, при толщине слоя грунта от дна реки до шелыги свода в 3 *м*.

Щитовые работы велись под сжатым воздухом. Конструкция щита с поперечными диафрагмами позволяла в необходимый момент кессонировать щит.

Щиты Халингера отличаются по своей системе созданием обделок из бетонной и каменной кладки. По методу Халингера, вне зависимости от формы поперечного сечения, в оставшееся между грунтом и кладкой пространство специальными домкратами щита запрессовывается слой глины или бетона. Этим слоем ослабляется влияние домкратов на целость кладки и, с другой стороны, локализуются осадки грунта, которые могут распространяться до поверхности.

В хвосте щита устанавливается на расстоянии 1—1,5 *м* друг от друга ряд внеш-

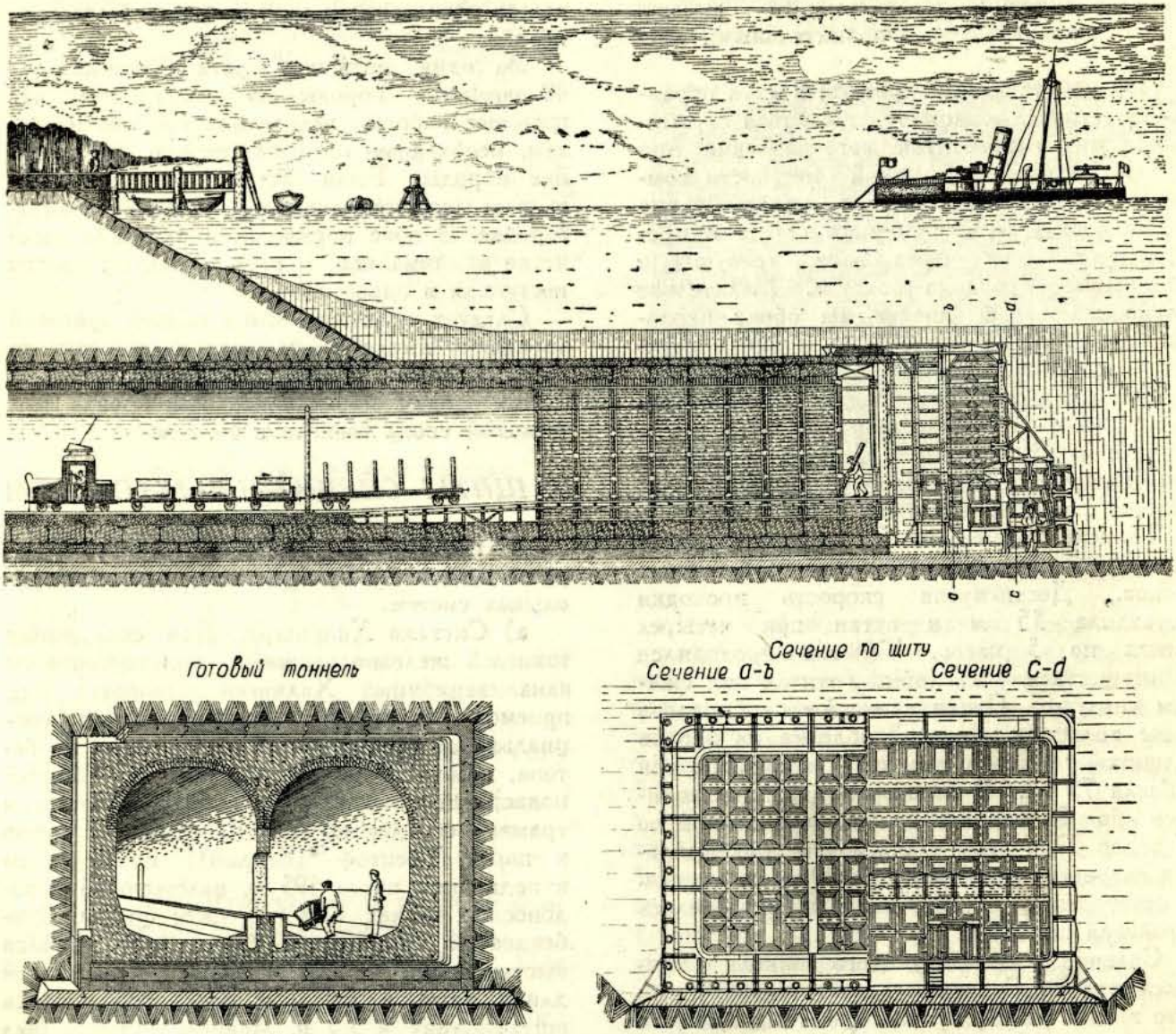


Рис. 324. Специальный прямоугольный щит для подводного тоннелирования

металлических рам, между которыми заводятся железобетонные или деревянные затяжки. Образуемые поверхности оклеиваются мягкой битуминозной изоляцией.

В случае особых условий пересекаемого грунтового массива и агрессивных вод, могущих разрушающе влиять на бетонную кладку, производится запрессовка за обделку специальных изолирующих материалов (например, асфальта). Запрессованный между обделкой и породой мягкий изолирующий слой сообщает щиту весьма благоприятные условия маневрирования при вписывании в кривые, тогда как жесткая металлическая или каменная обделка, зажимая хвост щита, препятствует повороту его без повреждений или деформаций выведенной обделки.

При проходке тоннеля под водой в песчаных, гравелистых грунтах, где возможна большая утечка сжатого воздуха при защитной кровле грунта в 1—2 *м*, обычный щитовой прием проводить весьма затруднительно. В этом случае Халингер предлагает следующий чрезвычайно смелый прием тоннелирования: под водой по трассе прорывается траншея до проектной отметки подошвы тоннеля. Далее прямоугольный водонепроницаемый кессонированный щит из двух оболочек продвигается гидравлическими домкратами. Сзади производится установка системы металлических рам и бетонируется тело тоннельной обделки при оклеечной изоляции. Через щит в подошву нагнетается плотный бетон, служащий основанием для продвигающегося щита и для самой тоннельной обделки (рис. 324). Чрезвычайно существенный момент — контакт оболочек с тоннельной обделкой, которая является угрожающим местом в отношении прорыва воды в тоннель. Другим важным моментом является обеспечение щита и тоннеля от всплытия вверх.

Необходимо проектировать вес щита и тоннельной обделки превалирующим над подъемной силой воды.

При проходке под сжатым воздухом вопрос осложняется наличием воздушного противодавления. При спокойном режиме воды в реке можно вести работы под водой при помощи кессонированной шахты — щита с обратным аванбеком. Этот щит устраивается полностью водонепроницаемым. Соединение его с укладываемой тоннельной обделкой обеспечивается специальными затворами. В остальном работа такого щита производится порядком, изложенным выше.

б) *Герметический щит ВЛМ-I системы инж. В. Л. Маковского* для проходки тоннелей на больших глубинах, в условиях значительного горного давления и гидростатического напора в неустойчивых, плывунных породах.

Система герметического щита ВЛМ-I для работы на больших глубинах основана на следующих принципах: мощный металлический корпус имеет впереди развитый нож, лобовую сферу № 1 и диафрагмы № 2 и № 3, образующие две камеры (*А* — головную, *Б* — гидравлический шлюз), которые в зависимости от размеров щита подразделяются на ярусы (рис. 325).

При работе в плывунах и слабых, неустойчивых породах, поддающихся выжиманию «слепым» методом, в лобовой сфере № 1 открываются затворы секторов, работающие в плоскости профиля забоя, и грунт при продвижении щита гидравлическими домкратами заполняет камеру между сферой № 1 и диафрагмой № 2. Затем затворы секторов в сфере № 1 закрываются и грунт рефулером удаляется из головной камеры *А*.

При работе в грунтах, требующих принудительного размыва, последний производится гидравлически с доведением давления гидромониторов до 50 *ат*. Трубы для воды заложены в корпусе щита по периметру ножевой части и по лобовой сфере № 1.

При встрече с крупными валунами и необходимости подступа непосредственно к забою в щите используются приемы водолазного дела. Через гидравлический шлюз *Б* водолаз входит в головную камеру *А*, которая может быть даже полностью заполнена водой. Приоткрывая затворы секторов лобовой сферы *А*, водолазу представляется возможным удалять встреченные препятствия и в случае необходимости производить подготовку для взрывов и взбучивания валунов в забое.

Процесс шлюзования и вышлюзовывания производится водолазом обычным порядком непосредственно в воду. Рабочая камера оборудуется иллюминаторами и рефлекторами.

За диафрагмой № 3 в хвосте щита эректором производится монтаж тюбингов тоннельной обделки. Строительный зазор между хвостом оболочки и внешней обделкой из тюбингов закрывается круговым упругим металлическим затвором, обеспечивающим от прорыва через этот зазор воды. На расстоянии 20 *м* от щита находится спасательный экран, а на расстоянии 40 *м* — передвижная

металлическая перегородка с аварийным шлюзом, всегда открытым со стороны щита, куда по спасательным мосткам могут укрываться тоннельщики в случае внезапной необходимости. Эта же перегородка ограждает готовый тоннель от непредвиденных прорывов.

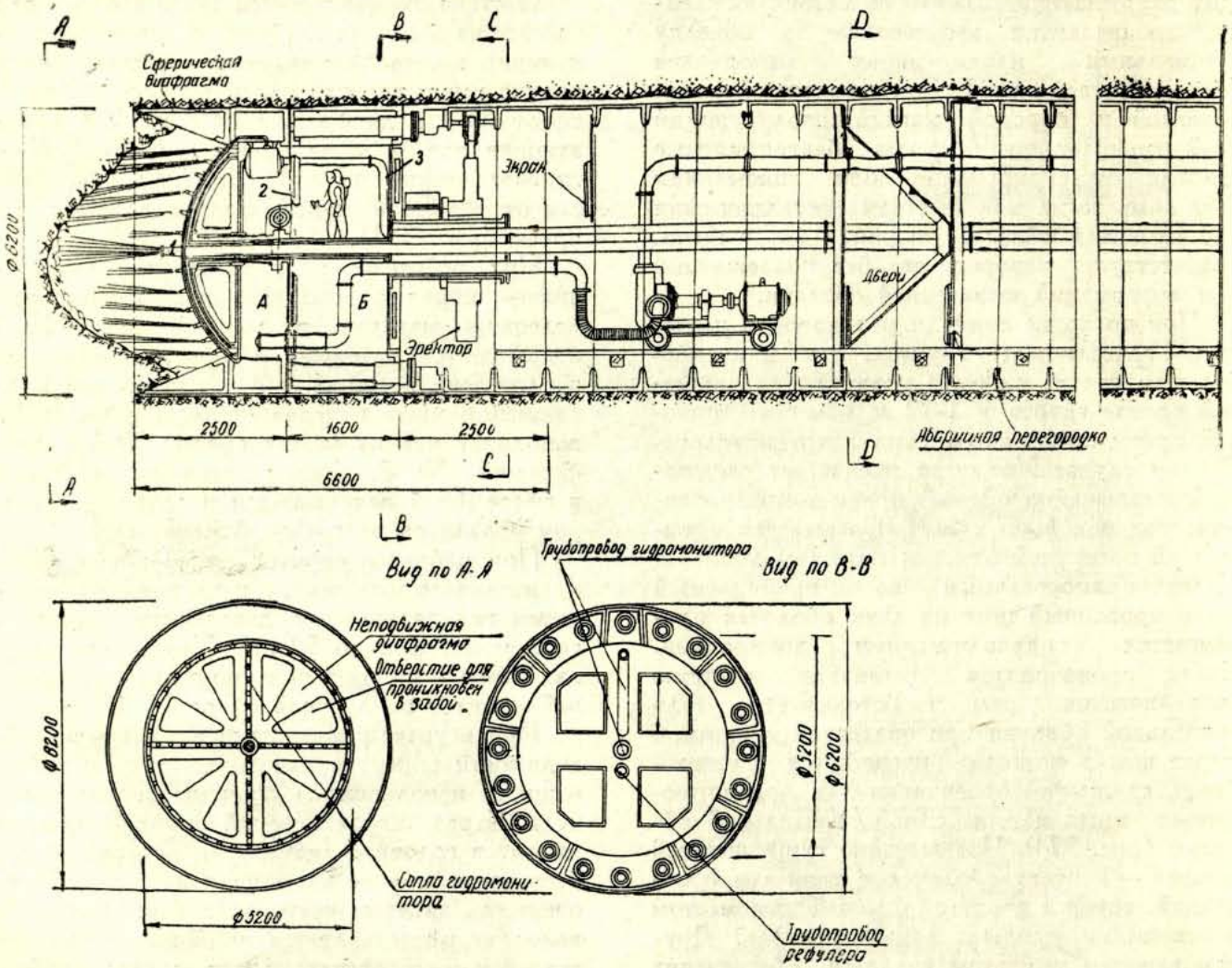


Рис. 325. Герметический щит ВЛМ-I (системы В. Л. Маковского)

Настоящая система герметического щита дает возможность полностью освободиться от сжатого воздуха и довести число людей в тоннеле к минимуму, выводя их за пределы щита и тем самым обеспечивая максимальную безопасность предпринимаемых работ в условиях осложненного геотехнического режима, недоступного для других систем щитов.

Герметический подводный щит ВЛМ-I с дублированной грудью, образующей головную камеру и гидравлический шлюз, обеспечивает безопасное ведение тоннельных работ в водоносных, неустойчивых породах при значительном горном давлении и гидростатическом напоре.

Грунт поступает в головную камеру *А* в процессе продвижения при открытой лобовой сфере № 1 и при закрытой диафрагме № 2. Таким образом, поступление грунта ограничивается объемом головной камеры и тем самым исключается возможность прорыва забоя и затопления тоннеля. При этом обеспечивается дозировка породы и исключается опасность выплывов и осадок на поверхности.

При встрече с породами, требующими принудительного размыва, автором применяется специальный прием гидравлического вруба гидромонитором, направленным к центру, при котором происходит лишь размыв центрального ядра сечения по лбу забоя. Порода по периферии тоннеля поступает

в лобовую камеру при продвижении щита вперед. Этим приемом исключается возможность размыва породы и «обыгривание» грунта вокруг корпуса щита, могущего нарушить равновесие окружающих его земляных масс.

Щитовые работы освобождаются от сжатого воздуха, что открывает возможность работать на больших, ранее недоступных глубинах, при значительном гидростатическом напоре, $H > 40$ *м*. Уравновешивание последнего потребовало бы давления, которого не

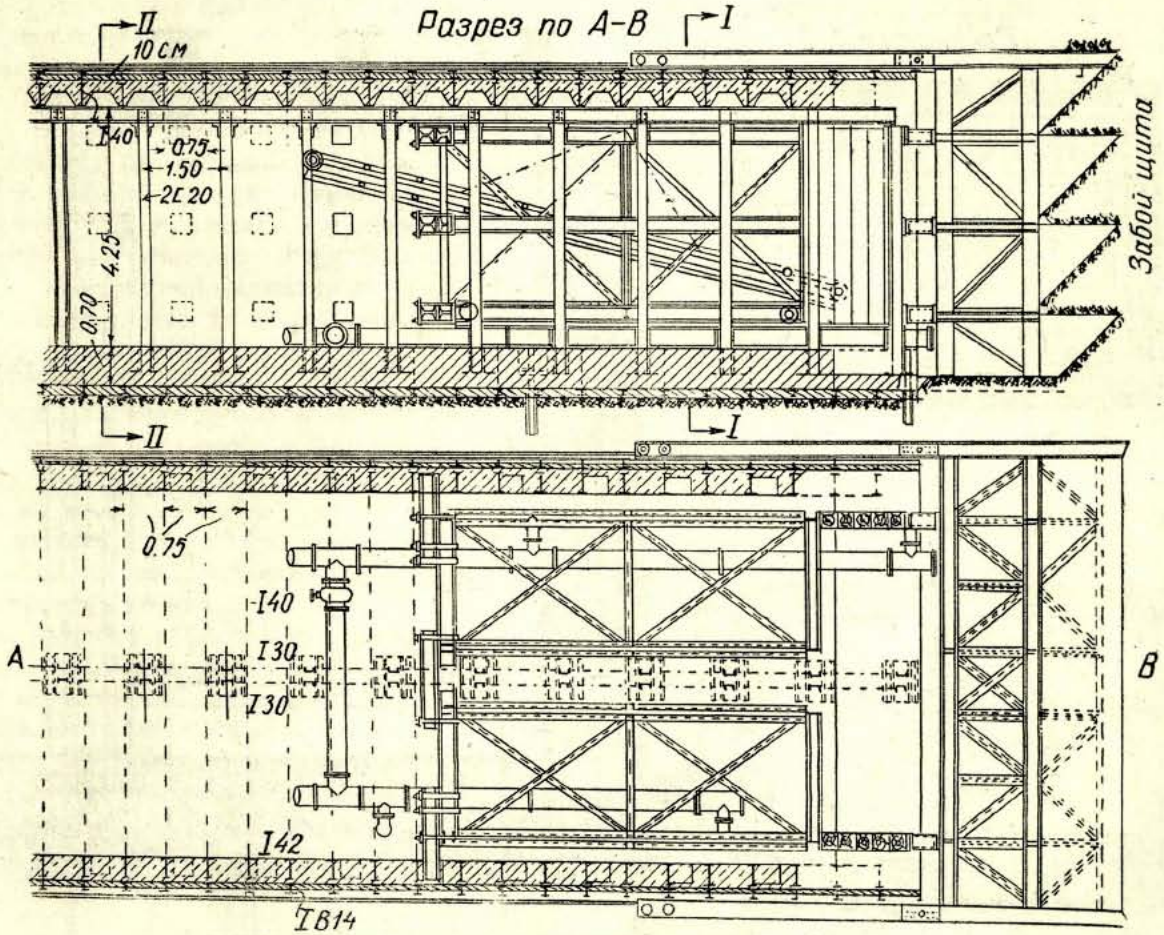


Рис. 326 а. Проходка тоннеля щитом системы Олитша

На основании изучения автором щитового опыта можно утверждать, что существующие за границей типы подводных щитов с закрытой грудью, оснащенные секторными, шандорными и другими затворами, являются паллиативными, так как не решают вопроса. В момент прорыва и устремления плывуна одни затворы обычно являются недостаточными, и грунт с водой устремляется непосредственно в тоннель, катастрофически заполняя подземные выработки.

Преимущества щита ВЛМ-I заключаются в обеспечении максимальной безопасности ведения процесса подводного тоннелирования, при этом исключается возможность осадок поверхности благодаря дозировке грунта в головной камере.

в состоянии выдержать человеческий организм.

в) *Система Олитша.* Инж. Олитш предложил проект проходки тоннелей метрополитена прямоугольных сечений щитом оригинального типа при мелком заложении. В соответствии с сечением сооружаемого тоннеля вскрывается шахта до проектной отметки подошвы тоннеля, после чего начинается монтаж конструкции щита и подвижной упорной тележки из элементов металлических балок (рис. 326 а и б). В хвосте щита монтируют металлические прямоугольные рамы, между которыми закладываются железобетонные затяжки, оклеиваемые мягкой, битуминозной изоляцией из гудронированного картона на горячей клебемассе. Ставят металлические

кружала и возводят бетонную обделку тоннеля. Затем начинают разбирать крепление и породу впереди щита. Приведя в действие винтовые или гидравлические домкраты, расположенные между основной рамой щита и упорной тележкой, щит продвигают вперед на брусьев клинообразного сечения. Кроме того, для облегчения поворота щита основные элементы аванбека снабжены шарнирами, а стены оболочки щита—отверстиями для выемки породы с боков. Оставшееся пространство между балками и корпусом щита и породой

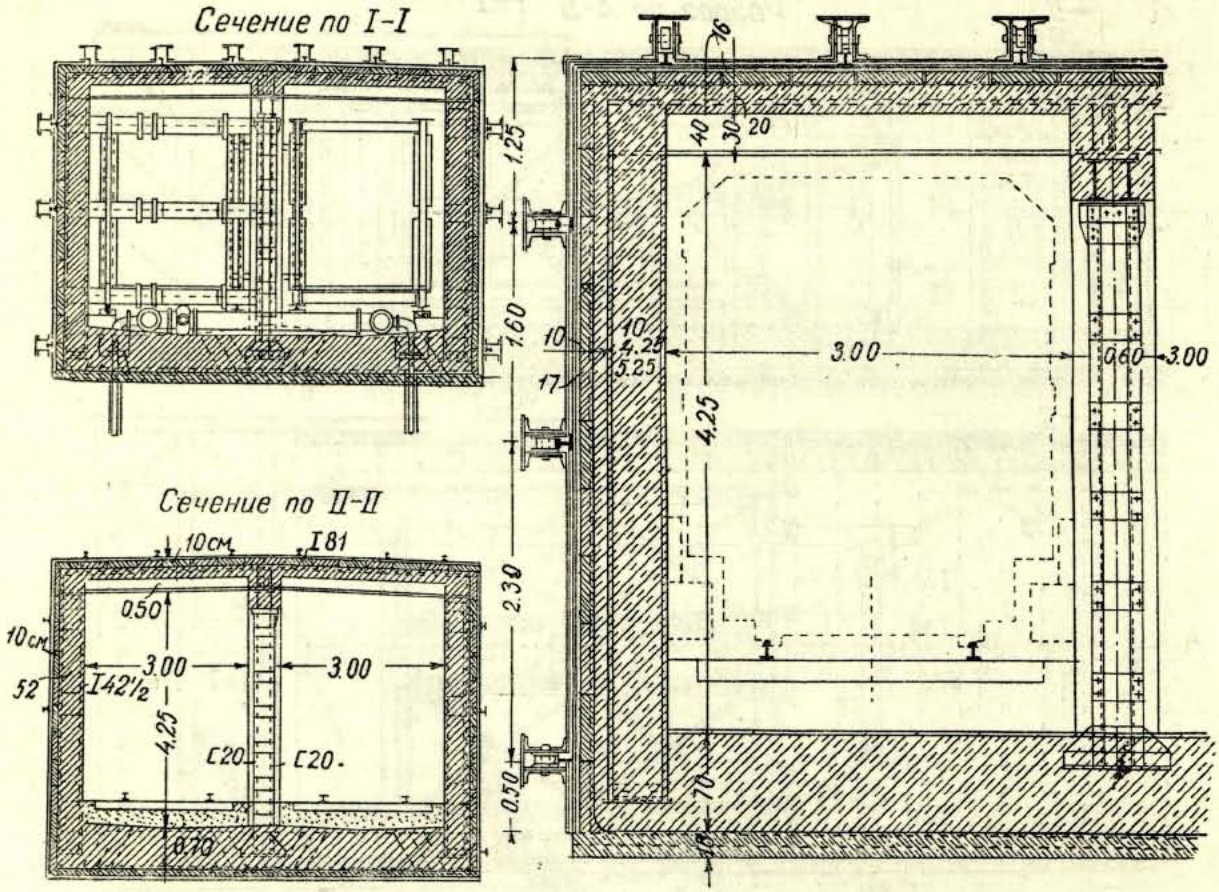


Рис. 326 б. Щит системы Олитша (поперечное сечение тоннеля)

ход поршня. После этого вставляют временные деревянные упорные брусья между тележкой и поддоном домкратов и продолжают продвижение щита вперед. После нескольких подвижек щита и закладки упорных брусьев на 1,50—2 *м* приступают к установке металлических рам и заведению затяжек. По окончании изоляционных работ устраивают опалубку и бетонную обделку тоннеля. В обделке оставляют люки, куда заводятся металлические приспособления тележки. Таким образом, продвижение щита производится без нажима на свежий бетон. Направляющие балки щита при помощи роликов перемещают по рельсам с внешней стороны тоннеля. Вписывание в кривые и изменение направления щита производится постановкой упорных

заполняется через специальные трубки крупным песком и цементным раствором под давлением.

Хотя описанный прием инж. Олитша содержит ряд существенных технических недостатков, он все же заслуживает внимания. Этот прием может послужить стимулом для дальнейшей разработки наиболее целесообразных способов щитовой проходки тоннелей мелкого заложения.

г) *Система инж. Гаага.* Исключительный интерес представляют специальные приспособления для проходки подводных тоннелей, запроектированные инж. Гаагом.

Одним из основных методов по сооружению тоннелей в водоносных грунтах является проходка под сжатым воздухом. При устрой-

стве кессонных оснований под инженерные сооружения в слабых грунтах воздух сравнительно равномерно распределяется по отметке ножа опускаемого кессона. Но при ходе этого же кессона в горизонтальном положении создаются условия, при которых регулирование воздушного давления по отношению к гидростатическому становится весьма затруднительным. Затруднения эти выявляются тем в большей степени, чем больше диаметр прокладываемого тоннеля. Причем, в зависимости от условий балансирования давлений, сжатый воздух проявляет иногда, в особенности в условиях воздухопроницаемых грунтов, стремление вырваться наружу.

Инж. Гааг на основании своих исследований приходит к выводу о возможности вести проходку при помощи щита, который позволяет в пределах аванбека держать естественный откос и, кроме того, уменьшать размеры этого откоса за счет устройства ряда горизонтальных платформ, разделяющих заложение откоса на ряд мелких уступов. Это может быть достигнуто устройством выдвижной части аванбека по основному, щитовому цилиндрическому корпусу.

При наличии в щите откоса, соприкасающегося непосредственно с грунтовой водой и глухой перегородкой, образующей гидравлический затвор (барьерный ящик), создаются условия, препятствующие утечке воздуха и

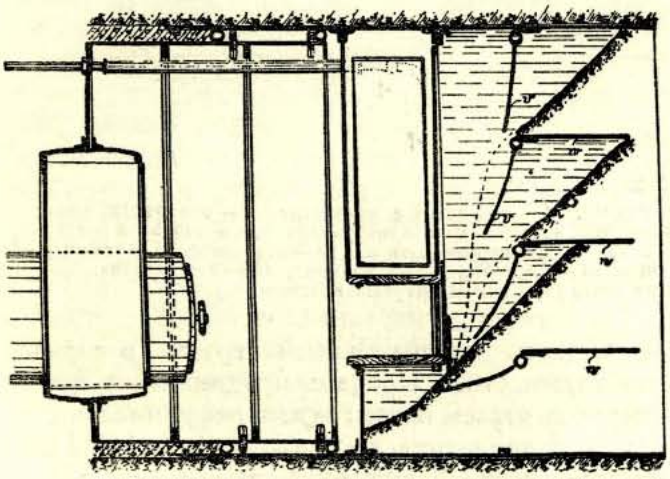


Рис. 327. Щит системы Гаага

распространению воды в тоннеле непосредственно. Продвижение щита осуществляется гидравлическими домкратами. Естественный откос грунта находится внутри аванбека, при этом исключается возможность выпуска большого объема грунта, что в городских условиях обычно приводит к значительным осадкам и к катастрофическим результатам в отношении сооружений подземного хозяйства и городских строений. Поступательное движение щита должно производиться рядом гидравлических домкратов таким порядком, чтобы естественный откос грунта всегда находился в пределах аванбека (рис. 327).

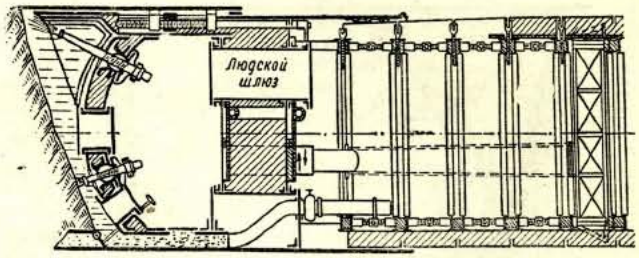


Рис. 328. Щит системы Гаага с обратным аванбеком

В дальнейшем инж. Гааг запроектировал новую конструкцию щита, в котором люди совершенно удаляются из пределов щитовой камеры (рис. 328 и 329).

Конструктивные особенности этого щита заключаются в следующем. Корпус представляет собой мощную металлическую конструкцию с закрытой, сферического очертания, грудью; сверху находится выдвижной металлический аванбек. Внутри основного корпуса концентрически установлен вращающийся вокруг продольной оси тоннеля второй щитовой корпус. В сферической перегородке устроены двери (*1*), через которые можно проникнуть в забой в случае необходимости, например при проходке в сухих условиях или при положении горизонта грунтовых вод, позволяющем вход в передовую камеру (*2*). У подошвы нижней части сферической перегородки расположено отверстие (*3*), которое служит для выборки грунта в передовой камере под углом естественного откоса. Если условия физико-механических свойств грунта позволяют вести работу при помощи рефулирования, то грунт отсасывается по трубам через подводящее отверстие (*4*). По поверхности сферической лобовой части щита имеется ряд отверстий (*5*), через которые вставляются механические инструменты для разработки забоя. При встрече с выклиниванием пород значительной крепости порода может быть с помощью ударных инструментов разрыхлена, спущена на подошву камеры и убрана. Эти пневматические инструменты за-

делываются в сальниках, входящих непосредственно в отверстия (5). Расположение отверстий дает возможность подойти к любому пункту забоя. Внутренний цилиндр имеет враще-

ней части разрыхляют грунт, который устремляется вниз и убирается путем рефулирования. Отверстия (8) во внутренней части щита и прорези (9) дают возможность

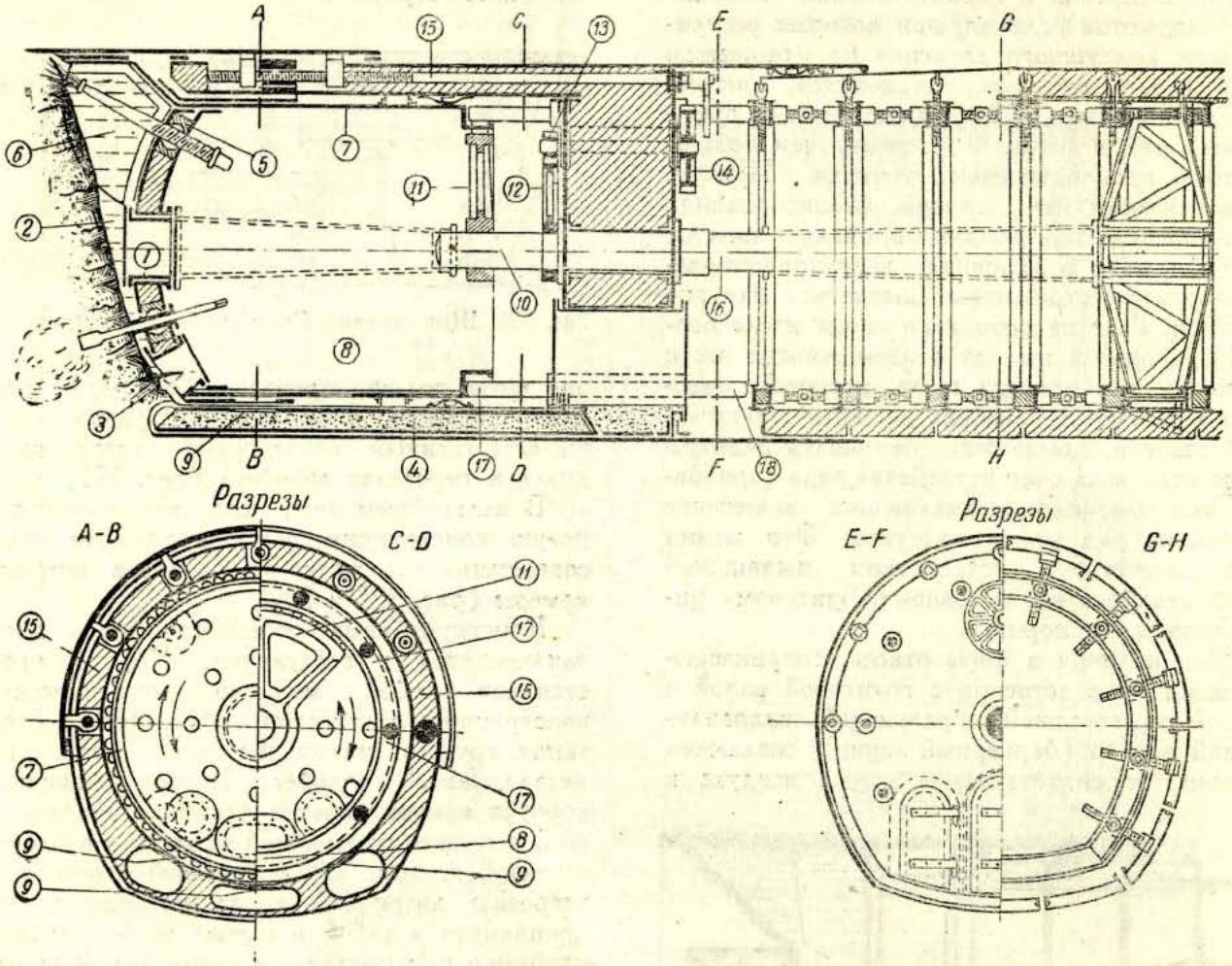


Рис. 329. Щит системы Гаага:

1 — двери, *2* — передовая камера, *3* — отверстие для выборки грунта, *4* — подводящее отверстие, *5* — отверстия для разработки забоя при помощи механических инструментов, *6* — ножи (под аванбеком), *7* — внутренняя часть щита, *8* — отверстия и *9* — прорези, через которые высасывают разрыхленный грунт (при необходимости), *10* — ось щита, *11* — сектор зубчатого колеса, *12*, *13* и *14* — передачи, *15* — внутренняя стенка щита, *16* — гидравлический домкрат, *17* и *18* — гидравлические мелкие домкраты, применяемые для выправления щита (при неравномерных продвижках).

щение внутри внешнего корпуса щита. Выступающие под аванбеком ножи (6) при своем вращении разрыхляют грунт впереди забоя под аванбеком, грунт падает вниз и убирается; таким путем образуется пространство для поступательного движения щита вперед. Внешняя часть корпуса не имеет круглого очертания, чтобы воспрепятствовать возможному повороту щита вокруг своей оси в процессе вращения в нем внутренней части щита (7). В передней части щита имеется ряд консольных ножей, которые поддерживают аванбек. Эти ребра консолей при вращении внутрен-

высасывать разрыхленный грунт в случае необходимости. Процесс продвижения щита вперед и отсасывание грунта рефулированием может производиться даже одновременно. При необходимости в щитовую камеру впускается сжатый воздух. В этом случае процесс шлюзования может производиться через замурованный в бетонной переборке людской шлюз.

Вращение внутренней части щита вокруг оси тоннеля в корпусе самого щита может быть осуществлено следующим приемом: на оси (10) укреплен сектор зубчатого колеса (11), который через систему передач (12, 13,

14) производит процесс вращения. Между внутренней и внешней стенками укладываются по определенной системе шарикоподшипники. Подвижной аванбек защищает от возможных обвалов грунта впереди. Он скользит по внешней поверхности щита и по выступающим консольным ножам (*6*). При вращении внутренней части щита, наоборот, консоли скользит по внутренней поверхности аванбека.

В центре корпуса помещен гидравлический домкрат (*10* и *16*), который дает возможность перемещать щит вперед и назад. Конструкция связана с элементами тоннельной обделки таким порядком, чтобы препятствовать возможной тенденции щита «клевать» или, наоборот, подниматься кверху от своего проектного положения. Домкраты по периферии щита дают возможность перемещать отдельно внешнюю оболочку щита от внутренней. Если внешнюю часть щита необходимо продвинуть впереди внутренней части, то приводят в действие поршень домкрата (*10* и *16*). Мелкие домкраты (*17* и *18*) дают возможность выправлять щит от неравномерных продвижек и направлять его по заданной, проектной трассе.

Указанный щит системы Гаага хотя и разрешает вопросы тоннелирования, но обладает рядом недостатков в отношении его маневренности. Значительно развитая длина щита, приводящая к большому отношению длины его к диаметру, заставила Гаага сделать значительное упрощение, а вместе с тем и усовершенствование этого типа щита. В описываемой ниже конструкции щит сделан значительно короче. Помимо увеличения его маневренной способности, снижаются до минимума внешние силы трения, что особенно важно при вписывании щита в кривые. При этой системе уже не предусматривается вращение внутренней части щита в основном корпусе. Регулирование поступления грунта из забоя совершается при помощи заслонки в лобовой, сферической диафрагме. Во избежание размыва грунта впереди щита предусматривается устройство постоянного обратного аванбека (рис. 328). В хвосте щита, кроме людского шлюза, предусматривается также устройство материального шлюза, но пользование ими весьма ограничено.

Заслуживает внимания и щитовая система проходки по дну протоков. Здесь Гааг предусматривает систему замкнутого щита на колесах, который катится непосредственно по рельсам, уложенным по железобетонным лежням. Пути укладываются водолазами в заранее подготовленном при помощи экскавации ложе. До продвижения щита путь осматривается водолазами, лишний грунт убирается. Особое внимание должно быть

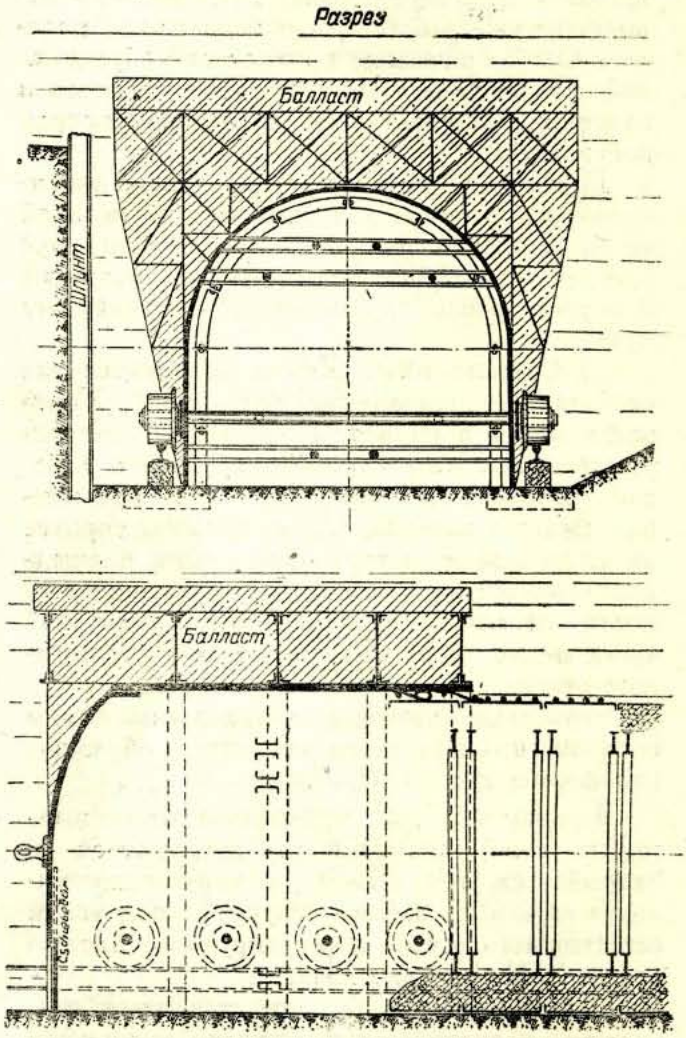


Рис. 330. Катучий щит системы Гаага

обращено на вопрос всплывания конструкции самого щита. Щит оснащается специальным балластом, который загружает корпус конструкций; помимо этого через систему специальных связей он прикрепляется к уже возведенному сзади тоннелю, который вслед засыпается сверху. Перемещение щита может быть осуществлено как домкратами, так и тяговым канатом, прикрепленным в центре лобовой поверхности щита (рис. 330).

Гаагом запроектирована и комбинированная система проходки — вначале обычной системой полущита в водоносных грунтах,

а затем и в открытой воде по заранее подготовленному землечерпанием ложу. Это уподобляется системе подвижного, водолазного колокола. Когда эта конструкция пересекает грунтовой массив, работы ведутся обычным порядком с выборкой забоя, как при щитовой проходке; попадая в открытую воду, полущит уже работает, как водолазный колокол. Особое внимание приходится обращать, как указано, на стык оболочки тоннеля и хвоста щита во избежание возможных прорывов воздуха.

Щиты системы Гаага сулят весьма заманчивые перспективы для щитовой тоннельной техники, но ряд основных положений еще требует дальнейшего теоретического развития и корректировки в соответствии с данными практики.

д) *Система инж. Ханта.* Отличительная особенность щита системы инж. Ханта заключается в барьерных затворах, регулирующих поступление слабых грунтов с лобовой части под аванбеком, без применения сжатого воздуха. Щит в своем корпусе имеет диафрагму и горизонтальными площадками делится на два или три яруса, в зависимости от его размеров. Грунт в лобовой части может держаться под углом естественного откоса.

Барьерные затворы установлены таким образом, что при своем открытии образуют платформы щита t, t^1, t^2.

Барьеры d, d^1, d^2, прикрепленные на шарнирах, имея возможность закрываться и открываться, тем самым регулируют поступление грунта из забоя, текущего под углом естественного откоса и регулируемого плоскостями b, b^1, b^2 (рис. 331).

При системе Ханта представляется возможным в значительной степени уменьшить осадки, связанные с выпуском грунта из-под аванбека. Когда имеются ярко выраженные плывуны, приходится прибегать к сжатому воздуху, но в условиях песчаных, водоносных грунтов означенная конструкция щита может обеспечить проходку при нормальном атмосферном давлении с обычным водоотливом. При этом, однако, должны быть приняты меры против выноса илистых частиц в процессе водопонижения.

Щит системы Ханта применялся в Лондоне при прокладке тоннельных коллекторов диаметром до 3,5 *м*.

е) *Система облегченного типа щита с горизонтальным металлическим шпунтом.* При прокладке тоннелей в зоне нарушенных водоносных грунтов на небольшом протяжении применение облегченного типа щита с металлическим шпунтом может дать эффективное разрешение задачи.

Эта система была применена в США при проходке деривационного тоннеля диаметром около 6,5 *м* на глубину 150 *м* от поверхности. Начальная проходка тоннеля в устойчивых скальных породах велась обычным горным способом, при направляющей верхней штольне. Забой штольни продвигался вперед лишь тогда, когда рекогносцировочным, горизонтальным бурением выявлялся характер подлежащих пересечению горных пород. В процессе бурения скважин вода внезапно прорвалась через них с огромной силой в забой штольни. Это обстоятельство указывало на наличие зоны нарушенных водоносных грунтов, в соответствии с данными гидрогеологического прогноза. Во избежание возможного затопления готового тоннеля в процессе продвижения забоя вперед была установлена первая бетонная диафрагма в уже готовом тоннеле. В последней был устроен ряд камер с металлическими дверями. Толщина бетонной диафрагмы, установленной по полному поперечному сечению тоннеля, была по расчету 3,5 *м*. Верхние камеры размерами $1{,}5 \times 1$ *м* служили для пропуска людей, а нижние — для выдачи породы. В бетонную диафрагму были замурованы трубы для инъекции цементного раствора и трубы для пропуска воды.

Приняв указанные меры, ограждающие тоннель от возможного заполнения водой и грунтом, приступили к весьма осторожному продвижению забоя. Наготове были мешки с песком, которые должны были служить первым ограждением при прорыве. Вскрытие лба забоя выявило настолько сильное давление водоносных илистых песков, что напором их были совершенно смыты уложенные ограждения из мешков.

Работы были немедленно прекращены, и металлические двери основной перегородки закрыты. Манометром в водоотводной трубе указывалось гидростатическое давление порядка 12 *ат*. Это большое давление удерживалось трехметровой бетонной перегородкой.

Заранее поставленная мощная бетонная диафрагма предохранила от затопления уже построенную часть тоннеля. Бурением ряда горизонтальных скважин через диафрагму было произведено нагнетание цементного

раствора. Производство усиленного нагнетания цементного раствора и расход значительного количества цемента, исчисляемый в 170 *т*, позволили приостановить огромный приток вод, закрепить относительно слабые породы пересекаемого выклинивания и продолжать продвижение забоя тоннеля вперед.

Однако, учитывая ожидаемое усиленное горное давление, применение обычного метода предварительного крепления представлялось рискованным. Вследствие этого был применен совершенно новый тип металлического крепления в виде прототипа щита, конструкция которого представляет собой ряд металлических круглых рам, вокруг которых производится предварительная забивка в породу горизонтальных металлических шпунтов параллельно оси тоннеля. Эти шпунты, образующие цилиндрическую поверхность в голове сооружаемого тоннеля, забивались с помощью пневматического молота двойного действия, который перемещался по специальным направляющим (рис. 332). Эти направляющие, в соответствии с положением забиваемой шпунтины, при специальной каретке перемещались вокруг металлического опорного кольца с помощью талей. Шпунты забивались длиной в 10 *м*, причем выборка породы под защитой шпунтин производилась с таким расчетом, чтобы конец последних минимум на 1 *м* всегда оставался заделанным в породу. После окончания разработки породы производилось закрепление шпунтин временным креплением. Во избежание вывалов из лба забоя последний всегда тщательно закреплялся. По мере продвижения забоя вперед шпунтины, забиваемые вокруг металлического опорного кольца, наращивались на длину в 7 *м*. Это делалось с расчетом прорезать полностью зону слабых грунтов, с тем чтобы снова врезаться в коренные породы гнейса, где работы могут быть продолжены уже обычными приемами.

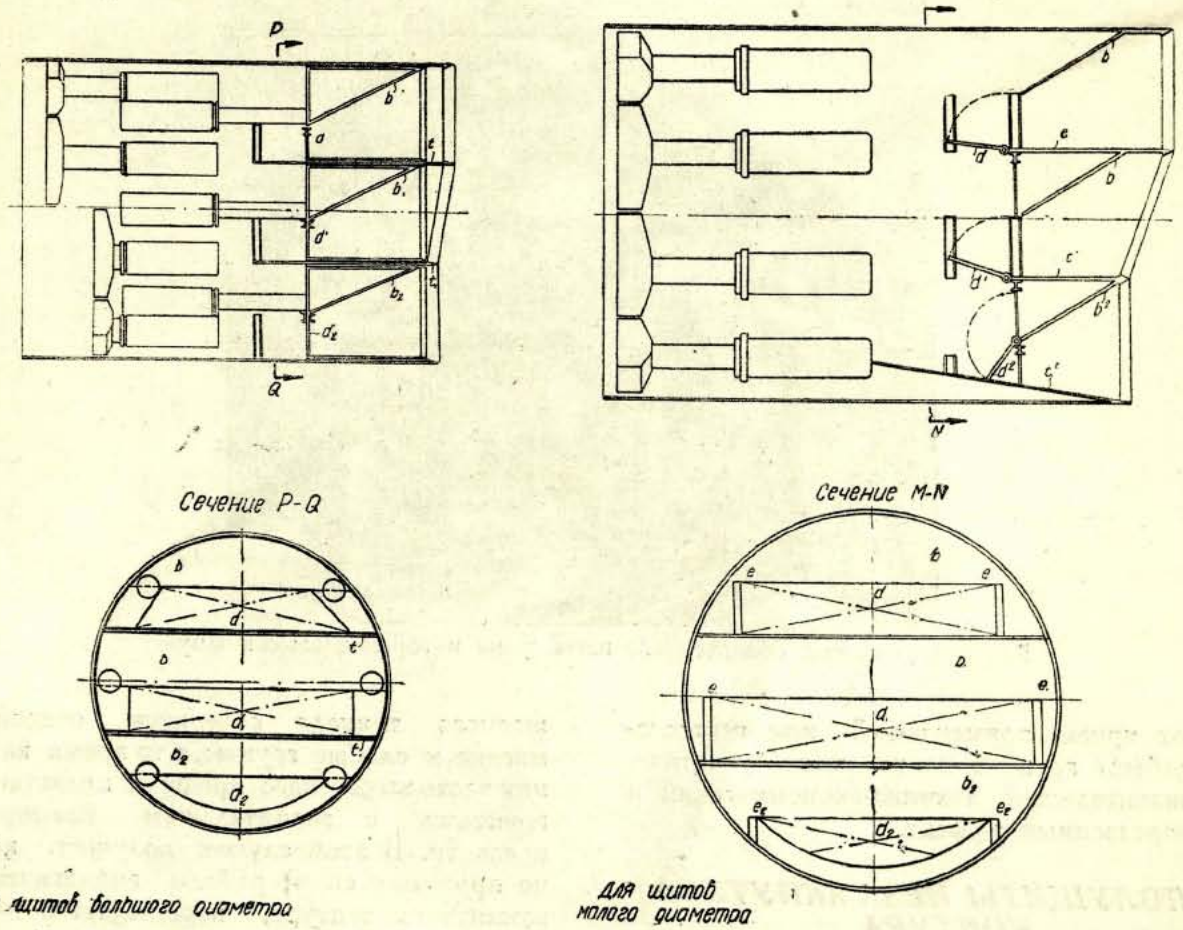


Рис. 331. Щит системы Ханта (t, t^1, t^2 — платформы щита, d, d^1, d^2 — барьеры, b, b^1, b^2 — плоскости для регулирования наклона откоса грунта в забое)

Преимущество этого метода составного щита из опорного кольца и металлических шпунтин заключается в том, что он не требует применения специального мощного гидравлического оборудования, как это практикуется в обычных щитах.

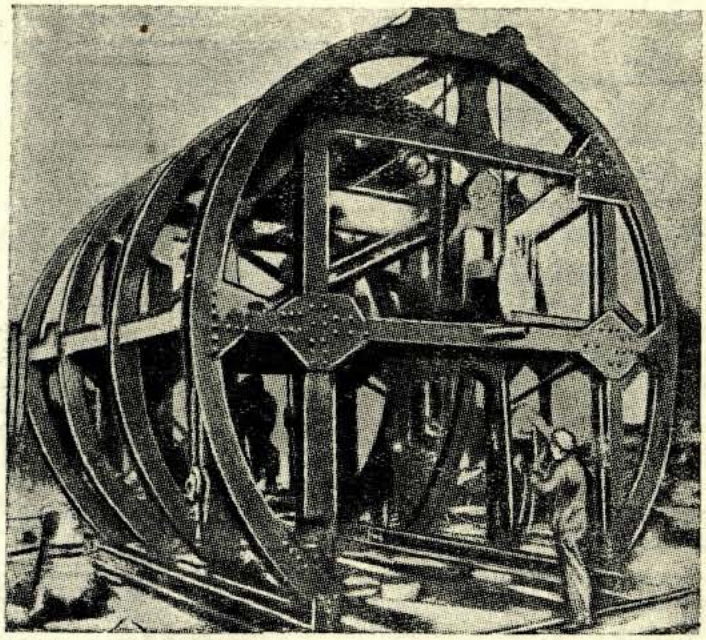


Рис. 332. Система облегченного щита (рама и горизонтальный шпунт)

Этот прием, применяемый при пересечении слабых грунтов на коротких участках, дает значительный технико-экономический и производственный эффект.

3. ПОЛУЩИТЫ НЕЗАМКНУТОГО КОНТУРА

Полущиты незамкнутого контура при обделке из металла или из каменной кладки применяются преимущественно в СССР, Франции, Англии, Америке, главным образом в относительно слабых грунтах непосредственно под улицами, когда недопустим открытый способ работ и где обычная система деревянного крепления может привести к значительному выпуску породы, а следовательно, к осадкам.

Первые полущиты эллиптического очертания состояли из металлической оболочки, смонтированной на металлических клепаных фермах, жестко соединенных между собой системой балок и подкосов. Гидравлические домкраты полущита упираются непосредственно в возведенную каменную кладку, полукольца тюбингов или в ряд сборно-разборных металлических кружал, поддерживающих вновь возводимую кладку.

Полущиты незамкнутого контура применяются преимущественно в тех случаях, когда верхняя часть калоттного профиля сооружаемого тоннеля содержит относительно мягкие и слабые грунты, в то время как нижняя часть штроссного профиля представляется грунтами с значительным коэфициентом крепости. В этом случае полущит, который по принципу своей работы аналогичен щиту замкнутого контура, перемещается под действием гидравлических домкратов по твердой породе. Когда по условиям напластований пересекаемых пород под пятами полущита оказываются ненадежные грунты, дальнейшее продвижение влечет весьма большие осложнения, поскольку неравномерная осадка опор полущита может обусловить деформации его конструкции. В этом случае необходимо предварительно, до продвижения полущита, пройти боковые штольни, заложить в них бетонные стены обделки и создать надежную опору для катков продвигаемого вперед щита (рис. 333). Когда порода основания под полущитом представляется надежной, работа после устройства свода под защитой полущита ведется методом подведения стен, аналогично бельгийской системе.

Впервые система полущита незамкнутого

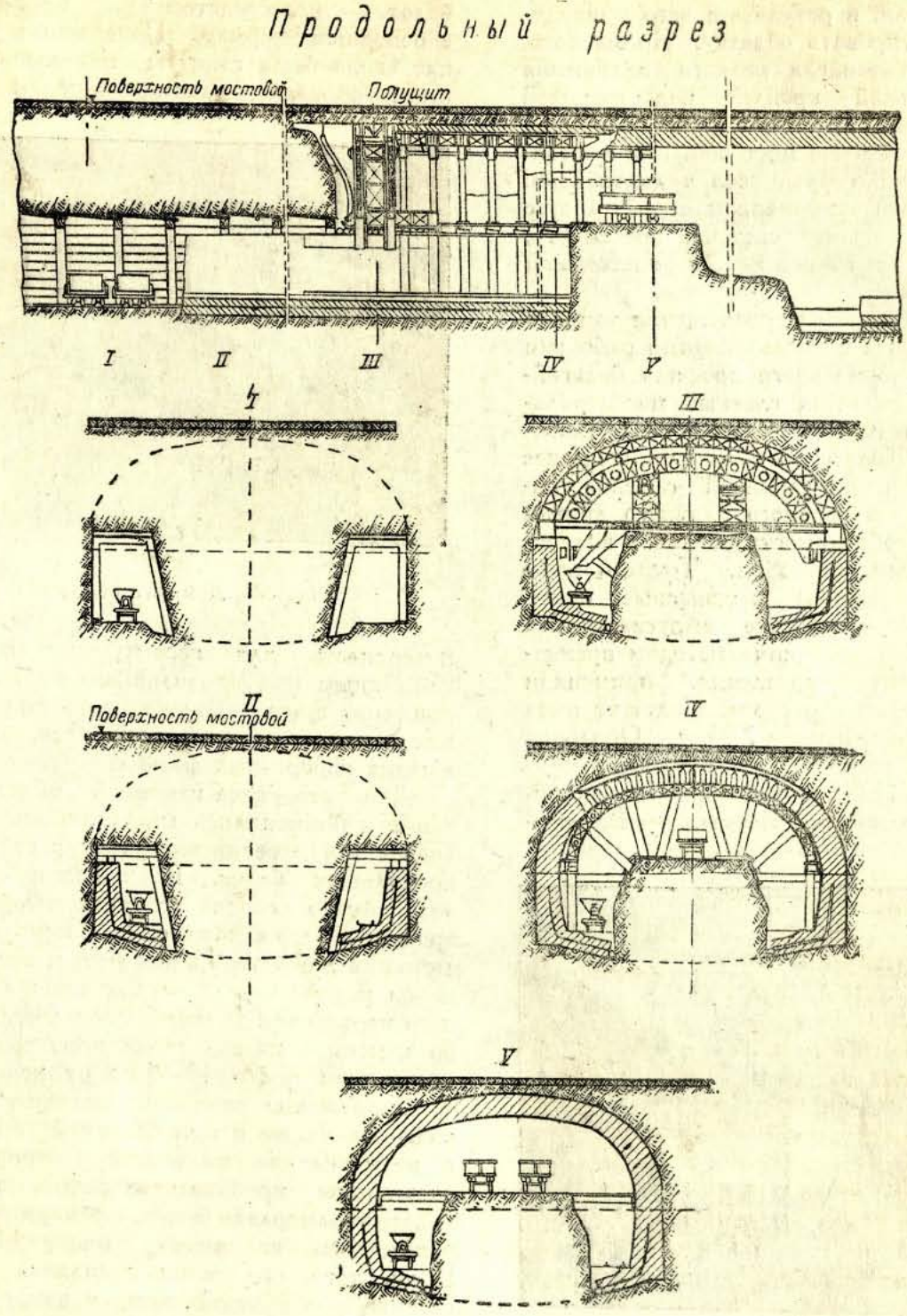


Рис. 333. Фазы производства работы полущитом

контура была применена французами при постройке сложной сети крупных коллекторов и линий метрополитена Парижа. Однако применение полущита незамкнутого контура в условиях города доказало дефективность этой системы. Во время производства работ как полущит, так и обделка претерпевали значительные деформации, которые иногда

искажали заданный габарит по поперечному сечению тоннеля, в результате чего приходилось реконструировать обделку. Кроме того, при постройке тоннеля мелкого заложения с незначительной кровлей над шелыгой свода усиленный нажим домкратов вызывал подъем и повреждение мостовой. Это обстоятельство заставило французов в дальнейшем отказаться в метрополитенном строительстве от полущита в пользу системы временного, деревянного крепления, при постоянной каменной обделке.

Одним из примеров сооружения тоннеля методом полущита с последующими работами по окончании тоннельного профиля бельгийским методом является главный магистральный коллектор Клиши парижской канализационной сети. Коллектор имел эллиптическое сечение 6 × 5 *м* при каменной обделке тоннеля. Условия оживленного уличного движения выявили необходимость создания коллектора тоннельным способом. Тоннель пересекал крупнозернистые водоносные пески. Опасаясь осадок вследствие выпуска грунта в процессе тоннелирования методом временного деревянного крепления, применяли полущит для возведения свода. Полущит имел ширину 7,25 *м* и высоту 2,95 *м*. Оболочка щита состояла из стального листа толщиной 14 *мм*. Эта оболочка покрывала эллиптические металлические фермы, расположен-

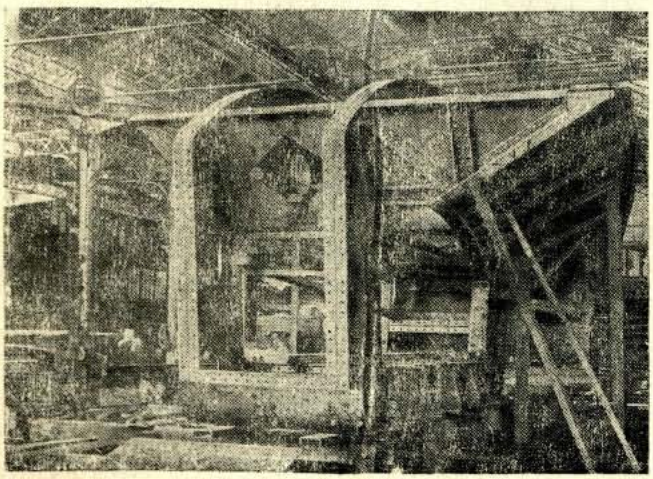


Рис. 334. Монтаж полущита на заводе

ные на расстоянии 1,4 *м* друг от друга и соединенные между собой, для создания пространственной жесткости, рядом металлических балок и раскосов. Щит впереди имел аванбек, образованный рядом консольных балок, непосредственно прикрепленных к основным фермам. Поперечные фермы у пят свода были стянуты металлическим листом, образуя таким образом гладкую



Рис. 335. Домкрат полущита

поверхность для перемещения по каткам, уложенным под продольными балками. Продвижение щита производилось под нажимом шести гидравлических домкратов, укрепленных на поперечных фермах.

Для устройства каменной обделки свода тоннеля применялись металлические кружала (через 1 *м*), соединенные между собой рядом продольных балок. Всего для поддержания возводимого свода устанавливалось около тридцати кружальных ферм. Поршни гидравлических домкратов опирались непосредственно на первое металлическое кружало и через него передавали усилие на остальные. Работы по каменной кладке свода производились на расстоянии около 10—15 *м* от хвоста щита.

Сооружение тоннелей полущитом производилось также и при бетонной обделке, но в этом случае выявились отрицательные результаты производства работ, поскольку давление гидравлических домкратов вредно отражалось на вновь уложенном бетоне. Кроме того, сам бетон сцеплялся непосредственно с оболочкой щита и затруднял его продвижение вперед.

Полущит в городских условиях, пересекая разнородного характера насыпные грунты и грунты аллювиальных образований, не всегда имел достаточное основание для своего продвижения, а потому в большинстве случаев до пуска щита предварительно применялась,

как указано было выше, система продвижения по готовым стенам, уложенным в пройденных заранее боковых штольнях (рис. 334, 335).

Одним из крупных полущитов, применен-

роликам, расположенным в плоскости горизонтального диаметра тоннеля (рис. 336). Ролики перемещались по стальным листам, непосредственно уложенным на породу, а в слабых местах—по бетону, уложенному в прой-

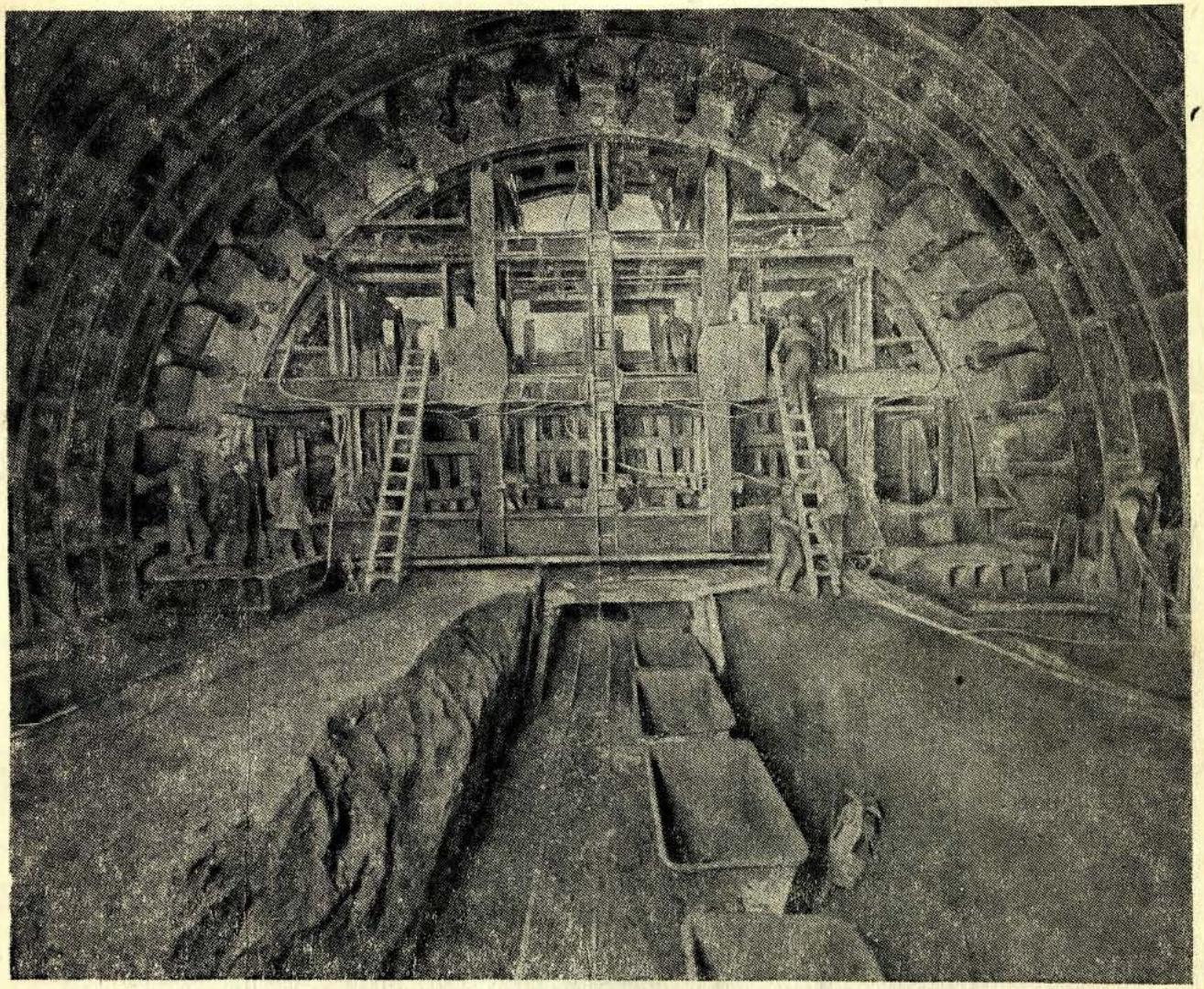


Рис. 336. Тоннель под р. Мерси (полущит)

ных при сооружении подхода к подводному тоннелю под р. Мерси, является полущит диаметром 14,1 *м*. Подходная часть тоннеля на протяжении 267 *м* под Дейл-стрит (в Ливерпуле) располагалась в глине, весьма близко от поверхности мостовой. Проходка этого участка была проведена полущитом системы Маркхэм. Этот полущит полуциркульного очертания для главного тоннеля имел оболочку диаметром 14,1 *м* из металлических листов толщиной 19 *мм* и продвигался вперед 24 гидравлическими домкратами по

денных заранее боковых штольнях. Полущит длиной по оси тоннеля в 3,74 *м* был оборудован двумя эректорами с гидравлическим приводом. Домкраты полущита развивали усилие для продвижения его в 2 400 *т*. Собранное полукольцо опиралось непосредственно на породу. Сзади производилась подводка нижней бетонной части под металлические полукольца обделки. Удаление породы и подача необходимых материалов производились по нижней пилот-штольне. Общий вес полущита составлял 200 *т*.

В процессе работ выявилось, что жесткость конструкции полущита недостаточна. Полущит претерпел довольно большие деформации, обнаружились значительные осадки на поверхности мостовой. Несмотря на отмеченные осложнения, работы этим щитом довели до конца (рис. 337). В результате оболочка щита была похоронена за обделкой, а оборудование его, составляющее всю ценность полущита, было изъято для возможности использования на новых работах.

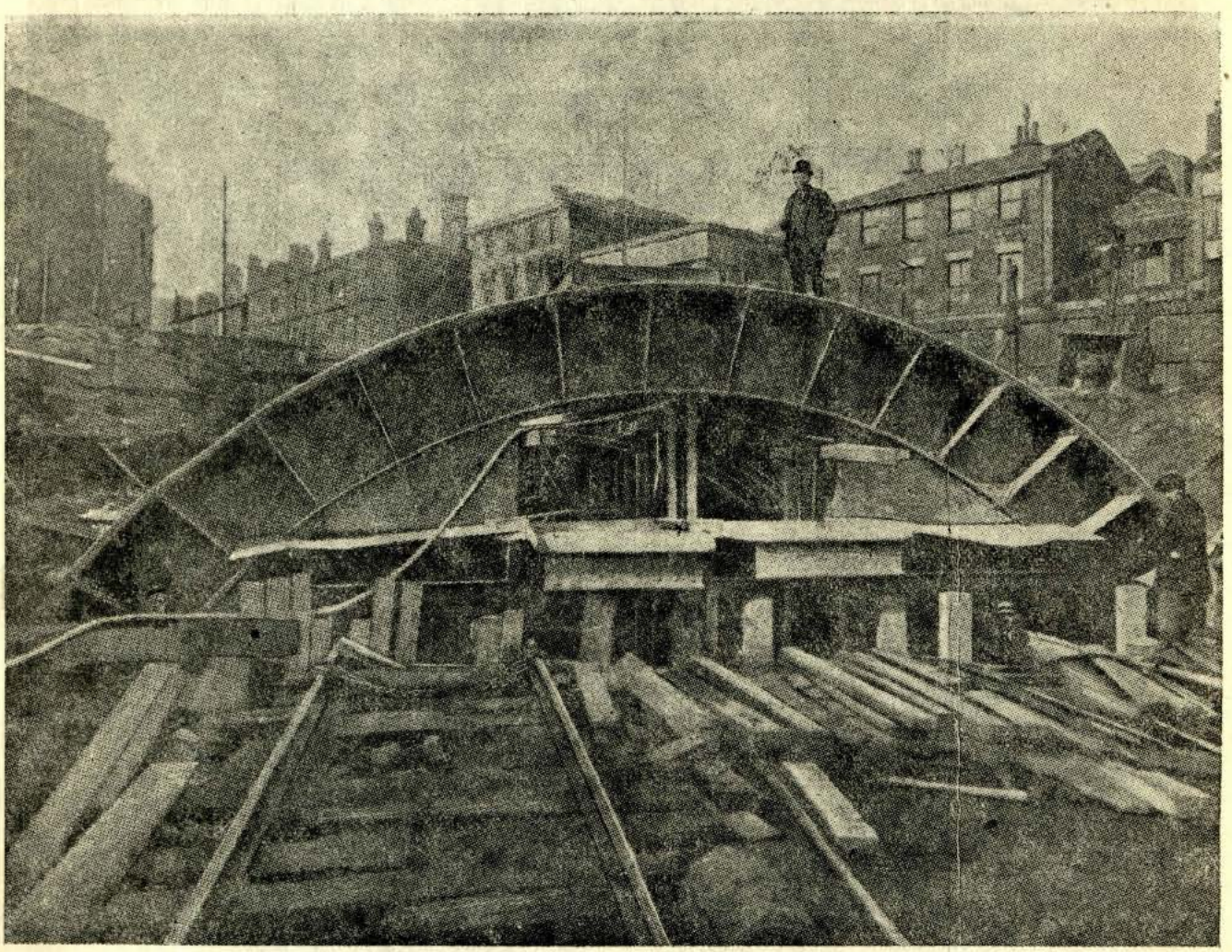


Рис. 337. Тоннель под р. Мерси (полущит)

В практике строительства 2-й очереди Московского метрополитена были применены два полущита для проходки средней части станции. В одном случае полущит пролетом 9,1 *м* опирался непосредственно на конструкцию обделки крайних тоннелей (станция Площадь Маяковского, рис. 338); в другом — полущит диаметром 9,5 *м* опирался непосредственно на коренную породу (станция Площадь Революции), причем до продвижения щита по породе устраивалась бетонная подготовка толщиной 15—25 *см*. При выключивании в основании щита неустойчивых пород закладывались бетонные опоры в предварительно пройденных по бокам штольнях.

В основном конструкции полущита, запроектированные под руководством автора, представляли собой систему арки с затяжкой. Полущит был разделен рядом горизонтальных и вертикальных перегородок, образуя рабочие ячейки, оборудованные рядом выдвижных платформ. Крепление лба забоя производилось шандорами, при забойных домкратах.

Арки опорного кольца и ножи выполнялись для первого полущита сварной, а для другого — литой конструкции. Особое внимание было обращено на расчет хвостовой части оболочки щита, которая должна работать, как консоль. Перемещение щита вперед производилось под нажимом гидравлических домкратов, по стальным каткам, уменьшающим величину сопротивления трению опорной части арки полущита.

Опорные плоскости дорожки были покрыты стальными листами толщиной 20 *мм* и строго выверены до продвижения щита на ход поршня. Монтаж тюбингов при полущите 9,1 *м* производился двумя эректорами, прикрепленными непосредственно к корпусу щита. Давление рабочей жидкости для щитовых домкратов достигало 200 *ат*, а для эректора, забойных и платформенных домкратов — 35 *ат*.

Анализируя системы полущитов, примененных в тоннельной практике, и опыт проходки полущитом тоннелей Бостона, и особенно опыт советских инженеров, следует указать, что при правильном конструировании элементов щита, обеспечении надлежащей жесткости, соответствующей геотехническим условиям, применение системы полущита может в определенных случаях несомненно оказаться целесообразным.

Полущит незамкнутого контура может найти широкое применение при раскрытии крупных тоннельных профилей, в частности тоннелей и станций метрополитена и тоннелей специального назначения.

Характеристика полущитов приведена в табл. 21.

4. ЭСКАЛАТОРНЫЕ ЩИТЫ

Одним из модернизированных приемов проходки наклонных эскалаторных тоннелей в слабых грунтах является система кессонированных пилот-щитов. Этот прием был запроектирован для сооружения эскалаторных тоннелей Лондонского метрополитена. Сущность его заключается в следующем. Предварительно по оси строящегося тоннеля пропускают пилот-щит диаметром 4,5 *м*, имеющий нижний аванбек. Домкраты в хвосте щита распределены таким образом, что в нижней части профиля они имеют более частое размещение, чем в верхней. Нижнее расположение аванбека и распределение домкратов сделано с целью воспрепятствовать тенденции щита

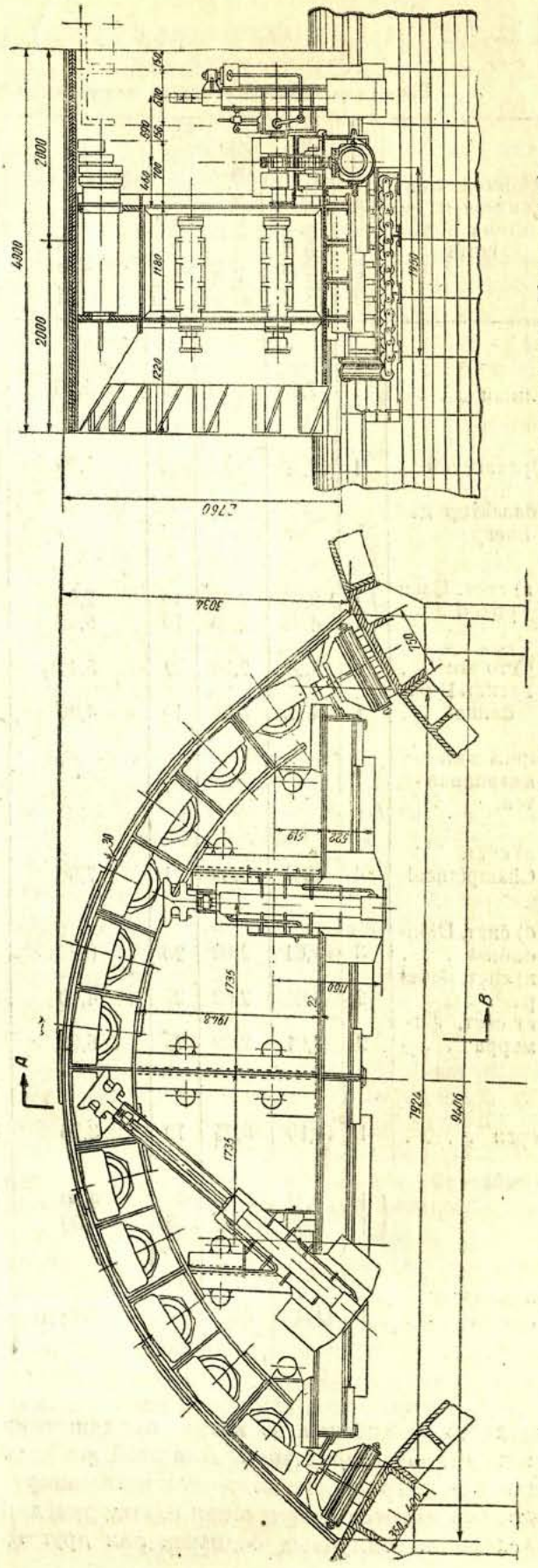


Рис. 338. Московский метрополитен (полущит сварной конструкции с двумя эректорами системы Метростроя)

Таблица 21

Основная характеристика полущитов незамкнутого контура и условия их проходки

Наименование тоннеля и система полущита	Количество, шт.	Ширина полущита в *м*	Высота полущита в *м*	Толщина оболочки в *мм*	Длина полущита в *м*	Количество домкратов, шт.	Внутренний диаметр домкратов в *мм*	Максимальные усилия, развиваемые домкратами, в *т*	Скорость проходки (максимум-минимум) в сутки в *м*	Путь полущита в *км*	Характеристика грунтов
Клиши	1	7,24	2,95	14	5,26	6	241	616	8,84 / 4,50	1,25	Разнозернистые пески
Орлеанский . .	1	10,59	3,81	25	5,99	10 10	114	168	6,71 / 1,02	0,87	Наносные грунты, старые стены и фундаменты
Коллектор де-Бьевр											
а) сист. Chaughaud . . .	1 1	9,75 4,93	3,56 2,00	19 19	7,01 5,49	8 6	235 171	1 021 228	3,30 2,44	0,35 0,17	
б) то же . .	1	4,93	2,30	19	5,49	6	171	228	2,74	0,28	Слабые мергели и известняки
в) сист. Dioudonnat . .	1	4,95	3,20	14	4,06	5	159	224	2,14	1,13	Песок и гравий
Парижский метрополитен:											
а) сист. Champigneul	4	8,51	2,68	11	7,06	8	235	923	3,96 / 3,05	1,53	Песок, старые фундаменты. Пески, мергель
б) сист. Dioudonnat . . .	3	8,61	2,62	25	6,76	8	216	896	—	0,53	
в) сист. Вебера	2	8,61	2,62	25	4,90	4 8	146 216	170 896	—	1,45	Водоносный гравий и песок
г) сист. Лямарра . . .	2	8,61	2,62	25	6,02	9	190	1 149	1,98	0,31	Песок и гравий. Гравий и мергель
Мерси	1	14,10	6,05	19	3,76	24	—	2 400	—	0,27	Глина
Московский метрополитен	1 1	9,41 9,62	3,03 4,61	30 26	4,00 4,00	12 16	230 230	1 080 1 440	— —	0,16 0,15	Глина Водоносный песок
Балтиморский тоннель . .	1	11,5	6,3	—	4,50	20	—	4 000	4,50	0,60	Песчаные и галечные грунты

«клевать» аванбеком во время продвижения его по уклону сверху вниз. Для этой же цели и для предотвращения поворотов щита вокруг своей оси имеется специальная платформа для балласта из свинцовых болванок или другого груза, связанная общей конструкцией со щитовой диафрагмой.

Вслед за проходкой пилот-щита и устройством чугунной обделки под сжатым воздухом пускается объемлющий щит диаметром 7,46 *м*

для образования окончательного диаметра эскалаторного тоннеля.

В целях уменьшения расхода сжатого воздуха малый щит с внутренней стороны обволакивается глиной. Вес малого щита диаметром 4,5 *м* — 50 *т*; вес большого щита диаметром 7,46 *м* — 120 *т*.

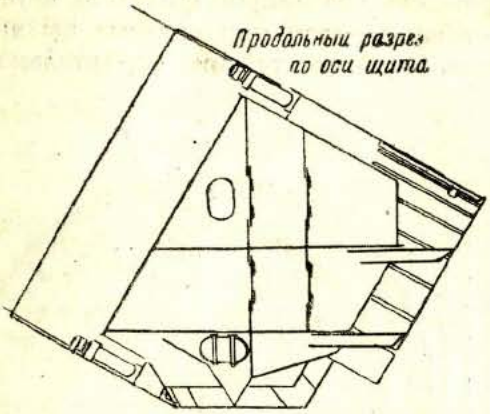


Рис. 339. Кессонированный щит для проходки наклонных эскалаторных тоннелей под углом 30°

Щитовые работы по проходке наклонного тоннеля в плывунах ведутся в сочетании с сжатым воздухом, при дополнительной шлюзовой диафрагме, установленной в подземном вестибюле.

* * *

Во Франции также разработан метод проходки в плывунах наклонных тоннелей для эскалаторов специальным кессонированным щитом. Последний диаметром в 8 *м* снабжен шандорными приспособлениями для крепления лба забоя, вода из которого должна отжиматься давлением сжатого воздуха. Для успешной работы щита под уклоном в 30° и локализации тенденции его «клевать» передней частью корпус щита имеет, так же как и в английской системе, обратный, но выдвижной аванбек.

Работа щитом предусматривается сверху вниз по уклону, но для удобства выборки породы и монтажа обделки рабочие платформы расположены в эскалаторном щите горизонтально (рис. 339).

В хвосте щит снабжается 27 гидравлическими домкратами, из которых каждый развивает усилие до 150 *т*, а всего общей мощностью до 4 050 *т*. Полный вес щита 250 *т*.

5. ЩИТОВАЯ ПРОХОДКА ТОННЕЛЕЙ МАЛЫХ СЕЧЕНИЙ

За последнее время наблюдается широкое применение щитовой проходки в крупных городах, при сооружении тоннельных коллекторов малых сечений для коммунальных целей: водопровода, канализации, телефона, почты.

Сооружение коллекторов для городского подземного хозяйства производилось обычно открытым способом, что нарушало уличное движение и загромождало проезды. Только тоннельный метод прокладки коллекторов обеспечил производство работ, не нарушающее нормальных условий жизни города. Наиболее приемлемым и индустриальным методом сооружения тоннельных коллекторов является щитовой метод при обделке тоннелей из бетона, железобетона или чугуна. Минимальным размером тоннельного хода при сооружении тоннельных коллекторов следует считать 1,25 *м* диаметр в свету, при наружном диаметре 1,5 *м*. Это учитывают при прокладке ряда тоннельных коллекторов в СССР, в США и в частности при прокладке канализации в Москве.

Тоннельная обделка коллекторов из бетонных камней применяется прямоугольного, трапецоидального и сотового типа.

В 1945 г. при строительстве газопровода Саратов — Москва в широком масштабе были применены щиты малых сечений (D = 1,5 — 2,0 *м*) для прокладки газопроводов под железнодорожными насыпями Московского железнодорожного узла. В частности, щитовая проходка велась под 24 путями Западной железной дороги.

Применяемый для проходки указанного тоннельного коллектора в неустойчивых, песчаных грунтах щит представляет собой специальную металлическую конструкцию. Опорное кольцо и нож щита шарнирно перемещаются по отношению к оси тоннеля. Щит снабжен выдвигающимся аванбеком для поддержания породы под углом естественного откоса. Оболочка щита из литой стали толщиной 19 *мм*, при этом на длине 35 *см* толщина оболочки составляет лишь 6 *мм*. Утончение оболочки в хвосте щита принято для того, чтобы довести до минимума пустоты за обделкой, образуемые за счет толщины оболочки при продвижении щита вперед (рис. 340).

Никакого строительного зазора между тоннельной обделкой и щитом не предусматри-

вается. Общая длина щита 3,2 *м*, а длина выдвигающегося авангека 50 *см*. Порода из забоя выдается по специальному транспортеру, размещенному в нижней центральной части забоя щита. Щит продвигается вперед восемнадцатью гидравлическими домкратами, которые работают последовательно, двумя группами по 9 штук. Такое распределение домкратов по периметру щита вызывается специальным типом сотовых блоков, обеспечивающих конструктивную жесткость и водо-

до 6 *м* за смену. Всего на тоннеле занято 6—7 рабочих и 1 десятник. Двое рабочих производят разгрузку вагонеток и нагрузку платформы блоками на поверхности, один ведает передвижением вагонеток по тоннелю, двое производят укладку блоков тоннельной обделки. Один щитовой мастер и один рабочий заняты на погрузке породы в вагонетки.

Проходка указанным щитом в неустойчивых, сухих грунтах при системе выдвижного авангека, при отсутствии строительного за-

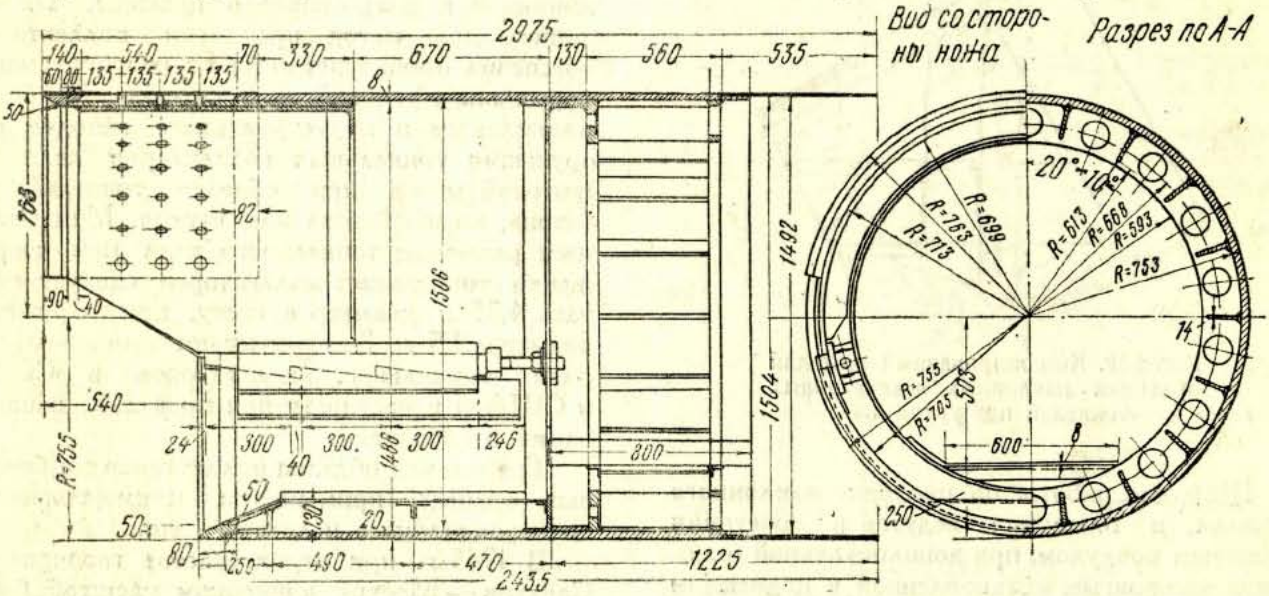


Рис. 340. Щит тоннельного коллектора диаметром 1,5 *м*

непроницаемость обделки при битуминозной обмазке швов. Порода из забоя за пределы щита выдается ручным путем на транспортер. Учитывая малый габарит тоннельной обделки, транспортирование породы по коллектору осуществляется применением спаренного сосуда — вагонетки для породы с платформой для блоков (рис. 341). Емкость вагонетки в 3 $м^3$ достаточна для вмещения полностью объема породы за одну продвижку щита.

Работы по выдаче породы и подаче материалов организованы следующим порядком. При подаче платформы и вагонетки от ствола в тоннель вагонетка идет порожней, а платформа нагружена блоками. В тот момент, когда спаренные вагонетка и платформа подходят к забою, происходит разгрузка блоков и установка их на место с одновременной загрузкой вагонетки породой через транспортер. Обратно платформа направляется порожней, а вагонетка — груженная породой. Таким путем достигнута скорость проходки в неустойчивых песчаных и гравелистых грунтах

зора и конструктивной особенности щита в виде поворота головной части по отношению к оси тоннеля дала положительные результаты.

Щитом аналогичной конструкции были пройдены, при системе трапецоидальных блоков, тоннельные коллекторы Московской городской канализации на протяжении 4,5 *км*, при этом скорости проходки щитами малых сечений (D = 1,5 *м*) достигали 12 *м* в сутки.

* * *

Проходка тоннелей для канализации в Мельбурне велась на протяжении около 11 *км*, при внутреннем диаметре коллекторов от 1,2 до 3 *м*. Тоннели пересекали исключительно слабые грунты, что привело к применению сжатого воздуха. Тоннельная обделка была из чугуна, дерева и кирпича. При проходке тоннелей величина воздушного давления поддерживалась примерно по величине гидростатического давления. Во избежание выплывов слабых грунтов из забоя лоб последнего

усиленно крепился. Обычно продвижка щита проводилась на ширину кольца тюбингов в 70 *см*. В плывунах продвижка проводилась последовательно, малыми порциями, преимущественно в два приема, во избежание выпуска породы. Для предупреждения отклонения щита от проектной трассы при ведении его в условиях слабых пород применялся метод частичной выемки грунта по лбу забоя. Кроме того, приходилось регулировать гидравлические домкраты, оси которых при их монтаже не совпадали с осью прокладываемого тоннеля.

Большие осложнения в регулировании щита при его продвижении вперед возникали, когда приходилось вести щит не круглой, а овоидальной формы. В этом случае малейшее неправильное отклонение в вертикальном и горизонтальном направлении приводило к осложнениям, связанным с вписыванием щита в проектную трассу.

При проходке под сжатым воздухом в Мельбурне особое внимание обращалось на чистоту воздуха. Устанавливались соответствующие фильтры, особенно следили за своевременным обменом воздуха. Скорость проходки для щита диаметром 3,1 *м* доходила в среднем до 3,5 *м* в сутки. Наибольшая скорость достигалась применением чугунной обделки, меньшая — бетонной и деревянной.

Сравнительная стоимость проходки тоннелей в Мельбурне под сжатым воздухом и в нормальных условиях, при обделке кирпичом, чугуном и комбинированной деревянной оболочкой с бетоном, составила:

бетонная обделка в нормальных грунтах	100 %
деревянная обделка с внутренней бетонной облицовкой, в слабых грунтах, при проходке под сжатым воздухом	114 %
кирпичная обделка в нормальном грунте	126 %
чугунная обделка в слабых породах под сжатым воздухом	190 %

* * *

В связи с тем, что при сооружении тоннельных коллекторов из штучных камней остается практически неразрешенным вопрос об изоляции стыков, в практике щитовой проходки имеются случаи применения обделок из монолитного бетона.

Так, при прокладке тоннельного коллектора Сифон д'Уаз (Франция) и в ряде тоннелей Италии был применен щит специальной конструкции, имеющий в хвосте две концентрически расположенные оболочки (рис. 342). Между последними запрессовывался при помощи щитовых домкратов бетон, образуя бетонную обделку тоннеля. При диаметре последнего 2,63 *м* толщина бетонной обделки, создаваемой прессованием, составляла 23 *см*. Методом прессования удавалось достигнуть исключительной плотности бетона. Нагнетания за обделку с целью заполнения строительного зазора в этом случае уже не

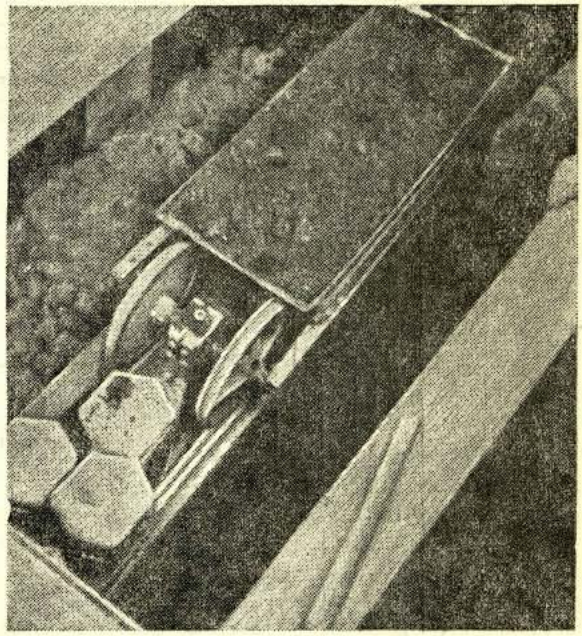


Рис. 341. Спаренная вагонетка-платформа

требовалось, так как в процессе прессования, параллельно с продвижкой щита вперед, бетон плотно зажимался в окружающий грунт, обеспечивая надлежащий пассивный отпор. В дальнейшем, по мере совершенствования этого способа, бетон укладывался лишь при одном металлическом чехле, размещенном в хвосте щита по внутреннему диаметру обделки. При этом бетон запрессовывался непосредственно между чехлом и породой.

Метод прессования бетона обладает тем недостатком, что может оказать отрицательное влияние на качество бетона, так как процесс схватывания бетона в условиях прессования не всегда протекает нормально. Это обстоятельство привело некоторых техников к мысли армирования обделки продольными металлическими стержнями, которые воспринимают на себя давление ходовых домкратов при продвижке щита. В практике известны также случаи устройства бетонной

обделки (при щитовой проходке) на кружалах, как переносных, так и подвижных.

Учитывая актуальность проблемы прокладки тоннелей из индустриального бетона в подземных условиях, в СССР в настоящее время ведется работа по испытанию вибропрессующего механизированного щитового агрегата системы проф. В. В. Михайлова и

в кровле попадаются пески и галька, насыщенные водой. Уровень грунтовых вод на глубине 3,05 *м* от поверхности.

Тоннели сооружаются щитом Гретхэда с открытой грудью, при сжатом воздухе.

На первый период работы щитом кессонирование производилось при помощи шлюзовой диафрагмы, установленной в шахте. Затем

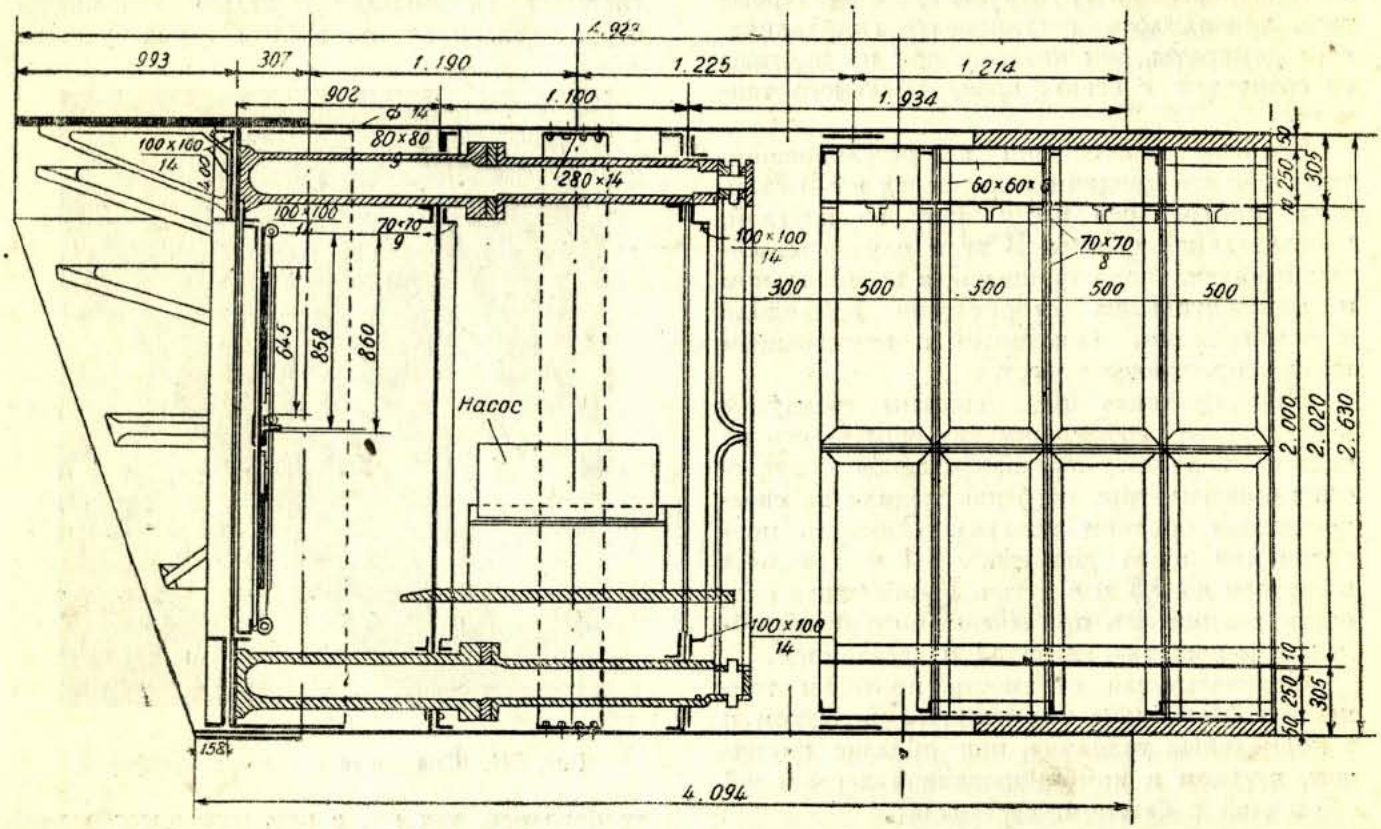


Рис. 242. Тоннель Уаз (щит для устройства тоннельной обделки прессованием бетона)

доцента В. А. Словинского. Этот агрегат позволяет осуществить сооружение монолитной конструкции обделки тоннельного коллектора из вибропрессованного бетона. Испытания агрегата на практике в производственных условиях должны выявить преимущества и недостатки метода сооружения вибропрессованной монолитной обделки и ожидаемый технико-производственный и экономический эффект, с целью сопоставления его с практикующимся методом сооружения тоннельных коллекторов из бетонных блоков, изготовляемых заводским способом на поверхности.

Тоннели коллектора Вест Мидлсекс и Чивзик-парк в Лондоне проходятся на глубине порядка 9,5 *м* от поверхности. Имея диаметр в свету 1,83 *м*, тоннель залегает в основном в лондонской глине, причем

в начальных участках готовых тоннелей из чугунных сегментов было устроено по одному шлюзу на каждое рабочее крыло шахты.

Устанавливались две бетонные стены толщиной по 1,5 *м*, в которые заделывались металлические двери. Расстояние между дверями определялось возможностью одновременного шлюзования трех вагонеток.

Щит Гретхэда, диаметром около 2 *м*, при общей длине в 2,74 *м*, был снабжен шестью домкратами, из которых каждый развивал усилие до 20 *т*, а всего общей мощностью до 120 *т*. Ход поршня домкратов в соответствии с шириной чугунного сегмента равен 51 *см*.

Давление воздуха в щите регулировалось по гидростатическому давлению, в плоскости горизонтального диаметра щита. Щитовые работы под сжатым воздухом велись в 3 смены.

При разработке породы применялись пневматические лопаты. Вслед за установкой сегментов производилось нагнетание цементного раствора под давлением 3—4 *ат*.

На участке тоннельных работ протяжением в 1 620 *м* в каждом забое работало:

водитель щита	1
проходчиков	2
чернорабочих	2
откатчик	1
шлюзовых рабочих	2

Один из шлюзовых рабочих обслуживал одновременно оба рабочих крыла шахты у шлюзовых диафрагм. Всего под землей на 2 крыла в 3 смены работало 45 человек.

Средняя скорость проходки щитом под сжатым воздухом в слабых грунтах 6 колец в сутки равна 3 *м*, при трех сменах по 8 часов. Максимальная скорость щитовой проходки под сжатым воздухом, достигнутая на участке тоннеля Мидлсекс, — 12 колец в сутки, т. е. 6 *м* готового тоннеля.

Тоннельные работы протяжением в 2 130 *м* на Мидлсексе были закончены в восемнадцать месяцев, вместе с укладкой кислотоупорной внутренней обделки из кирпича.

Компрессорная установка имеет три компрессора по 70 *л. с.*, общей мощностью в 210 *л. с.*

Щитовые работы обеспечены в отношении безопасности независимыми двумя источниками энергии — паровой и электрической.

* * *

Основная характеристика щитов и скорости щитовой проходки приводятся в табл. 22.

6. МЕХАНИЗИРОВАННЫЕ ЩИТЫ

Усовершенствованный тип щита системы Маркхэм на современном этапе развития техники дает определенные технические возможности для сооружения тоннелей. Подобная система щита имеет лишь назначение мощной подвижной металлической крепи, под защитой которой производится разработка породы и укладка элементов тоннельной обделки. Применение щита хотя и позволяет наиболее эффективно строить тоннели и механизировать процесс монтажа тоннельной обделки эректором, все же в полной степени не разрешает механизации разработки забоя.

Практика работы щитом с открытой грудью показывает, что именно разработка забоя является узким местом и занимает, в зависимости от характера пересекаемых грунтов, от 40 до 80% времени, потребного для осуществления одной подвижки щита на ход поршня.

Стремление механизировать разработку забоя нашло свое выражение в ряде конструкций тоннельных экскаваторов (например, экскаваторы Прейса, Томпсона, Халингера, Уайтекера, Макензена). Однако разнородность напластований грунтов не давала благоприятных условий для широкого применения этих видов тоннельных машин, поскольку они приспособлены преимущественно к мягким грунтам однородной или гомогенной структуры. Попадая в грунты с отличающимися коэфициентами крепости, они подвергаются поломкам, приводящим к значительной задержке продвижения забоя (см. главу XII «Разработка горных пород в тоннельном забое»).

В горной практике при разработке небольших профилей получило широкое применение большое количество разнообразных врубовых и проходческих машин, штанговых, дисковых. В тоннельном деле, где строителям приходится сталкиваться с раскрытием крупных профилей пролетами в 6, 10, 15 *м*, предложенные тоннельные снаряды не нашли до сих пор применения из-за громоздкости конструкции и несоответствия производственно-практической работе в подземных условиях. Все предложенные до сих пор тоннельные машины являются пока лишь попытками разрешения сложного вопроса механизированной разработки крупных тоннельных профилей.

Большая работа по разработке новых систем тоннельных машин проведена рядом советских инженеров, в частности коллективом инженеров Технического отдела Метропроекта (под руководством автора).

Разрешение задачи механизированных щитов ведется инженерами разных стран. Ниже приводятся различные системы щитов, примененных в практике тоннелестроения, а равно типы механизированных агрегатов советских инженеров.

Щиты системы Прейса, Томпсона и Уайтекера

При прокладке лондонских тюбов в глине, помимо применения обычной системы проходки щитом Гретхэда с открытой грудью и разработкой забоя при помощи пневматических лопат, применяется и механическая разработка забоя с помощью турбинных экскава-

Таблица 22

Скорости щитовой проходки тоннелей

Наименование тоннеля	Характеристика тоннеля	Страна	Город	Диаметр в *м*	Скорость щитовой проходки в *м*			Характеристика грунта	Год сооружения
					минимальная	средняя	максимальная		
Блекволл	Подводный под р. Темзой	Англия	Лондон	8,43	—	1,16	2,81	Глина, песок, гравий с водой. Применен сжатый воздух	1897
Уотерло-Сити . . .	Метрополитен	»	»	7,57	—	—	3,0	Глина, песок	
Ротергайт	Подводный под р. Темзой	»	»	9,35	—	1,0	1,92	» »	1908
Черинг-кросс	Метрополитен	»	»	3,86	—	—	3,86	Лондонская глина	
Тоннель под р. Эльбой	Подводный	Германия	Гамбург	6,0		1,5	3,25	Песок, глина. Применен сжатый воздух	1913
Финсбери-Кокфостер	Метрополитен	—	—	3,66	—		4,5	Лондонская глина	1932
Шельда	»	—	—	7,07	—	—	3,0	» »	
	Подводный	Бельгия	Антверпен	9,4	1,5	—	3,15	Глина, песок	1933
				4,74			8,4	Применен сжатый воздух, глина	
Бостонский	»	США	Бостон	9,0	4,5		9,6	Глина, песок, гравий. Применен сжатый воздух	1932
Бруклинский	Метрополитен	»	Нью-Йорк	6,1	—	—	4,5	Сухой песок, гравий	1933
Гудсонский	Подводный для метрополитена и железной дороги	»	»	5,9	1,0	5,7 5,8	18,0 22,0	Гудсонский ил	
Под р. Сеной	Метрополитен	Франция	Париж	7,8× ×5,9	—	0,75	—	Мергели, гипсы, пески	
Лондонский Андерграунд (щит Прейса)	Подводный	Англия	Лондон	3,66	—	—	до 10	Глина	1933
Новый тоннель Мидтаун (Линкольн) .	»	США	Нью-Йорк	9,45	—	12	до 18	Гудсонский ил	1934
Будапештский тоннель (щит-экскаватор под Дунаем) .	Подводный для водопровода	Венгрия	Будапешт	4,0	—	1	14,16	Глина и разрушенный известняк до 250 *кг/см²*	1933
Тоннель в Детройте .	Гидротехнический	США	Детройт	5,7	—	15	20	Ил, песок, сжатый воздух	1937
Чикагские тоннели .	Метрополитен	»	Чикаго	7,45	—	—	7,6	Глина	1940
Московские тоннели	»	СССР	Москва	6,0	—	—	8,0	—	1941

Примечание: Достигнутая в СССР скорость щитовой проходки, в сложнейших геотехнических и городских условиях, является непревзойденной в мировой практике метростроения.

Таблица 23

Основная характеристика щитов замкнутого контура и условия проходки

Наименование тоннелей	Количество щитов в работе, шт.	Внешний диаметр в *м*	Длина щита в *м*	Толщина оболочки щита в *мм*	Количество домкратов, шт.	Внутренний диаметр домкрата в *мм*	Максимум усилий, развиваемых домкратами, в *т*	Вес щита в *т*	Скорость проходки щитов в *м*	Путь щита в *км*	Характеристика грунтов
Темза (Gb)	1	—	2,74	—	10	—	—	134	0,61 в сутки	—	Лондонская глина
Тоуэр (Gb)	1	—	1,45	13	6	—	—	274	2,74 „		
Сити – южн. Лондон	18	3,38	1,80	13	6	165		—	101,5 в месяц	9,98	Глина, редкие включения водоносных грунтов
		3,47	1,98	13	6	165	179				
Мерси	1	3,12	3,53	19	10	178	770	—	117,37 „	0,4	—
Глазго (Харбор)	1	5,26	2,13	19							
	2		2,59	25	13	178	250	—	0,15 в сутки	0,66	Глина с валунами и песком
Глазго (District)	16	3,72	1,98	13	6	165	100	7	30,48 в месяц	5,95	То же
Блекволл	1	8,43	5,94	63	28/6	203/254	5785	224	2,81 в сутки	0,95	Глина, песок, гравий с водой
Уотерло-Сити	2	4,01	2,13	13	7	178	135	—			
	2	4,19	2,89	13	7	178	135	—	3,00 „	4,56	Глина с песком
	1	7,57	3,30	25	22	178	845	—	—		
Центр, Лондон	—	3,86	2,13	13	6	178	185	—	—	2,92	Лондонская глина
		6,96	2,08	25	22	178	680		—	—	
Бекер-стрит – Уотерло	1	3,96	2,95	25	14	152	475	33	42,00 в месяц	—	Глина и водоносный песок
Гринвич	1	3,96	4,29	25	13	178	850	84	79,00 „	—	
Леа	1	3,78	3,50	25	11	165	—	—	—	0,34	То же
Ротергайт	2	9,35	5,49	57	40	228	6700	—	1,92 в сутки	1,11	„
Кингсвей	1	4,93	2,67	25	16	203	—	—	1,55 „	0,14	Лондонская глина
Черинг-Кросс	—	3,86	2,67	13	10	—	—	—	3,86 „	—	Глина
Большой Северный Странд	—	3,86	2,12	13	8	—	—	—	—	—	
Финсбери-парк — Кокфостер (1932)	16	3,66	—	13	10	—	385	—	макс. 4,5 в сутки	7,45	Лондонская глина
	2	3,57	—	13	10	—	335	—			
	1	6,46	—	19	22	—	847	—			
	3	7,07	—	19	22	—	847	—	макс. 2,7 в сутки	—	То же
Московский метрополитен	30	6,06	4,97	40	24	230	1 800	120	8,0 „ „	—	—
	12	9,57	4,73	20×2	36	280	4 500	340	3,0 „ „	—	—

торов системы Прейса, которые непосредственно связаны со щитом. Этот экскаватор звездообразного типа имеет шесть крыльев, на которых размещается ряд ножей. Последние размещены на различных расстояниях от

ватора и выгружающие ее через наклонный жолоб непосредственно в транспортер, подающий породу в вагонетки подземной откатки

Тоннельный экскаватор Прейса применительно в сооружению тюбов диаметром

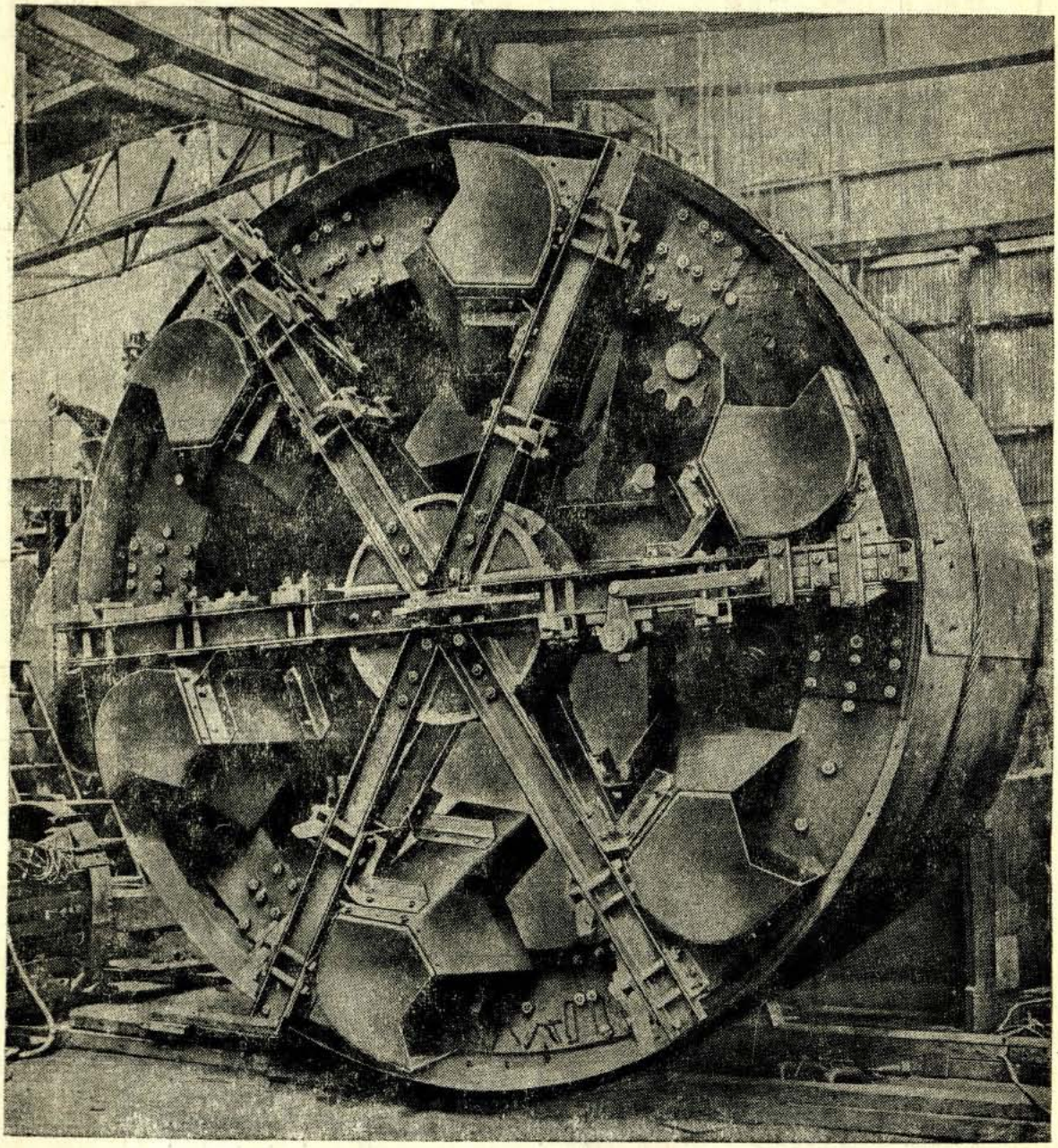


Рис. 343. Механизированный щит системы Прейса

центра щита, на каждом крыле, таким образом, что при вращении вокруг центральной оси тюба происходит разработка по всей поверхности лба забоя. По периферии каждого крыла размещены ковши, подхватывающие породу, разрабатываемую в процессе вращения экска-

3,66 *м* приводится в движение от электромотора мощностью до 60 *л. с.* Нормальный трубоэкскаватор совершает в работе около четырех оборотов в минуту (рис. 343).

Обычно экскаватор Прейса прикрепляется непосредственно к щиту системы Гретхэда,

образуя с ним одно целое, и подвигается вперед по мере продвижения забоя.

Проходка щита с экскаватором ускоряется вдвое против обычной и доходит до 10 *м* готового тоннеля в сутки. При встрече с валунами темп работ замедляется, приходится

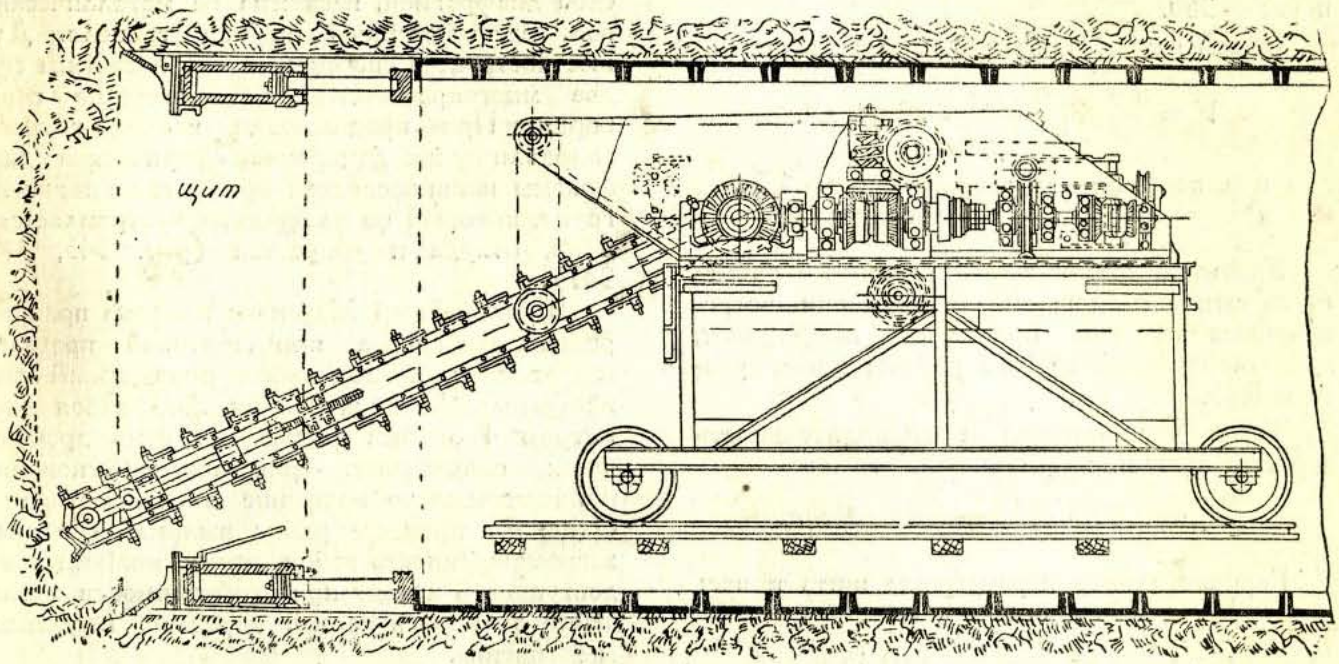


Рис. 344. Механизированный щит системы Томпсона

пневматическими отбойными молотками разбивать валуны, а иногда и взрывать их.

При строительстве тюбов в лондонских глинах применялись также экскаваторы системы инж. Томпсона. В течение 1 часа 30 минут совки, направляемые цепью со стрелами тоннельного экскаватора и приводимые в движение электромотором, срезали в забое слой глины толщиной в 60 *см*. В дальнейшем при продвижении щита режущим краем срезалась недобранная часть породы по периферии тоннельного профиля. Длина цепи экскаватора Томпсона 4,9 *м*, число совков 37 (рис. 344).

Большой интерес представляет также тоннельная машина системы Уайтекера, работающая по принципу машины Прейса [1].

Область применения тоннельных экскаваторов ограничена лишь однородными грунтами при перегонных тоннелях небольшого поперечного сечения. Более крупные профили станционного типа разрабатываются в глинах пневматическими лопатами.

В слабых грунтах, при работе под сжатым воздухом, при текучем забое и при встрече с грунтами, обладающими разными коэфициентами крепости или содержащими валуны, тоннелирование применением тоннельных экскаваторов является затруднительным.

Для характеристики щита системы Прейса приводим извлечение из расчета, произведенного в Метропроекте.

Характеристика элементов механизированного щита системы Прейса

Мощность мотора — 60 *л. с.*

Число оборотов кольца экскавации $n = 2$ в мин.

Диаметр щита — $D = 4$ *м*.

Коэфициент полезного действия передачи = 0,64.

Окружная скорость

$$v = \frac{\pi Dk}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 4 \cdot 2}{60} = 0{,}42 \text{ м/сек.}$$

Усилие на зуб рабочего колеса

$$P = \frac{75 Nr}{v} = \frac{75 \cdot 60 \cdot 0{,}64}{0{,}42} = 6\,857 \text{ кг.}$$

[1] В. Л. Маковский, Сооружение тоннелей метрополитенов. М., 1935.

Производительность погрузочного механизма при щитовой проходке:

объем ковша — 0,02 $м^3$;
число оборотов ротора — 2 *об/мин;*
число ковшей — 6 шт.;
число высыпаний ковша в час — 60;
число высыпаний всех шести ковшей в час — 360.

Объем разрабатываемой породы в час:

$$V = \frac{360 \cdot 0{,}02 \cdot 1{,}2}{1{,}3} = 6{,}64\ м^3.$$

при коэфициенте разрыхления = 1,3
и « » заполнения = 1,2.

Учитывая возможность задержек в работе из-за смены резцов, смазки и уборки встретившихся валунов, принимаем коэфициент, характеризующий эффект работы щита, равным 0,85.

Тогда практическая производительность агрегата составит:

$$V_1 = 6{,}64 \cdot 0{,}85 = 5{,}64\ м^3/час.$$

Горизонтальное перемещение щита в час:

$$l = \frac{4V_1}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 5{,}64}{3{,}14 \cdot 4^2} = 0{,}45\ м.$$

За 8-часовую смену:

$$0{,}45 \cdot 8 = 3{,}60\ пог.\ м.$$

Приведенный расчет носит поверочный характер по производительности погрузочных ковшевых устройств тоннельного агрегата. При глубине внедрения резцов в породу за один оборот в 9—15 *мм* скорость щитовой проходки данным типом агрегата лимитируется производительностью породулавливающих устройств.

Щиты системы Макензена

Попытка введения элементов механизации разработки забоя при щиговой проходке была сделана инж. Макензеном в условиях пересечения разнозернистых песчаных грунтов.

Вводя усовершенствованные конструктивные элементы в обычную систему щита как подвижной металлической крепи, Макензен подошел к прототипу, приближающемуся к механизированному щиту.

Особенность первого типа щита, предложенного Макензеном, заключалась в оснащении щита рядом горизонтальных, консольного типа ножей, размещенных в голове щита, непосредственно по лбу забоя прокладываемого тоннеля. Эта группа ножей, конструктивно сопряженная с мощной сферической диафрагмой, насажена на металлический вал, расположенный по оси тоннеля. Для жесткости всей системы на вал насажены еще две многокрыльчатые металлические переборки. При продвижении вперед группой гидравлических домкратов сферической диафрагмы ножи последней врезаются в песчаный грунт, который по площадкам «устремляется» вниз, откуда и убирается (рис. 345, 346, 347).

В дальнейшем Макензен изменил принцип разработки грунта при щитовой проходке применением по лбу забоя ряда ножей при вращательном движении их. Лоб забоя диаметром 4 *м* был разбит на семь дробных ячеек, снабженных спиральными ножами, приводимыми во вращение электромоторами. Однако в процессе работ выявилась полная загроможденность забоя этими ножами и недоступность к нему при необходимости извлечения валунов и корней деревьев, пересекаемых щитом.

Это привело в дальнейшем к системе размещения четырех спиральных ножей в забое четырехметрового профиля тоннеля. Такое размещение ножей давало возможность при остановке работы агрегата подойти вплотную к забою.

При испытании этой относительно механизированной системы разработки забоя в неустойчивых, преимущественно песчаных грунтах выявился ряд обвалов породы, образование пустот и осадок на поверхности.

Макензеном были произведены испытания в отношении влияния щитовой проходки агрегатом на поверхность. При глубине проходки около 12 *м* в песчаных грунтах на поверхности была возведена специальная кирпичная стена. В процессе проходки уже наблюдались значительные трещины в этой опытной стене, а после пропуска щита под ней стена развалилась. Этот опыт побудил Макензена при конструировании щита для проходки специального тоннеля в Берлине значительно развить аванбек щита. При диаметре щита в 4 *м* аванбек выступал на 3,6 *м* при общей длине корпуса щита в 6,1 *м*. Аванбек был устроен в соответствии с углом естественного откоса

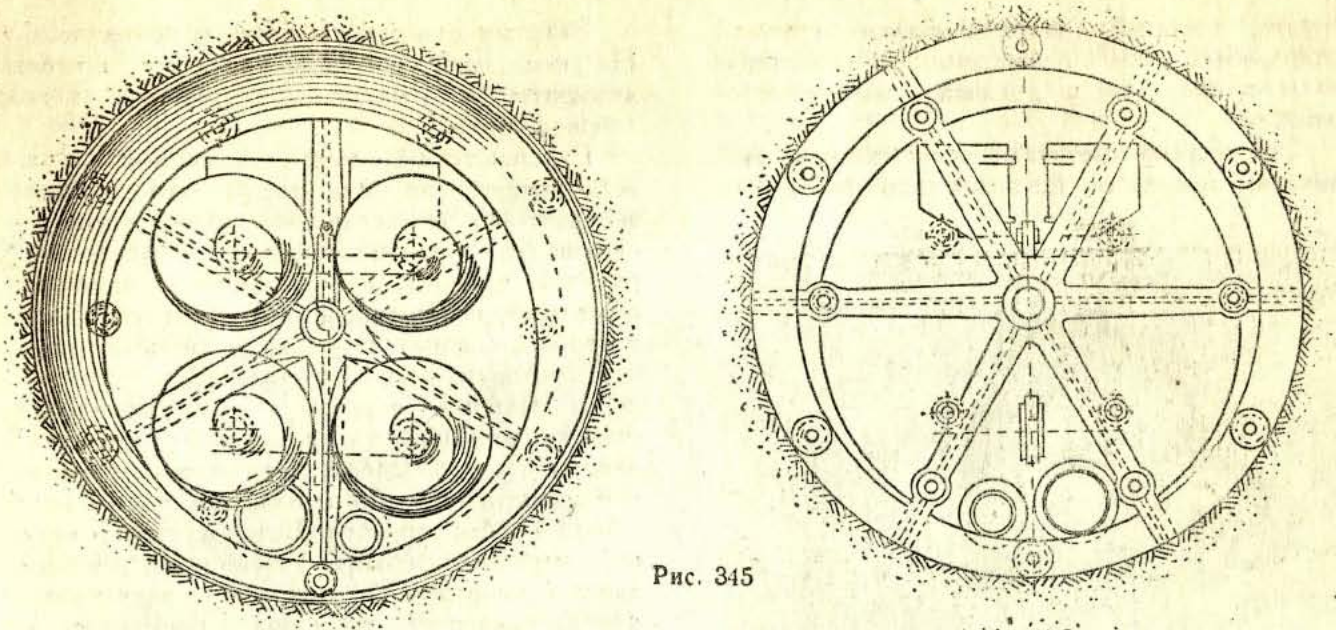


Рис. 345

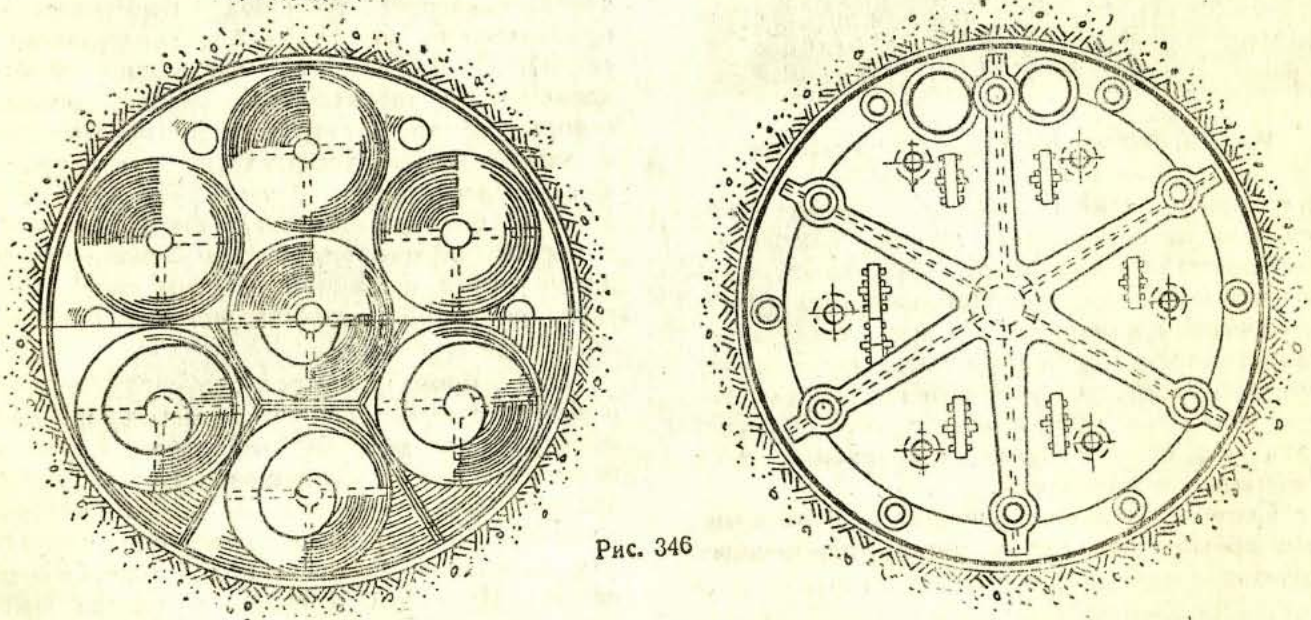


Рис. 346

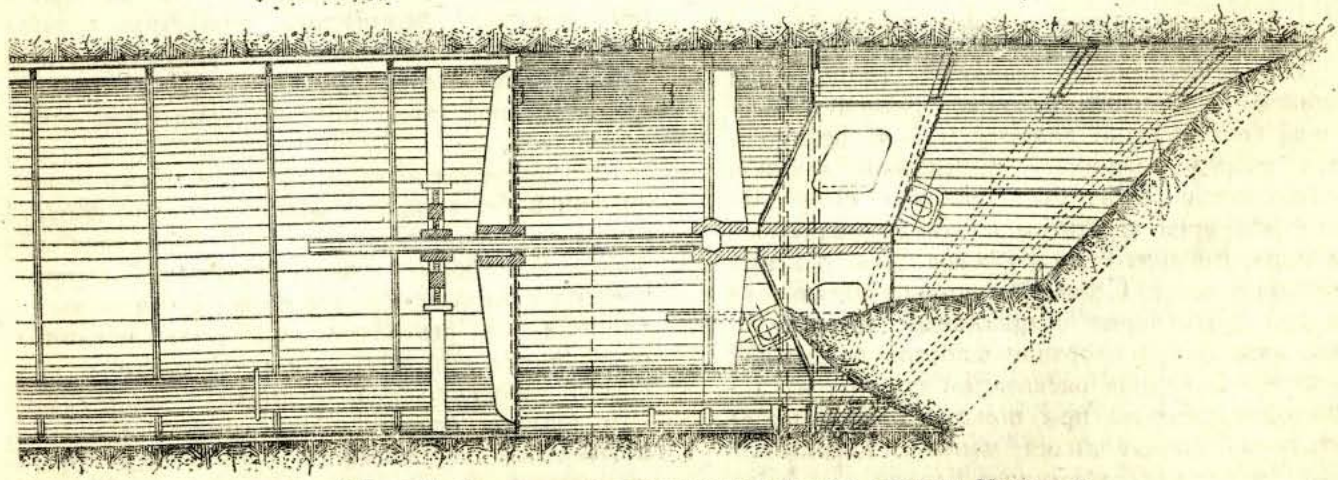


Рис. 345—347. Схемы механизированных щитов системы Макензена

грунта, который разрабатывался группой спиральных ножей, насаженных на отдельные валы, приводимые в движение электромоторами.

Эта система требовала значительного увеличения мощности щитовых домкратов для

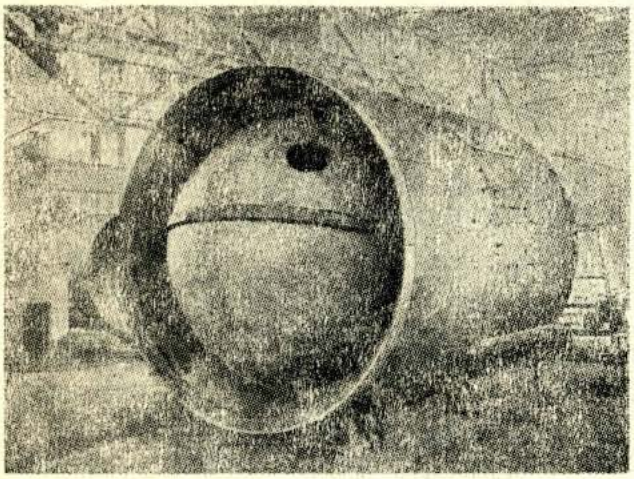


Рис. 348. Механизированный щит-экскаватор

продвижения щита вперед, при значительном лобовом сопротивлении грунта. Особенные затруднения выявлялись при вписывании щита в кривые, с одной стороны, вследствие ограниченной маневренности щита при сильном развитии аванбека, а с другой — при включении на кривой односторонней группы домкратов; суммарная мощность домкратов оказывалась недостаточной для преодоления всех сложных сопротивлений.

Система Макензена получила ограниченное применение лишь в мягких однородных грунтах.

Механизированный щит-экскаватор

При сооружении подводного тоннеля под Дунаем в Будапеште впервые применили щит новой конструкции, диаметром 3 *м*, оснащенный впереди закрытой подвижной лобовой поверхностью. Щит был снабжен специальным режущим агрегатом по типу секторного затвора, имевшего ряд фрезов для резания породы в забое. Срезанная порода подавалась внутрь щита через специальный материальный люк по транспортеру в поезда подземной откатки. В период экскавации породы из забоя одновременно при помощи специального эректора производился монтаж тоннельной обделки из железобетонных блоков.

Энергия для работы щита гидравлическая. На последней работали эректор, щитовые домкраты и режущий секторный затвор впереди щита.

Будапештский механизированный щит, работающий по принципу одноковшевого экскаватора, обладает большими преимуществами перед применяющимися в однородных грунтах щитами вращательного движения. Этот щит, оснащенный режущим секторным затвором, с одной стороны, превращает инертную щитовую крепь в активный агрегат, разрабатывающий породу, с другой — всегда имеется возможность создать сферический, закрытый лоб забоя, ограждающий щит, а следовательно и тоннель, от устремления в него слабых грунтов. В тех случаях, когда щит пересекает грунты устойчивые, режущий агрегат работает по принципу экскаватора, преодолевая крепость пород с временным сопротивлением до 250 *кг/см*^{2} (разрушенная скала). В тех случаях, когда щит должен врезаться в относительно слабые породы, которые проявляют тенденцию устремляться в забой, ковш экскаватора превращается в секторный затвор (рис. 348, 349). При этом из имеющихся в нем люков порода может поступать внутрь тоннеля, при одновременном продвижении щита при помощи гидравлических домкратов. Скорость щитовой проходки до 14—15 *м* в сутки.

При прокладке водосточного тоннеля в Дортмунде был применен метод щитовой проходки, при обделке (диаметром 4,2 *м*) из бетонных блоков. Сооружение канала производилось механизированным щитом, который с успехом был применен при щитовой проходке для подводных тоннелей под Дунаем (в Будапеште). Щит был оснащен в голове щитового корпуса сферическим режущим агрегатом. При помощи последнего разработка лба забоя была механизирована. Щит продвигался вперед при помощи гидравлических домкратов.

Поскольку проходка велась в мягких грунтах, во избежание выплывов и осадок поверхности требовалось тщательное крепление лба забоя. В данном случае сферический агрегат, помимо своего основного назначения — экскавации забоя, выполнял еще роль механического крепления лба забоя. Впереди сферический агрегат был оснащен специальным комплектом ножей. Последние были расположены по четырем горизонтам сферы и выступали соответственно на 20, 40,

60 и 80 *мм*. Сферический агрегат во время резания породы приводился в действие гидравлически, с использованием цепей Галля. При ходе гидравлических домкратов в 550 *мм* обеспечивалось перемещение ножей режущего аппарата на 1 *м*. Толщина стружки в процессе резания породы составляла 20 *мм*. Процесс

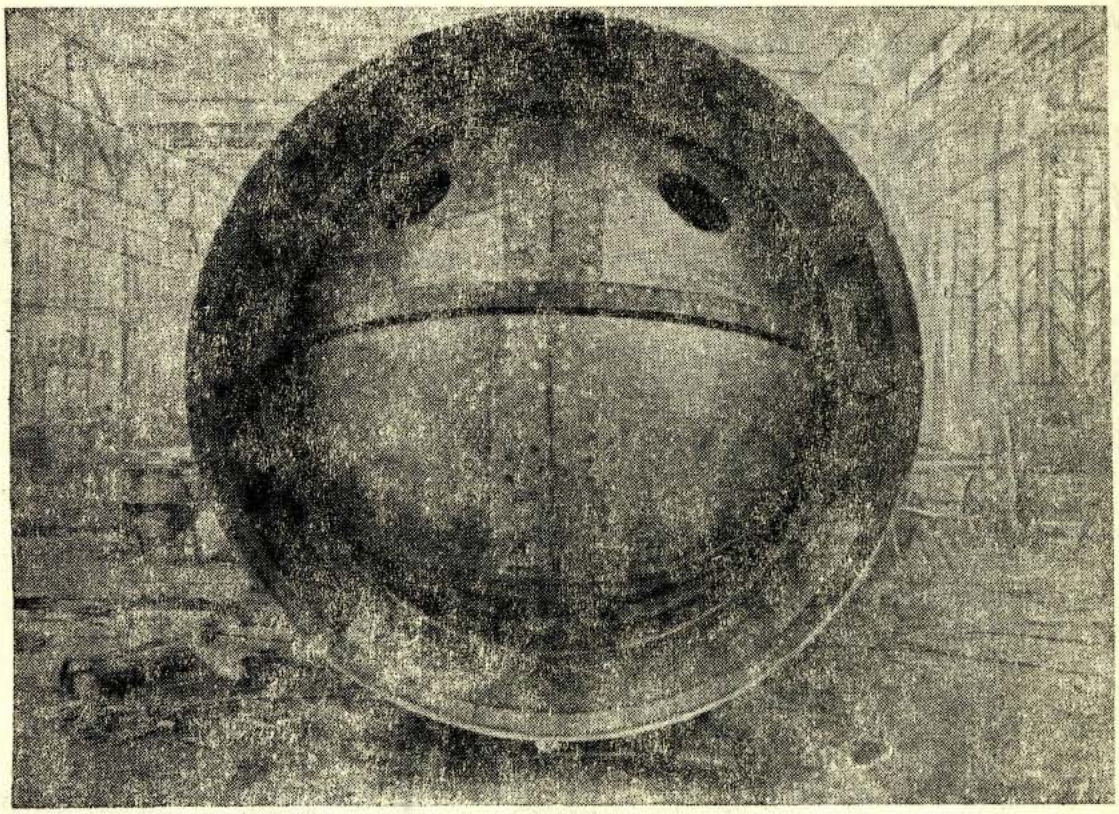


Рис. 349. Механизированный щит-экскаватор

резания продолжался до тех пор, пока забой не был разработан на ход поршня щитовых домкратов, после чего происходила продвижка щита вперед. Срезанная порода погружалась на скребковый транспортер и на вагонетки подземной откатки (рис. 350).

Особо важным моментом для примененного механизированного щита является управление им. В отличие от обычного щита с открытой грудью, вождение механизированного щита со сферическим лбом забоя требует специальных приемов. В связи с тем, что центр тяжести щита из-за значительного веса сферического аппарата размещен близко к голове щита, проявляется тенденция к «клеванию» корпуса. Это явление локализуется применением металлических крыльев, которые выдаются за внешнее очертание корпуса в виде стальных пластин. Последние, помимо удержания щита от клевания, не дают ему делать поворот вокруг своей оси. Эти стальные крылья имеют возможность выдвигаться за контур щита и быть убранными. При помощи специальных винтов крылья могут быть поставлены под любой угол по отношению к щиту и выдвинуты за пределы щита (максимум на 15 *см*). Управляя крыльями, представляется возможность дополнительно регулировать положение щита по проектному направлению как в плане, так и в профиле.

Проходка щитом водосточного коллектора в Дортмунде велась при наличии кривых весьма малого радиуса (до 100 *м*). Применение щита давало возможность механизировать наиболее трудоемкие работы в виде экскавации лба забоя, обеспечивало полную безопасность работ и устраняло осадку поверхности.

Следует отметить, что вслед за продвижением щита велось нагнетание раствора за обделку, для заполнения всех пустот. Разработка велась таким порядком, что вышележащие грунты не успевали быть нарушен-

ными. В тех местах, где при проходке встречались водоносные грунты, был применен сжатый воздух под давлением до 0,7 *ат*, что обеспечивало практическую сухость забоя.

Конструкция тоннельной обделки для водостока состояла из бетонных блоков толщиной 30 *см* и внутреннего железобетонного кольца толщиной 20 *см*.

Проходка в илистом грунте производилась под сжатым воздухом без особых осложнений. При пересечении гравелистых воздухопроницаемых грунтов в отдельных случаях имели место прорывы сжатого воздуха.

Особенно большие осложнения возникли при проходке под большим прудом, который был засыпан культурным слоем толщиной до 10 *м*.

Скорость проходки щитом водосточного тоннельного коллектора в городских условиях Дортмунда составляла 8—10 *м* готового тоннеля в сутки.

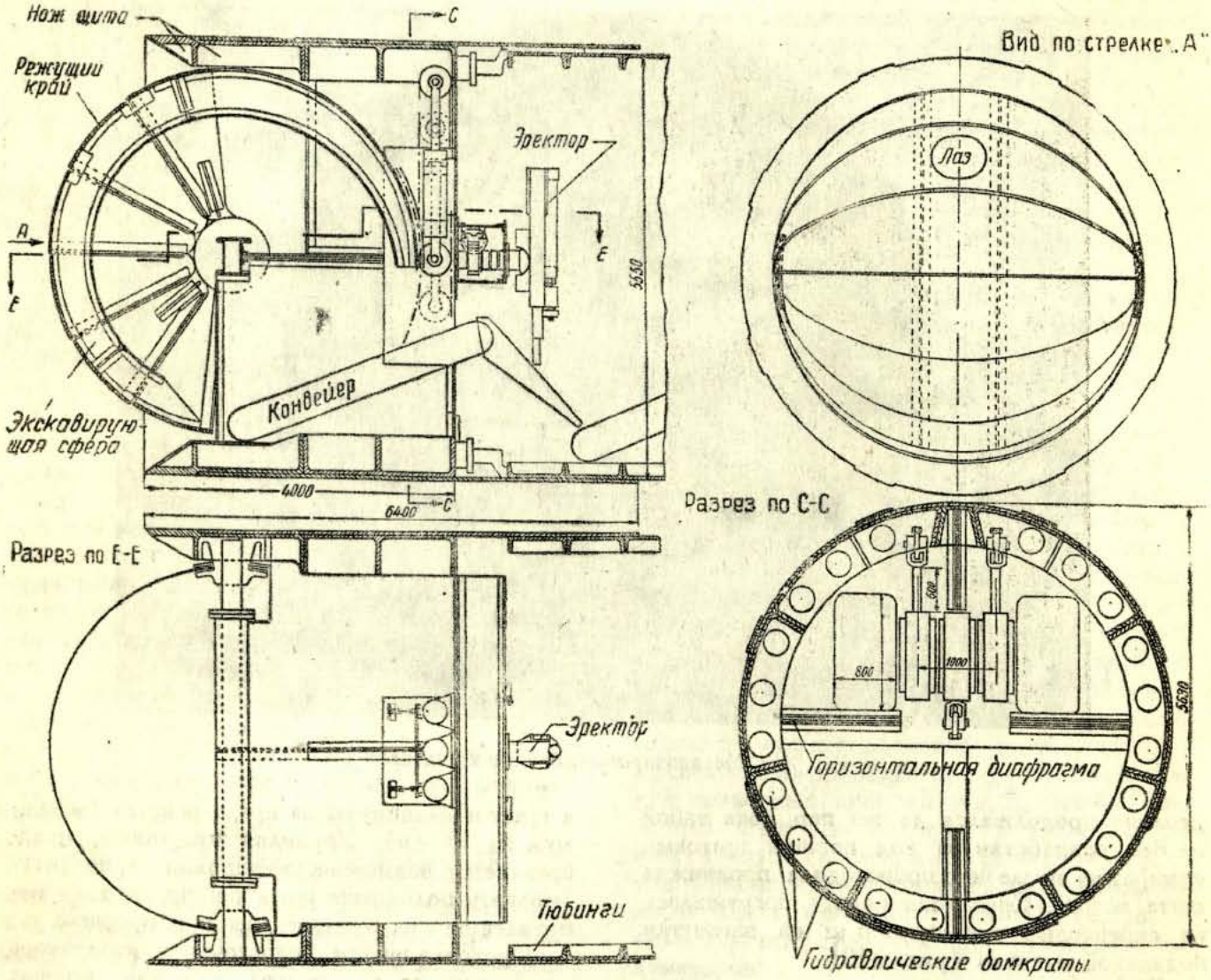


Рис. 350. Механизированный щит-экскаватор

Метропроектом разработан специальный щит-экскаватор для сооружения тоннеля диаметром 3,5 *м*. Этот щит в значительной степени отличается от будапештского принципом своей работы, кинематической схемой и характером резания забоя. Помещенный впереди щита полусферический ковш имеет две режущие кромки. На последних поставлен ряд съемных полудисковых ножей, служащих

для нарастающего врезания кромки в породу. Активный рабочий ход ковша экскаватора сообщается от четырех гидравлических домкратов и через систему двух кривошипов передает сферическому ковшу поворот на 62°. При этом получается большой крутящий момент на шейке вала, непосредственно прикрепленного к мощному корпусу самого щита. В период поворота обе режущие кромки успевают произвести работу резания по забою сверху вниз, причем каждая из кромок берет породу с опережением примерно на 5 *см*. Продвижение щита вперед производится в тот момент, когда первая кромка находится в положении горизонтального диаметра забоя щита, а вторая находится наверху. Со лба забоя порода в процессе резания поступает непосредственно из-под режущего ковша на скребковый транспортер, направляющий породу через полый вал эректора, непосредственно в сосуды тоннельного транспортера.

Транспортирование породы из щита не мешает непрерывной работе эректора, монтирующего из отдельных блоков обделку сооружаемого тоннеля. Продвижение механизированного щита диаметром в 3,5 *м* осуществляется при помощи 24 гидравлических домкратов мощностью по 50 т каждый, упирающихся непосредственно в выведенную тоннельную обделку. С целью обеспечения наиболее правильного направления движения механизированного щита по трассе щит, кроме основных щитовых домкратов, оснащен еще четырьмя домкратами. Последние имеют назначение выправлять щит, вписывать его в кривые соответственно с проектной трассой тоннеля.

Работы по проходке этим механизированным щитом через грунты, отличающиеся физико-механическими свойствами, производятся с учетом следующих обстоятельств:

а) при пересечении известняков с временным сопротивлением $R > 250$ *кг/см*^{2} процесс резания становится технически нецелесообразным; здесь предпочтение должно быть отдано другим методам разработки, в частности производству взрывных работ, как дающих наибольший технико-производственный эффект;

б) разработка суглинков, глин, плотно слежавшихся песков и скалистых грунтов с временным сопротивлением $R \leqslant 250$ *кг/см*^{2} производится применением резания и скалывания породы;

в) при пересечении грунтов плывунного характера режущий ковш автоматически превращается в секторный затвор, образуя закрытый сферический лоб забоя, не дающий слабым грунтам доступа непосредственно в тоннель.

Регулирование направления щита производят выпуском слабых грунтов через люки, руководствуясь применяемым в практике слепым методом выдавливания породы. Этот метод обычно применяется в практике при проходке в слабых плывунах щитами с закрытой грудью. По произведенным подсчетам применения механизированного щита (в отличие от щитов обычной системы, где скорости проходки лимитирует преимущественно разработка забоя, занимающая от 50 до 80% времени в общем цикле щитовых работ) лимитом скорости может оказаться работа эректора, монтирующего сегменты тоннельной обделки.

При проектировании настоящего щита использованы данные опытов ряда научно-исследовательских институтов и лабораторий по резанию горных пород. При изучении условий резания глины выявлена эффективная скорость резания $v = 0{,}7$ *м* в секунду. Однако эта скорость резания имеет колебание от 0,4 до 1,25 *м/сек*. Усилия резания глины $P = 1{,}9\ tlB$, где t — сопротивление резания в *кг* (для плотных глин — 2,5, для песка — 0,25), l — толщина стружки в *см*, B — линия резания в *см*, 1,9 — коэфициент, зависящий от угла резания.

Необходимая мощность для резания глинистых грунтов

$$N = \frac{Pv}{75\eta} = \frac{1{,}9\ tlB}{75\eta}\ v,$$

где v — скорость 0,25 — 1 *м/сек*.

Применительно к известнякам с временным сопротивлением 250 *кг/см*^{2} выявлены усилия на 1 *пог. см* скалывающей кромки 50—100 *кг*, при скорости резания 0,7 *м/сек*. Величина 100 *кг* принимается при затуплении режущей кромки > 2 *мм*, а 50 *кг* — при кромке < 2 *мм*. Запроектированный щит был применен при проходке тоннельного коллектора сооружаемого Дворца Советов. Надлежит особо подчеркнуть, что приведенные выше данные по резанию горных пород являются весьма условными. Для установления требуемых для проектирования механизированных щитов параметров по резанию, скалыванию и дроблению пород необходимы дальнейшие научно-исследовательские и экспериментальные работы.

ПРОЕКТЫ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ ЩИТОВ МЕТРОПРОЕКТА

Как указывалось выше, основные недостатки обычного типа щита выражаются прежде всего в следующем: а) отсутствие в щите элементов, разрабатывающих непосредственно забой, б) выдача породы из забоя мешает операции укладки тюбингов, производимой эректором, и в) в условиях слабых грунтов применение щита с открытой грудью требует крепления его и, кроме того, применения сжатого воздуха. В связи с изысканием способов устранения приведенных недостатков Метропроектом были (под руководством автора) запроектированы щиты для проходки тоннелей внешним диаметром $D = 2{,}6$ *м* и $D_1 = 3{,}5$ *м*.

Скорости щитовых проходок при механизированных агрегатах запроектированы порядка 10—20 *м* в сутки.

* * *

Для проходки тоннелей $D = 2{,}6$ *м* запроектирован унифицированный корпус щита, позволяющий устанавливать различного типа механизмы и тоннельные агрегаты для разработки грунтов. При этом диаметре щита длина его 3 *м*. Количество домкратов, размещенных по периметру щита,—16 шт., а суммарное усилие, развиваемое ими,—450 *т*.

Для работы в неустойчивых породах щит оснащен специальной диафрагмой в опорном кольце, которая имеет две двери размерами 650×900 *мм*. В случае необходимости двери могут быть открыты для доступа к забою с целью уборки валунов, мешающих нормальному движению вперед. Когда же пересекаются устойчивые породы, диафрагма может быть убрана. Непосредственно в диафрагме устроены небольшие закрывающиеся люки размерами 250×250 *мм* для выжимания через них плывунов, регулирования движения щита и снятия лобового сопротивления. Вся конструкция корпуса щита весит 8,4 *т*. Этот щит приспособлен для установки нижеприведенных экскавирующих механизмов.

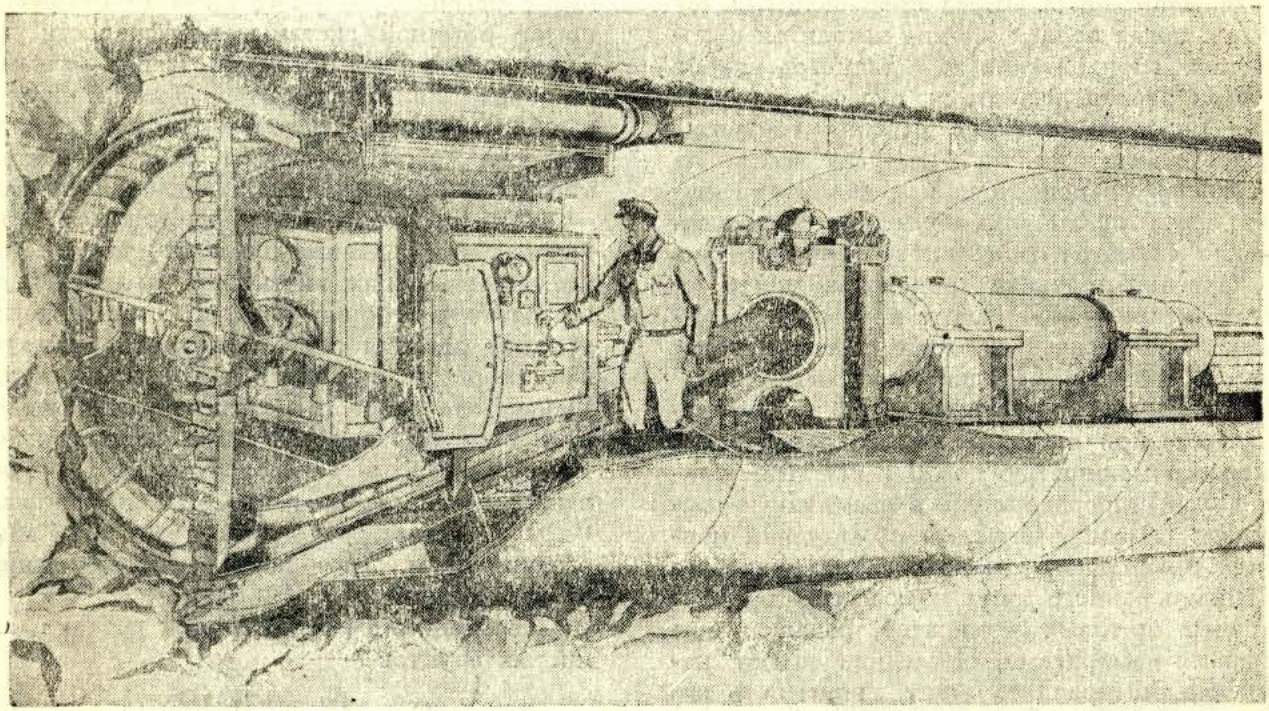


Рис. 351. Механизированный щит системы В. А. Варганова

Механизированный щит системы инж. В. А. Варганова

Разработка породы достигается вращением крестообразного бара фрезерной машины, на котором размещен ряд зубков, дисковых ножей и клиновидных дробителей в зависимости от характера породы. Работа этим баром

в глине производится следующим порядком. Зубками, укрепленными на одной половине крестообразного бара, при вращении образуется ряд концентрических углублений по

при встрече с выклиниваниями, не предусмотренными геологическим прогнозом.

Разработанная порода поступает на скребковый транспортер, расположенный в нижней

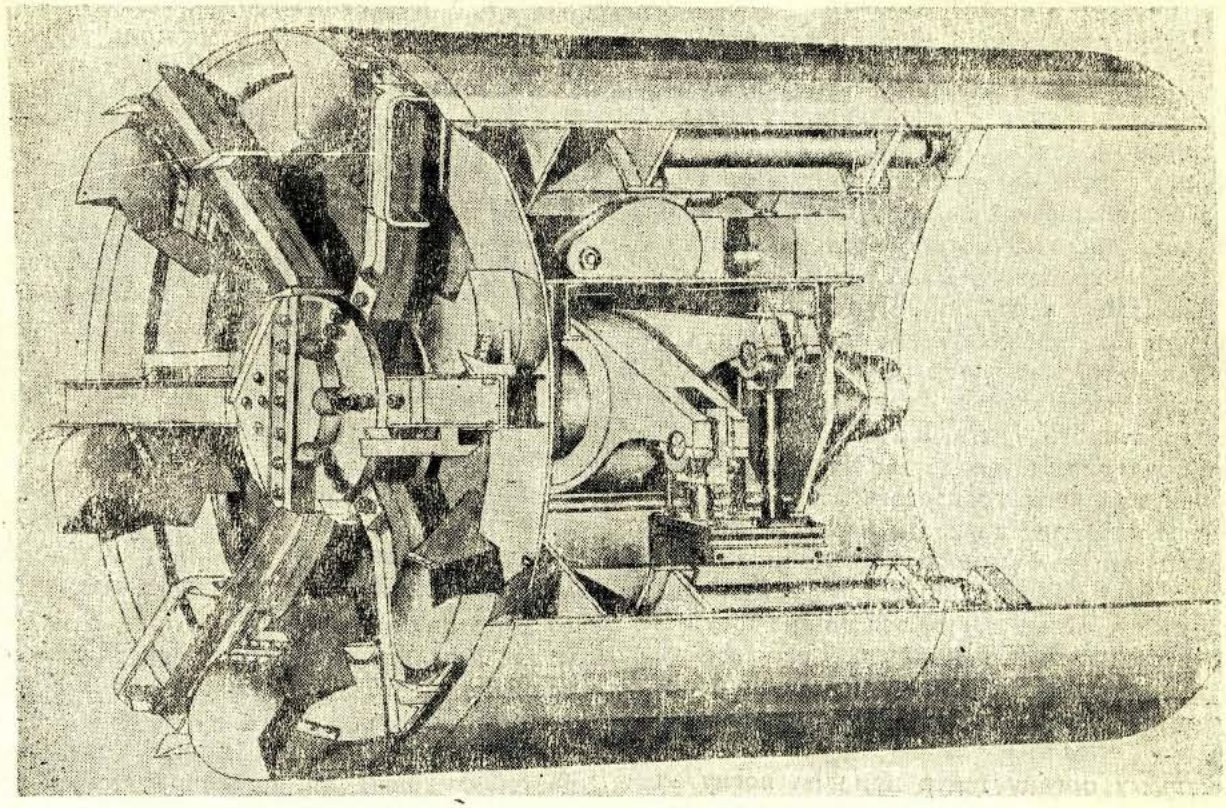


Рис. 352 а. Механизированный щит системы Волкова

лбу разрабатываемого забоя. При вращении другой половины бара, на котором насажены дисковые ножи, происходит срезание стенок породы, образующих углубление, созданное зубками первой половины бара (рис. 351).

Наиболее сложно обстоит дело с разработкой известняков. Здесь предусматривается, как и в первом случае, образование специальными зубками концентрических углублений, а затем откалывание выступов специальными клиновидными дробителями.

Для вращения бара предусматривается электрическая энергия, а для поступательного движения самого бара — гидравлическая или пневматическая энергия. Бар, будучи литым и крестообразной формы, представляется чрезвычайно удобным для шандорного крепления забоя в случае необходимости, при возможном выклинивании слабых пород в забое. Машина снабжается электромагнитным тормозом для остановки ее во избежание поломок

части профиля, и выдается из щита в тоннель.

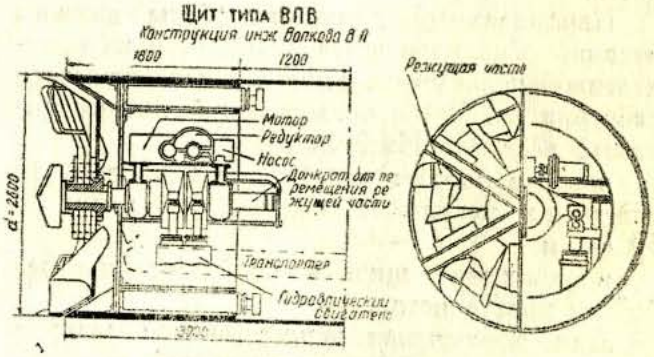


Рис. 352 б. Механизированный щит системы В. П. Волкова

Фрезерная машина имеет поступательное перемещение режущей части независимо от щита.

Подача бара осуществляется под сжатым

воздухом давлением 6 *ат*. При подаче бар прижимается ко лбу забоя усилием в 5 *т*. Вес механизмов щита — 11,45 *т*, вес всего щита — 13,55 *т*. Мощность мотора режущего органа щита — 14,5 *квт*.

Механизированный щит системы инж. В. П. Волкова

Щит системы инж. Волкова (рис. 352 а, б) имеет унифицированный корпус и отличается от других систем своими механизмами. Последние смонтированы на валу, который вращается со скоростью двух оборотов в минуту, при системе храпового колеса и двух рычагов, приводимых в действие гидравлическим двигателем. Вал располагается по оси щита и оснащен в забойной части режущим органом с системой погрузочных устройств по типу механизированного щита Прейса.

Вал поддерживается двумя подшипниками и упорной торцовой траверзой, воспринимающей осевое давление на вал и передающей его через поперечные балки на корпус щита. На валу насажено храповое колесо.

Вал имеет шпонки, позволяющие осуществить поступательное движение его вместе с режущей частью на длину, большую половины длины блока тоннельной обделки (до 30 *см*).

Режущему органу щита придана вогнутая форма, благодаря чему при проходке возможна центрировка положения щита.

Кроме того, при проходке в неустойчивых породах вогнутость может предохранить от нарушения породы, находящейся вне контура щита.

Кардинальный принцип работы данного механизированного щита базируется на определенной последовательности и независимости действия режущего органа и собственно щитового агрегата. Имеется в виду:

резание породы с одновременной подачей режущего механизма вперед, на длину до 30 *см*, и

продвижение щита в подготовленное забойное пространство.

Для обеспечения непрерывности выдачи породы предусмотрен специальный шарнирный лоток, прилегающий к режущей части механизма.

При проходке неустойчивых пород применяется специальная диафрагма, дозирующая поступление их в тоннель.

Вес механизмов щита (включая и вес насоса) — 4,1 *т*; общий вес щита при унифицированном корпусе — 17,3 *т*. Мощность мотора режущего органа щита — 22 *квт*.

Механизированный щит системы инж. С. Г. Кубкина и В. А. Мухина

Отличие щита системы инж. Кубкина и Мухина сводится к новому типу механизмов для разработки породы, при унифицированном корпусе $D = 2{,}6$ *м*.

В центре щита, параллельно горизонтальной оси, располагается коренной вал, приводимый в действие двумя рычагами, осуществляющими возвратно-качательное движение вала, с общей амплитудой колебания в 52°. Эти рычаги приводятся в действие домкратами с шаровой поверхностью, благодаря чему они имеют возможность несколько отклоняться, когда приведены в действие (рис. 353 а, б).

На конце вала со стороны забоя помещается режущая часть в виде конуса, обращенного в сторону забоя. На поверхности конуса расположены режущие элементы.

Порода при разработке забоя отваливается вниз и в дальнейшем перемещается скребковым транспортером, расположенным по подошве тоннеля.

Этот щит снабжен, кроме того, герметической диафрагмой, предохраняющей тоннель от заплывания породой щита в случае проходки в плывунах.

Процесс резания осуществляется, как указано выше, поворотом конуса попеременно то в одну, то в другую сторону со скоростью качания 1 *об/мин*. Вес механизмов щита — 5,3 *т*; общий вес всего щита при унифицированном корпусе — 18,5 *т*.

Механизированный щит системы инж. Г. С. Каханова ($D = 3{,}5$ м)

Металлический корпус механизированного щита содержит два кольцевых цилиндра, имеющих вращение в противоположные стороны. На этих цилиндрах закреплены режущие металлические диски, изогнутые по винтовым линиям и снабженные рядом выступов. При продвижении щита вперед мощными гидравлическими домкратами в период поступательного движения самого щита происходит одновременное вращение указанных кольцевых цилиндров, экскавирующих и режущих грунт. Врезающиеся в породу грани высту-

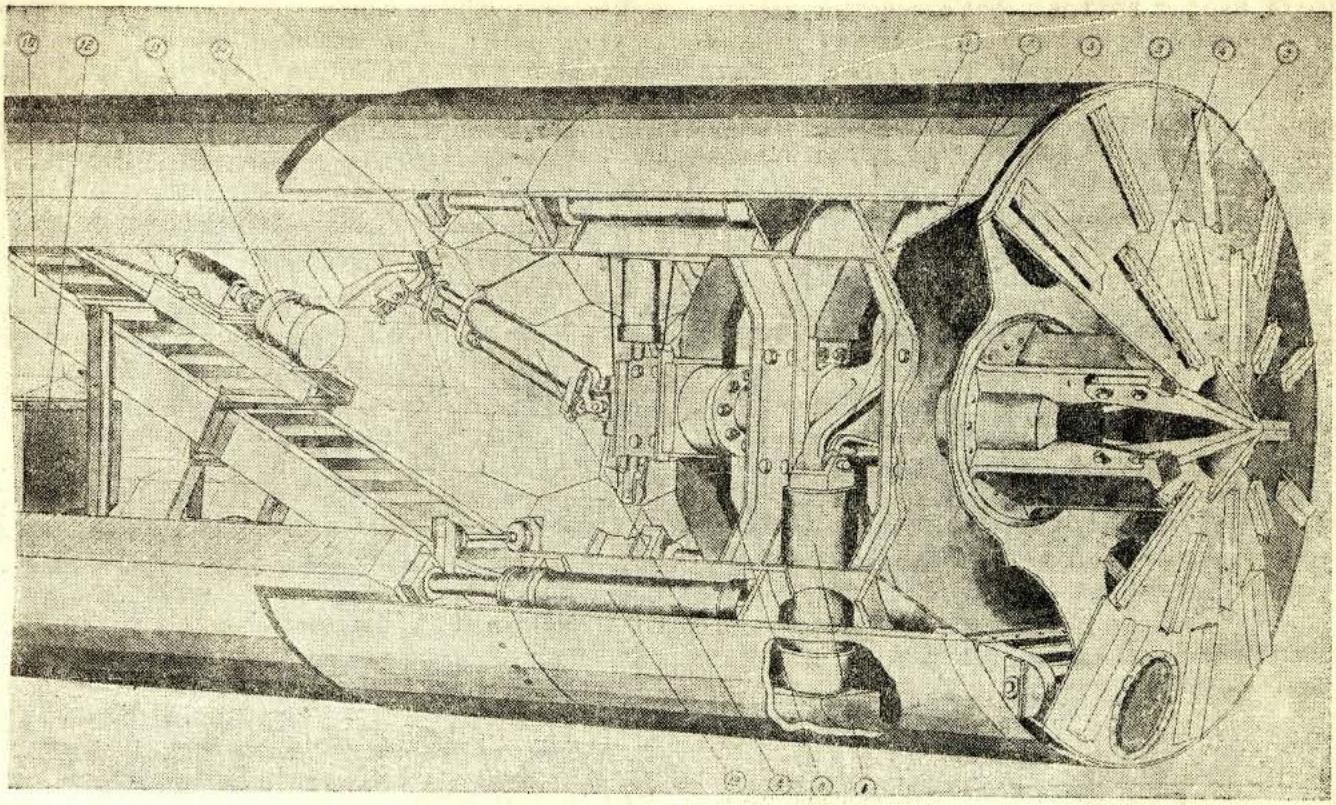


Рис. 353 а. Механизированный щит системы С. Г. Кубкина и В. А. Мухина

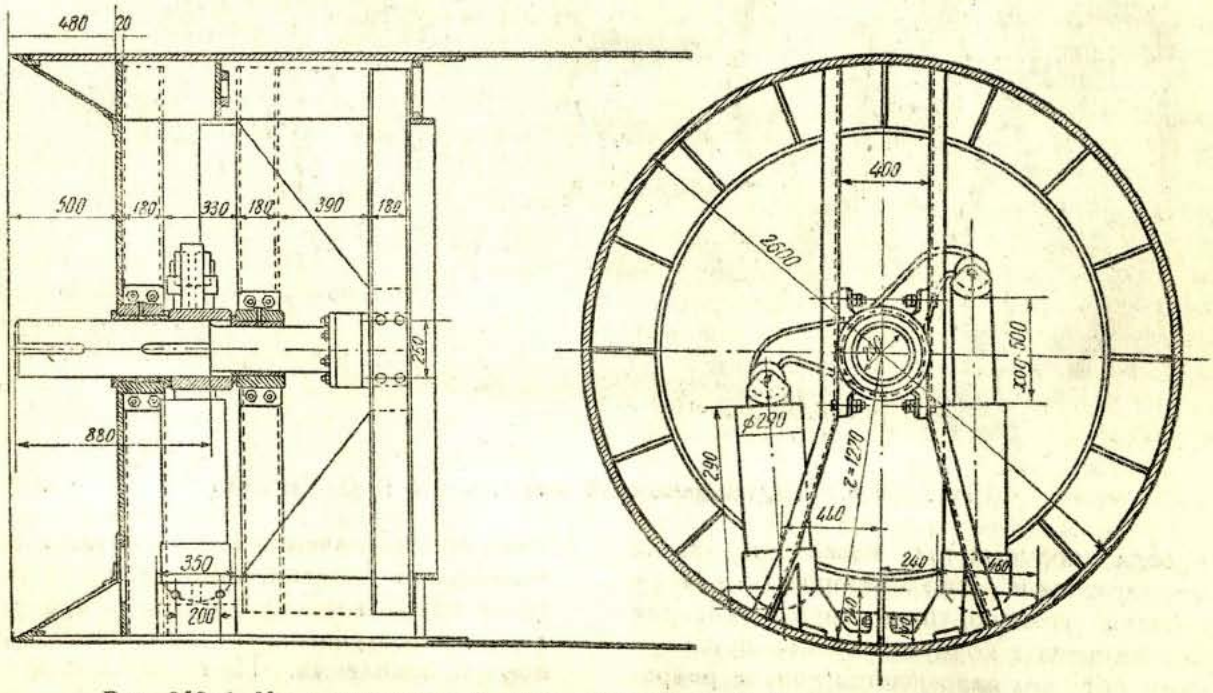


Рис. 353 б. Механизированный щит системы С. Г. Кубкина и В. А. Мухина

пов имеют ряд зубцов. В процессе резания порода входит внутрь через отверстия выступов в ковши, образуемые системой внутренних переборок. При вращении цилиндров срезанная порода поднимается наверх и оттуда транспортируется в расположенную по центру оси тоннеля транспортную трубу, которая жестко соединена с корпусом самого щита.

Таким образом разрешается вопрос разработки лба забоя, лимитирующего темпы щитовой проходки (рис. 354 а, б).

Транспортирование экскавируемой породы в период работы щита-экскаватора происходит непрерывно при помощи шнека, непосредственно расположенного в трубе. Рычаг эрек-

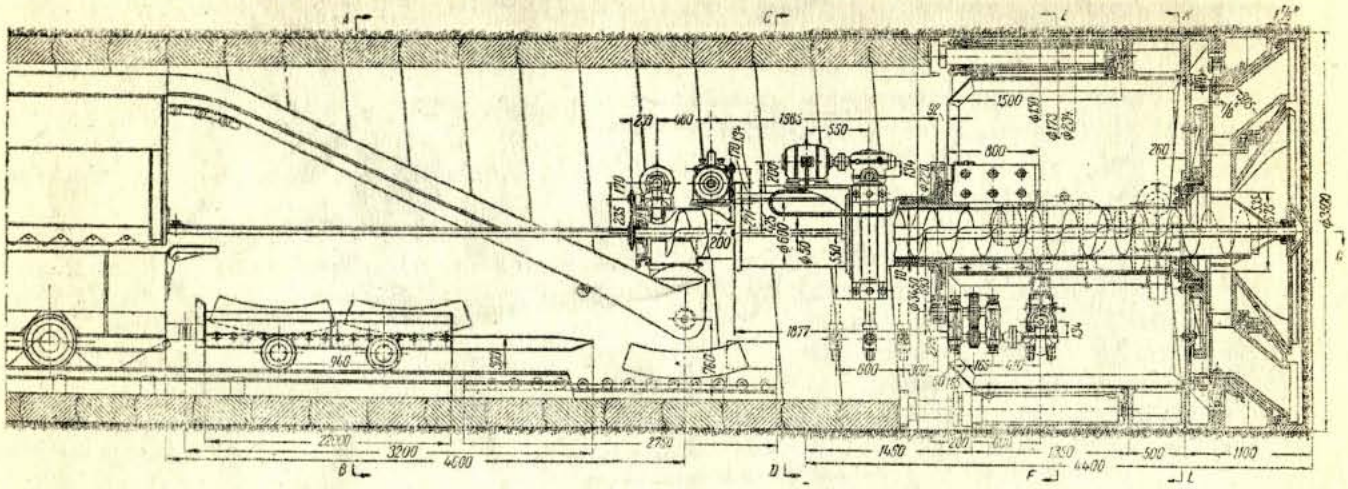


Рис. 354 а. Механизированный щит системы Г. С. Каханова

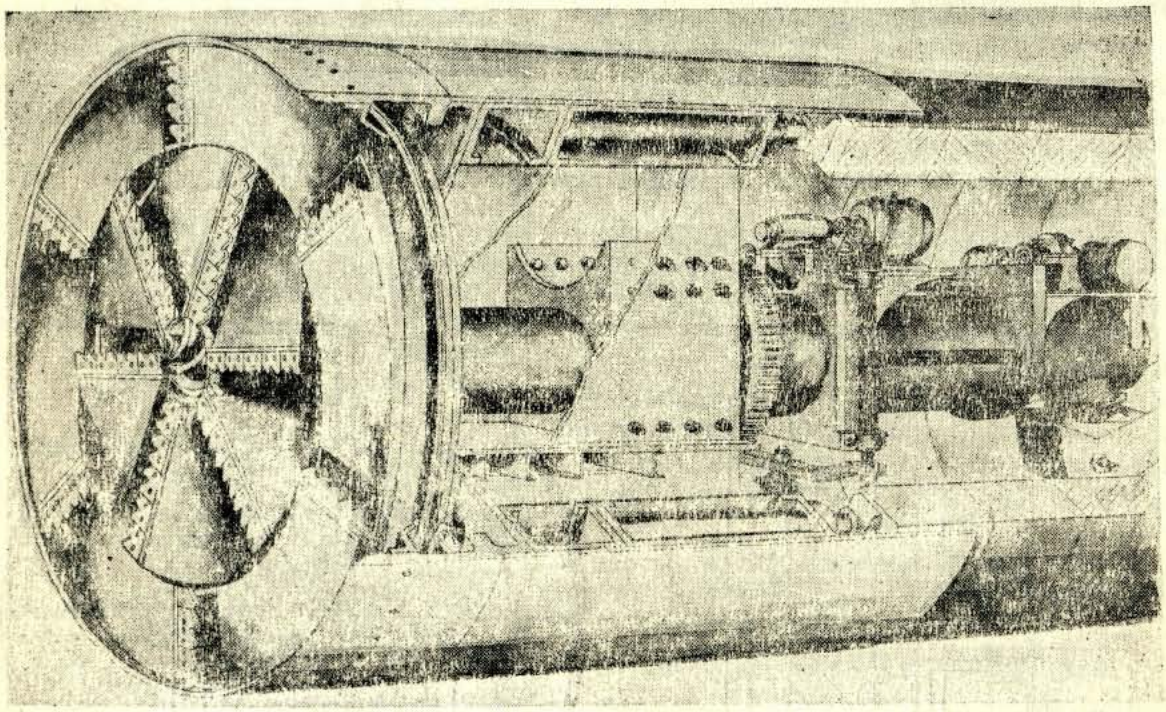


Рис. 354 б. Механизированный щит системы Г. С. Каханова

тора, предназначенный для монтажа сегментов тоннельной обделки, прикреплен к указанной выше трубе и может совершать вращательное, а равно поступательное движение в радиальном направлении. При указанной системе обеспечивается независимость работы эректора по монтажу тюбингов, при одновременной

выдаче породы. При этом ни одна из указанных операций не является для другой помехой, неизбежной в обычной конструкции щита и эректора.

Обеспечивая непрерывность выдачи грунта и укладки сегментов тоннельной обделки, в процессе интенсивного поступательного движения щита, при наличии пород, которые по своим физико-механическим свойствам допускают резание, можно ожидать значительных скоростей проходок, превышающих скорости, получаемые применением обычных типов щитов. Принимая, например, высоту режущего выступа $a = 30$ *см*, количество выступов на вращающейся части $n = 3$, ориентируясь при этом, что лимитом для продвижения щита является не разработка лба забоя, а монтаж тюбингов, и принимая время для монтажа одного кольца тюбингов шириной в 75 *см* $t = 40$ мин., теоретически получаем участок длиною

$$l = \frac{60 \cdot 24 \cdot 0{,}75}{40} = 27 \text{ м}$$

при непрерывной работе.

При продвижении на эту длину режущая часть щита экскаватора должна будет совершить число оборотов в час:

$$n = \frac{27}{3.24 \cdot 0{,}30} = 1{,}25 \text{ об/час}$$

или 1 оборот в 48 минут. При моторах с 850 *об/мин* необходима соответствующая передача $840 \times 48 \approx 40\,000$. Таким образом, потребуется уменьшение числа оборотов выбранного мотора в 40 000 раз. Потребуется весьма незначительная мощность моторов, с помощью которых должны быть преодолены усилия резания при вращении передней части щита. Элементы щита диаметром 3,5 *м* характеризуются следующими данными:

наружный диаметр щита	3,5 *м*
длина щита	4,6 „
внутренний диаметр режущего кольца	2,54 „
диаметр отверстия центральной трубы для пропуска грунта	1 „
высота режущих выступов	0,20 „
количество выступов, экскавирующих грунт в обоих кольцевых цилиндрах	3 шт.
диаметр шнекового цилиндра	0,40 *м*
ход поршня щитовых домкратов	1.30 „
количество домкратов по периферии щита	16 шт.
мощность каждого домкрата	50 *т*

Принимая угловую скорость вращающихся режущих цилиндров, направленных в противоположные стороны, 1 *об/час* и принимая 20 часов работы щита, получается скорость проходки в сутки $= 0{,}20 \times 3 \times 20 = 12$ *м* в сутки.

Объем экскавируемого грунта в сутки:

$$V = \frac{\pi \cdot 3{,}5^2 \cdot 12}{4} = 115{,}4 \text{ м}^3.$$

Работа, которую необходимо затратить при одном обороте экскавирующих цилиндров, выражается: $T = 2\,020$ *т/м*.

Мощность электродвигателей $N = 33$ *л. с.*

Передняя сторона щита, обращенная к забою, закрыта и плотно прижимается домкратом к поверхности грунта, что исключает возможность деформации забоя, отвала и выплыва грунта внутрь щита. Общий вес щита 48,3 *т*. Другие специальные виды тоннельных машин, базирующиеся на принципах резания, скалывания, дробления и бурения горных пород, приведены в главе XII «Разработка горных пород в тоннельном забое».

7. ЩИТОВАЯ ТЕХНИКА В МЕТРОСТРОЕНИИ

Советские конструкторы и техническое оснащение стоят на большой высоте.

При сооружении тоннелей Московского метрополитена применялся ряд интересных и смелых технических приемов. Из них особо ценным является щитовой метод проходки. Щит, представляющий собой механический тоннельный снаряд, при помощи которого представляется возможным сооружать тоннели сразу на полный профиль, впервые в СССР (по предложению автора[1]) был применен и освоен при проходке подземного староречья р. Неглинки.

Выявлено, что в московских условиях щит является наиболее совершенным методом проходки тоннелей, в связи с чем и принято правительственное решение о щитовой проходке не только перегонных тоннелей, но и станций метрополитена для 2-й, 3-й, 4-й и перспективных очередей строительства, а равно для сооружения тоннелей метрополитенов Ленинграда и Киева. Это поставило перед инженерно-техническими работниками большие задачи в части составления проекта щитовых работ и проектов самих щитов для сооружения перегонных тоннелей, станций и подводных тоннелей под р. Москвой. В настоящее время Метрострой располагает самым крупным щитовым парком в Европе.

[1] Статья в газете „Правда" 1/III 1932 г.

Один из тяжелых в геотехническом отношении участков тоннелей на 1-й очереди строительства Московского метрополитена на протяжении около 600 *м* под подземной рекой (староречье) был сооружен при помощи щита: при обделке из железобетонных блоков. На этом участке щитовым методом пройдены при глубоком заложении два однопутных тоннеля. Работа велась под защитой мощного цилиндрического корпуса щита.

Щит, которым проведена проходка этого ответственного участка, представляет замкнутую оболочку из отдельных металлических листов толщиной 40 *мм*, круглого сечения, соответствующую очертанию и внешнему диаметру обделки тоннеля, равному 6,5 *м*.

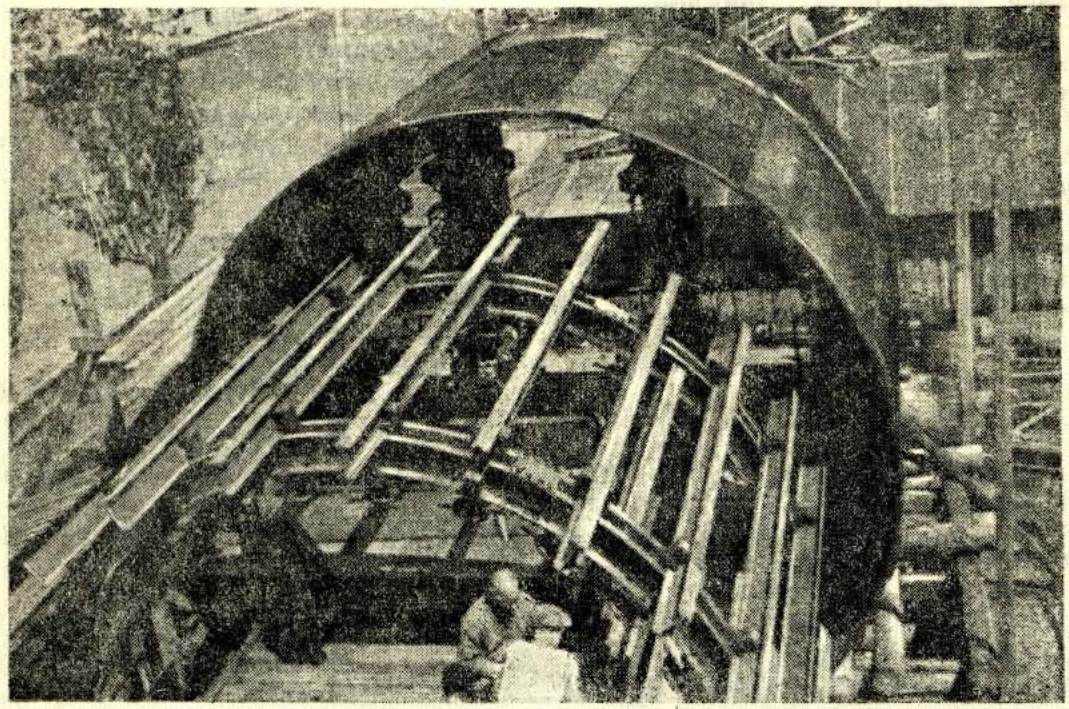


Рис. 355. Эректор для укладки бетонных блоков в тоннеле

Работы эти начались впервые в Союзе, не имея никакого опыта в щитовой проходке.

Тоннели метрополитена рассматриваемого участка пересекали по верхней части поперечного сечения юрскую глину, а по нижней — известняки, задевая подошвой карбонные глины. Далее юрская глина совершенно эродирована в верхнюю часть поперечного профиля тоннеля врезаются разжиженные суспеси, исключительно слабые по своей структуре и физико-механическим свойствам. На значительном протяжении все сечение тоннеля проходит полностью в слабых грунтах плывунного характера, заполняющих глубокую промоину староречья. Далее тоннели залегают в карбонной глине, задевая по подошве известняк, а по шелыге — юрскую глину. Ввиду сложности геотехнического режима, в котором протекала прокладка тоннелей, ра-

Впереди щит снабжен аванбеком — козырьком из литой стали, который под действием гидравлических домкратов, помещенных в хвосте щита, врезается в грунт. Аванбек занимает около $^2/_3$ окружности тоннеля и монтируется из двенадцати сегментов. Щит оборудуется двумя вертикальными диафрагмами и двумя горизонтальными площадками, которые делят поперечное сечение на девять отделений. Впереди щита для переброски породы имеются две неподвижные горизонтальные платформы и шесть выдвижных.

Выдвижные платформы перемещаются под действием гидравлических прессов диаметром 13 *см* при ходе поршня 1,25 *м*. Двадцать четыре гидравлических домкрата, передвигающих щит, размещаются равномерно по контуру тоннеля в хвосте щита. При диаметре

поршня в 22 *см* домкрат развивает усилие 56,9 *т*, при суммарной мощности всех домкратов 1 366 *т*. Домкраты, упираясь в выведенную обделку, плавно продвигают щит вперед на ход поршня 75 *см*. Системой пневмо-гидравлических насосов вода (рабочая жидкость) под давлением 140 *ат* подается по трубопроводам непосредственно к щитовым домкратам, которые могут включаться в работу отдельно, группами или полностью, в зависимости от направления щита (при движении его по уклонам и кривым). Вода к забойным и платформенным домкратам подается под давлением в 35 *ат* непосредственно от гидравлического аккумулятора, установленного на поверхности. Вслед за щитом передвигается платформа с реверсивным ходом, оборудованная эректором для установки на место блоков, образующих тоннельную обделку. Эта платформа снабжена передвижными кружалами из двутавровых балок для поддержания бетонных блоков (рис. 355, 356), приборами нагнетания раствора за обделку, пневматическими механизмами, трубопроводами, пусковыми приспособлениями и другим оборудованием. Эректор, являясь подъемным и поворотным краном, имеет возможность с помощью передачи вращаться на 360°, удлинять и укорачивать свою стрелу в радиальном направлении. При этих условиях, имея на своем конце приспособление, захватывающее блок, эректор свободно берет с тележки блок и заводит его в требуемое положение (рис. 357). Эректор изготовлен с комбинированным противовесом для возможности манипуляции с железобетонным блоком весом в 1,5 *т* или чугунным сегментом весом 800 *кг*. Перегонные тоннели для проходки щитом однопутные, круглого сечения. Обделка однопутного тоннеля составляется из двенадцати бетонных блоков (рис. 358), армированных легкими сетками из круглого железа для восприятия растягивающих напряжений, возникающих в блоках при подъеме их эректором, а равно для равномерного распределения усилий от упирающихся в блоки гидравлических домкратов. Соединение блоков между собой достигается устройством выступов и пазов в местах примыкания одного блока к другому и, кроме того, нагнетанием цементного раствора через отверстия, связывающие блоки по щековым поверхностям. Каждый блок весом в 1,5 *т* снабжен двумя отверстиями для захвата его клещами руки эректора. Заполнение кольцеобразного пространства, образуемого за вновь выложенной обделкой, производится через отверстия, устроенные в блоках, сначала вдуванием под давлением до 5 *ат* крупного песка или гравия, а затем нагнетанием цементного раствора. Этим достигается заполнение пустот и локализация осадок, могущих распространиться до поверхности.

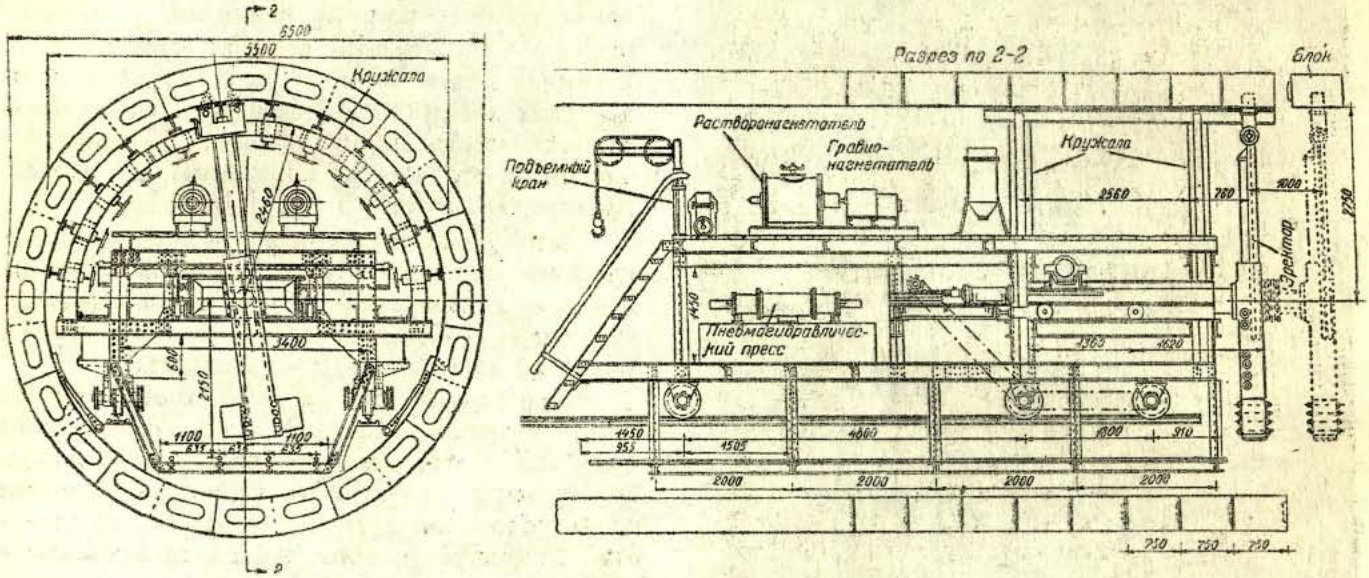


Рис. 356. Эректор для укладки бетонных блоков в тоннеле

Для полной изоляции тоннеля от сырости и блуждающих токов внутренняя поверхность блоков оклеивалась мягкой изоляцией из гудронированного толя на горячей клебемассе. С этой же целью была устроена внутренняя, защитная железобетонная оболочка,

способная воспринимать полное гидростатическое давление. Кроме того, эта оболочка, в сочетании с балкой жесткости, уложенной под подошвой вдоль оси тоннеля, создавала достаточно полную жесткость всей тоннельной конструкции.

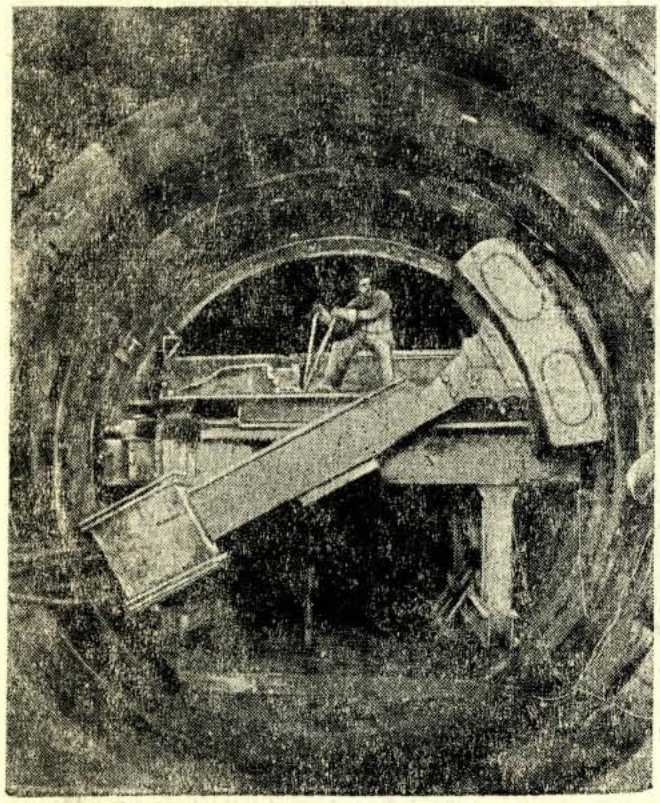


Рис. 357. Эректор для укладки бетонных блоков в тоннеле

При проходке в водоносных грунтах бетонитовая обделка находилась под сжатым воздухом, отжимавшим воду. Благодаря этому изоляционные работы велись по сухой поверхности. Организация щитовых работ была проведена следующим порядком.

В первую очередь была пройдена вертикальная шахта ниже проектной отметки подошвы тоннеля метрополитена. Параллельно производилось соответствующее оборудование шахтной поверхности. Шахтный ствол диаметром 6 *м* обеспечивал возможность пропуска наиболее крупных элементов щита и его оборудования. В дальнейшем был пройден подходный тоннель от шахты к основной трассе. На расстоянии около 9 *м* от места пересечения подходного и основных тоннелей горным способом была сооружена камера для сборки щита. В камере круглого сечения при диаметре 8,54 *м* и длине 6 *м* в свету был заделан ряд монтажных балок в своде и уложены направляющие рельсы, по которым смонтированный щит легко продвигался вперед, упираясь домкратами в выложенные сзади упоры.

В условиях устойчивых коренных пород известняков, карбонных глин и выклиниваний юрской глины сооружение камеры велось по бельгийской системе. В подошве щитовой камеры была устроена бетонная подушка, в которую были заделаны четыре рельса типа III-а, размещенные на взаимном расстоянии около 90 *см*. Головки рельсов выступали над бетонной подушкой на 6 *см*. В торцовые стены щитовой камеры были заделаны восемь монтажных металлических балок. Для подъема элементов щита были применены две лебедки грузоподъемностью 3 *т* и тали в 1,5 *т*.

Части щита опускались в шахту при помощи крана системы Мукаг, грузоподъемностью в 7 *т*, в соответствии с максимальным весом отдельных элементов щита и оборудования (металлические шлюзовые аппараты).

Процесс монтажа щита в тоннельной камере включал следующие основные этапы (рис. 359): оборудование тоннельной камеры подъемными и тяговыми приспособлениями; сборку оболочки щита и постановку специальных диафрагм; монтаж аванбека постоянных и выдвижных платформ; установку гидравлических домкратов, забойных и платформенных прессов; сборку подвижной платформы для эректора и кружал; установку эректора для монтажа сегментов; установку специального

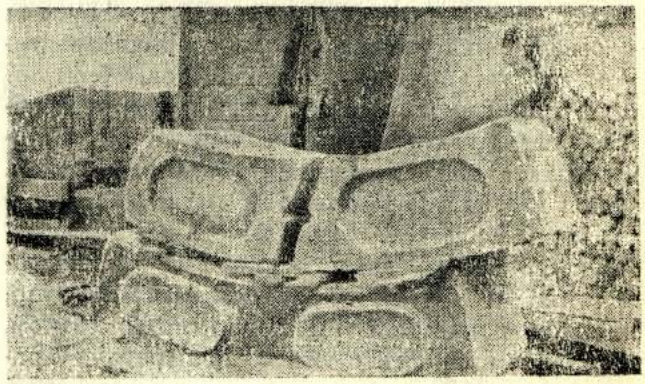


Рис. 358. Замковый бетонный блок

оборудования пусковых приспособлений и подводку энергии к щиту; постановку приборов для нагнетания цементного раствора за тоннельную обделку; проведение трубопроводов

для воздуха высокого и низкого давления, для подачи воды в домкраты.

Порядок сборки щита был принят следующий. На бетонную подушку было уложено три листа оболочки и нижний сегмент опорного кольца; непосредственно к последнему были

выше второй горизонтальной перегородки, монтировались уже после окончательной сборки ножа и опорного кольца и установки в нем щитовых домкратов. Верхние щитовые домкраты устанавливались после полной сборки оболочки. Постановка забойных и

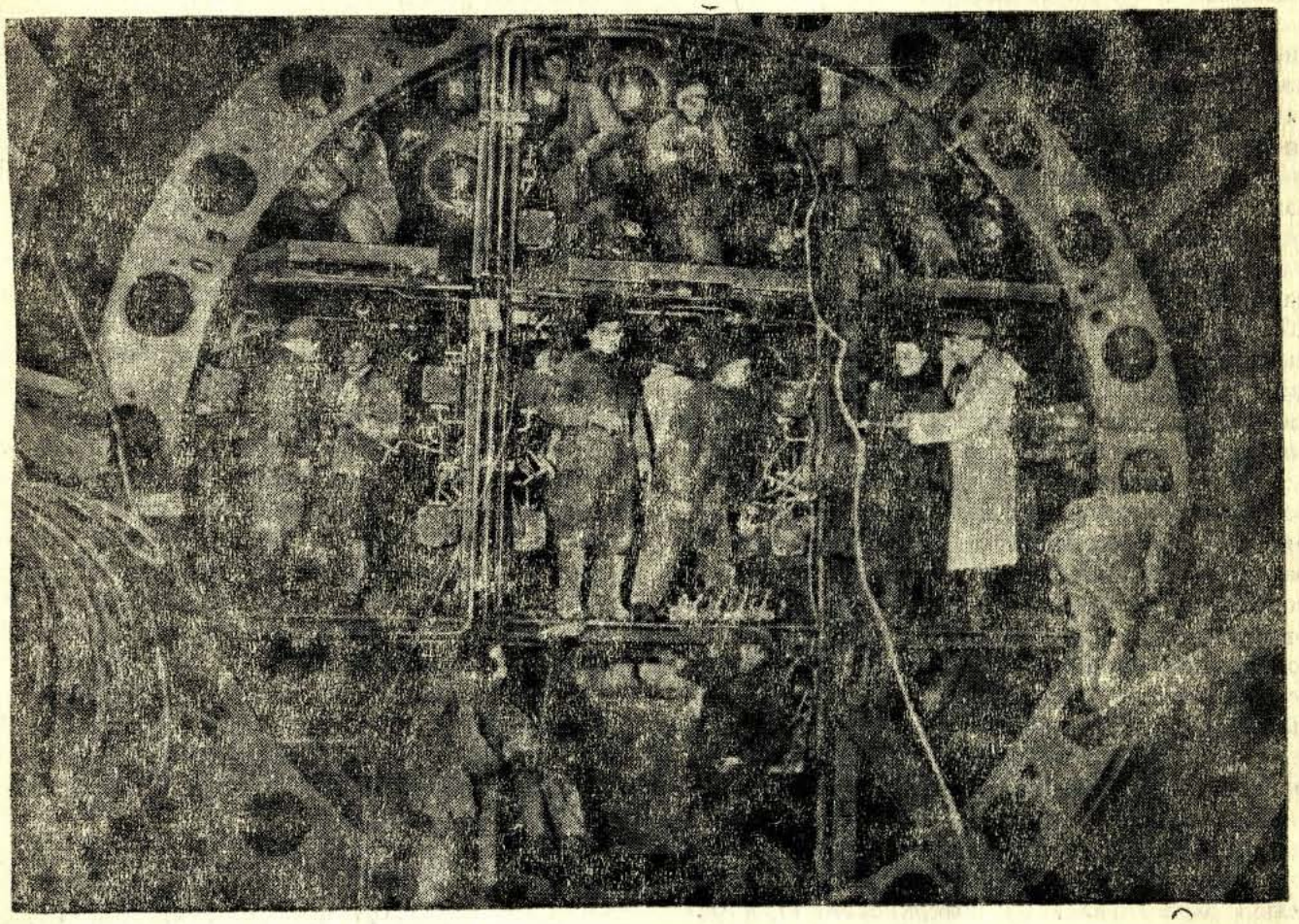


Рис. 359. Подземный монтаж щита в камере

присоединены сегменты ножа. Далее постепенно присоединялись элементы опорного кольца и ножа. После первой горизонтальной перегородки были установлены вертикальные перегородки, образующие нижние ячейки щита; производилась последовательная сборка сегментов щита с последующей установкой второй горизонтальной перегородки и вертикальных перегородок, образующих средние ячейки щита. Затем присоединялись следующие элементы опорного кольца и ножа. После постановки вертикальных перегородок, образующих верхние ячейки, производилось замкование корпуса щита сегментами ножа и кольца. Последние элементы оболочки,

платформенных домкратов не вызывала никаких затруднений. Впоследствии производился монтаж трубопроводов и необходимой пусковой аппаратуры. Сборка эректора также не представляла особых затруднений. Работа компрессоров при 100-процентном резерве, в целях безопасности и успешности ведения работ под сжатым воздухом, обеспечивалась двумя независимыми источниками электроэнергии. Параллельно с подготовкой площадки для монтажа щита и щитовых работ в подземной части на поверхности производились работы по монтажу и оборудованию компрессорных, гидравлических и силовых установок.

Следует отметить, что монтаж щита в шахте был затруднен исключительным обилием подземных вод, которые заливали подошву щитовой камеры. Продвижение щита производилось при опирании щитовых домкратов в кольцо тоннельной обделки, укладываемой в щитовой камере.

Щитовые работы требовали следующих операций: разработки породы в забое щита, монтажа тоннельной обделки, уборки породы за пределами щита и продвижения щита вперед.

На первом этапе работ щит пересекал комбинированную грунтовую толщу, а именно: в верхней части профиля юрскую глину, в середине сечения — известняк, по подошве — карбонную глину. В этих случаях разработка лба забоя велась по всему сечению с выдвижных платформ, при поддержке соответствующим водоотливом. Работа в юрских и карбонных глинах осуществлялась пневматическими лопатами. Разработка известняков, в зависимости от коэфициента крепости, велась отбойными молотками или взрывами малых зарядов в центральной передовой штольне, с расчетом не повредить элементов щитовой конструкции. При приближении щита к слабым грунтам староречья, где юрская глина совершенно эродирована, лоб забоя (особенно верхняя часть профиля) крепился системой шандор, препятствующий выплыву породы.

В готовой части тоннеля устраивалась диафрагма, в которую заделывались два материальных шлюза в нижней части поперечного сечения, шлюз для трубопроводов в центре сечения и вверху людской шлюз. Медицинский шлюз располагался на поверхности. При работе сжатым воздухом тоннель делился диафрагмой на две части. В одной из них работа протекала под нормальным атмосферным давлением, в другой же под сжатым воздухом шла работа щитом и эректором. Сжатый воздух подавался по трубопроводам в соответствии с проявляемым гидростатическим давлением. Необходимо отметить, что регулирование давления в щите отличалось особенностью в отношении нарушения состояния равновесия между внутренним давлением сжатого воздуха и внешним гидростатическим давлением. Учитывая, что разность напора воды в подошве и шелыге свода равна диаметру тоннеля в 6,5 *м* и соответствует 0,65 *ат*, получалось, что давление сжатого воздуха, постоянное по сечению забоя, не могло уравновешивать воду по высоте щита. При давлении воздуха соответственно гидростатическому давлению верхней точки щита происходило интенсивное поступление воды снизу. При давлении же сжатого воздуха в соответствии с давлением воды в нижней точке щита имелось избыточное воздушное давление вверху, что вызывало (особенно в песчаных грунтах) большую утечку воздуха, с резким понижением давления его в щите, а это могло привести к прорыву воды в тоннель. Ориентировка воздушного давления велась примерно по средней, осевой линии тоннеля, с допуском некоторого притока воды снизу забоя. Однако вопрос, связанный с неуравновешенностью воздушного давления внутри тоннеля и гидростатического внешнего напора на каждом отдельном участке, являлся предметом всестороннего исследования и окончательно разрешался с учетом физико-механических свойств пород. При этом принимались во внимание выработанные практикой технические приемы.

Воздух низкого давления порядка 1,5—2 *ат* до подачи его за диафрагму предварительно очищался через угольные фильтры. После проходки щитом слабых, плывунного характера грунтов, заполнявших промоины в староречье, щит снова врезался в юрскую и карбонную глины, где работа производилась без сжатого воздуха.

Как указывалось выше, при пересечении карбонных и юрских глин производилось крепление лба забоя установкой деревянных шандор вразбежку. Шандоры прижимались забойными домкратами.

При пересечении слабых, плывунных пород староречья даже в условиях проходки под сжатым воздухом щит с открытой грудью требовал приспособлений для крепления лба забоя. Во избежание выплывов грунта приходилось вести исключительно тщательное крепление лба забоя и забивку впереди аванбека марчеван, с посадом 0,6—0,7 *м*. При пересечении плывунных пород в кровле щита вначале производилась выемка плывуна на величину 0,5 *м*. После закрепления лба забоя производилась последующая подработка карбонной глины и известняков. Следует отметить, что примененный на шахте вначале способ продвижения в плывунах забивкой впереди ножа марчеван по кружалам, установленным у режущего края, приводил к осложнениям, поскольку корпус щита при продвижении производил значительный нажим и излом марчеван. В связи с этим пришлось прибегнуть к методу заве-

дения марчеван непосредственно за внешнюю поверхность режущего края. Хотя этот метод и давал довольно хорошие результаты в присутствии сжатого воздуха, отжимавшего воду в забое, но он был связан с опасностью вывалов породы и требовал особо тщательной работы и осторожности в приемах экскавации. Разработка глины и известняков с небольшим коэфициентом крепости производилась отбойными молотками и пневматическими лопатами. Но там, где известняк имел значительный коэфициент крепости, порядка 6, производились взрывные работы аммоналом, при весьма незначительных зарядах взрывчатого материала. Так, при глубине шпура 1,5 *м* закладывалось от 100 до 250 *г* аммонала, который после взрыва лишь взбучивал породу. Нормальная продвижка щита вперед производилась на 80 *см*. В некоторых случаях приходилось вести продвижку щита малыми порциями, в 20—40 *см*. Вписывание щита в трассу достигалось регулированием щитовых домкратов, а также характером разработки забоя впереди щита. В тех случаях, когда требовался определенный поворот щита, в одной части забоя порода не выбиралась, так что при поступательном движении, под нажимом домкратов, часть режущего края встречала определенное сопротивление. Это заставляло корпус щита делать требуемый поворот. Когда щит встречал в подошве разжиженную под влиянием значительного притока воды карбонную глину, он под действием своего собственного веса в 140 *т* проявлял тенденцию «клевать». Для локализации этого явления, которое приводило к тому, что щит «заносился» от своего проектного направления, приходилось его искусственно поднимать применением подушки из пакета железнодорожных рельсов, уложенных впереди щита непосредственно по грунту. Следует указать, что этот метод выправления щита, хотя и достигал результата, отражался вредно на состоянии элементов конструкции корпуса щита.

При подходе щитом к староречью была тщательно поставлена служба рекогносцировочного бурения с целью установления контактных зон неустойчивых пород.

Поскольку диаметр разработки тоннеля по щиту равен 6 617 *мм*, а внешний диаметр обделки тоннеля из бетонных блоков — 6 500 *мм*, приходилось учитывать, что зазоры между обделкой и породой составляли в нижней части 32 *мм*, в верхней — 85 *мм*. Для обеспечения тоннельного кольца от деформации его собирали на специальных кружальных балках тележки эректора и, кроме того, немедленно производили нагнетание цементного раствора, заполняющего пустоту за обделкой с целью обеспечения пассивного отпора грунта, а также для взаимного сцепления отдельных блоков и колец между собой.

Что касается тоннельной обделки, уложенной в оболочке щита, то она раскреплялась деревянными клиньями для обеспечения проектного положения и надлежащего строительного зазора.

Для удержания цементного раствора за обделкой при нагнетании производилась конопатка швов между бетонными блоками паклей.

Суточная скорость проходки достигала 4,75 *м*.

При подходе к староречью в условиях неустойчивых, плывунных пород в шелыге свода пришлось применить сжатый воздух. Проходка под сжатым воздухом велась при длине участка в 180 *м*, который ограждался специальной шлюзовой перегородкой. Итти на большую протяженность зоны сжатого воздуха в данных условиях не представилось возможным в связи со значительной утечкой сжатого воздуха как через обделку тоннеля из бетонных блоков, так в особенности по лбу забоя. Это обстоятельство не позволило поддерживать необходимое воздушное давление.

После проходки 180 *м* тоннеля под сжатым воздухом была установлена вторая диафрагма, уже железобетонной конструкции с металлическими дверями. В связи с этим вначале представилась возможность поддерживать величину воздушного давления только до 0,7 *ат*. В дальнейшем в связи с тем, что щит вошел в русло староречья при увеличенном гидростатическом давлении, пришлось прибегнуть к системе ступенчатого воздушного давления. Величина воздушного давления у щита до первой перегородки была от 2 до 2,2 *ат*, а между первой и второй перегородкой составляла 1,5 *ат*.

Для обеспечения щитовых работ шахты сжатым воздухом были установлены две компрессорные станции. Одна станция вырабатывала воздуха до 304 $м^3/мин$, а вторая 360 $м^3/мин$ низкого давления — до 3 *ат*. Помимо этого для снабжения воздухом пневматических инструментов и приборов имелись компрессоры высокого давления. Для обеспечения работы забойных и платформенных дом-

кратов под давлением до 35 *ат* на поверхности была оборудована гидроаккумуляторная, состоявшая из грузового аккумулятора и пневмо-гидравлического насоса. При давлении воды в 35 *ат* груз гидроаккумулятора составлял 16 *т*.

Во время производства работ под сжатым воздухом была обеспечена надлежащая телефонная связь подземной части с поверхностью (с компрессорной станцией). Помимо этого была установлена соответствующая звонковая и электросигнализация.

Щитовая проходка велась под сложным подземным хозяйством (кабели, телефон, водопровод, канализация, водостоки, телеграф, газ) и между крупными многоэтажными зданиями. Особенно ответственным явился момент проходки под старым кирпичным коллектором подземного староречья, фундированным на свайном основании. Следует отметить, что щитовой метод проходки в данном случае не потребовал предварительного укрепления фундаментов и не вызвал заметных деформаций в указанных зданиях.

Помимо борьбы с плывунными грунтами, приходилось бороться и с напором воды из известняков, который достигал дебита около 150 $м^3$/*час*.

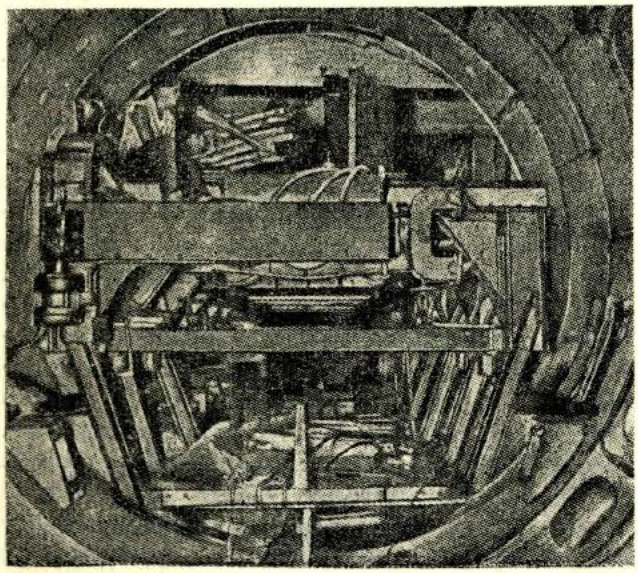


Рис. 360. Укладка блоков в тоннеле

При щитовой проходке процессы разработки грунта, укладки блоков и транспорта распределялись по длительности цикла следующим образом: разработка грунта — 70,5—80,5%, укладка блоков — 6,5%, погрузка грунта и транспорт его за пределы щитовой зоны — 23—13%.

Была принята следующая расстановка проходчиков по ячейкам: в средних ячейках

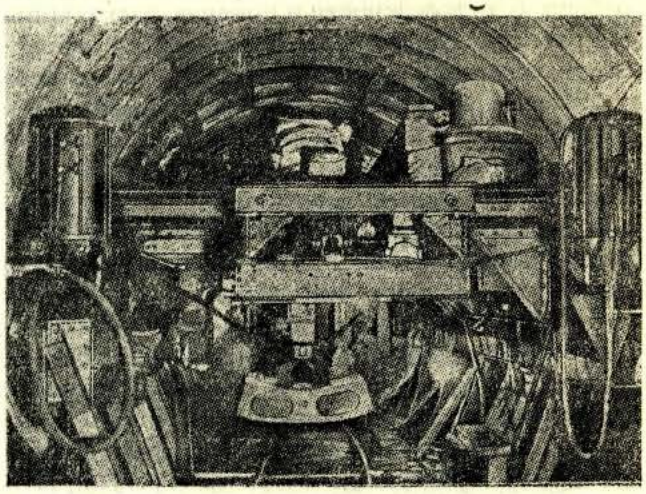


Рис. 361. Укладка блоков в тоннеле

всех ярусов работало по два человека, во всех остальных — по одному проходчику. В состав сменной бригады входили укладчики блоков, рабочие по нагнетанию раствора за обделку, откатчики, аппаратчики и сигналисты у шлюза (рис. 360, 361). В зависимости от успешности производства работ, в каждой из средних ячеек добавлялось по одному проходчику. Количество рабочих в сменной бригаде см. таблицу 24.

На строительстве Московского метрополитена преимущественно принята, как указывалось выше, щитовая техника тоннелирования. Из общего протяжения линий 2-й очереди в 14,9 *км* щитовым способом сооружено 10,4 *км*. На основании успешного опыта щитовой проходки под староречьем на 1-й очереди и новейших данных мировой техники щитового тоннелирования работниками Отдела основных работ Метропроекта (под руководством автора) были составлены проекты перегонных и станционных щитов для сооружения тоннелей 2-й очереди. Изготовление щитов в количестве 30 перегонных и 12 станционных было передано крупнейшим заводам Союза (Кировскому, Краматорскому, Коломенскому, заводу «Серп и молот» и др.). Щиты были запроектированы и *изготовлены полностью из советских материалов и оборудования*.

Тоннельные сооружения 2-й очереди в основном имеют глубокое заложение в толще коренных пород юрского и карбонного комплекса, местами прорезая исключительно слабые грунты плывунного характера. При ведении щитовых работ в коренных устойчивых породах для сооружения перегонного тюбингового тоннеля применялся щит с открытой грудью внешним диаметром 6 140 *мм*, разделенный двумя вертикальными и двумя горизонтальными диафрагмами на девять независимых рабочих ячеек. Длина щита с аванбеком — 4 770 *мм* (рис. 307). Щит продвигался вперед двадцатью четырьмя гидравлическими домкратами, развивавшими общую мощность в 1 270 *т* при давлении рабочей жидкости в 140 *ат*. При поднятии гидравлического давления до 200 *ат* становилось возможным преодолевать сопротивление щиту при его поступательном продвижении вперед на ход поршня в 900 *мм*, при ширине тюбинга в 750 *мм*, до 1 800 *т*. Для удобства работы в ячейках при атаке забоя имелись горизонтальные платформы, выдвигаемые платформенными домкратами. На случай выклинивания в забое неустойчивых пород, требующих крепления лба забоя и выработок в каждой из ячеек щита, были размещены гидравлические забойные домкраты. Как платформенные, так и забойные домкраты развивали усилия до 4 *т* при нормальной величине давления рабочей жидкости в 35 *ат*, поддерживаемого обычно гидравлическим аккумулятором. Ножевая часть щита и опорное кольцо его, претерпевающие значительные усилия при толщине стенок 50—68 *мм*, изготовлены были из стали Л-2, а оболочка щита толщиной 40 *мм* и диафрагмы из листов стали СТ-3 толщиной 18 *мм*. Общий вес перегонного щита составлял 120 *т*.

Эректор для монтажа тюбингов был размещен на специальной подвижной платформе. Рука эректора могла вращаться на 360° и по ходу поступательного движения передвигаться в радиальном направлении. Это позволяло брать эректором тюбинг, поднимать его и устанавливать на требуемое место в процессе монтажа обделки. На платформе размещались два насоса для работы щитовых домкратов и, кроме того, гравио- и растворонагнетатели, необходимые для заполнения пустот за монтируемой обделкой после проходки щитом. На Метрострое работали электрические и гидравлические эректоры. Опыт щитовой работы доказал несомненные преимущества последних, так как гидравлические эректоры проще и легче (рис. 308).

При пересечении щитами слабых, неустойчивых пород приходилось прибегать к специальным, искусственным мероприятиям в виде сжатого воздуха. Перегонные щиты центральной шахты, проходившие под застроенной оживленной частью города, под сплошной сетью подземных сооружений и под большим коллектором, прорезали в кровле неустойчивые породы и работали с применением сжатого воздуха.

В процессе щитовой проходки тоннелей под сжатым воздухом выявилось, что основная утечка последнего происходит преимущественно через забой. Утечка через швы нерасчеканенных тюбингов и через строительный зазор щита является незначительной. Таким образом, размеры утечки сжатого воздуха при проходке зависят главным образом от воздухопроницаемости пересекаемых грунтов, от их физико-механических свойств.

Определение потребности сжатого воздуха для проходки на основе практики Метростроя производится по нижеследующей формуле:

$$Q = 0{,}013(1 + kp)D \cdot L,$$

где:

Q — потребность сжатого воздуха ($м^3/мин$),

k — коэфициент, зависящий от физико-механических свойств грунтов,

p — воздушное давление в тоннеле при проходке ($ат$),

D — диаметр тоннеля,

L — длина тоннеля.

Для производства работ под сжатым воздухом в тоннеле применяли шлюзовую диафрагму, предназначенную оградить область повышенного давления от нормального давления; диафрагма имела следующие шлюзовые камеры: два материальных шлюза длиной 6,4 *м*, диаметром в 2 *м* (для пропуска нормальных рудничных вагонеток с породой со стороны забоя, а также шлюзование материалов для тоннельной обделки); людской шлюз диаметром 2 *м*, расположенный в верхней половине шлюзовой перегородки; аварийный шлюз диаметром в 2 *м* (назначение последнего — исключительно пропуск людей при аварии); шлюз-труба, служащий для пропуска через перегородку длиномерных материалов, например труб, арматурного железа, лесоматериалов, рельсов (длина этого шлюза 7,3 *м*, диаметр 0,3 *м*).

Шлюзовая перегородка снабжена также трубопроводами для подачи сжатого воздуха низкого давления (до 3 *ат*) двумя трубами, для подачи воздуха высокого давления (до 10 *ат*) и для подачи воды, а также четырьмя полуторадюймовыми трубопроводами для пропуска электрических, осветительных и телефонных проводов.

Материальные и людские шлюзы были оборудованы дверями, открывавшимися в сторону повышенного давления.

Шлюзовая перегородка сооружалась в начале тоннельной проходки под сжатым воздухом и оставалась на месте до отдаления щита на расстояние до 250 *м*, в зависимости от условий проходки. Таким образом, зоной повышенного давления являлся вновь сооруженный тоннель на протяжении от лба забоя до шлюзовой перегородки. После этого сооружалась вторая шлюзовая перегородка.

Кроме указанных шлюзов, в комплект шлюзового оборудования входил так называемый лечебный шлюз. Он располагался на поверхности в амбулатории и предназначался для людей, страдающих кессонной болезнью. Шлюз состоял из камеры для вышлюзования и прикамерка, снабжен был клапанами для медленного вышлюзования, манометром и смотровым отверстием для наблюдения за больным и регулировки давления в камере как изнутри, так и снаружи шлюза. Больной, помещенный в этот шлюз, испытывал то же давление, что в тоннеле, и находился в условиях медленного вышлюзования.

Разительный технико-производственный эффект дал щитовой метод проходки при сооружении крупных профилей станций метрополитена. При размерах поперечного профиля 32 × 12 *м* станции на 1-й очереди строительства создавались горным способом, раздробленными фазами штолен, фурнелей, калотт и т. д., при огромном расходе лесных материалов и рабочей силы. Применением станционных щитов диаметром до 9,6 *м* удалось построить трехсводчатую станцию на полный профиль, при обделке из чугунных тюбингов.

Станционный щит, внешним диаметром 9 680 *мм*, был разделен тремя вертикальными и горизонтальными диафрагмами на 16 рабочих ячеек, по 4 ярусам. Длина щита с авантбеком 4 730 *мм*. Щит был снабжен 36 гидравлическими ходовыми домкратами, 36 забойными и 20 платформенными домкратами (рис. 362). При давлении рабочей жидкости в 140 *ат* развивалось суммарное усилие в 3 240 *т*, ход поршня 750 *мм* при ширине тюбинга в 600 *мм*. Общий вес станционного щита с эректором на тележке около 340 *т*.

Станции глубокого заложения 2-й очереди (за исключением станции Площадь Маяковского) представляют по своей конструкции трехсводчатый профиль, образованный тремя параллельными станционными тюбами диаметром по 9,5 *м*.

Станция Площадь Маяковского является особой металлической конструкцией, где средний и крайние станционные тоннели системой металлических балок и колонн сливаются в один общий профиль (Методы щитовой проходки этих станций см. главу IX, стр. 408).

* * *

В период Великой Отечественной войны коллективом Метростроя завершено строительство тоннельных сооружений Замоскворецкого и Покровского радиусов 3-й очереди Московского метрополитена, крупного оборонного сооружения столицы.

При этом особо важным является опыт производства тоннельных работ, связанный с коренным усовершенствованием метода щитовой проходки при комплексной механизации производственных процессов для непрерывного получения готового тоннеля — создание поточного метода работ, примененного на ряде шахт строительства 3-й очереди.

Анализ опыта тоннельного строительства 1-й и 2-й очереди метрополитена выявил, что основные операции, обусловливающие процесс сооружения тоннеля (экскавация и крепление лба забоя, погрузка породы в забое, внутритоннельный транспорт, монтаж тюбинговой обделки эректором, нагнетание раствора за обделку, расчеканка швов тюбингов, укладка жесткого основания и пути метрополитена), не были достаточно согласованы между собой в своем комплексном производстве.

Имелась определенная тенденция проводить в первую очередь две операции: разработку забоя и монтаж тюбингов, чтобы построить тоннель вчерне. При этом операции по нагнетанию, перебалчиванию, смене шайб, расчеканке, укладке жесткого основания пути и т. д. производились без строгой взаимной увязки, со значительным опозданием против основных проходческих работ. В результате продукция готового тоннеля получалась на ряде участков трассы только через полгода после того, как уже имелся тоннель вчерне.

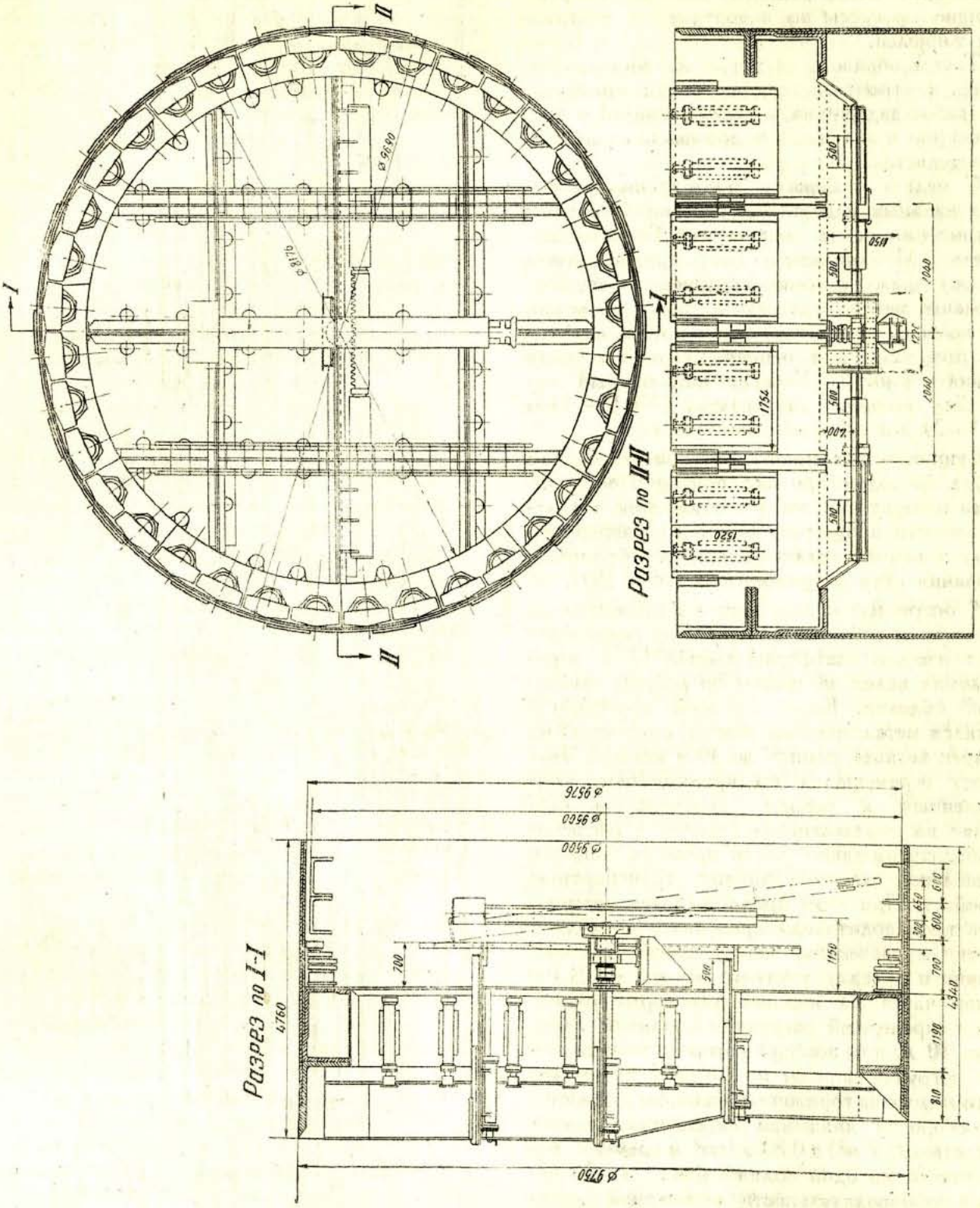


Рис. 362. Щит для проходки станционных тоннелей

Такая технически несовершенная система производства работ вызывает значительные непроизводительные расходы, включая обслуживающие процессы по водоотливу и вентиляции тоннелей.

Таким образом, несмотря на достигнутые успехи в строительстве, указанная организация работ задерживала сдачу тоннелей в эксплоатацию и значительно повышала стоимость строительства.

С целью избежать приведенных выше кардинальных недостатков указанной системы организации работ инженерами Технического отдела Метропроекта (под руководством автора) было внесено коренное усовершенствование метода щитовой проходки тоннелей, при комплексной механизации производственных процессов, для непрерывного получения готового тоннеля. Усовершенствованный метод был применен на шахтах (№ 13—14 и № 1—2) 3-й очереди строительства.

Сущность внесенного усовершенствования метода проходки при модернизации оборудования прищитовой зоны заключается в одновременности процессов, начиная с разработки забоя и кончая укладкой жесткого бетонного основания пути метрополитена (рис. 363).

К опорному кольцу щита прикреплялась посредством гибкой стальной тяги подвижная металлическая платформа длиной 17 *м*, перемещаемая вслед за щитом по ребрам тюбинговой обделки. Вслед за этой платформой двигался металлический помост, состоящий из четырех звеньев, длиной по 10 *м* каждое. Этот помост перемещался по кронштейнам, прикрепленным к ребрам тюбингов, и был поднят на определенную отметку с расчетом освободить нижнюю часть профиля тоннеля от обычно загромождающих транспортных устройств. При этом представлялась возможность производить одновременно с проходкой очистку и расчеканку швов, перебалчивание, а равно и укладку жесткого основания. В головной части на нижней платформе размещался скреперный погрузчик с длиной трамплина 30 *м*, при помощи которого производилась погрузка породы из забоя в вагонетки, поднимаемые на горизонт подвижного помоста. При скорости движения скреперного ковша (емкостью 0,5 $м^3$) в 0,80 *м/сек* и времени, необходимом на один полный цикл, в 125 секунд производительность скреперной установки достигала 15 $м^3$/*час*. Скреперная лебедка типа ССМ, грузоподъемностью 2,5 *т*, работала при мощности электромотора 30 kW.

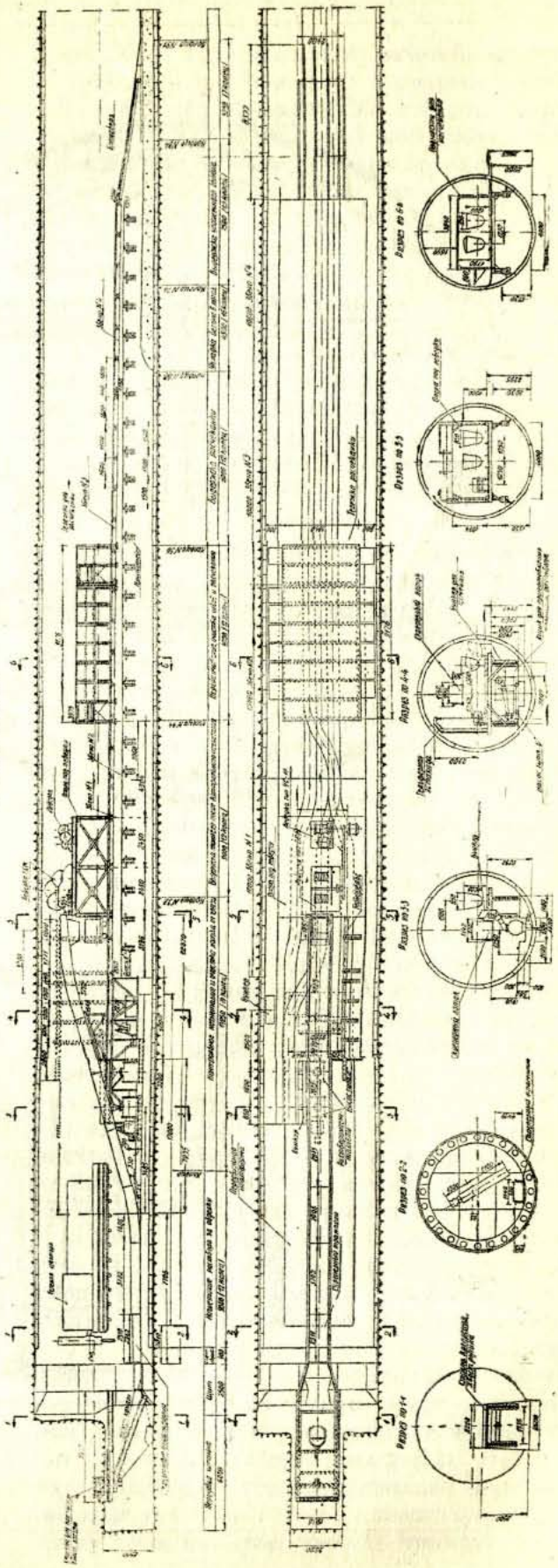


Рис. 363. Комплексная механизация работ при щитовой проходке перегонного тоннеля

На нижней платформе располагались четыре растворонагнетателя Дмитровского завода, загружаемые с верхнего помоста через бункер. Контрольное нагнетание производилось поршневым насосом типа «Е». Подъем порожняка под погрузку с отметки уложенного жесткого основания пути на верхний помост осуществлялся через бремсберг лебедкой типа УС-10 при мощности электромотора 6,8 kW.

Спуск тюбингов с помоста на нижнюю платформу производился тельфером грузоподъемностью 1 *т*.

Использование тягового усилия щита дает полную возможность осуществлять движение комплексной установки: платформы с помостом, со всем оснащением, оборудованием и путями по длине фронта в 70 *м*. На этом рабочем участке выполняется комплекс операций: экскавации забоя, погрузки породы и монтажа тюбингов, сбалчивания тюбингов, первичного и контрольного нагнетания раствора на обделку, очистки от грязи, перебалчивания тюбингов и постановки шайб, расчеканки швов и укладки жесткого основания пути.

Таким образом, при высококачественном выполнении работ на расстоянии 70—80 *м* от забоя получается готовый тоннель. Подземный транспорт с помощью электровозной тяги работал по готовому пути метрополитена.

Приведенным методом организации и механизации работ, при использовании существующего основного оборудования, без реконструкции щита открылась возможность систематически давать два кольца в смену, т. е. 6 *м* в сутки при трехсменной работе.

Оборудование по комплексной механизации щитовых работ выполнено механическим заводом Метростроя.

Приведенный новый метод организации и механизации работ был применен при сооружении перегонных и подводных тоннелей шахт Замоскворецкого и Покровского радиусов 3-й очереди сторительства.

Проект дальнейшего усовершенствования комплексной механизации щитовых работ, с применением подвижной установки в виде металлической фермы с пластинчатым транспортером в сочетании с грузчиком, заключался в следующем: порода при помощи скреперного грузчика (ковш 0,5 $м^3$, $N = 30$ *kW*) или специальной погрузочной машины, размещенной на нижней подвижной металлической платформе длиной 17 *м*, передавалась на пластинчатый транспортер шириной 0,6 *м*, длиной 40 *м* (с электромотором $N = 40$ kW). Этот транспортер был составлен из нормалей Шахтстроя и располагался на однопролетной металлической сквозной ферме длиной 35 *м*, весом около 10 *т*, опирающейся с одной стороны на готовый лоток жесткого основания пути, а с другой стороны на металлическую подвижную платформу (рис. 364).

Таким образом, порода от забоя при помощи погрузочной машины по транспортеру попадала через бункер (емкостью 1,5 $м^3$) в стоящие под погрузку на жестком основании вагоны. Применением этой фермы на участке в 36 *м* тоннель полностью освобождается для выполнения всех операций по нагнетанию, перебалчиванию, расчеканке, вплоть до укладки жесткого основания.

Такая система обусловливает чистоту тоннеля, культуру работ и высокое качество их выполнения.

Подача материалов — тюбингов и раствора — производится тельферами по двум монорельсам, подвешенным к консолям фермы пластинчатого транспортера. Дублирование монорельсов вызвано главным образом требованиями техники безопасности.

Работы по изоляции тоннеля организуются так, чтобы при обработке левой части нижнего профиля монорельсовая откатка осуществлялась по правому монорельсу и наоборот. На нижней платформе, кроме того, предусмотрено место для складирования тюбингов с целью ускорения процесса монтажа их. Подобная техника тоннельных работ может дать значительный производственный эффект.

Подача материалов к растворонагнетателям осуществляется монорельсовой откаткой в кублах (бадьях) емкостью 0,15 $м^3$ на одну порцию растворонагнетателя.

Применение запроектированного метода организации и механизации работ обеспечивает цикличность и скоростное тоннельное строительство.

Усовершенствование комплексной организации работ с помощью подвижного металлического моста применительно к проходке в неустойчивых породах под сжатым воздухом может быть проведено по следующей системе (рис. 365). Так как укладка жесткого бетонного основания пути метрополитена в зоне сжатого воздуха может вызвать ряд осложнений в том смысле, что после «стравливания» сжатого воздуха обнаружатся течи, поступают следующим образом.

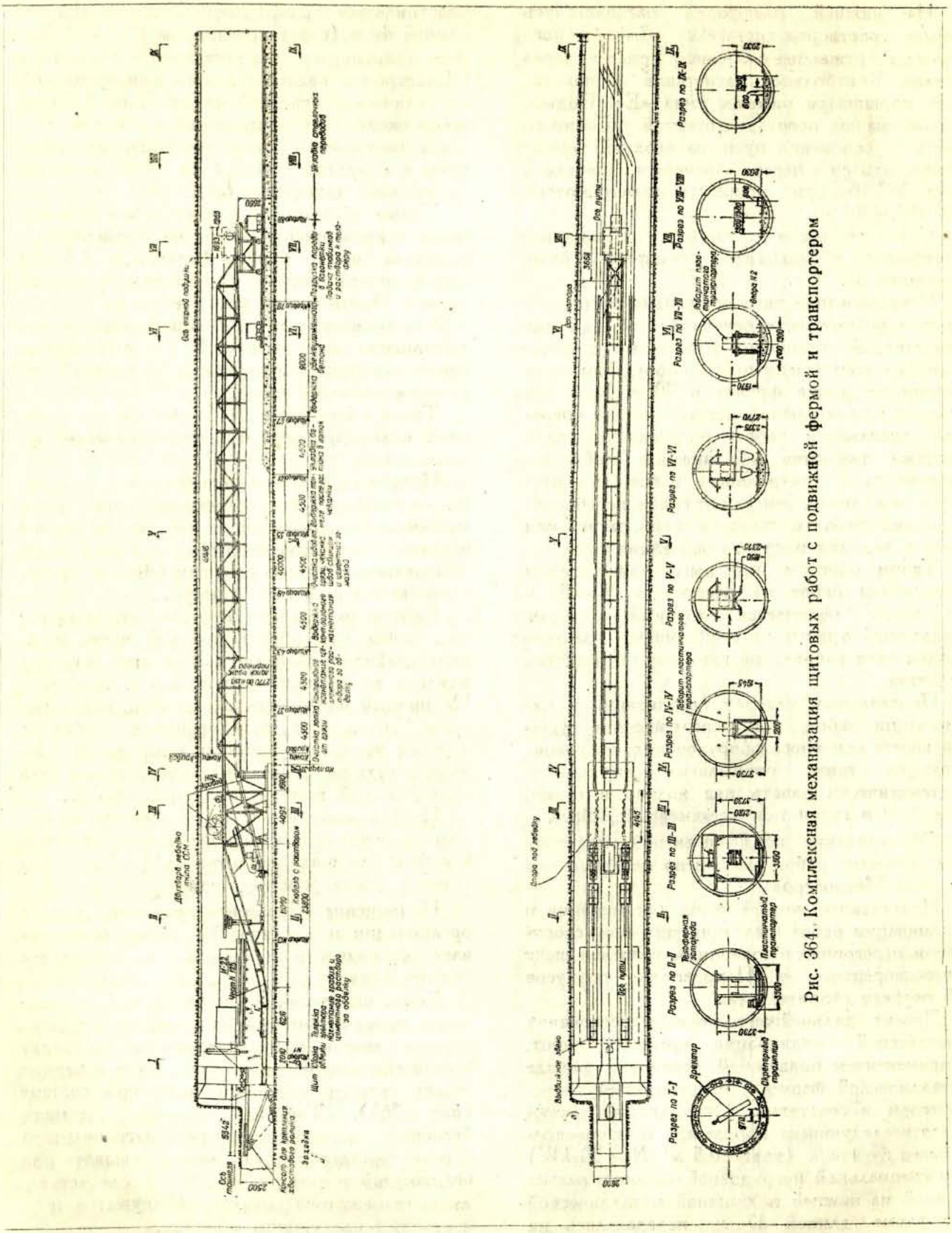


Рис. 364. Комплексная механизация щитовых работ с подвижной фермой и транспортером

В зоне сжатого воздуха производятся лишь работы по механизированной выдаче породы на вагонетки подземного транспорта и первичная расчеканка тюбингов свинцом.

Груженые вагонетки и порожняк пропускаются нормально через материальные шлюзы, расположенные в нижнем горизонте шлюзовой перегородки разборной металлической конструкции.

В зоне нормального давления, на отрезке в 32 *м*, организуются работы комплекса операций по устройству готового тоннеля. Устанавливается мост металлической конструкции с двумя бремсбергами, через который пропускаются вагонетки подземной откатки. Под проезжей частью моста освобождена нижняя часть тоннельного профиля, где возможно проверить и исправить расчеканку свинцом при обнаружении течи, провести контрольное нагнетание, очистку от грязи, перебалчивание, расчеканку цементом и укладку жесткого основания.

Ферма подвижного моста имеет длину 32 *м* (8 панелей по 4 *м*) и весит около 12 *т*. Передвижка моста осуществляется двумя трехтонными ручными лебедками.

В зоне сжатого воздуха вслед за щитом перемещается металлическая платформа, на которую опирается ферма, содержащая транспортер пластинчатого типа шириной 600 *мм*, по нормалям Шахтстроя. Порода передается по транспортеру в бункер емкостью 1,5 $м^3$, служащий для регулирования погрузки в вагонетки. С этой фермы производится первичная расчеканка свинцом.

Применение этого метода позволяет освободить тоннель от лесов и подмостей в зоне сжатого воздуха и тем самым повысить условия безопасности работ.

Таким образом, хотя на первый взгляд мы имеем разрыв комплексности работ, но в действительности этот разрыв существует лишь в интервале между щитом и мостом (200—250 *м*). Это объясняется специфичностью условий работ под сжатым воздухом и требованиями качества изоляционных работ. Приведенные коренные усовершенствования обеспечивают высококачественное скоростное тоннельное строительство.

Касаясь элементов механизации работ, примененной на 3-й очереди по отдельным операциям, следует учитывать данные по разработке забоя (см. главу XII).

Погрузка породы в забое является наиболее узким местом в общем комплексе тоннельного процесса и занимает от 50 до 80% времени полного цикла работ. Это обусловило необходимость применения погрузочных машин в забое. Скреперные грузчики разрешили вопрос механизации погрузки в забое лишь частично, на 40—50%.

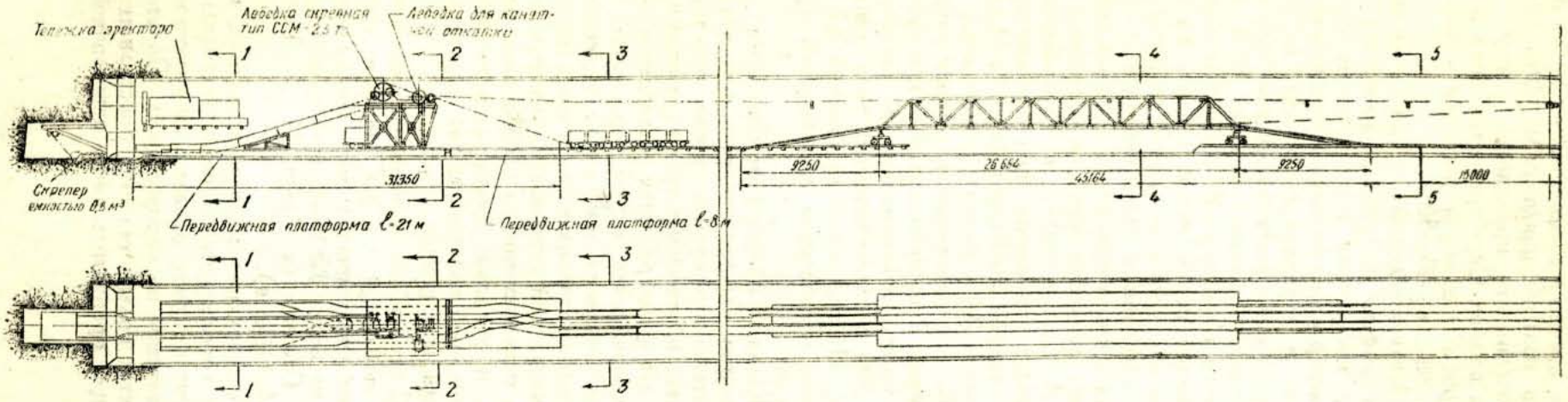
Исключительный технико-производственный эффект получен применением системы двух поперечных металлических скребковых транспортеров, размещенных в нижней ячейке щита и передающих породу от забоя на продольный пластинчатый транспортер в вагонетки подземной откатки. Этой системой удается уловить до 87% породы забоя и механизированным путем выдать из щитовой зоны на внутритоннельный транспорт. Система поперечных транспортеров с большим успехом была применена при сооружении щитовым способом станции Бауманская (инж. М. А. Самодуров) и в дальнейшем нашла широкое применение при строительстве других станций Замоскворецкого и Покровского радиусов 3-й очереди строительства.

Внутритоннельный транспорт разрешается (помимо канатной откатки на коротких участках трассы) применением на расстоянии более 500 *м* электровозной тяги троллейного типа. На строительстве станций 3-й очереди широко использован конвейерный транспорт породы.

Касаясь процесса механизации монтажа тюбингов, следует отметить, что, хотя производительность существующих эректоров полностью обеспечивает темпы щитовой проходки, все же усматривается недостаток эректора, заключающийся в том, что рука его при своем вращении фактически пересекает конструкции установленного в щите погрузочного агрегата. При этом частично нарушается процесс одновременности выдачи породы из забоя и укладки тюбингов в нижней части кольца, при наличии одного эректора с осью вращения в центре.

С этой точки зрения заслуживает внимания тюбингоукладочная машина (рис. 366), сконструированная, изготовленная и примененная на шахте № 9—10 при сооружении станции Сталинская (инж. Н. А. Губанков и В. И. Обухов).

Конструкция кольца укладчика, по которому перемещается каретка, устанавливающая на место тюбинг обделки, смонтирована непосредственно на корпусе щита. По этой схеме в центре кольца остается пространство, позволяющее пропустить хвост погрузочной маши-



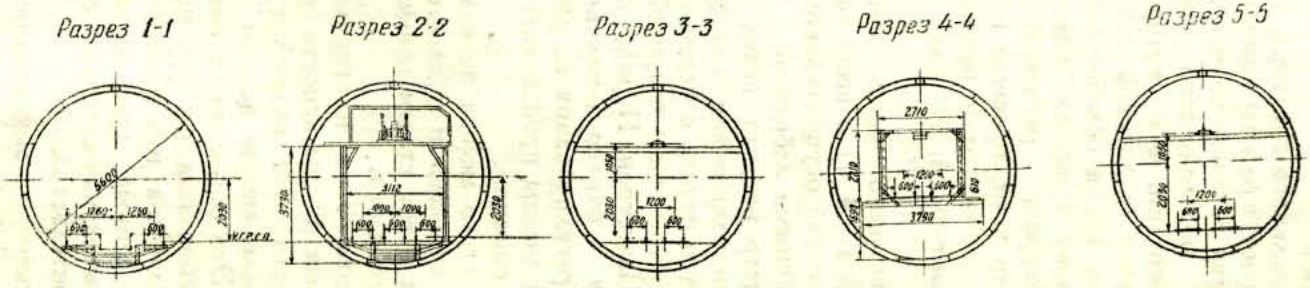


Рис 365. Комплексная механизация щитовой проходки под сжатым воздухом

ны — транспортер — и таким образом решить задачу совмещения процесса укладки тюбингов и выдачи породы из забоя. Несмотря на некоторые конструктивные недостатки этой машины, вызванные спешностью изготовления в шахтных условиях, все же можно указать, что при дальнейшей работе над схемой и проектом возможно ожидать весьма эффектив-

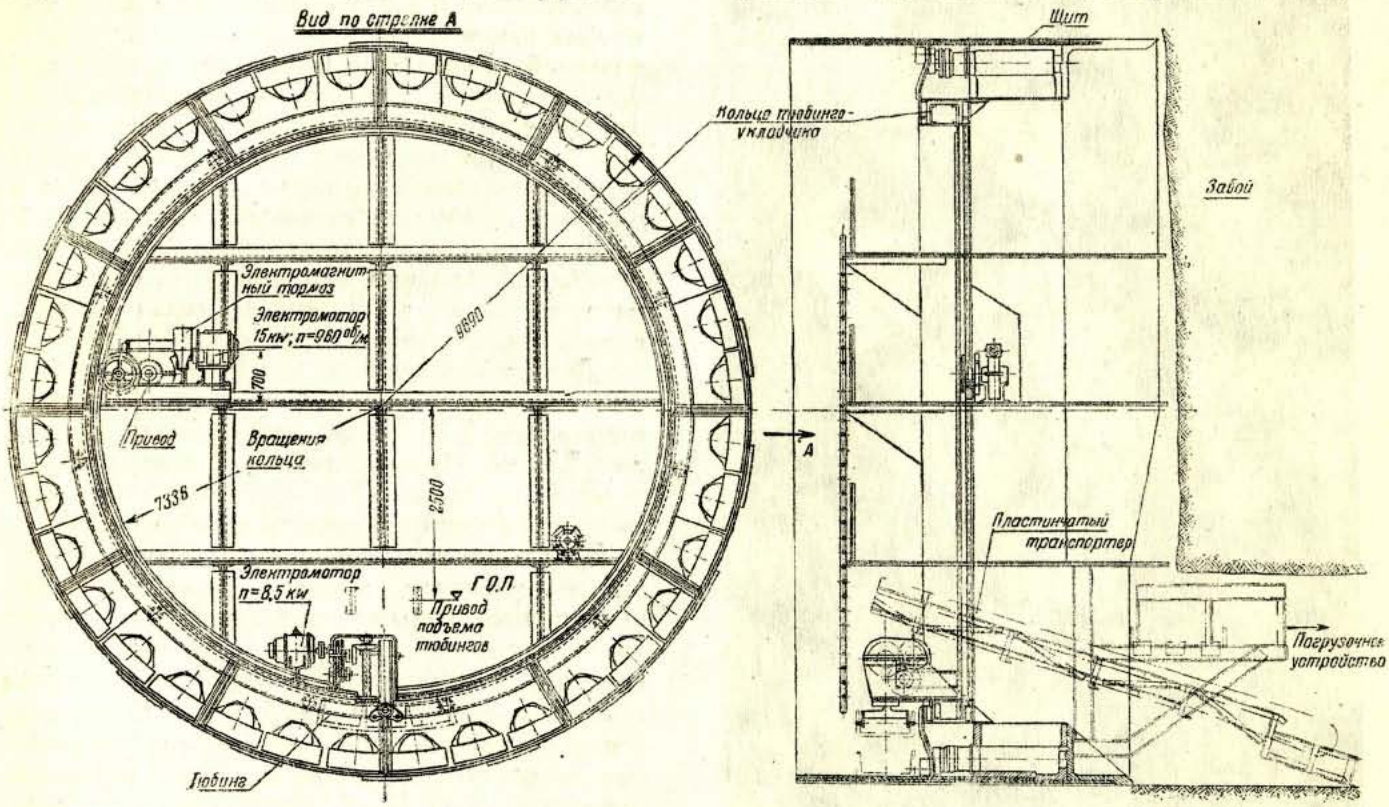


Рис. 366. Тюбингоукладочная машина, смонтированная на станционном щите

ного решения вопроса укладки тюбингов, базируясь на опыте шахты № 9—10 Метростроя.

Эректор в том виде, как он применяется на Метрострое и в заграничной практике, предназначается для монтажа тюбинговой обделки, но в действительности он выполняет лишь весьма ограниченную операцию укладки тюбингов по контуру обделки. Собственно монтаж элементов обделки между собой, сбалчивание тюбингов происходит вручную. На рис. 367 показан процесс сбалчивания тюбингов вручную при сооружении тоннеля в США.

Это определяет элемент (полумеханизацию) незаконченности механизированного процесса монтажа тюбингового кольца. Достаточно указать, что на 3-й очереди строительства необходимо было сболтить до 7,5 миллиона болтов, чтобы ощутить, насколько важно перейти от ручного сбалчивания к механическому.

Определенный эффект в области механизации сбалчивания дал механический сбалчиватель системы инж. И. Г. Данковцева, примененный на ряде шахт 3-й очереди, но он требует дальнейшего усовершенствования.

В стремлении механизировать операцию сбалчивания при сооружении последнего Линкольнского подводного тоннеля под р. Гудсон (США) с успехом был применен специальный болтовой эректор, обеспечивающий производительность до 18 *м* в сутки, при диаметре до 9,5 *м*. Этим болт-эректором представлялась возможность крестообразно сбалчивать тюбинговое кольцо одновременно в четырех точках и обеспечить высокие темпы сборки (рис. 368).

Исключительно важной и ответственной операцией, обеспечивающей гидроизоляцию тоннеля, является расчеканка швов тюбингов.

Как известно, процесс расчеканки состоит из предварительной операции по расчеканке свинцовым шнуром с последующей операцией расчеканки цементом. Объем расчеканочных

работ на Метрострое был огромный и характеризовался для 3-й очереди величиной до 300 км.

Это породило настоятельную необходимость в изыскании способов и средств механизации расчеканочных работ, которые до сих пор проводятся как в заграничной практике, так и у нас преимущественно ручным способом.



Рис. 367. Сбалчивание тюбингов вручную

Работы по расчеканке являются весьма кропотливыми и для обеспечения надлежащего качества требуют значительной затраты времени и рабочей силы. Этот вопрос инженеры пытаются разрешить применением систем расчеканочных эректоров для свинца и воздушных аппаратов, подающих расчеканочную смесь определенной консистенции в желобки между тюбингами. Но все эти агрегаты остаются пока в области исканий и изобретений, являясь паллиативными средствами. Таким образом, до сих пор еще нет более или менее удовлетворительного и приемлемого агрегата, способствующего «малой» механизации расчеканочных работ.

Как указывалось выше, на современном этапе развития тоннельной техники щитовая механизированная проходка, позволяющая раскрыть выработку сразу на полный профиль, без применения кустарных методов деревянного крепления, является наиболее совершенной. В дореволюционной России щит не был применен ни на одном из строительств тоннелей. Впервые в Советском Союзе щит был применен советскими инженерами на 1-й очереди строительства Московского метрополитена при проходке перегонного тоннеля через подземное староречье. Однако щиты и щитовые приемы, применявшиеся за границей, не могли удовлетворять высоким требованиям, предъявленным при сооружении Московского метрополитена в сложных геологических, гидрогеологических и городских условиях.

Достаточно сказать, что станции Лондонского метрополитена имели размеры боковых тоннелей в 6,5—7,0 *м*, при среднем тоннеле до 3,7 *м*, образуя двухсводчатые станции с двумя проемами. Так сооружены, как правило, все станции Лондонского метрополитена

Благодаря новым, смелым, усовершенствованным щитовым методам, запроектированным и внедренным советскими инженерами Метростроя, применению крупных станционных щитов и полущитов новой конструкции создан ряд станций глубокого заложения, представляющих собой инженерные сооружения со значительными пролетами и объемами выработок ($L = 32$ *м*), находящихся на большой глубине, под значительным горным и гидростатическим давлением. Станции подобного типа, созданные щитовым способом глубокого заложения (Площадь Свердлова, Курская, Новокузнецкая, Бауманская, Электрозаводская и др.), неизвестны в мировой практике тоннелестроения. Щитовые методы работ по раскрытию больших тоннельных профилей обусловили создание станций Маяковская, Сталинская — выдающихся сооружений мировой инженерной техники.

О том, насколько советские инженеры в области новых методов щитовой проходки опередили англичан, где щит был изобретен, достаточно привести данные из отчета о строительстве последней линии Лондонского метрополитена — Илфорд. Английские инженеры, используя опыт щитовой проходки советских инженеров, создали пока лишь одну станцию Гент-Хилл по образцу станции Московского метрополитена.

Коренные усовершенствования методов щитовых работ, запроектированные и внедренные на Метрострое, обусловили:

а) сооружение станционных тоннелей больших объемов и пролетов, не имеющих прецедентов в мировой практике;

б) создание конструкций щитов и полущитов, оснащенных специальными погрузочными устройствами, обеспечивающими погрузку до 87%, увеличивающую скорость проходки в 2,5 раза;

в) создание ряда подводных тоннелей без применения сжатого воздуха.

В заграничной практике, как правило, подводному тоннелестроению сопутствует сжатый воздух;

г) создание комплексной механизации скоростной щитовой проходки, позволяющей вслед за разработкой забоя непрерывно вести все операции и получать готовый тоннель (в расстоянии до 150 *м* от забоя);

д) создание методов, позволяющих вести щитовую проходку под ответственными сооружениями и многоэтажными зданиями, не вызывая осадок.

Новые индустриальные методы щитовых работ, сложившие механизированную технику советского тоннелестроения, теоретически и практически разработаны, запроектированы, внедрены и проверены на Метрострое, в многочисленных забоях Московского метрополитена и на других тоннельных объектах в течение 15-летнего периода.

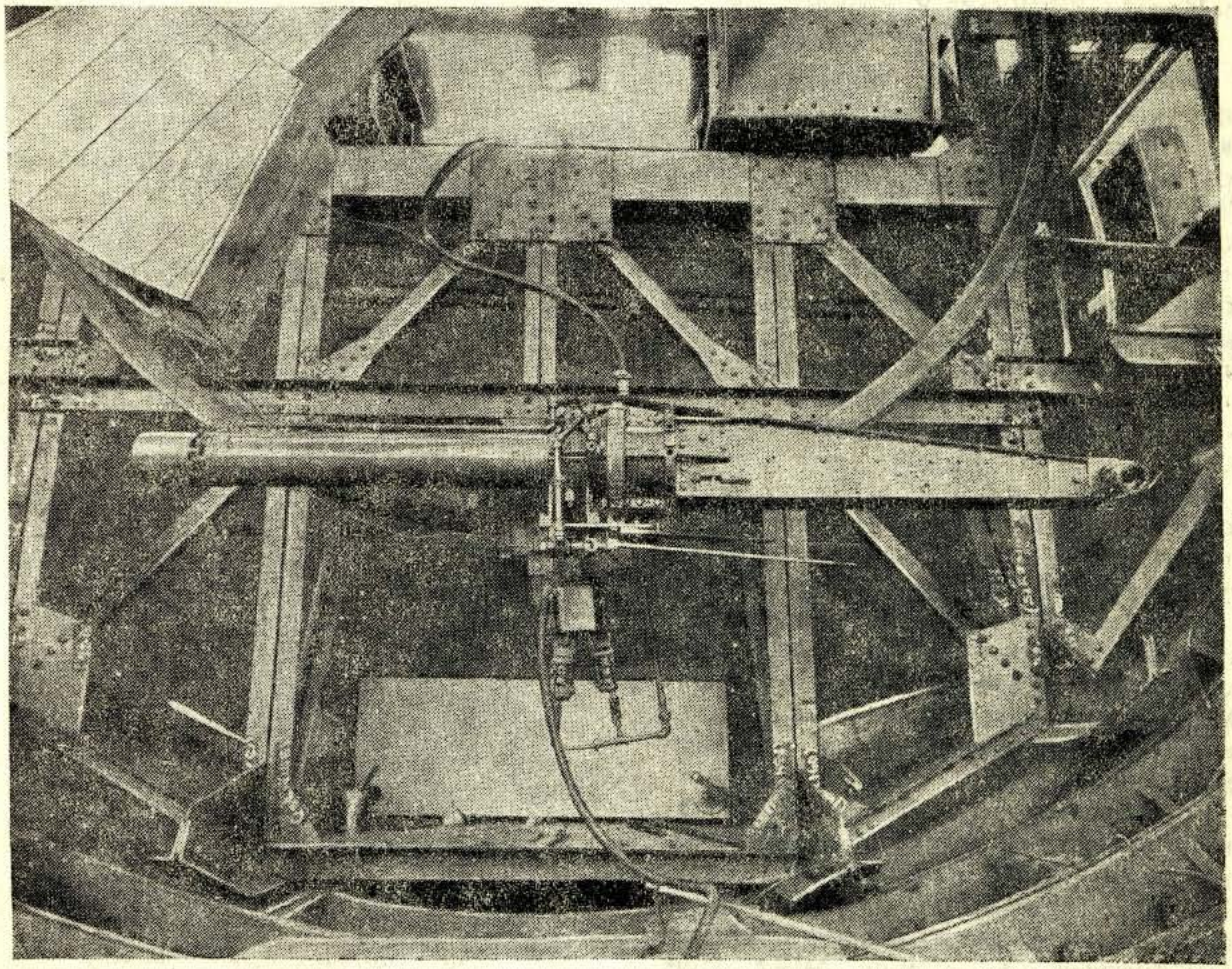


Рис. 368. Болтовой эректор

В геотехнической обстановке 4-й очереди строительства Московского метрополитена (значительное горное давление и приток подземных вод до 2 500 $м^3/час$) доказано, что сооружение тоннелей и станций крупных профилей щитовыми методами может быть теперь успешно осуществлено в сложнейших геологи-

ческих и гидрогеологических условиях. Методы щитовой проходки приняты для сооружения тоннелей и станций метрополитенов Ленинграда и Киева.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И МЕХАНИЗАЦИИ ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ МЕТРОСТРОЕНИЯ[1]

I. Общие вопросы организации тоннельных работ

1. Методы производства тоннельных работ по сооружению метрополитена, установленные в соответствии с геотехническими и городскими условиями, должны обеспечить устойчивость зданий, поверхностных и подземных сооружений по трассе. Тоннельные работы должны вестись таким порядком, чтобы не нарушать нормальной жизни города и не вызывать осадок поверхности.

Основным методом производства работ по сооружению тоннелей и станций метрополитена устанавливается метод щитовой проходки.

2. В основу организации работ по сооружению метрополитена должны быть положены методы поточно-скоростного строительства, базирующиеся на следующих принципах:

а) протяженность отдельных линий и порядок ввода их в строительство должны быть выбраны таким образом, чтобы ликвидировать вынужденные разрывы в работах и обеспечить планомерную сдачу готовых участков в эксплоатацию;

б) параллельное выполнение и механизация всех процессов, входящих в комплекс сооружения тоннелей.

3. Профиль трассы, отметки заложения станций, их конструкция должны решаться с учетом будущей организации работ. При трассировке линий надо максимально избегать участков слабых пород, требующих применения специальных методов работ (замораживания, сжатого воздуха и т. д.).

4. Выбор точек заложения стволов, расстояния между ними должны решаться с учетом:

а) принципа поточно-скоростного строительства;

б) скорости щитовой проходки;

в) вопросов вентиляции, водоотлива;

г) направления движения щитовых забоев, направления потоков внутритоннельного транспорта, объемов работ и графика производства работ. Как правило, назначается один шахтный ствол на станцию метрополитена и один ствол на проходку перегонных тоннелей.

5. Направление движения щитов должно быть решено одновременно для всей линии в целом.

6. Вопрос о передовых штольнях должен быть решен для каждого конкретного участка в зависимости от геологии, гидрогеологии, продольного профиля и других специфических условий.

7. Расчет конструктивных элементов щитов и временных креплений должен производиться в соответствии с теорией сооружений, учитывая влияние нарушения пород в процессе проходки.

II. Открытие фронта тоннельных работ

1. Открытие фронта работ при сооружении тоннелей метрополитена осуществляется из: а) вертикальных шахтных стволов; б) наклонных шахт; в) наклонных эскалаторных тоннелей.

2. В зависимости от геологических и гидрогеологических условий проходка шахт осуществляется: а) обычным способом; б) под сжатым воздухом; в) замораживанием грунтов; г) методом бурения.

3. В состав околоствольных выработок входят рудничный двор, обгонные выработки у ствола, насосная камера, электрокамера, склад взрывных материалов, монтажные и демонтажные щитовые камеры.

III. Элементы проходческих работ

1. Проходка тоннелей, как правило, должна осуществляться щитовым способом. Щит может быть создан универсальным, позволяя вести работы в разных геотехнических условиях, допуская применение отбойных инструментов, буровзрывных работ, а равно оснащение щита агрегатом для механизированной разработки забоя. Горный способ работ может применяться главным образом для сооружения тоннелей небольшого протяжения и переменного сечения, как, например, раструбы, переходные камеры и др.

2. Процессы разработки, уборки породы и монтажа обделки должны быть по возможности совмещены.

3. Щиты должны быть оснащены необходимыми механизмами в целях максимальной механизации, экскавации и уборки породы.

[1] Проект автора.

4. Механизация уборки породы может быть решена при помощи породоуборочной машины и транспортера, а в некоторых случаях гидромеханизацией.

5. Для осуществления комплексной механизации с параллельным выполнением всех процессов по сооружению готового тоннеля необходимо:

а) транспортировку грунта в зоне сооружения тоннеля осуществить транспортерами;

б) освободить в указанной зоне лоток от настила и путей.

6. Крепление элементов горных выработок и тоннельных опалубочных устройств производится при помощи металлических, сборно-разборных, инвентарных, стандартного типа конструкций.

IV. Разработка забоя и уборка породы от щита

1. Для форсирования разработки забоя в скальных породах необходимо усовершенствовать методы ведения буровзрывных работ в направлении:

а) увеличения скоростей бурения;

б) автоматизации подачи бура;

в) оснащения щитов и тележек для проведения процесса многоперфораторного обуривания забоя;

г) применения новых видов взрывчатых материалов;

д) установления оптимальных размеров заряда и длины шпуров в зависимости от геологических условий.

2. Для решения и последующего проектирования методов разработки забоя необходима широкая постановка экспериментально-исследовательских работ, которые должны вестись в направлении изыскания механизмов, работающих на принципе резания, бурения, дробления и скалывания пород.

3. При пересечении слабых пород процесс тоннелирования должен производиться в сочетании с одним из специальных приемов искусственного укрепления пород, как, например, замораживание, сжатый воздух, силикатизация и др.

4. При выборе типа породоуборочной машины необходимо учесть опыт работы машин на 3-й и 4-й очередях строительства Московского метрополитена и приемлемых для тоннелестроения отечественных конструкций.

V. Монтаж тоннельных обделок

1. Наряду с применением существующих эректорных укладчиков необходимо предусмотреть применение укладчиков нерадиального типа, освобождающих среднюю часть тоннеля для транспортных целей.

2. Механизмы для сбалчивания должны конструироваться по двум направлениям:

а) по линии облегчения (до 8 кг) ручных сбалчивателей;

б) по линии конструирования сбалчивателей тяжелого типа с монтажом их на эректоре.

VI. Нагнетание растворов за обделку, гидроизоляция и бетонирование

1. Процесс нагнетания растворов за обделку должен быть решен во взаимосвязи с общим тоннельным комплексом при параллельном ведении работ.

2. В целях повышения качества нагнетания и экономии цемента необходимо максимально стремиться к усовершенствованию процесса нагнетания за обделку инертных материалов.

3. Вопросы гидроизоляции тюбинговой обделки подлежат проработке в следующем направлении:

а) изыскание заменителей свинца;

б) улучшение изоляции болтовых креплений;

в) механизация укладки замазки и очистки болтовых креплений.

4. Подача бетона к месту укладки в прищитовой зоне должна производиться с применением бетононасосов.

На станциях бетонные работы должны производиться бетоноукладчиками.

Уплотнение бетона должно осуществляться вибраторами.

VII. Внутритоннельный транспорт

1. Основным видом транспорта для участков перегонных тоннелей следует установить электровозную откатку.

2. Для околоствольных выработок и на коротких участках трассы допускается применение канатной тяги.

3. Основным подвижным сосудом для породы установить вагонетку с глухим кузовом.

4. При сооружении станции, как правило, применять конвейерный транспорт.

VIII. Шахтный подъем

1. Наряду с применением существующих клетьевых подъемов необходимо в конкретных условиях проработать вопрос о применении для выдачи породы скиповых подъемов, как более производительных.

2. Процессы загрузки и разгрузки клетей должны быть механизированы применением цепных компенсаторов, толкателей, самокатных путей, опрокидывателей и механических питателей.

3. Рудничные дворы и верхние приемные площадки должны быть приспособлены для поточной загрузки клетей (двухсторонний выход).

4. При сооружении станций должен быть использован наклонный эскалаторный ход для подъема породы и спуска материалов.

IX. Шахтный водоотлив

1. Для станционных тоннелей отметки передовых штолен и подходных выработок должны быть заданы таким образом, чтобы дренаж воды от забоев к центральной насосной станции происходил без промежуточных перекачечных установок.

2. Суммарная установленная производительность насосной станции должна быть не менее двух- и не более трехкратного притока воды.

3. Емкость водосборника должна быть не менее получасового притока воды.

4. В целях усовершенствования шахтного водоотлива требуется постановка проектно-экспериментальных работ по применению эрлифтов.

X. Организация поверхностных площадок

Оборудование шахтной поверхности должно быть произведено с учетом:

а) применения инвентарных сборно-разборных сооружений;

б) усовершенствования конструкции с максимальным применением недефицитных материалов;

в) планировки зданий в соответствии с технологическим процессом в целях максимального сокращения внутришахтных перевозок.

Некоторые данные по щитовым работам в условиях метростроения приведены в табл. 24 и 25.

Таблица 24

Обслуживающий и рабочий персонал при щитовой проходке в условиях метростроения

Наименование квалификации	Количество людей	
	перегонный щит	станционный щит
Сменный инженер	1	1
Сменный механик	1	1
Машинист на эректоре	1	1
Машинист погрузочного механизма	1	1
Дежурный электрослесарь	1	1
Проходчики	6	12
Тюбингщики	3	5
Рабочие по расчеканке швов	4	6
Рабочие по нагнетанию раствора	2	3
Обслуживание водоотлива в забое	1	1
Итого	21	32

Таблица 25

Перечень тоннельно-строительных работ в условиях метростроения

Освоение и оборудование шахтных площадок
Проходка шахт
Проходка околоствольных выработок
Проходка штолен
Сооружение монтажных камер, перегонных станционных щитов
Монтаж перегонных и станционных щитов и эректоров
Проходка перегонных тоннелей щитами
Проходка перегонных тоннелей под сжатым воздухом
Проходка перегонных тоннелей горным способом с эректором
Проходка станционных тоннелей щитом
Проходка станционных тоннелей горным способом с эректором
Проходка переходных камер и съездов горным способом
Проходка натяжных станционных камер горным способом
Сооружение вентиляционных тоннелей и камер сантехнического и энергетического комплекса
Проходка наклонных эскалаторных тоннелей
Сооружение подземных и надземных вестибюлей
Укладка железнодорожного пути метрополитена и электромонтажные работы
Архитектурно-отделочные работы станций метрополитена

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

СООРУЖЕНИЕ ТОННЕЛЕЙ КРУПНЫХ ПРОФИЛЕЙ

Наиболее сложной задачей в тоннельном деле является раскрытие крупных профилей. Условия подземных работ, а главное — влияние возрастающего в количественном отношении горного давления в соответствии с увеличением размеров выработок заставляют строителей изыскивать в этом случае особые приемы тоннелирования. Применяя систему временного деревянного крепления при каменной обделке, сооружение крупных тоннельных профилей сводят к дробным этапам раскрытия отдельных элементов сечения.

Разрезая массив системой штолен и заходок путем замены выбранной породы кладкой, удается заложить по контуру выработки несущую конструкцию обделки тоннельного профиля.

Так, в период сооружения тоннелей глубоких станций первоочередной линии Московского метрополитена трехсводчатого сечения шириной до 32 *м*, при высоте 13 *м*, вначале строились отдельными фазами крайние тоннели. При последующих работах в породах карбонного комплекса и юрских глин последние были настолько нарушены, что устройство средней части профиля станции при нарастающем горном давлении представляло огромные технические трудности. Однако методами, примененными советскими инженерами, указанные трудности были преодолены.

Следует все же заметить, что приемы временного деревянного крепления при раскрытии крупных профилей трудно поддаются механизации. Поэтому в процессе сооружения станций 2-й очереди партией и правительством был поставлен вопрос о необходимости применения и в этом случае модернизованной тоннельной, в частности щитовой, техники при металлической обделке.

Щитовая система сооружения крупных станционных профилей запроектирована и применена для станций 2-й, 3-й и 4-й очереди Московского метрополитена, а равно для метрополитена Ленинграда и Киева.

Стремление к сооружению тоннелей крупных профилей комбинированными щитовыми приемами наблюдается в последнее время и за границей, в особенности в США и Англии (Пенсильвания, Мерси).

При сооружении крупных тоннельных профилей приходится обычно в каждом отдельном случае создавать ряд совершенно своеобразных приемов тоннелирования комбинированными методами производства работ.

Тоннели крупных профилей применяются при создании станций метрополитенов, подземных складов горючего и боевых припасов, резервуаров, мастерских и заводов, ангаров, подземных убежищ для военных судов и т. д.

При создании тоннелей крупных профилей стремятся к заложению их преимущественно в коренных устойчивых и главным образом в скальных породах. В последнее время, в зависимости от конфигурации и размеров подземных сооружений, стремятся вскрывать ограниченное сечение по контуру тоннеля, включающему конструкцию обделки. Это дает возможность выборку земляного ядра осуществлять, при несущей конструкции обделки, без применения временного крепления, при широкой механизации земляных работ. Применением усовершенствованных тоннельных экскаваторов ускоряется производство работ до 50% и снижается стоимость строительства на 20—25% по сравнению с обычными методами работ.

Выборка земляного ядра может быть эффективно осуществлена, когда нарезается ряд транспортных галлерей по нижнему горизонту и через вертикальные или наклонные фурнели под силой тяжести опускается порода всего разрабатываемого профиля в сосуды подземного транспорта либо на систему конвейеров. При высоком коэфициенте крепости

пород допустима разработка ядра снизу вверх, при уступчатой системе разработки.

В целях форсирования предпринимаемых работ, по мере устройства контура обделки в нескольких кольцах, к удалению ядра может быть приступлено немедленно. Для сохранения верхнего откаточного горизонта устраивается подвесная (к своду) конструкция моста.

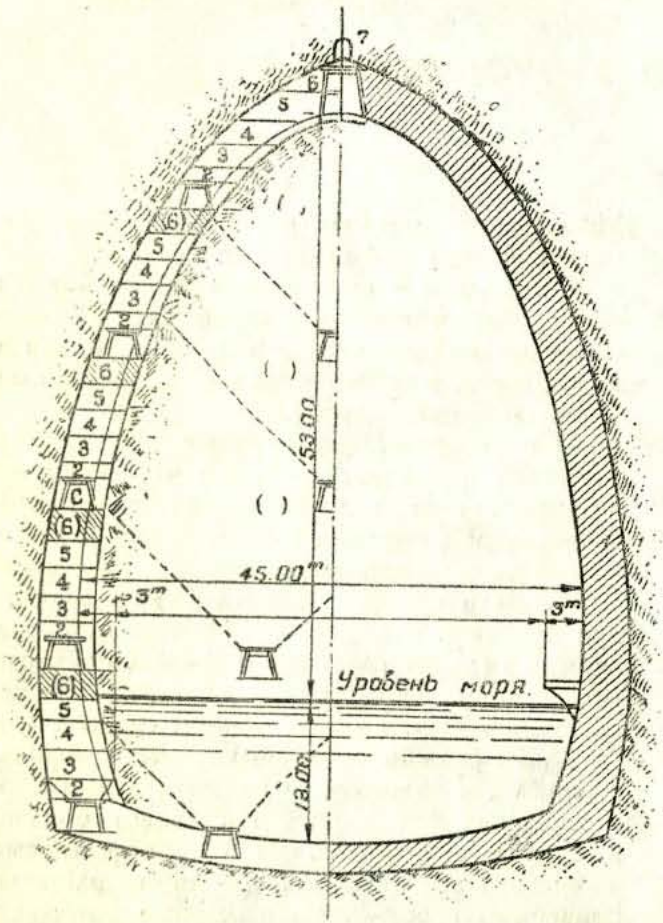


Рис. 369 а. Сооружение тоннельного убежища для военных судов

а) *Сооружение тоннелей специального назначения.* Примером тоннеля крупнейшего односводчатого профиля, предназначенного как убежище для военных судов, является сооруженный во Франции гигантский тоннель шириной 45 *м* и высотой 66 *м*. По высоте тоннель имеет 13 *м* воды для осадки крупных судов (рис. 369а). Конструкция обделки этого тоннеля создана из бетона. Сооружение тоннеля производилось следующим порядком. Вскрытие профиля осуществлялось из шести горизонтов пробивкой штолен в теле конструкции обделки. Разработка велась уступчатым методом снизу вверх, причем оставлялись целики под подошвой каждой из четырех боковых штолен. Порода удалялась через наклонные фурнели в специальные транспортные штольни (нижележащего горизонта), заложенные в ядре сечения выработки. Сечения штолен рассчитывались двухпутными, причем предусматривалась возможность пропуска помимо вентиляционных труб еще трубопроводов бетононасоса для механизированной укладки бетона в конструкцию обделки. Сооружение обделки производилось снизу вверх — от фундаментов стен к замку свода. Для обеспечения надлежащего качества работ по замкованию свода была пройдена специальная надземная галлерея, которая после производства бетонных работ была забучена.

Во Франции для размещения подземного завода по сборке торпед был использован автодорожный тоннель в районе Сен-Клю. Тоннельная обделка эллиптического очертания, пролетом 16, 8 *м* и высотой 6,3 *м*. Длина тоннеля 840 *м*.

В Италии было построено два авиационных подземных завода со стороны западного берега озера Гарда. Заводы расположены в 74 тоннелях диаметром по 9 *м* и длиною по 360 *м*.

В Англии особо важные заводы авиационной промышленности созданы подземными. В 1942 г. начал функционировать подземный авиационный завод, сооруженный и оборудованный в течение одного года. Подземные выработки завода пройдены на глубине 33 *м* от поверхности. Завод оборудован 8 лифтами грузоподъемностью по 50 человек. Налеты вражеских самолетов не влияли на работы подземного завода, производившиеся круглосуточно.

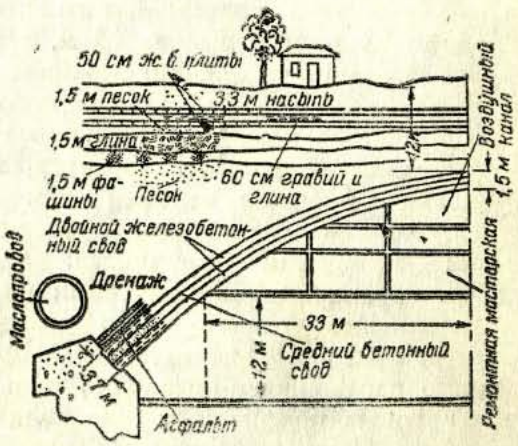


Рис. 369 б. Конструкция подземного ангара

В 1940 г. в Гибралтаре построен ряд тоннельных сооружений в скальных породах для подземных убежищ, госпиталей и бензинохранилищ. В частности, размеры горных выработок для размещения госпиталя составляли: а) 3,6 × 10,5 *м* и длиною 60 *м* и б) 3,6 × × 3,6 *м* и длиною 360 *м*.

В Тюрингии в период второй мировой войны построен ряд подземных заводов по выпуску самолетов, снарядов. Пролеты выработок доходят до 83 *м* при высоте 30 *м*. Толщина армированного бетонного свода в замке 5 *м*, в пятах 13 *м*. Внутренний объем выработки заполнен пятиэтажной рамой железобетонной конструкции, габариты которой обусловлены технологией завода. Заводы строились полуподземного типа в шахтах и в тоннельных выработках для целей авиации, синтетического бензина и др.

Для характеристики объема работ по одному из подземных заводов для синтетического горючего в Нардхаузене, построенному в период второй мировой войны, достаточно указать, что пройдено до 50 *км* параллельных тоннельных выработок пролетом до 20 *м* при объеме вынутой породы в 1 600 000 $м^3$.

Следует, однако, указать, что, как правило, выработки сооруженных подземных заводов проходились в горных массивах через породы с высоким коэфициентом крепости, не требующих крепления, при практическом отсутствии подземных вод. Так что устройства гидроизоляционных работ не требовалось. .

В 1944 г. Морским министерством США в районе порта Пирл Харбор были сооружены огромные подземные нефтехранилища емкостью до 900 000 $м^3$. Последние представляют собой 20 вертикальных цилиндров, каждый диаметром 33 *м* и высотою до 80 *м*. Размер целиков между отдельными выработками — 60 *м*. Каждый из цилиндров, заложенных на большой глубине в скальных породах, имеет конструкцию верхнего и нижнего купола, сопряженных с обделкой цилиндра.

Схема вскрытия подземных выработок усматривается из рис. 369 в и проведена следующим порядком:

Из ряда шахт размерами 1,2 × 1,8 *м* засечен верхний штольневой горизонт, из которого пройдена система кольцевых тоннелей, включающих опорные железобетонные кольца верхних куполов. Последние бетонировались по стальным формам на земляных кружалах. Выборка цилиндрического ядра производилась спуском породы через центральные «слепые» шахты размерами 3,7 × 3,7 *м* в тоннель нижнего горизонта. Горизонтальный транспорт породы осуществлялся системой конвейеров.

Бетонирование обделки производилось с применением металлического чехла, смонтированного с помощью специального подъемника. Применение железобетонной обделки в сочетании с металлическим чехлом обеспечило требуемую прочность и изоляцию конструкции этих грандиозных размеров подземных нефтехранилищ.

В этом же районе на морской базе сооружена подземная электростанция на глубине 30 *м* от поверхности.

Размеры машинного зала: пролет 8,4 *м*, высота 8,7 *м* и длина 68, 9 *м*.

В Северной Америке сооружены подземные ангары пролетом до 60 *м* как средство для укрытия самолетов и обеспечения авиационных баз. Несущая конструкция обделки ангара односводчатая многослойной железобетонной конструкции, при защитной земляной толще.

В некоторых случаях устраиваются защитные железобетонные тюфяки с целью поглощения ударного воздействия авиационной бомбы.

Особое внимание уделяется качеству материалов и вопросу обеспечения прочности конструкций, подвергаемых специальным статическим и динамическим расчетам в зависимости от глубины заложения сооружения и от средств поражения. На рис. 369 б изображено поперечное сечение подземного ангара.

б) *Сооружение станций метрополитена глубокого заложения горными методами.* Исключительный интерес представляет сооружение станций Московского метрополитена трехсводчатого профиля шириной выработки 32 *м* и высотой 13 *м* на большой глубине от поверхности. Задача осложнялась тем, что тоннели станций проходились под мощной толщей плывунов.

При этом, поскольку эллипс обрушения выходил на дневную поверхность, приходилось считаться с полным давлением грунта, налегающего над кровлей выработок. К сооружению станционных тоннелей на временном деревянном креплении, при постоянной каменной обделке, надлежит подходить с большой осторожностью. Разработки следует вести (независимо от выбранного способа) небольшими частями. Опыт показал, что для станционных тоннелей недостаточно ограничиться расчетом конструкций как законченного сооружения. Необходимо проверять устойчивость отдель-

ных элементов тоннельной обделки по фазам в процессе производства работ. При расчете следует также учитывать обнажение, которое получается в связи с развертыванием фронта работ, в соответствии с заданным графиком производства.

В конструкции станции метрополитена трехсводчатого профиля нагрузка на промежуточные опоры — пилоны — доходит иногда до 3000 *т*. Эти ответственные элементы, от качества выполнения которых зависит устойчивость сооружаемого тоннеля, должны возводиться с большой тщательностью (рис. 369 г).

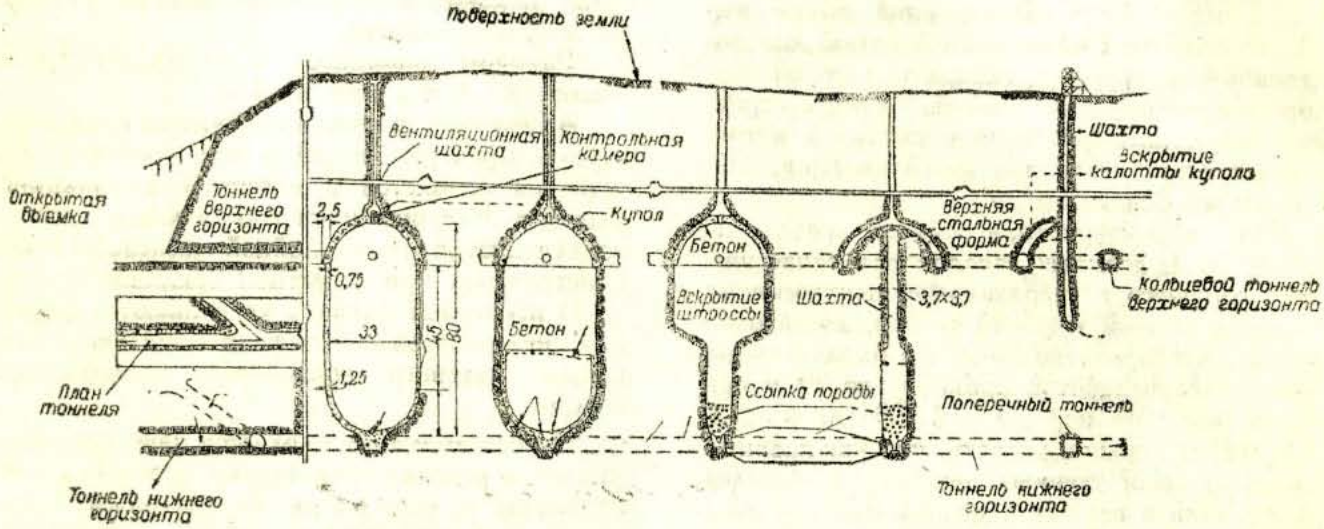


Рис. 369 в. Фазы работ по сооружению подземных нефтехранилищ

Работы по сооружению станций трехсводчатого типа обычно начинаются снизу, с закладки штолен под фундаменты стен и пилонов. Параллельно ведется проходка нижних транспортных штолен. Когда фундаменты возведены, приступают к проходке надпилонных штолен. Из них опускаются колодцы, в которых бетонируются самые пилоны. Последние устраиваются бетонной или железобетонной конструкции. Следующим этапом является укладка мощной железобетонной балки в надпилонной штольне. Затем ведется проходка верхних штолен, боковых тоннелей, после чего приступают к раскрытию из них калотты с последующей бетонировкой свода. Полностью создают два крайних тоннеля. Эти боковые станционные тоннели должны быть до создания третьего свода рассчитаны на полное давление грунта. Самым ответственным является устройство среднего тоннеля, который требует специального подхода. Поскольку возведенные обделки боковых тоннелей рассчитываются с учетом пассивного отпора грунта, то совершенно ясно, что нарушение равновесия грунта в связи с разработкой третьего (среднего) тоннеля может привести к деформациям в крайних тоннелях. Раскрытие среднего свода надлежит производить небольшими кольцами длиной не более 2 *м*, не допуская при этом опережения верхней штольни. В момент раскрытия кольца среднего свода учитывается продольная жесткость готовых боковых сводов. Разбивку среднего тоннеля на рабочие кольца следует производить таким образом, чтобы швы среднего свода не совпадали с рабочими швами сводов боковых станционных тоннелей. Ни в коем случае не допускается приступать к раскрытию среднего свода, пока не замкнуты контуры боковых тоннелей. Разработка штроссы и создание лотков или обратных сводов тоннелей производится обычным способом.

в) *Сооружение станций Московского метрополитена глубокого заложения щитовым методом.* Станция метрополитена глубокого заложения представляет собой трехсводчатый профиль, образованный тремя параллельными тюбами, диаметром по 9,5 *м*, размещенными

I Проходка штолен 1-го горизонта и кладка в них средних стен вестибюля

II Проходка штолен 2-го горизонта и кладка в них стен

III Проходка штолен 3-го горизонта, устройство ж.б. пилонов в колодцах, устройство ж.б. плиты и части стен над пилонами

IV Устройство сводов крайних тоннелей

Уложить 2 железные трубы при производстве работ диам. по 150 мм

V Подбодка стен крайних тоннелей

VI Устройство свода и среднего тоннеля

Готовые тоннели

Стойки штолени должны опираться на известняк с увеличением высоты штолени до 2,50 метров

В части станции, лежащей в ванных геологических условиях стена предварительно выбивается в двух расположенных одна под другой штольнях

Рис. 369 г. Сооружение трехсводчатой станции бетонной конструкции горным способом

на взаимном расстоянии между осями порядка 12 *м* (станция типа Площадь Свердлова 3-й очереди строительства). Профиль раскрывается шириной около 32 *м*. При длине станции в 155 *м* сооружение станции проводится раздельным движением щитов по каждому из станционных тюбов.

Сооружение станции ведется щитовым способом при обделке чугунными тюбами. Щиты диаметром 9,6 *м* имеют 16 рабочих ячеек, откуда ведется разработка забоя. В хвосте щита эректором монтируются сегменты станционного тюба (рис. 370).

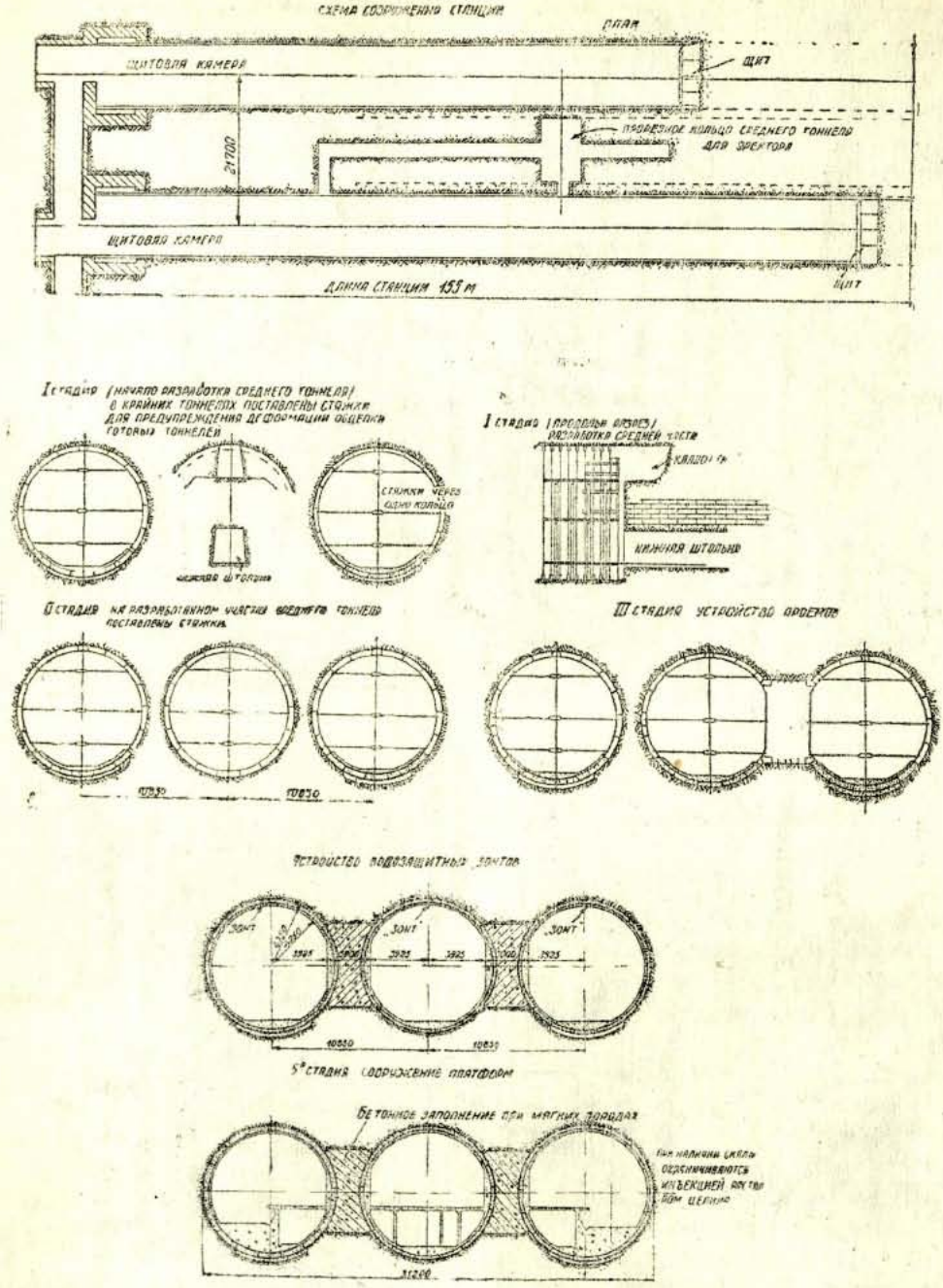


Рис. 370. Сооружение трехсводчатой тюбинговой станции щитом и эректором

В торце станции, используя вентиляционные тоннели, оборудуют камеру для монтажа щитов. Нормально щиты пускают для проходки боковых тоннелей на протяжении 155 *м*.

Средний станционный тоннель сооружается

горным способом при специальном эректоре для монтажа тюбингов. При проходке в глинистых грунтах предварительный пропуск крайних щитов может в значительной степени

нагнетание за обделку цементного раствора с целью заполнения пустот, постановка специального крепления и стяжек в тоннеле, причем надо учесть возможность растягиваю-

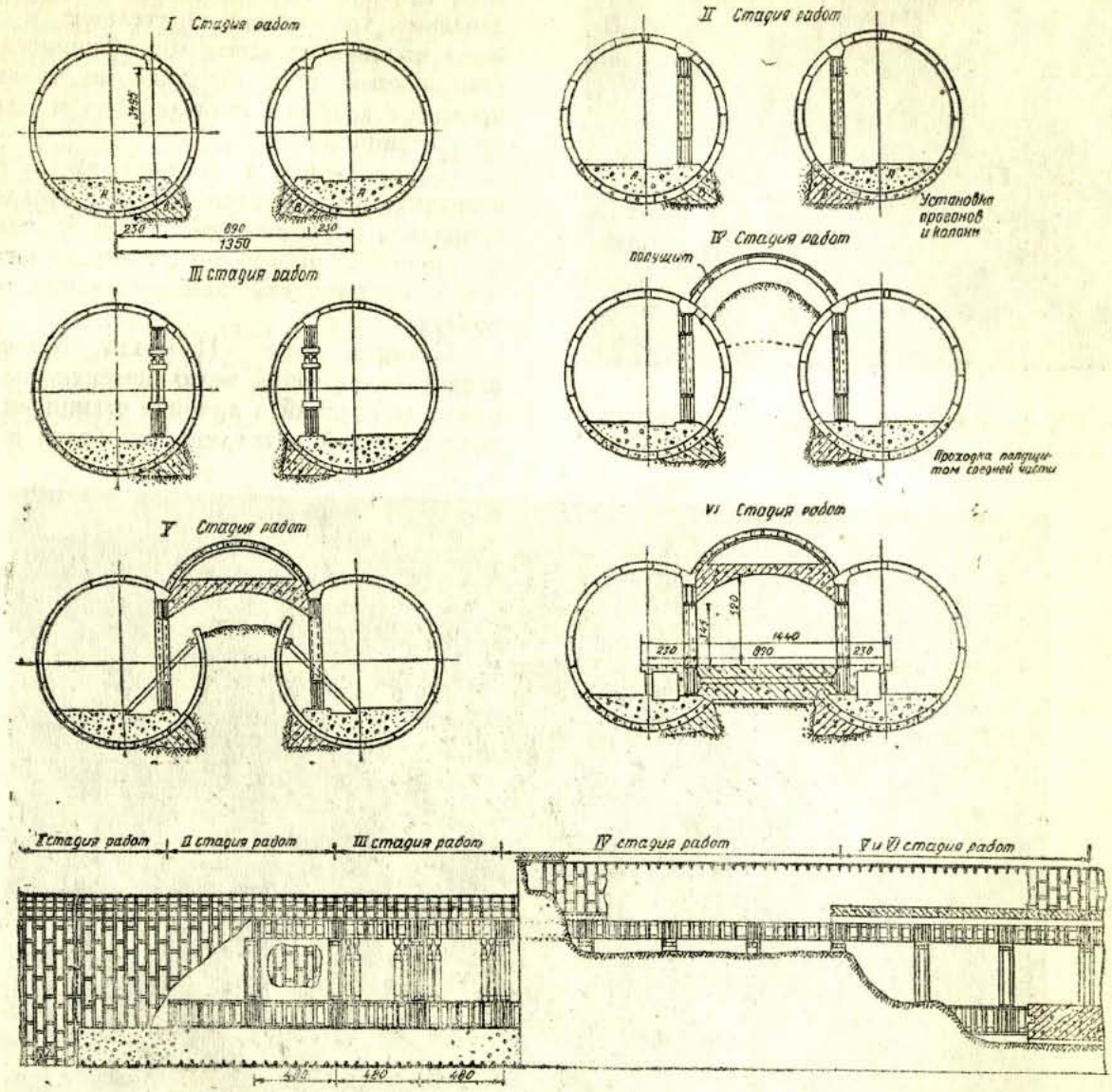


Рис. 371. Московский метрополитен (сооружение трехсводчатой станции на колоннах щитом и полущитом)

нарушить целик, что приводит к большому горному давлению, а следовательно, и к значительным осложнениям при сооружении среднего тоннеля. В этом случае целесообразна предварительная проходка среднего тоннеля в ненарушенной зоне. Однако последующая неосторожная проходка крайними щитами в чрезвычайной близости от созданного среднего тоннеля может также привести к деформации последнего. Поэтому необходимы предварительные меры, а именно: тщательное

щих напряжений в обделке его при лишении пассивного отпора.

Проемы для прохода из среднего тоннеля станции в боковые сооружались на 2-й очереди путем последовательной разборки в соответствующих местах тюбингов крайних тоннелей и замены их фигурными, образующими в проеме жесткую металлическую раму замкнутого контура.

Сооружение станции щитовым способом в коренных породах производилось обычно

следующим порядком: из щитовых камер или полукамер, вскрытых в торце станции поочередно, монтировались станционные щиты в боковых тоннелях и пускались вперед до конца станции, где они демонтировались с учетом дальнейшего использования после ремонта на новых работах 3-й очереди.

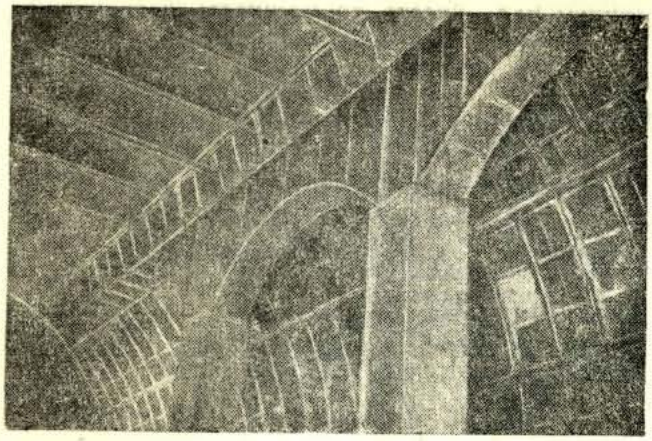


Рис. 372. Элементы металлических конструкций в период монтажа в станционном тоннеле

Средний станционный тоннель в коренных устойчивых породах сооружался преимущественно эректором без щита.

При ненадежных породах, например в условиях проходки станции Динамо, где проявлялось пучение грунта и нарастающее горное давление, требовалось тщательное и усиленное крепление по всему лбу обширного забоя, станционный щит ставился не только для проходки крайних тоннелей, но и для среднего станционного.

При наличии в средней части станции незначительной кровли, которая могла быть прорвана вышележащей толщей плывунов, в процессе раскрытия станционного профиля применялись замораживание, сжатый воздух.

Станция типа Площадь Маяковского представляет собой металлическую конструкцию, где средний и крайние станционные тоннели системой металлических балок и колонн сливаются в один общий профиль (рис. 371, 372, 373).

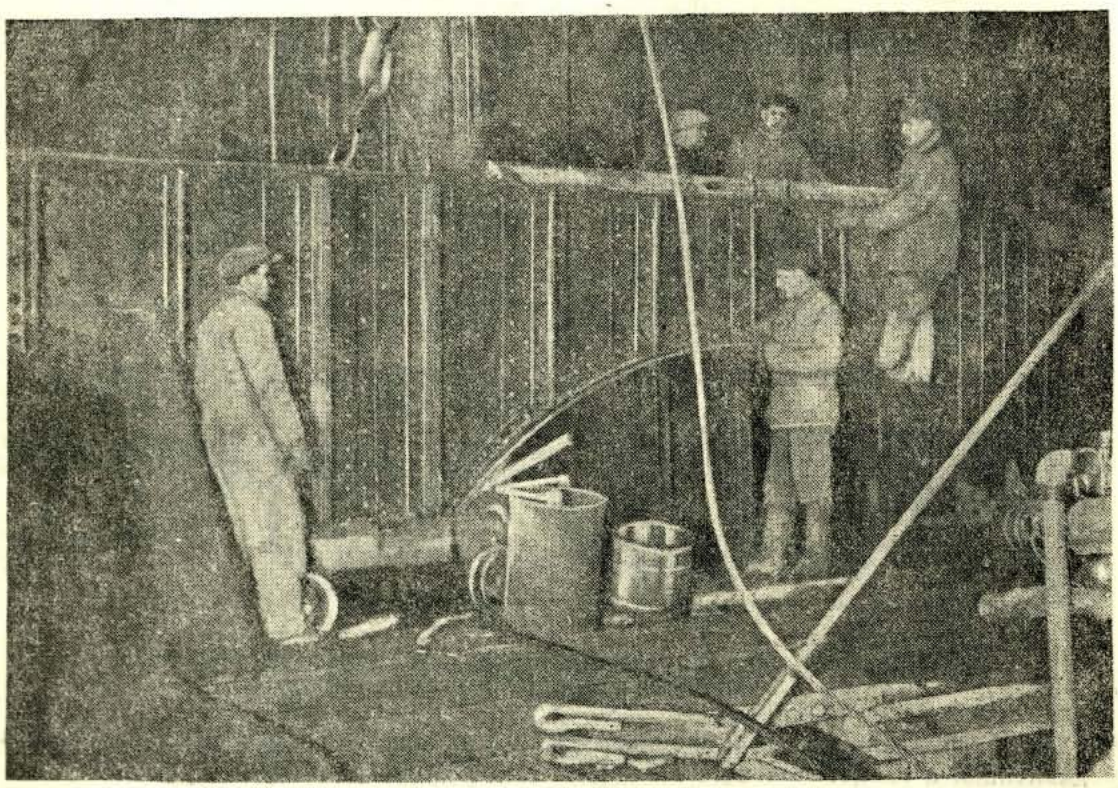


Рис 373. Элементы металлических конструкций в период монтажа в станционном тоннеле Московского метрополитена

Первая стадия прокладки крайних тюбов проводилась станционными щитами, а свод средней части создавался полущитом незамкнутого контура

Полущит диаметром 9 *м* собирался в торце станции и затем по специальным металлическим каткам, укладываемым по крайним тюбам, перемещался вперед (рис. 338). Под защитой оболочки полущита двумя эректорами, прикрепленными непосредственно на его корпусе, монтировалась из тюбингов средняя сводчатая часть станции.

Опыт строительства трех очередей показал, что не перегонные тоннели (хотя и имеющие значительную протяженность) решают успех предприятия, а именно станции всегда являются узким местом и могут задержать своевременный пуск линии метрополитена в эксплоатацию.

Для станций Бауманская и Электрозаводская Покровского радиуса, а равно для станции Новокузнецкая Замоскворецкого радиуса 3-й очереди были приняты оправдавшие себя на практике 2-й очереди типы конструкции трехсводчатых станций в виде трех параллельно сближенных тоннелей из чугунных тюбингов, соединенных между собой системой проемов в поперечном направлении.

На станции Сталинская Покровского радиуса соединение тюбов между собой осуществлено системой спаренных колонн вместо обычно применяемых проемных рам.

Указанные станции глубокого заложения сооружены в условиях коренных пород карбонного комплекса (глин и известняков) под мощной толщей плывунов.

Огромные размеры поперечного профиля станции (32×10 *м*) обусловили значительное горное давление; приходилось считаться со всей вышеналегающей грунтовой толщей. Задача осложнялась тем, что на трассе 3-й очереди при сооружении станции был встречен значительный дебит подземных вод, доходящий до 850 $м^3/час$ (350 $м^3/час$ на 2-й очереди).

Основная проходка станционных тоннелей диаметром 9,5 *м* проведена на 3-й очереди строительства, так же как и на 2-й, при помощи щитов и эректоров при обделке чугунными тюбингами.

В связи с тем, что на 3-й очереди почти каждая станция запроектирована с учетом сооружения ее только из одного шахтного ствола, приходилось соответственно организовать работы.

Наличие одного шахтного ствола обусловило необходимость от забоя щита выдавать грунт назад, в тоннель. Расчеты, проведенные Метропроектом, а также опыт шахты № 3—4 станции Бауманская показали, что при надлежащей комплексной организации и механизации работ на базе цикличности и стахановских приемов работ все затруднения, вызванные выдачей породы, могут быть преодолены. Порода из забоя среднего тоннеля выдавалась погрузочной машиной — скрепером — по специальному трамплину или при помощи улавливающих поперечных питателей, примененных на шахте № 3—4 (инж. М. А. Самодуров), далее системой металлических пластинчатых транспортеров или резиновых конвейеров — в подземные бункеры, размещенные в торце станций (в щитовой камере), где производилась нагрузка вагонеток, направляемых к рудничному двору.

Тюбинги и другие материалы для инъекции и расчеканки подавались на платформах при канатной тяге.

При сооружении станции Бауманская с успехом использовали наклонный ход для транспортирования породы из забоя в период проходки тоннеля средней части станции эректором. Порода в этом случае выдавалась из забоя вперед по передовой штольне при помощи металлического пластинчатого транспортера до местоположения натяжной камеры, где погружалась в скип, поднимаемый по уклону 30° в бункер на поверхность.

* * *

В комплексе трудоемких процессов при сооружении тоннелей станций метрополитена следует отметить операции по устройству проемов. Строители 2-й очереди столкнулись с большими трудностями и неприятностями, когда им пришлось выбивать уложенные в месте проемов тюбинги, с тем чтобы уложить обрамляющие проемы рамы из фигурных тюбингов. Приходилось ломать, резать, а иногда и взрывать элементы чугунной обделки, а затем вручную монтировать чугунные рамы.

Таковы уроки устройства проемов на 2-й очереди строительства.

Чтобы избежать тяжелых и вместе с тем кустарных приемов устройства проемов, была разработана и принята на строительстве система установки рамных тюбингов одновременно со щитовой проходкой (рис. 374).

Для обеспечения нормальной работы тоннельной обделки под горным давлением, а равно при воздействии щитовых домкратов в процессе продвижения щита вперед был

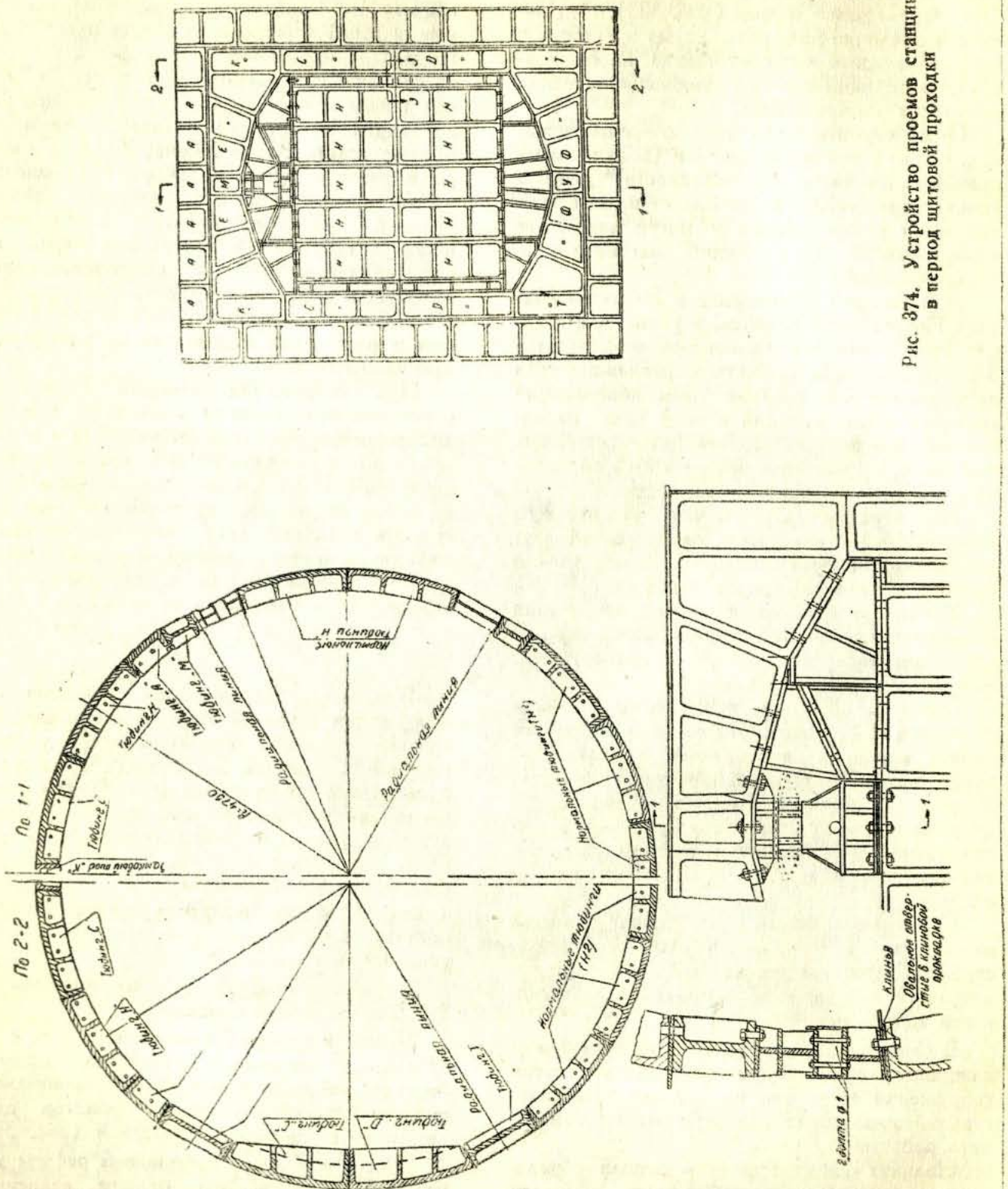


Рис. 374. Устройство проемов станции в период щитовой проходки

запроектирован комплект металлических сварных тюбингов, играющих роль временного заполнения проема (рис. 375). Монтаж рамных тюбингов производился при помощи эректора.

Таким образом удалось не только избавиться от тяжелого процесса разборки тюбинговой обделки, но и осуществить механизацию укладки рамных тюбингов. Замена мягких пород (карбонных глин), залегающих между тоннелями станции в местах пилонов, бетоном производилась из средней части тоннеля. При этом использовались металлические сборно-разборные подмости.

Монтаж металлических конструкций станции Сталинская производился в готовых, сооруженных щитами тоннелях, при помощи кранов, что не влияло на основные работы.

Учитывая работу тоннелей станции в смысле взаимовлияний конструкций одного из тюбов на соседний и возможности деформаций, а также поломок элементов конструкций, расчеканочные и отделочные работы вели на тех участках, где были проложены все три параллельных тоннеля станции.

Завершение постройки станций Новокузнецкая и особенно Павелецкая протекало в необычных для строительства условиях потому, что линия Замоскворецкого радиуса была пущена в эксплоатацию 1 января 1943 г. в период Великой Отечественной войны без указанных выше промежуточных станций.

Такое решение, продиктованное требованиями военного времени (быстрейший ввод Замоскворецкого радиуса в эксплоатацию), обусловило проведение работ по сооружению указанных станций при непрерывном движении поездов. Требовалось вести тоннельно-строительные работы, ни в коем случае не прерывая движения поездов на радиусе. В тех случаях, когда встречалась необходимость провести работы, нарушающие габарит подвижного состава, строителям приходилось использовать трех-четырехчасовой ночной перерыв.

В действующих боковых станционных тоннелях в период движения производился монтаж несущих металлоконструкций, мощных колонн и прогонов для образования аванзала станции Павелецкая. Эти работы протекали при значительном горном давлении пород и большом дебите подземных вод (до 600 *м*³/*час*). Последнее обстоятельство вызвало большие трудности в отношении гидроизоляции конструкции станции. Применением тампонажа, повторной чеканки и водозащитных «зонтов» задача была практически разрешена.

г) *Двухъярусные тоннели.* Исключительный интерес представляет сооружение тоннелей двухъярусного спаренного участка линий № 8 и 9 Парижского метрополитена.

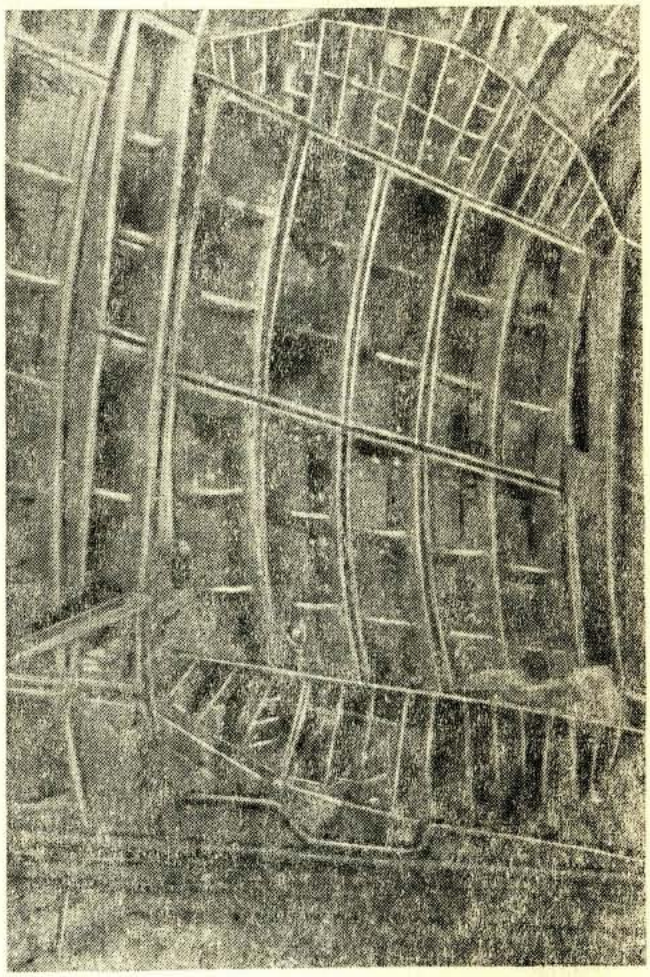


Рис. 375. Устройство проемов станции в период щитовой проходки

Вследствие расположения путей линий метрополитена № 8 наверху и № 9 внизу здесь образовался тоннельный профиль поперечного сечения 11 × 11,28 *м*, своды толщиной в ключе 50 *см* и стены от 0,9 до 1,1 *м* (рис. 376, 377).

Крупное тоннельное сооружение протяжением 1 216 *м* расположено под весьма оживленными Большими Бульварами. В связи с этим расположением путей получились и двухэтажные станции (Рю Монмартр, Бульвар Бон-Нувель, Страсбург, Сен-Дени и Бульвар

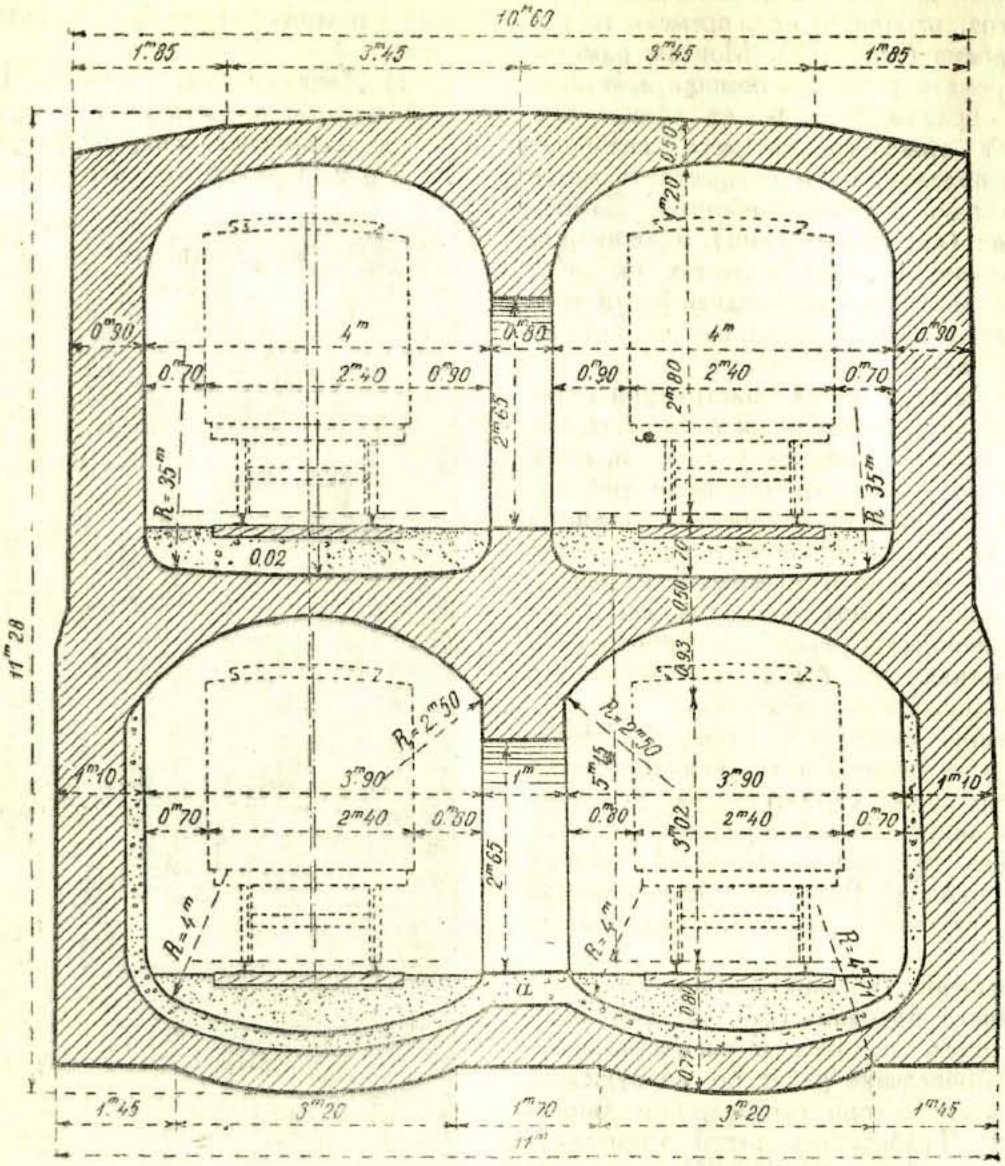


Рис. 376. Конструкция двухъярусного тоннеля

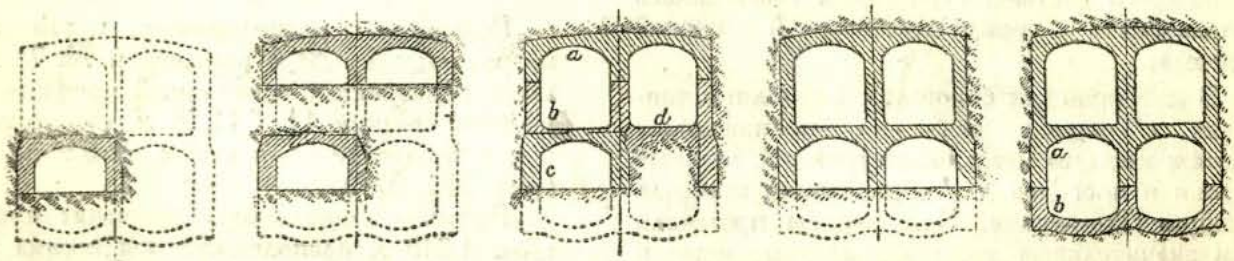


Рис. 377. Фазы раскрытия профиля двухъярусного тоннеля

Сен-Мартен) с размерами поперечного сечения станционного тоннельного профиля 20,4 × × 12,64 *м*, при толщине свода в замке около 70 *см*, а стен—от 1,2 до 1,75 *м* (рис. 378, 379).

де-ла-Репюблик, выходила эстакадой к набережной де-Вальм канала Сен-Мартен. Здесь производилась выгрузка породы тоннельных разработок в баржи и погрузка необходимых

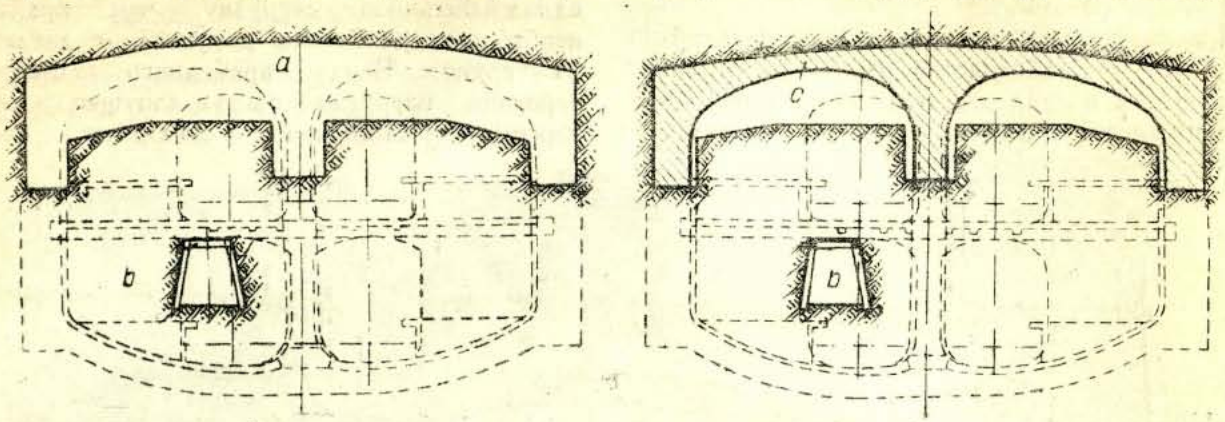


Рис. 378. Раскрытие калоттной части верхнего яруса станции

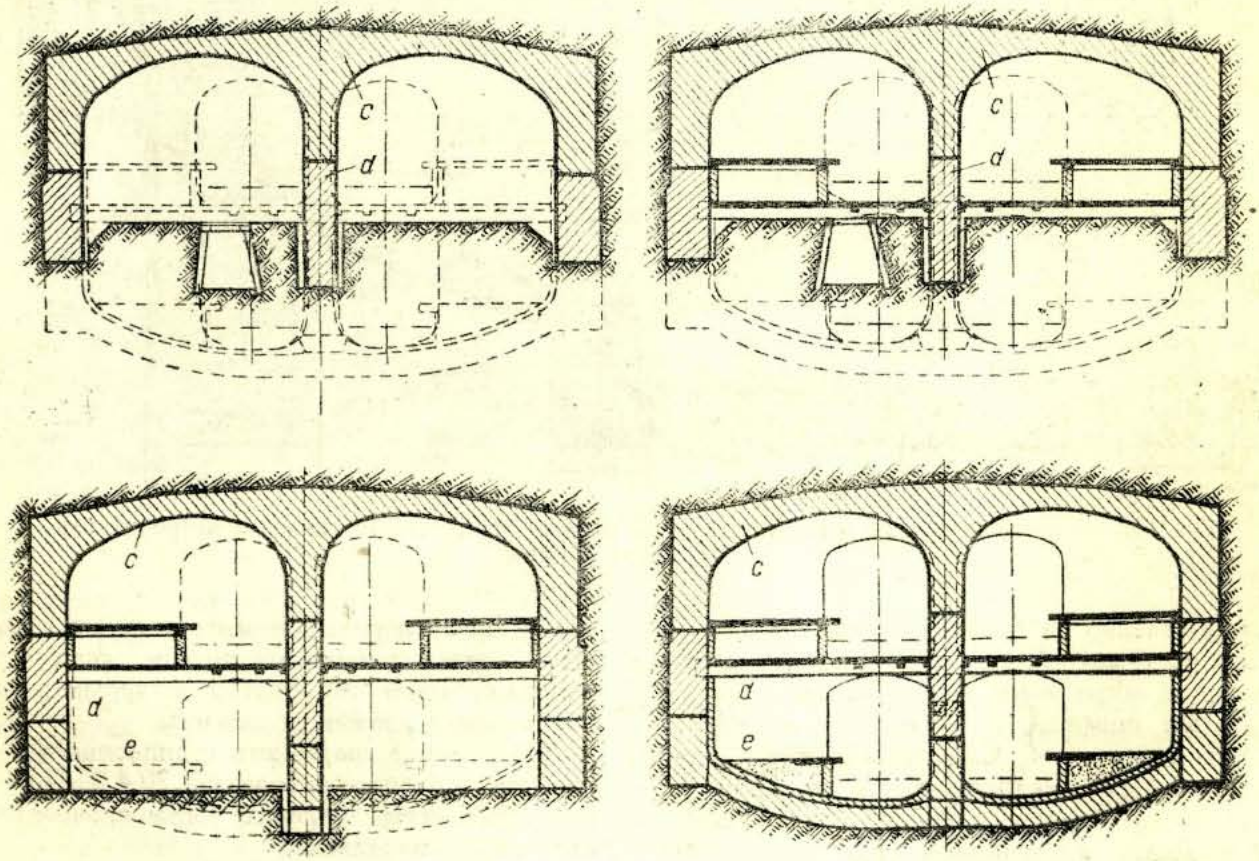


Рис. 379 Полное раскрытие профиля двухъярусной станции метрополитена

Строительство указанных тоннельных сооружений было разрешено городам с условием не нарушать уличного движения.

Строителями была пробита специальная транспортная подземная галлерея, которая, соединяясь со служебным тоннелем у Плас

материалов для производства работ. Откатка производилась поездами с тракторной тягой. Благодаря этой галлерее, служившей основной транспортной магистралью, работы удавалось вести без «стеснения» уличной поверхности.

Разработка спаренного перегонного тоннеля линий № 8 и 9 производилась в условиях устойчивых мергелистых пород, на деревянном креплении, при каменной обделке, отдельными фазами.

Предварительно, по обычному бельгийскому методу производства работ, раскрывалась калотта и укладывался свод одной из ячеек нижнего профиля, который опирался

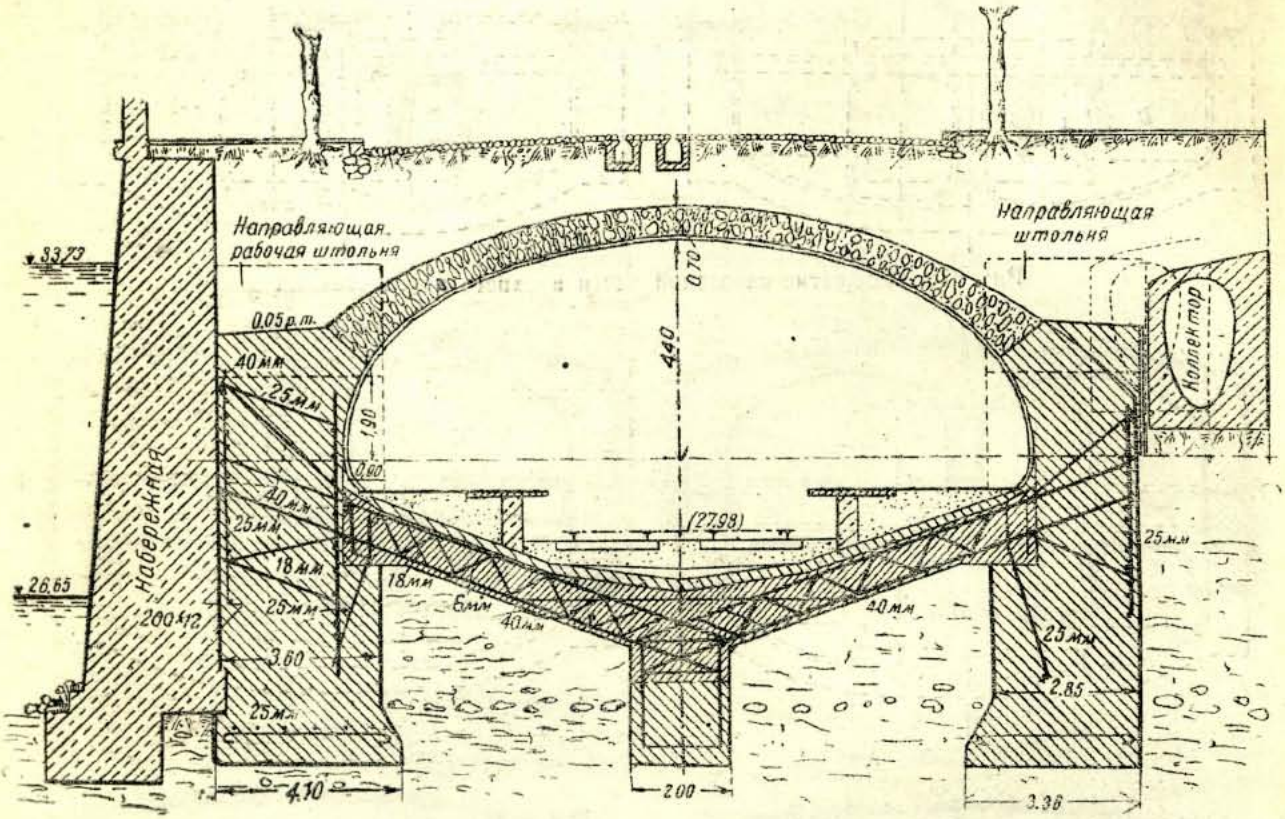


Рис. 380. Специальная тоннельная конструкция станции Нотр Дам Парижского метрополитена, у набережной р. Сены.

непосредственно на породу. Затем последовательно раскрывался калоттный профиль верхнего яруса обеих ячеек и устраивался двухсводчатый профиль, опиравшийся на грунт по трем плоскостям. Следующий этап — выборка штроссы верхнего яруса и подводка в шахматном порядке стен под выложенные своды. Далее на земляных кружалах возводился свод для другой тоннельной ячейки нижнего яруса, пяты его опирались на выложенную кладку (рис. 377).

Последней фазой являлись выборка штроссной части нижнего профиля, подводка стен и устройство лотка. Необходимо заметить, что подобные работы требуют исключительной тщательности и осторожности. Иначе даже в условиях устойчивых пород могут произойти обвалы возведенных элементов тоннельной обделки. Рассчитывая среднюю опору обделки, несущую примерно вдвое большую нагрузку, чем крайние, необходимо учитывать допускаемое давление на грунт. Ввиду временного характера передачи нагрузки было допущено некоторое перенапряжение скалистых, невыветрившихся пород. В момент подводки обратного свода под нижним ярусом спаренного тоннеля линий № 8 и 9 в верхнем уже происходило движение поездов.

Сооружение спаренного станционного тоннельного профиля размерами 20,4 × 12,64 *м* при мергелистых породах было произведено следующим порядком.

Пользуясь пробитой транспортной штольней, из ряда фурнелей раскрыли верхнюю калотту и уложили двухсводчатую конструкцию, опиравшуюся по трем плоскостям на грунт.

Затем производилась первая подводка стен в шахматном порядке. Для обеспечения надлежащего распора стен при дальнейшем

углублении предварительно было устроено железобетонное несущее междуэтажное перекрытие для путей платформ станций. После этого велись подводка стен и устройство обратного свода спаренного профиля (рис. 379).

Между соседними тоннелями были пробиты отверстия для сообщения. В процессе производства работ эти отверстия закладывались временной сухой кладкой на тощем растворе.

Сложность работ, по условиям технической безопасности, требовала исключительной осторожности и последовательности в производстве их.

Необходимо отметить, что строительство спаренного участка линии № 8 протяжением в 8,09 *км* велось в течение четырех лет (с 1927 по 1931 г.).

д) *Сооружение станции Нотр Дам Парижского метрополитена.* Сложной задачей явилось сооружение станции метрополитена Нотр Дам. При трассировке линии станция оказалась втиснутой между массивной стеной набережной р. Сены и большим тоннельным коллектором общесплавной канализации. Задача заключалась в том, чтобы построить станцию пролетом 14,4 *м*, не влияющую на устойчивость набережной и коллектора. Казалось бы, наиболее правильным решением была конструкция станции с плоским перекрытием. Но город категорически запретил вскрывать мостовую, оберегая старые древонасаждения (рис. 380).

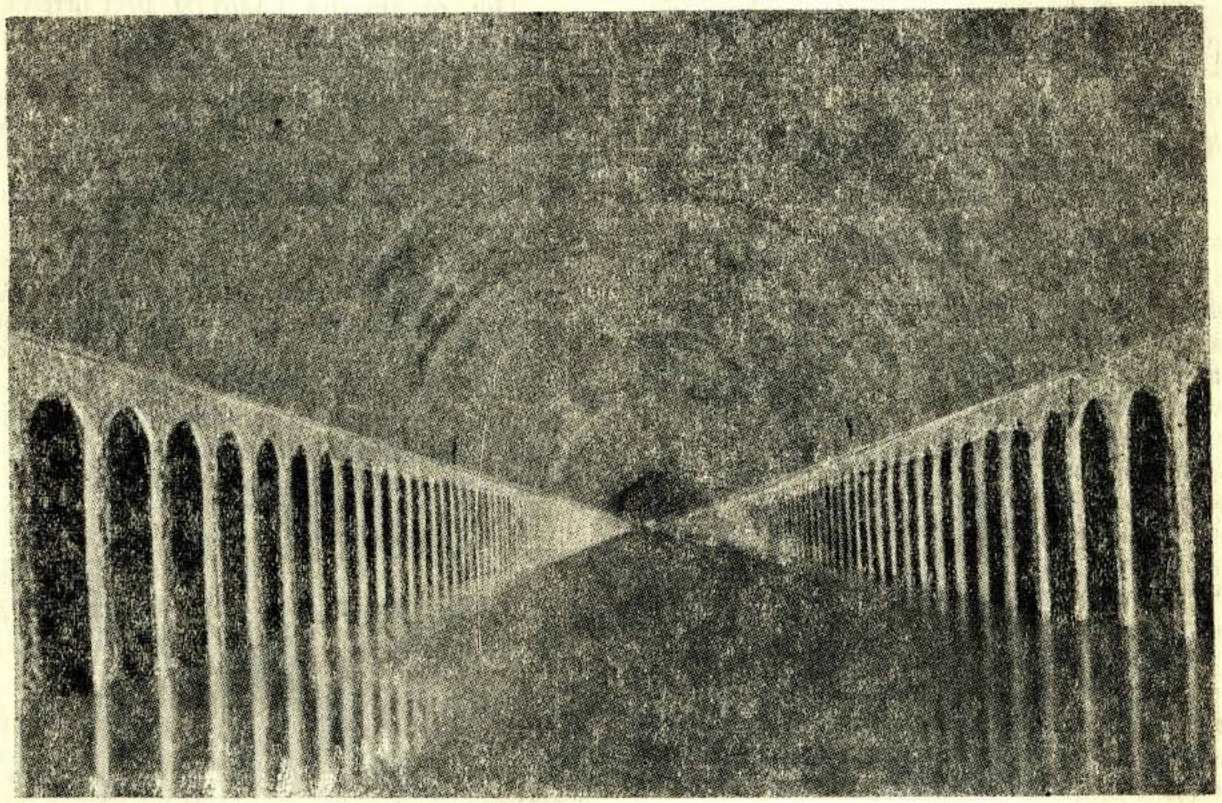


Рис. 381. Ровский тоннель-канал

Строителей поставили перед необходимостью создать тоннель сводчатого профиля, распор которого должен был быть поглощен и ни в коем случае не передаваться на стену набережной. Была запроектирована система армированных устоев с железобетонным лотком, стягиваемым посредине балкой.

Производство работ началось с устройства стен из штолен в нескольких ярусах. Калотта раскрывалась из старого коллектора от одной пяты свода к другой в виде поперечной штольни. Бутовый свод укладывался на выведенные армированные бетонные стены. Немедленно по выемке штроссы на участке в 3,2 *м* «вязалась» железобетонная конструкция нижней части тоннельного профиля.

е) *Сооружение Ровского тоннеля-канала.*

Одним из рекордных сооружений является Ровский тоннель-канал (рис. 381), который пересекает горный массив на протяжении 7 118 *м*. Поперечное сечение 22 *м* по ширине,

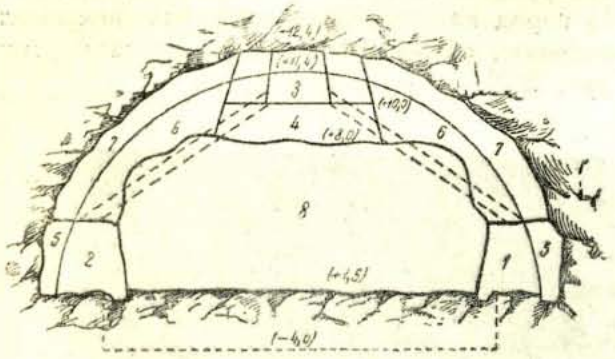


Рис. 382. Ровский тоннель-канал (фазы работ)

по высоте 15,4 *м* в свету предусматривает возможность одновременного передвижения судов в обоих направлениях при глубине воды в тоннеле-канале около 4 *м*. Квадратура выемки поперечного профиля 300—320 *м*^{2}.

Тоннель залегает в меловых отложениях неоднородной крепости, которые для своей разработки требовали применения взрывчатых веществ.

Раскрытие поперечного сечения тоннеля проводилось по комбинированному бельгийскому методу работ. Примерно по краям горизонтального диаметра выработки были заложены боковые штольни сечением 7—10 *м*^{2}. Такого же сечения проходилась верхняя центральная штольня, которая слепыми наклонными фурнелями соединялась с боковыми штольнями (рис. 382). Фурнели пробивались через 18 *м*, и по ним из верхней штольни порода сбрасывалась вниз, в поезда подземной откатки, циркулировавшие по нижним боковым штольням. Последние соединялись между собой поперечными галлереями через каждые 100 *м*. Это способствовало вентиляции, водоотливу, и, кроме того, квершлаги использовались для хранения инструмента, материалов и взрывчатых веществ. Скорость проходки штолен достигала 4,5—5 *м* в сутки.

Калотта раскрывалась кольцами длиной 6 *м* при последовательных этапах развития вниз и в стороны верхней центральной штольни, до нижних боковых штолен (рис. 383). Раскрытие калотты продолжалось около 15—20 дней, причем лонгарины располагались через 1,5 *м* без затяжек бортов и кровли оголяемых поверхностей. В течение 6 дней устанавливалось на кольцо 5 металлических кружал, каждое весом в 300 *кг*. Кладка свода от пят к замку возводилась из бута на известковом растворе, редко — на цементном. Проектные данные толщин свода в ключе от 0,7 до 1,25 *м* практически выдержаны в пределах от 0,6 до 1,95 *м*. Продолжительность кладки свода каждого кольца — около 30 дней. При этих условиях продолжительность обнажения выработки составила около двух месяцев.

При раскрытии калотты рассчитывали на разгружающий свод по кольцу перпендикулярно к оси прокладываемого тоннеля, который не проявляет в данных породах большого давления. Однако в процессе производства работ в нескольких кольцах произошли обвалы (рис. 384). Объем вывала был в одном случае 150 *м*^{3}, в другом — 380 *м*^{3} породы. Заделка последнего вывала велась с поверхности, чему благоприятствовала топография местности в «воздушной» части тоннеля, так что при шахте глубиной в 22 *м* удалось заполнить пустоту бетоном (рис. 385). Оставшиеся нетронутыми у места обвала готовые своды подпирались каменными торцовыми стенками, через которые велась атака завала.

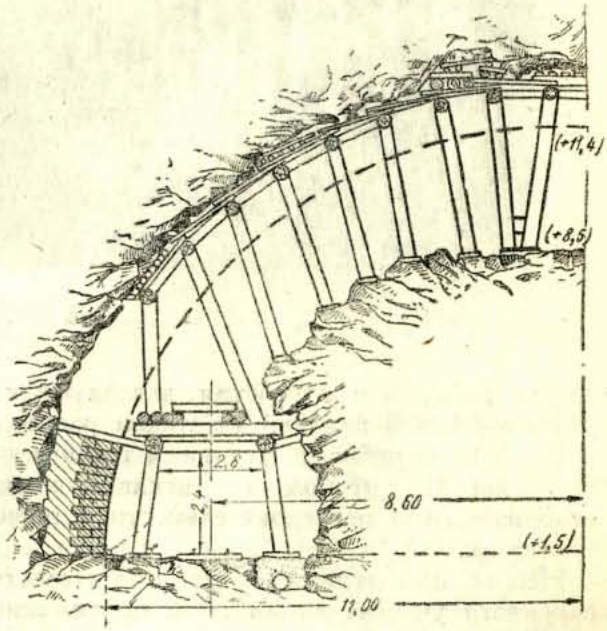


Рис. 383. Ровский тоннель-канал (фазы работ)

После устройства свода, опиравшегося на значительном протяжении на породу, приступали к выборке штроссы и подводке стен в шахматном порядке, участками в 2,5—3,5 *м*. В дальнейшем осуществлялось устройство бетонного лотка и двух бичевников. Тоннель-

ные кольца устраивались с осадочными швами; для обеспечения пассивного отпора и полноценного соприкасания грунта с кладкой про-

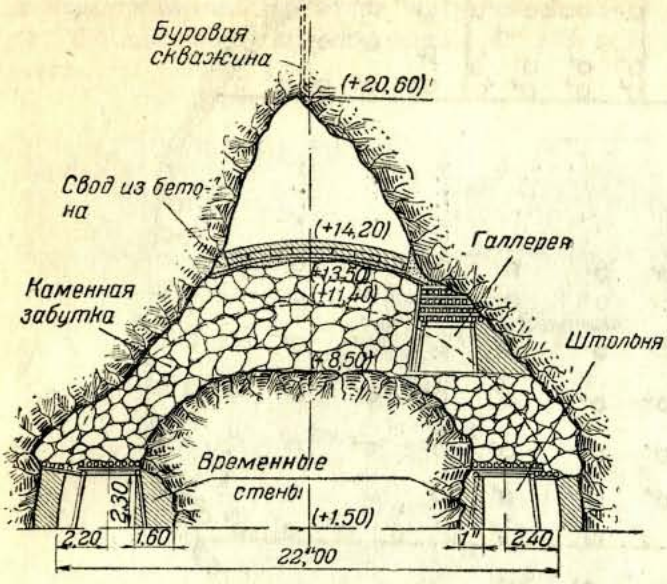


Рис. 384. Закрепление вывала в тоннельной выработке

изводилась плотная каменная забутка породой и нагнетание цементного раствора под давлением от 3 до 5 *ат*.

Подземная тяга — воздуховозы, работавшие под давлением 100 *ат* мощностью в 210 *л. с.*

Ежедневный расход динамита выражался в 0,5 *т*. Искусственная вентиляция в период производства тоннельных работ обеспечивалась вентилятором производительностью в 13 $м^3/сек$, установленным в шахте глубиной 140 *м*.

Так как условия эксплоатации тоннеля-канала требовали прокладки горизонтального профиля, отвод подземных вод из забоев был чрезвычайно осложнен. В некоторых зонах горного массива приток воды в тоннельные разработки колебался от 60 *л/сек* до 100 *л/сек*. Бывали места, где приток воды достигал 550 *л/сек*, при давлении до 3 *ат*. Максимальный дебит подземных вод составил 1 000 *л/сек*. Строители разбили тоннель перемычками на полукилометровые зоны, где устраивались зумпфы и производилась интенсивная откачка воды.

ж) *Сооружение крупных тоннелей*. Крупные тоннельные профили созданы при сооружении четырех деривационных тоннелей у плотины Хувера (D = 16,8 *м*) и при сооружении подземных гидростанций Бромматт и Кренгид (31,5 × 22 *м*; 11 × 13,5 *м*; 13 × × 32 *м*).

Особо крупным профилем представляется подземная гидростанция во Франции — размерами выработки 36,5 × 30,5 *м*.

Для отвода воды Колорадо (США) на период сооружения плотины была осуществлена проходка четырех, крупного профиля, отводящих тоннелей. Последние, круглого сечения (площадь = 229 $м^2$), диаметром в выработке 16,8 *м*, имели длину от 1 070 до 1 290 *м*.

Проходка велась в скальных породах высокого коэфициента крепости с применением буровзрывных работ без устройства временного крепления выработок. Разработка сечения тоннеля проводилась по следующим фазам: вначале проходилась верхняя штольня (13,4 $м^2$), которая расширялась на калоттный профиль (23 $м^2$); далее удалялась штросса (142,6 $м^2$) — средняя часть профиля; в последнюю очередь разрабатывалась нижняя лотковая часть (50 $м^2$) (рис. 386).

Проходка штолен производилась взрывным способом, причем обуривание забоя велось четырьмя перфораторами Ингерсоль-Рэнд-75, смонтированными на подвижной каретке. При длине шпуров в 3 *м* уход

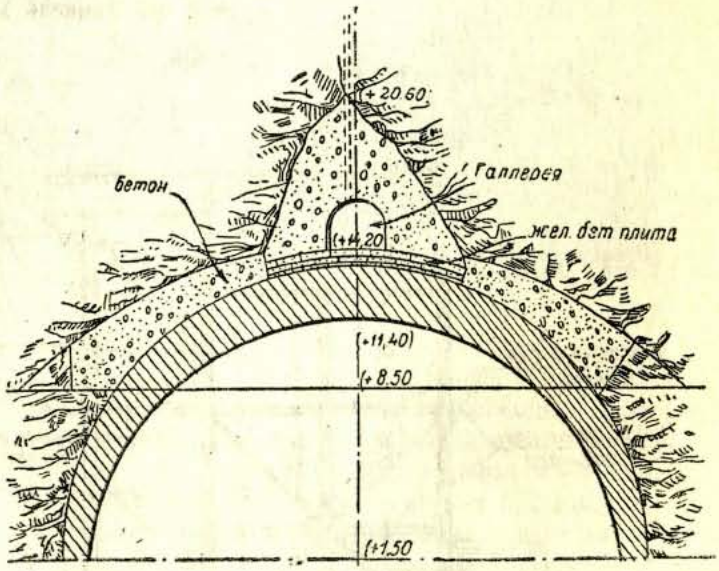


Рис. 385. Конструкция тоннельного кольца в месте вывала

забоя составлял 2,5 *м* за атаку. Взорванная порода убиралась погрузочной машиной системы Конвейг. Одна буровая тележка и погрузочная машина обслуживали два забоя. В период буровых работ

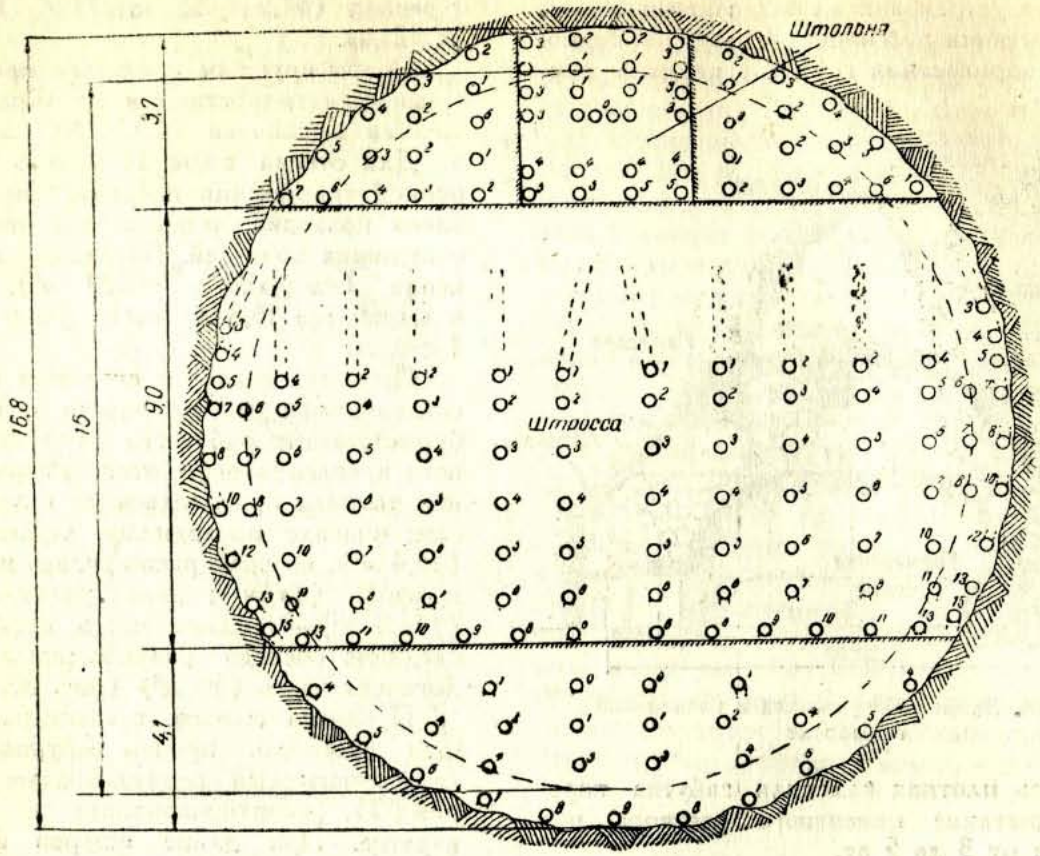


Рис. 386. Тоннель Хувер Дам (забой)

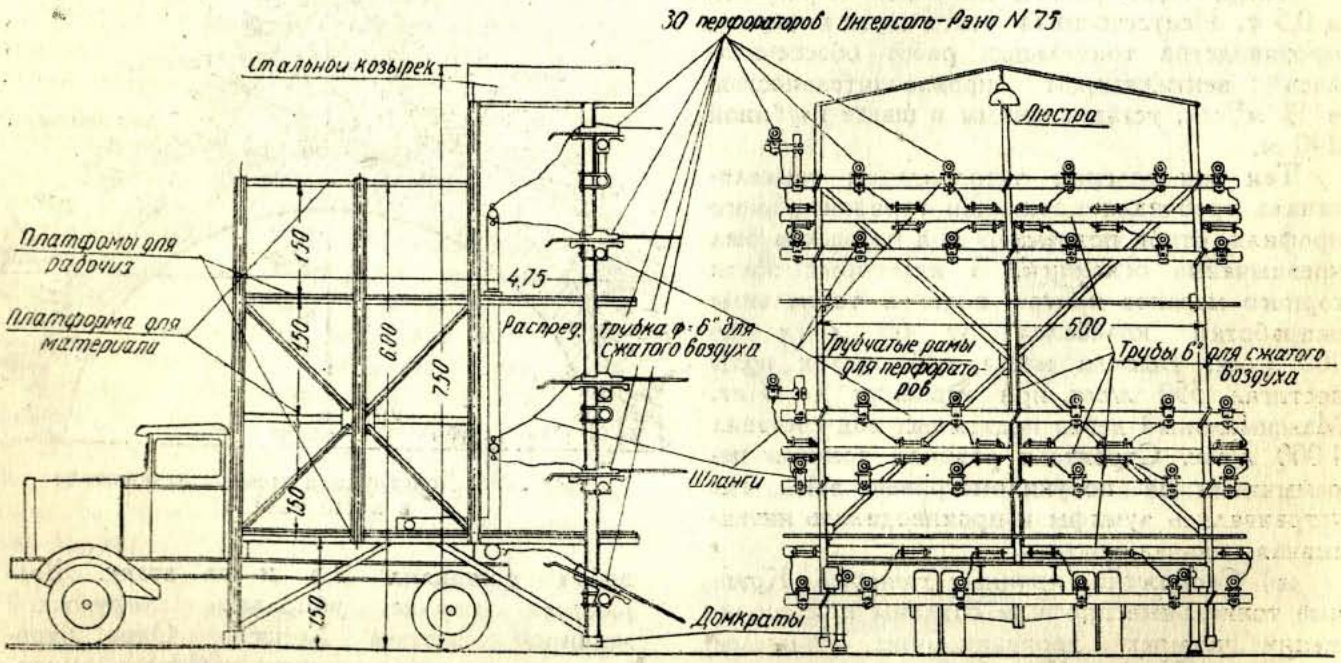


Рис. 387. Схема буровой тележки

в одном забое в другом производилась механическая погрузка породы. Расширение калоттного профиля велось с помощью колонковых перфораторов, при этом взорванная порода бульдозером сбрасывалась к забою штроссы.

в кровле. Всего на тележке было смонтировано 30 перфораторов. Глубина шпуров — 5 *м*, уход забоя за выпал — 4,8 *м*. Погрузка породы в забое производилась экскаватором типа Марион (емкость ковша 2,7 $м^3$), при подгребании выброшенной после взрыва породы бульдозером. Порода грузилась в автомашины емкостью до 10 $м^3$ и удалялась через порталы в отвал. На время взрыва тележка и экскаватор удалялись от забоя на 300 *м*.

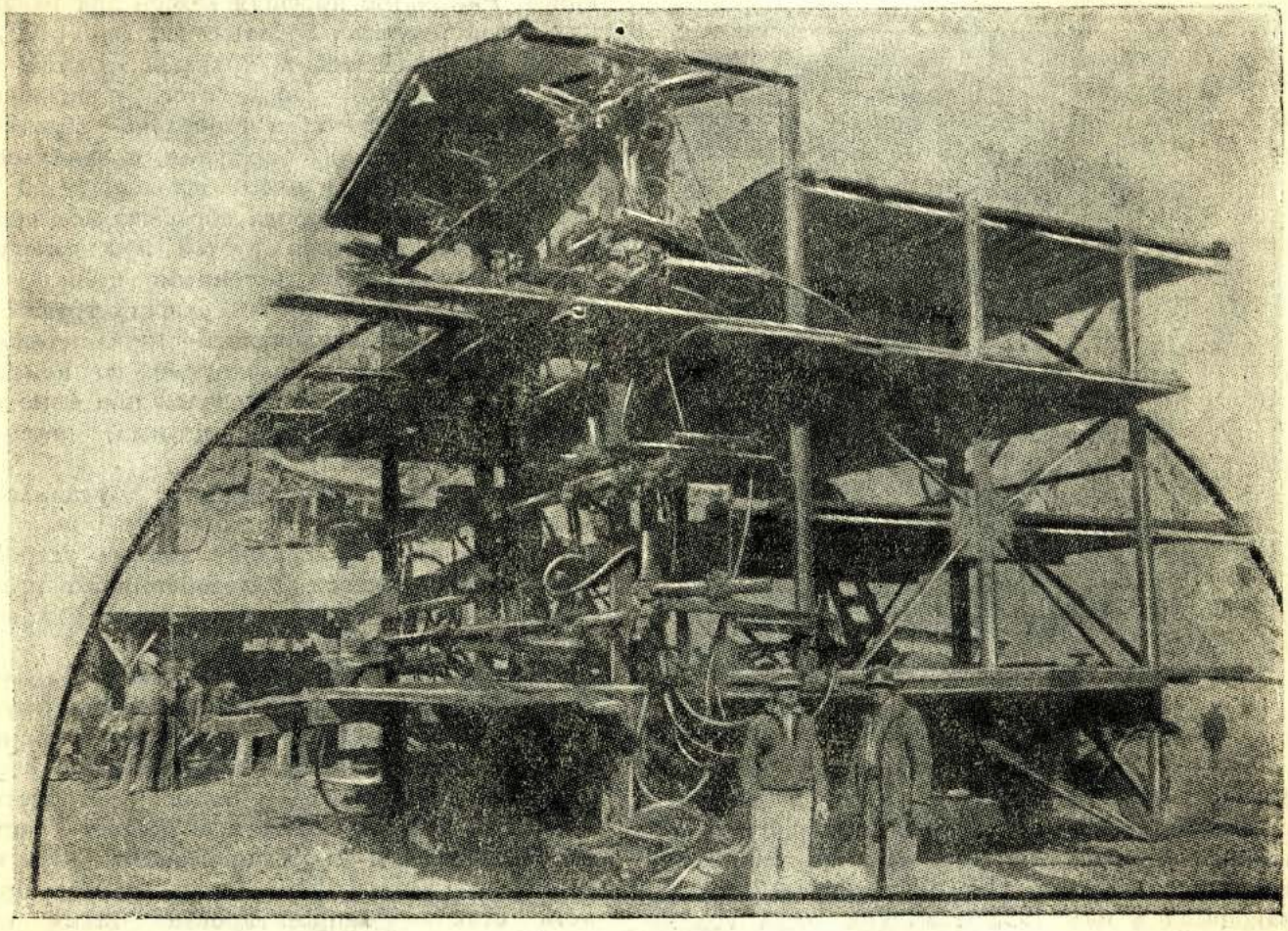


Рис. 388. Общий вид буровой тележки

Для ускорения производства буровых работ половина обширной площади штроссного забоя обуривалась одновременно со специально сконструированной подвижной фермы— Джимбо. Эта ферма, металлической конструкции, была смонтирована на раме пятитонного грузового автомобиля. Буровая тележка имела четыре яруса, с которых проходчики производили одновременное бурение шпуров на одной половине забоя мощными перфораторами с автоподатчиками, смонтированными на горизонтальных трубчатых колоннах (рис. 387, 388, 389). Верхний ярус тележки был защищен металлическим козырьком от возможных вывалов породы

За сутки продвигание забоя штроссы составляло в среднем 8 *м*, максимально 14,4 *м*.

Нижняя часть профиля обуривалась с подвижной тележки, оснащенной двумя шарнирно укрепленными «крыльями» — консолями, на которых было смонтировано 12 перфораторов для бурения 25 шпуров глубиной до 5 *м* (рис. 390).

Для выравнивания профиля по проектному контуру применялась подвижная металлическая каретка с рядом площадок, с которых

при помощи отбойных молотков снимались отдельные неровности профиля.

Буры были армированы твердыми сплавами. Глубина шпуров в отдельных случаях доходила до 6 *м*. Применялись детонаторы замедленного действия. При последовательном взрыве 48 шпуров за одну атаку расхо-

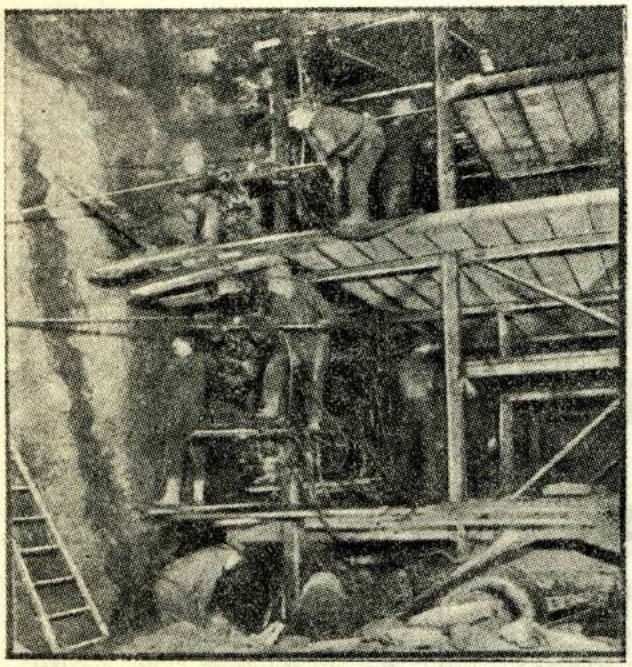


Рис 389. Буровая тележка Джимбо в забое

довалось до 1 *т* динамита. Уход забоя составлял до 4,5 *м*, при этом с помощью экскаваторов производилась уборка до 1 000 $м^3$ взорванной породы. Проходка тоннелей была закончена в мае 1932 года (за один год). Всего было вынуто до 1 200 000 $м^3$ породы. Параллельно велись работы по устройству бетонной обделки с применением металлических подвижных форм, бетоноукладчиков, конвейеров и вибраторов (см. главу XV).

Рекордная скорость проходки тоннеля составляла 9,4 *м* в сутки.

* * *

При пересечении двухъярусным мостом через бухту Сан-Франциско острова Иерба-Буэна (США) создан двухъярусный тоннель протяжением 165 *м*.

По площади своего поперечного сечения (15,5 × 24 *м*) этот тоннель является одним из самых крупных транспортных тоннелей в мире (рис. 391). В верхнем ярусе пролегает автострада шириной до 18 *м* с двумя тротуарами по 1,14 *м*. В нижнем расположены двухпутная электрическая железная дорога и три ленты для грузового автомобильного движения.

Тоннельные работы проводились в условиях напластования сланцевых пород и песчаников. Раскрытие профиля велось при первоначальной прорезке боковых штолен (4,2 × × 4,2 *м*), развитых в траншеи высотой до 12 *м* (рис. 392). После этого производилось бетонирование стен тоннельной сбделки. Раскрытие калоттного профиля проводилось из верхней центральной штольни (2,5 × × 2,5 *м*), причем порода сбрасывалась вниз по траншее, заполняя пустое пространство между выложенными бетонными стенами и породой по обнаженной поверхности траншеи. В калотте устанавливались металлические двутавровые балки, изогнутые по кривой свода. Последний бетонировался при помощи подвижных металлических кружал, перемещаемых по опорному ядру.

Само ядро впоследствии удалялось экскаватором (рис. 393).

Последним этапом работ явилось устройство междуэтажного железобетонного перекрытия и стенки, ограждающей автомобильное движение от железнодорожного.

з) *Сооружение подземной станции Плятцо Нью-Йоркского метрополитена.* На Бруклинской стороне была сооружена станция Плятцо длиной 210 *м*. К сооружению этой станции приступили после устройства крайних тюбов. Станция в средней части имеет подземный зал длиной около 150 *м* на глубине 15 *м*. Тоннельная конструкция этой станции запроектирована таким образом, что средняя массивная металлическая рама воспринимает на себя всю нагрузку от верхней части вестибюля; давление на крайние тюбы от средней арки не воспринимается.

Сооружение станции Плятцо велось тоннельным путем в условиях сухих грунтов (сыпучий песок и гравий с большим включением валунов). Уровень грунтовых вод — 24 *м* от поверхности.

Сооружение станции проведено следующим порядком: в первой фазе велись работы по устройству бетонного основания в крайних тюбах и закрепление конструкции системой деревянных подкосов и распорок на взаимном расстоянии 70 *см* (рис. 394).

Следующий этап — раскрытие калоттной части среднего тоннельного профиля. Крепле-

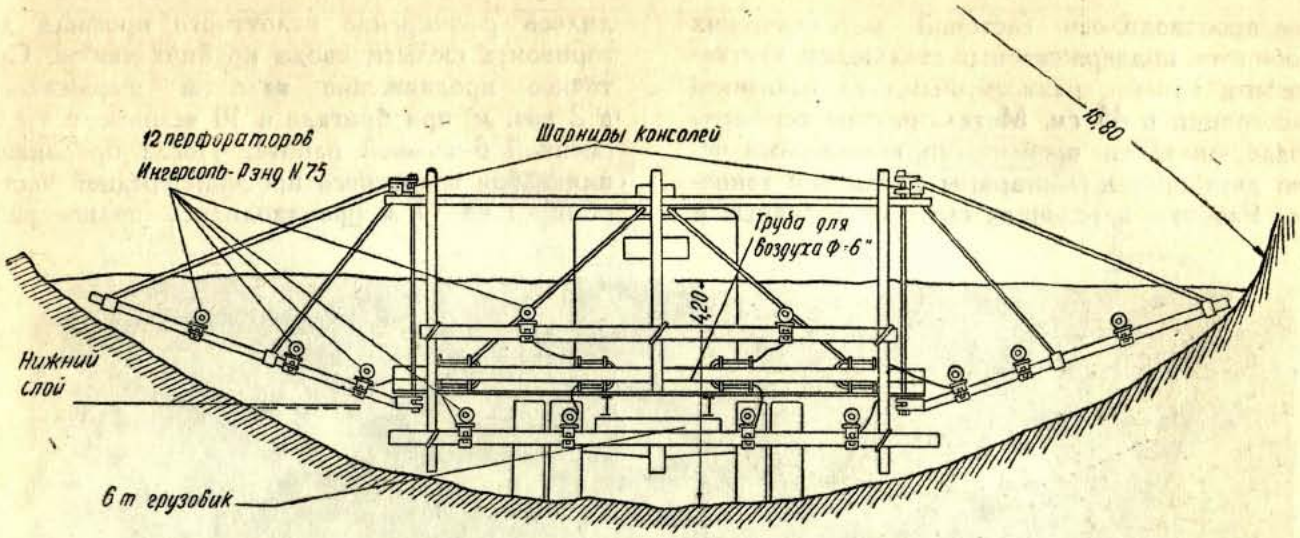


Рис. 390. Буровая тележка для обуривания нижней части тоннельного забоя

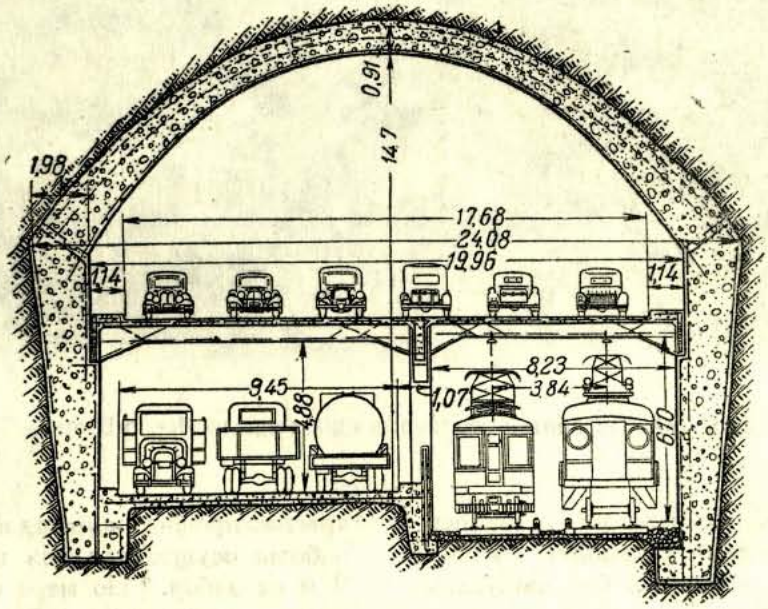


Рис. 391. Тоннель Иербо-Буэно

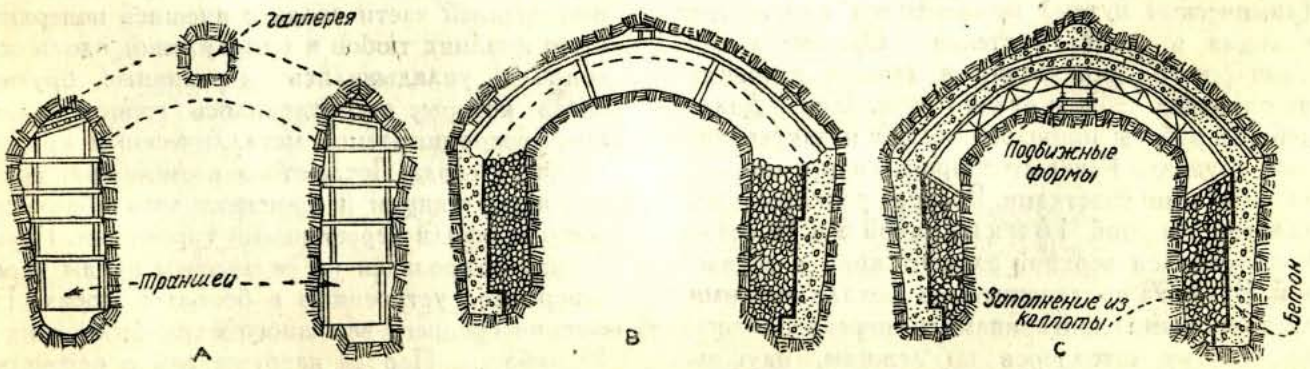


Рис. 392. Фазы работ по сооружению тоннеля Иербо-Буэно

ние производилось системой металлических тюбингов, поддерживаемых стальными двутавровыми арками, размещенными на взаимном расстоянии в 45 *см*. Металлические сегменты поддерживались временными штендерами через двутавровые лонгарины вдоль оси тоннеля. Работая в условиях сыпучих песчаных и

дилось расширение калоттного профиля до горизонта шелыги свода крайних тюбов. Суточное продвижение калотты выражалось в 2 *пог. м* при бригаде в 10 человек и трехсменной 8-часовой работе. После продвижения забоя калоттного профиля средней части станции на 15 *м* производилось полное рас-

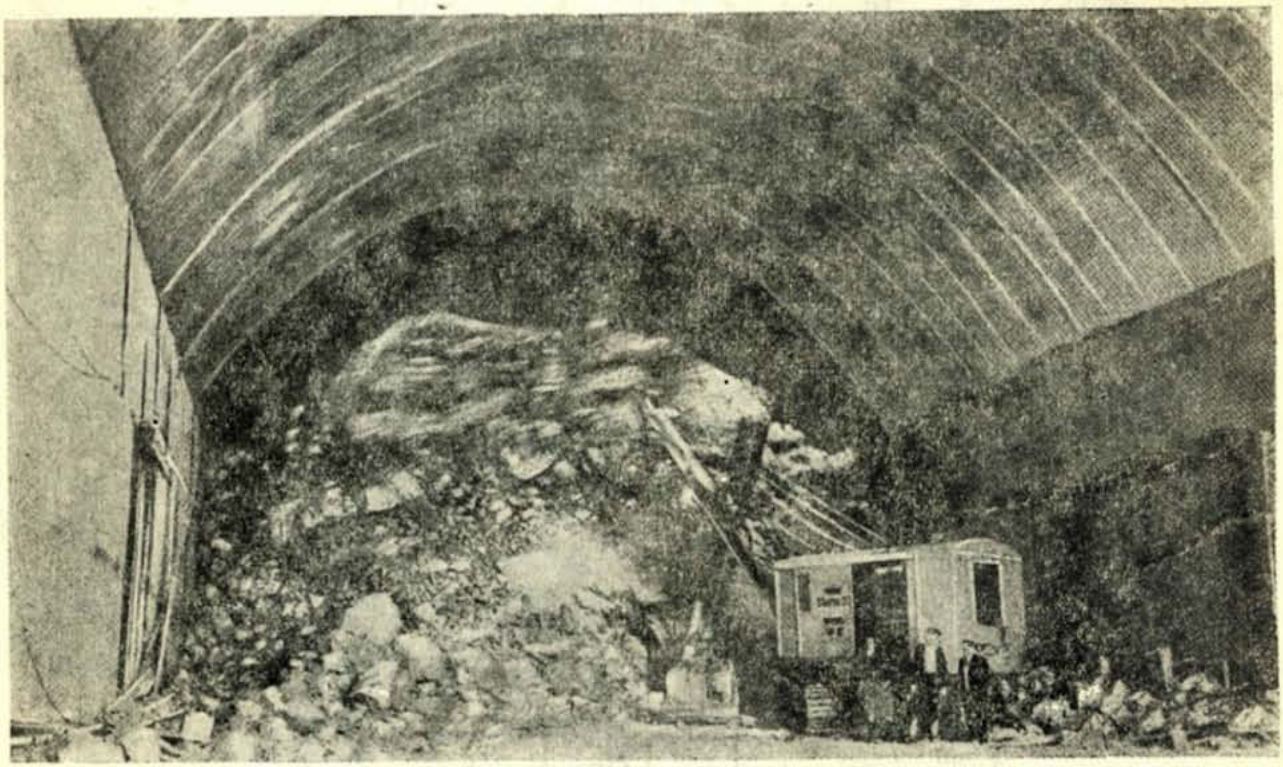


Рис. 393. Разработка земляного ядра тоннеля Иербо-Буэно

гравелистых грунтов, строителям пришлось столкнуться с трудностями установки креплений, причем дело не обошлось без выпусков песка. Для укрепления пересекаемых песчаных грунтов была сделана попытка окаменения их (химическим путем) применением хлористого кальция и жидкого стекла. Однако метод химического закрепления в данных условиях не оправдал себя, и от него отказались. Дальнейшие работы пришлось вести в незакрепленных грунтах. Раскрытие профиля производилось малыми участками. Впереди раскрывалась калотта высотой 1,6 *м* и шириной 6 *м*. Вначале монтировался верхний элемент арки с затяжкой. Эта арка поддерживалась металлическими двутавровыми лонгаринами и перекреплялась на систему штендеров по лежням, идущим вдоль оси тоннеля. Затем постепенно производилось крытие профиля бригадой в 12 человек. Эти работы осуществлялись на расстоянии около 9 *м* от забоя. По мере опускания подошвы калоттного профиля обнажались внешние поверхности крайних тюбов. В месте сопряжения средней части свода с внешней поверхностью крайних тюбов в направлении вдоль оси тоннеля укладывались деревянные брусья, через которые распределялось горное давление, воспринимаемое металлическими арками среднего свода. После этого вынималось среднее ядро станции и производилось крепление всего профиля деревянными тирантами. Грунт транспортировался по рельсовым путям через отверстия, устроенные в боковых тюбах. На выемке среднего земляного ядра было занято 15 рабочих. Порода нагружалась в вагонетки (емкостью 1,5 $м^3$) и транспортировалась

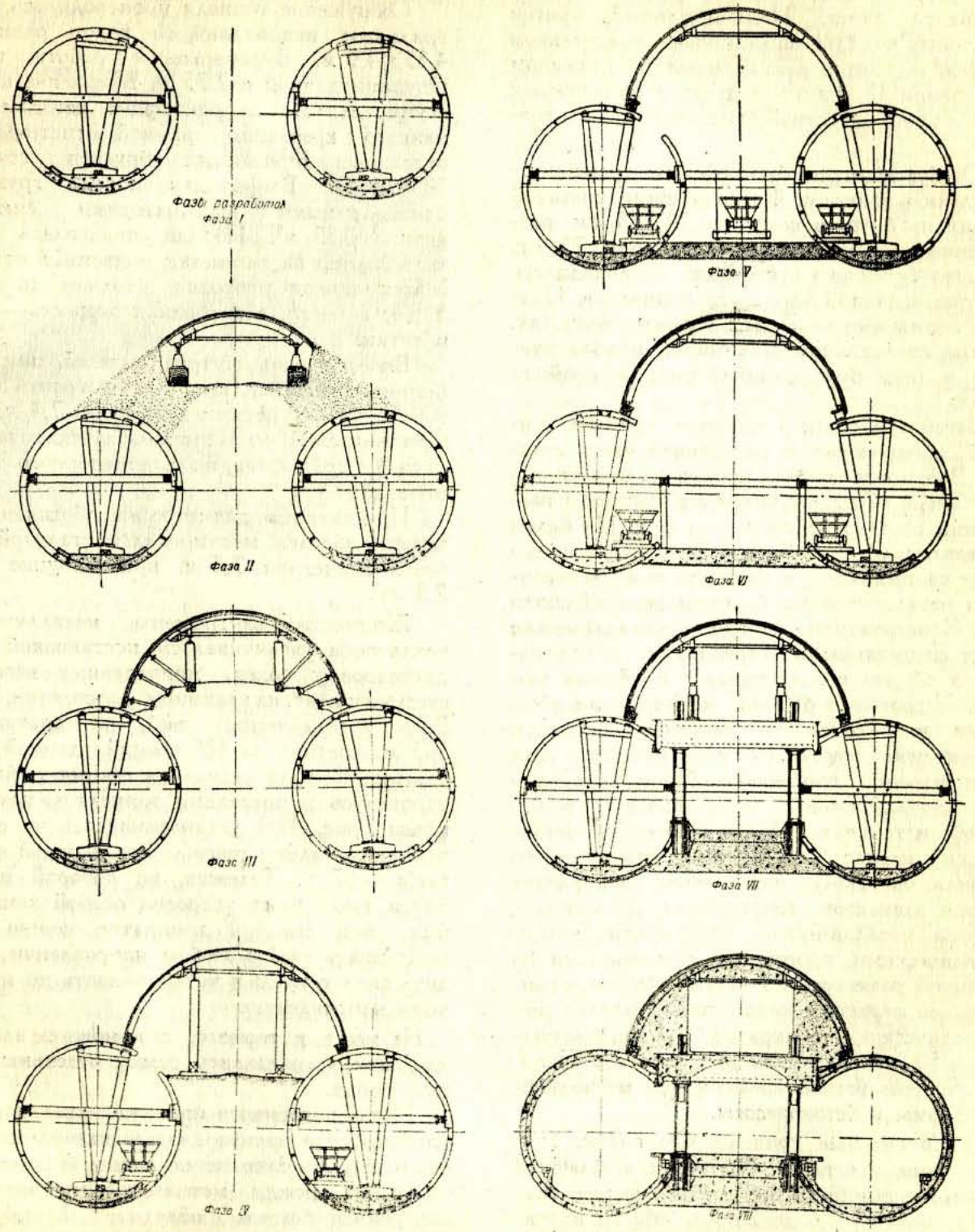


Рис. 394. Нью-Йоркский метрополитен (фазы работ по сооружению станции Плятцо)

аккумуляторными электровозами, шестивагонными составами.

Для бетонных работ по сооружению лотка был устроен подвесной путь, по которому подавался бетон. Незначительный приток грунтовых вод был ликвидирован водоотливом из ряда зумпфов, размещенных на взаимном расстоянии 15 *м* друг от друга и заложенных на 1 *м* ниже проектной отметки подошвы тоннеля.

Особое внимание было уделено временному креплению тоннельной конструкции системой тирант из брусьев сечением 20×25 *см*, размещенных на взаимном расстоянии 75 *см*. Укладка бетонного основания производилась участками длиной вдоль оси тоннеля в 15 *м*. Горизонтальные тиранты в боковых тоннелях, помимо специальной расклинки, прибалчивались к подкосам, поставленным в крайних тюбах.

Затем вынимались тюбинги крайних тоннелей, обращенные к внутренней части станции. Вдоль оси тоннеля производилась укладка мощных клепаных балок на взаимном расстоянии по ширине тоннеля в 6 *м*. На балки устанавливались колонны высотой 2,5 *м*, которые связывались в жесткую раму поперечными металлическими балками высотой около 1 *м*. Конструктивно клепаные металлические балки специальными сегментами объединялись в общую конструкцию с крайними тюбами. Устроенная рамная конструкция обеспечила неизменяемость системы станции и надлежащую жесткость конструкции. Для связи верхних поперечных балок укладывались дополнительные металлические балки вдоль оси тоннеля. Получив мощный металлический каркас конструкции станционного профиля, оказалось возможным заполнение бетоном элементов конструкции. В процессе монтажа металлической конструкции между металлическими прогонами, уложенными по созданной раме средней части станции, и конструкцией верхнего свода устанавливался ряд гидравлических домкратов грузоподъемностью в 50 *т* на взаимном расстоянии в 75 *см*. При укладке бетона применялись металлические формы и бетононасосы.

и) *Сооружение тоннелей Форт-Пэк.* При сооружении плотины Форт-Пэк в Америке для деривации были построены четыре тоннеля длиной от 1,6 до 2,2 *км*, общим протяжением в 7,7 *км*. Размеры каждого тоннеля в свету — 7,4 *м*.

Проходка велась в разлагающихся под действием воды сланцах, которые, проявляя пучение, оказывали усиленное давление на крепи. При проходке сланцев применялись взрывные работы.

Сооружение тоннеля производилось с центральным направляющим ходом размерами 4,25×4,9 *м*. Буровзрывные работы велись шпурами длиной в 2,75 *м*. Крепление штолен осуществлялось американским методом деревянного крепления рамной системы — из отдельных деревянных брусков сечением 30×30 *см*. Взорванная порода грузилась одноковшевыми экскаваторами емкостью ковша 0,35 $м^3$. Порода подавалась через транспортер на вагонетки подземной откатки. Максимальная проходка штольни достигала 515 *м* в месяц, а рекордная скорость—19,8 *м* в сутки.

Впоследствии внутри тоннелей, имеющих бетонную обделку, пришлось устроить стальной чехол внутренним диаметром 7,4 *м*. Этот металлический чехол имел назначением воспринять на себя функции водонапорного трубопровода.

При внешнем диаметре выработки в 9,7 *м* внутри обделки монтировался стальной тюбчехол диаметром 7,4 *м*, при толщине листа 2,5 *см*.

Жесткость внутреннего металлического чехла-тюба увеличивалась постановкой ряда двутавровых колец, приваренных непосредственно к нему, на взаимном расстоянии 80 *см*. Весь металлический тюб, на протяжении 945 *м*, состоял из 126 секций длиной 7,5 *м* каждая. Каждая отдельная секция тюба монтировалась за пределами тоннеля и с помощью крана (рис. 395) устанавливалась на особые тележки с электротягой. Вес каждой секции тюба — 67 *т*. Тележка, на которой перевозился тюб, была устроена особой конструкции; при помощи домкратов можно было перемещать тюб в любом направлении, заводить его в тоннель и устанавливать по проектному направлению.

На месте, в тоннеле, с помощью электрозаклепок устраивались стыки отдельных секций тюбов.

После подземного монтажа металлического трубопровода производилось нагнетанием через отверстия заполнение литым бетоном пространства между металлическим чехлом и внутренней бетонной обделкой. Бетон подавался двумя бетононасосами, установленными на передвижной металлической тележке. Бетонирование производилось после укладки

металлического трубопровода на протяжении около 24 *м*.

Продолжительность ввода в тоннель и установки трубопроводной секции и нагнетания за него — 2,5 дня.

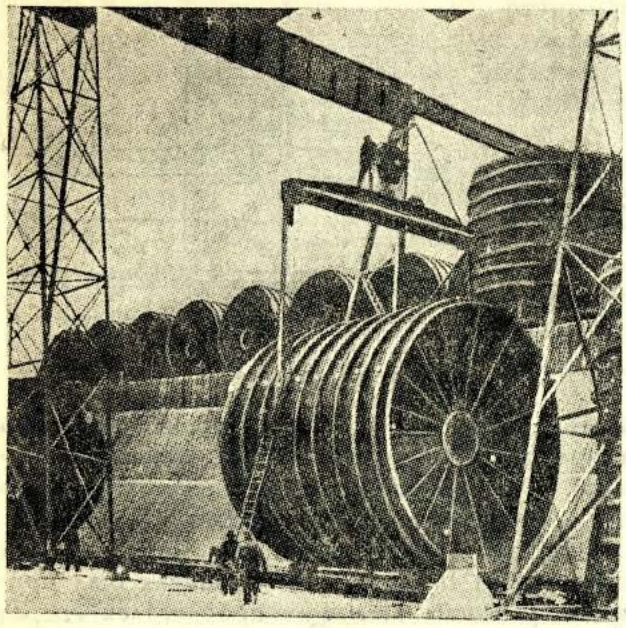


Рис. 395. Гидротехнический тоннель Форт-Пэк (подготовка стальных секций)

к) *Сооружение Балтиморского железнодорожного тоннеля.* Особый технический интерес представляет комбинированный щитовой прием, примененный на строительстве Балтиморского железнодорожного тоннеля.

Тоннель, поперечным сечением 12×9 *м*, на протяжении около 600 *м* был пройден двумя малыми щитами в нижних боковых частях профиля и полущитом — в калоттной части. Таким образом, комбинированная щитовая проходка проводилась аналогично практикующемуся методу опорного ядра. В малых тоннелях-штольнях бетонировались стенки-опоры, по которым представлялась возможность катить большой полущит для образования свода несущей тоннельной обделки (рис. 396).

Щиты пересекали преимущественно песчаные и галечные грунты, местами — включения глин. Пересекались тоннелем и гнейсы, потребовавшие применения взрывчатых веществ.

При заложении тоннеля на глубине порядка 6—10 *м* от поверхности горизонт грунтовых вод по длине тоннеля был весьма различен. Иногда вода доходила до горизонтального диаметра тоннеля, в других случаях она совсем не обнаруживалась.

Фронт щитовых работ был открыт из шахты, заложенной по оси тоннеля. Из нее в первую очередь были пущены два малых штольневых щита по нижним углам профиля сооружаемого тоннеля. При этих щитах, круглого сечения, диаметром 3,45 *м*, укладывалась чугунная обделка круглых штолен диаметром 3,35 *м*.

Штольневой щит продвигался вперед восемью гидравлическими домкратами диаметром 15 *см*, при ходе поршня 45 *см*. Грунт выбирался впереди щита на 90 *см*; при пересечении слабых песков производилось крепление лба забоя деревянными шандорами, а кровля затягивалась подвижными металлическими марчеванами по контуру аванбека. Откатка породы производилась в обычных вагонетках аккумуляторными электровозами (рис. 397).

Скорость движения штольневых щитов составляла 1,2—2,3 *м* в сутки. На расстоянии около 15—20 *м* от забоя каждого щита в готовой штольне, закрепленной тюбингами, производилось устройство бетонного лотка и стен-опор для движения полущита.

Бетон подавался бетононасосами с поверхности через ряд буровых труб (диаметром 25 *см*), заложенных через 50 *м* по трассе

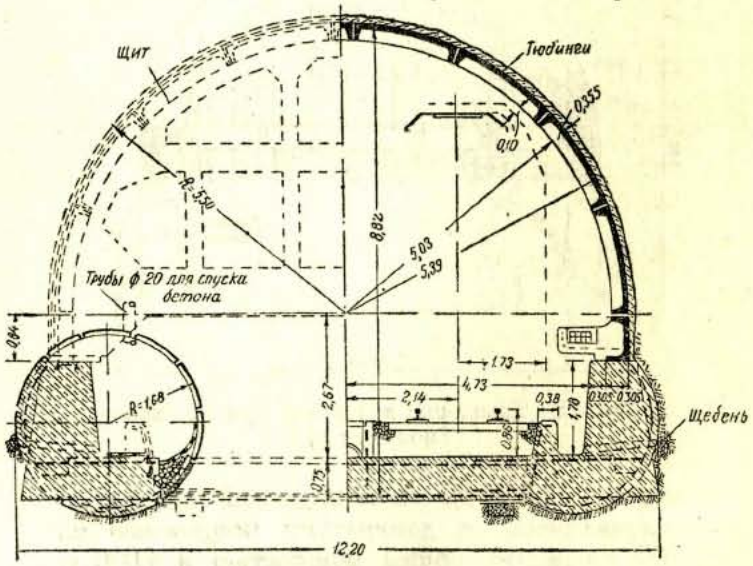


Рис. 396. Поперечное сечение Балтиморского железнодорожного тоннеля

штольневых щитов. Положением этих труб контролировались геодезическо-маркшейдерские работы при щитовой проходке.

Укладываемый под стены бетон с одной стороны ограждался выложенными в штольнях тюбингами, а с другой — подвижными металлическими лекальными фермами. Бетон подавался порциями в 15 $м^3$ на протяжении порядка 6 $м$ по оси штольни.

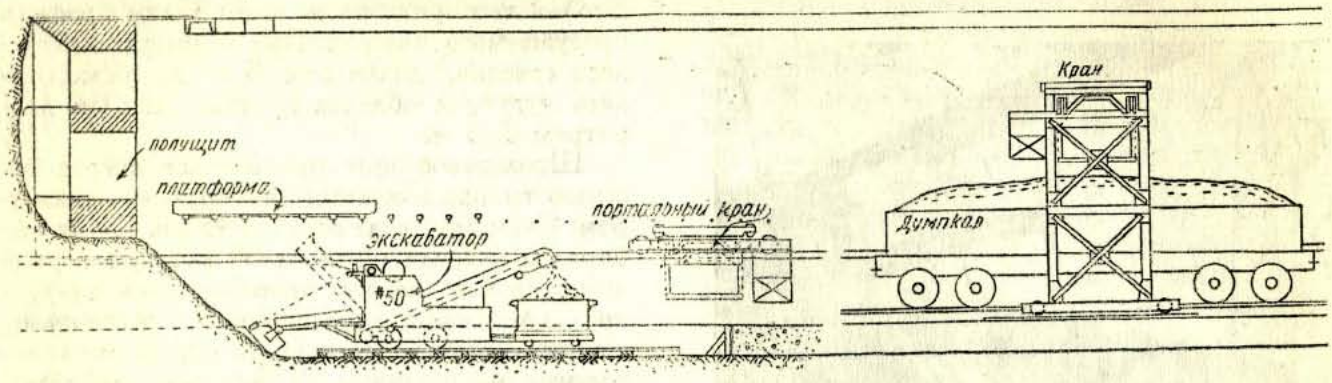


Рис. 397. Продольный разрез по оси тоннеля (производство работ)

Для образования калоттного профиля и устройства свода тоннеля из чугунных сегментов вслед по окрепшим бетонным стенам, уложенным в круглых штольнях, пускался центральный полущит. Последний, разжать проектное сечение прокладываемого тоннеля. Приходится либо реконструировать уже возведенную обделку, либо, что чаще, приостанавливать щитовые работы.

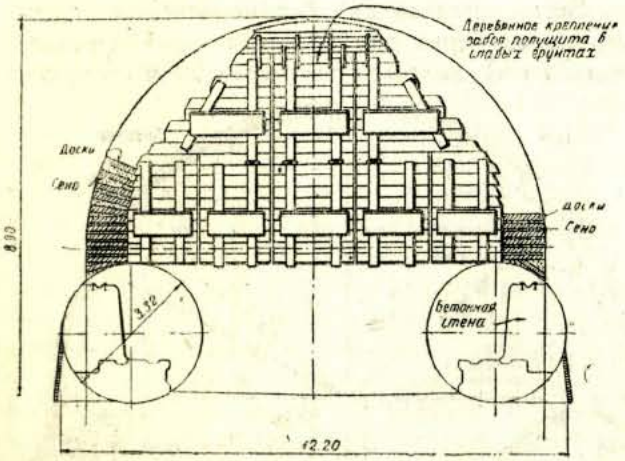


Рис. 398. Крепление лба забоя при проходке полущитом

мерами 11,5 × 6,3 $м$, оснащенный двадцатью гидравлическими домкратами мощностью по 200 $т$ каждый, общей мощностью в 4 000 $т$, продвигался вперед при стальных катках по плитам, уложенным на рельсах, заделанных в верхних плоскостях опорных бетонных стен. На положение фиксированных отметок рельсов обеих стен обращалось особое внимание, ибо неравномерное положение пят полущита могло привести к значительным перенапряжениям в элементах его конструкции и неизбежно к деформациям щита. Последнее обстоятельство может повести к большим осложнениям, так как в этом случае не удается выдер-

Следует подчеркнуть, что полущит при сооружении Балтиморского тоннеля был проведен успешно. Полущит продвигался вперед на ход поршня домкратов в соответствии с шириной сегмента обделки в 76 $см$.

Разработка забоя производилась из восьми ячеек, снабженных выдвижными рабочими платформами. Крепление лба забоя при пересечении мягких грунтов велось с деревянными шандорами при поддержке забойными домкратами (рис. 398).

Монтаж тюбингов производился гидравлическим эректором. Вслед за продвижкой щита велось нагнетание цементного раствора от пят к шелыге сооружаемого свода обделки. Особую осторожность пришлось соблюдать при проходке полущитом в расстоянии около 5 $м$ от существующего тоннеля с обделкой из кирпичной кладки. В этом случае продвижка полущита велась малыми порциями, а нагнетание раствора за обделку через загнутый наконечник, распространяющий раствор по внешней поверхности, в направлении вдоль оси тоннеля (а не перпендикулярно к ней).

В период щитовой проходки старый кирпичный тоннель был взят на временное деревянное крепление.

Погрузка и транспортировка породы производились следующим порядком. Порода, выдаваемая из забоя, а главное — штроссная часть профиля бралась одночерпаковым

экскаватором, установленным на отметке подошвы тоннеля. Экскаватор грузил породу в кузова емкостью 1,5 $м^3$, поднимавшиеся краном мостового типа и подававшиеся к подъемнику шахты для выдачи на поверхность.

В дальнейшем, при сбойке с открытым портальным участком, кузова выгружались непосредственно в думпкары емкостью в 27 $м^3$, которые по железной дороге направлялись на свалку (рис. 397).

При указанной механизации работ скорость проходки полущитом достигала 4,5 *м* в сутки.

Обратный бетонный свод укладывался вслед за продвижением щита. Выбирая штроссу между штольневыми тюбами на длине по оси тоннеля в 15 *м*, никакого движения открытых стен внутрь не наблюдали. Необходимо учесть, что при укладке бетонных стен в круглых тюбах были сделаны заходки в сторону с выборкой тюбингов для устройства прямой подошвы стен.

Тоннель Балтиморской железной дороги сечением 12×9 *м*, на протяжении 600 *м* пройденный в мягких грунтах, при объеме работ в 56 000 $м^3$ породы и 9 754 *т* чугуна, сооружен в 15 месяцев.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

СООРУЖЕНИЕ ТОННЕЛЕЙ В НЕУСТОЙЧИВЫХ ПОРОДАХ СПЕЦИАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

При пересечении горных массивов, а равно и при сооружении городских тоннелей приходится вести борьбу с обильным притоком подземных вод в условиях неустойчивых пород, часто плывунного характера.

При проходке в слабых, неустойчивых породах необходимо в первую очередь считаться с горным давлением, ломающим временное крепление и разрушающим как отдельные элементы постоянной обделки, так и готовую тоннельную конструкцию. При производстве тоннельных работ надлежит особо учитывать состояние равновесия грунтовых масс. Разработку следует вести малыми участками, немедленно производя закрепление всей системы (а не одного элемента) во избежание неравномерного давления и осадок.

Все пустоты, остающиеся за крепью, должны быть плотно заполнены и забучены.

Если получается деформация свода обделки в то время, когда она находится еще на кружалах, то надлежит произвести тщательное дополнительное крепление.

При обнаружении сильного давления необходимо сводить длину кольца раскрываемого профиля к минимуму (до 2 *м*). Учитывая вероятность осадки креплений в условиях слабых грунтов, следует заранее давать соответствующий строительный подъем своду, поднимая верхняк верхней направляющей штольни, а равно и лонгарины на 20—30 *см* выше наружной проектной поверхности свода тоннеля.

Слабые грунты в процессе их разработки проявляют тенденцию к устремлению в забой. Поэтому необходимо вести тщательное крепление, затягивая бока, кровлю, подошву и лоб забоя выработки. Работы осложняются, когда в забое выклиниваются породы с большим коэфициентом крепости, так как производство подрывных работ одновременно с креплением слабых пород является серьезной технической задачей, практическое решение которой связано с большими производственными затруднениями.

Наиболее мощным средством борьбы с неустойчивыми, водоносными грунтами при проходке является искусственное укрепление их следующими приемами: 1) тампонажем, 2) сжатым воздухом, 3) химическим закреплением грунтов, 4) искусственным понижением грунтовых вод и 5) замораживанием грунтов.

1. ТАМПОНАЖ

Чтобы укрепить зону неустойчивых пород, прекратить их подвижность, а равно интенсивный приток воды, применяется один из способов тампонирования, при котором под давлением нагнетаются цемент, глина, битум, силикат и т. д. Однако следует учесть, что тампонирование, имеющее целью укрепить неустойчивые породы, прекратить текучесть грунта и доступ воды в тоннельные выработки применимо не везде. Так, например, цементация не дает эффекта в грунтах, содержащих большой процент глины. В условиях ярко выраженных плывунов метод цементации совершенно неприменим.

Обычно цементация по укреплению зоны неустойчивых пород производится следующим порядком. Через обшитый лоб забоя бурятся скважины, в которые под давлением подается цементный раствор. Последний, проникая через пустоты в породе по линии наименьшего сопротивления, схватываясь с этой окружающей породой и твердея, образует бетоноподобную массу, через которую осуществляют продвижение забоя выработки. Вне зависимости от порядка проведения цементации устья нагнетательных скважин должны иметь конструктивное оснащение, препят-

ствующее вытеснению раствора в процессе работ по плоскости забоя.

В неустойчивых, рыхлых породах цементация вызывает ряд трудностей. Но если иногда при ней и не достигается полный эффект в смысле закрепления грунтового массива, то во всяком случае уменьшается подвижность грунта и условия производства работ соответственно облегчаются. При нагнетании под давлением через трубу цементный раствор, обладая вяжущими свойствами, «окаменяет» окружающий неустойчивый грунт. Но в присутствии глинистых или илистых частиц цементация протекает неудовлетворительно, аналогично тому, как получается дефектный бетон при инертных, обволоченных илистым глинистым материалом. Наличие значительной примеси ила или глины в неустойчивых породах соответственно ограничивает пределы применимости способа цементации. Однако имеется практический прием, при котором цементация может применяться и в грунтах, содержащих илистые и глинистые частицы. Сущность этого приема заключается в следующем. По плоскости закрепления забоя забивается ряд напорных труб диаметром 40 *мм* на взаимном расстоянии 0,7—1,1 *м* (радиус действия). Эти трубы забиваются по периферии, а в центре забивается одна всасывающая труба диаметром 100 *мм*. Через напорные трубы под давлением подается вода, а через всасывающую трубу при помощи насоса вода удаляется. Таким образом создается подземный ток воды, которым тонкие илистые и глинистые частицы и удаляются из массы подлежащего укреплению грунта. Затем через напорные трубы производится нагнетание под давлением 8—10 *ат* цементного раствора, укрепляющее зону неустойчивых пород. После насыщения породы цементом трубы удаляются, и следующим этапом приступают к продвижению забоя тоннельной выработки. Степень равномерности распределения раствора, образование гнезд и несцементированность отдельных включений зависят преимущественно от физико-механических свойств укрепляемого грунта и качества выполнения цементационных работ.

Указанный прием все же замедляет темпы ведения основных тоннельных работ и уступает методу химического закрепления. При проведении последнего присутствие в массиве неустойчивых пород илистых и глинистых частиц не сказывается в основном на химических реагентах, в то время как на степень связывающего действия цемента присутствие их оказывает решающее влияние.

Метод цементации с успехом может быть применен в относительно чистых, крупнозернистых песках и гравелистых грунтах. При этом следует подсчитать ожидаемый расход цемента и степень экономичности этого приема по сравнению с другими приемами. В связи с расчетом расхода цемента приходится особенно считаться с действием вымывания цемента водой, что препятствует процессу схватывания цемента и образованию камнеподобного массива.

В случаях, когда по местным условиям дебита и напора воды непосредственный отвод их нецелесообразен, применяется метод тампонирования, при котором посредством цементации, глинизации, гудронизации или нагнетания другого материала удается заглушить, прекратить доступ воды в тоннельные выработки.

Следует отметить, что наибольший эффект метод тампонажа, в частности цементации, дает при пересечении водоносных, трещиноватых, твердых пород с большим дебитом вод. Так, например, при сооружении подводного тоннеля под р. Мерси диаметром 14,1 *м*, длиной 3,47 *км* методом цементации был полностью разрешен вопрос тоннелирования при гидростатическом напоре в 52 *м* (ниже уровня моря). Было совершенно ясно, что вести проходку в условиях трещиноватых пород при помощи сжатого воздуха, под давлением 5,2 *ат* представлялось задачей практически невозможной. Поэтому борьба велась исключительно методом цементации при одновременном водоотливе 16 300 *л/мин*. Длина шпуров при тампонаже выразилась в 130 000 *пог. м*, расход цемента в трещиноватых породах красного песчаника доходил до 3 500 *т*. Этот же способ цементации имел успех при постройке Рондоутского тоннеля.

Исключительный интерес представляет система цементации при сборно-разборной сферической стальной перемычке, которая применялась французским инженером Мореном.

В зависимости от размеров очертания забоя устанавливается металлическая перемычка из отдельных элементов. Эта перемычка имеет по периферии ряд отверстий диаметром 400 *мм* для напорных труб, а в середине отверстие в 1 100 *мм* для всасывающей трубы. Перемычка рассчитывается на троекратное максимальное давление, под которым производится нагнетание цементного раствора. По

мере выборки породы перемычка передвигается вперед.

Величина давления, под которым производится цементация, зависит от физико-механических свойств пород, степени их трещиноватости, наличия пустот и напора подземных вод. В практике цементации при шахтных работах на больших глубинах известны давления порядка 100—130 *ат*. При наличии больших пустот для уменьшения расхода цемента допустимо предварительное нагнетание других материалов (глины, трепела, песка, золы) при последующем, однако, проведении цементации.

При пересечении трещиноватых пород с обильным притоком вод допускается тампонаж в виде нагнетания асфальтового битума. Этот метод тампонажа был с успехом использован при укреплении основания под плотину Хельсбарэ. Через буровые скважины под давлением до 12 *ат* нагнетался асфальтовый битум, имевший жидкую консистенцию при 100° С. Во избежание охлаждения битума и превращения его в мягкую массу, затрудняющую процесс битумизации, по нагнетательным трубам были проведены электропровода. Применением электронагрева удалось поддержать необходимую температуру для успешного ведения тампонажа асфальтовым битумом. При наличии трещин в скале шириной от 5 до 50 *см*, при скорости движения подземных вод 2 *м/сек* удалось укрепить основание введением до 2 500 $м^3$ асфальтового битума. Метод битумизации был с успехом осуществлен при устройстве глубоких оснований Дворца Советов (Москва).

Трещины в известняках заполнялись нагнетанием под давлением до 15 *ат* горячего битума при температуре в 220° С. Закладка фундаментов на глубину 22 *м* производилась при основании из трещиноватых водоносных известняков. По контуру каждого из котлованов были забурены скважины на глубину до 35 *м*, диаметром в 100 *мм*.

В буровую скважину опускали инъектор, представляющий собой трубу (диаметром 40 *мм*), перфорированную отверстиями (диаметр их 15 *мм*), через которую битум под давлением нагнетался в трещины известняков. Инъектор составлен из отдельных двухметровых звеньев, стыкуемых изоляторами. В середине инъектора имеется провод сечением 15 *мм*, пропущенный через фарфоровые изоляторы. По проводу пропускается постоянный ток, подогревающий битум. Расстояние между скважинами около 75 *см*. На контакте известняка с вышележащей грунтовой толщей в скважине устраивается цементная пробка.

Проведением ряда повторных инъекций битума (через те же скважины) в известняки трещины полностью заполнялись битумом, приток подземных вод в котлованы был значительно снижен.

В некоторых случаях этот метод может дать эффект. Однако метод битумизации не получил пока широкого распространения и полностью не освоен. Он требует дальнейшего усовершенствования как в части технологии, так и в отношении необходимого оборудования.

2. СЖАТЫЙ ВОЗДУХ

Одним из мощных приемов проходки в водоносных, неустойчивых грунтах плывунного характера является сжатый воздух. Балансируя воздушное давление в разработке соответственно гидростатическому, удается в известной степени оттеснить воду из забоя и работать в относительно сухих условиях. Возможность работы человека под сжатым воздухом лимитируется (по Хернэсту) 5 *ат*. Редко применяется давление выше 3,5 *ат*. в производственных условиях.

Если при возведении оснований сооружений, а равно при вертикальной проходке шахт сжатый воздух широко применяется, то в тоннельной практике при горизонтальной проходке пользование пневматикой весьма ограничено. Особо отличается щитовая проходка под сжатым воздухом, которая является мощным и наиболее совершенным видом горизонтальной проходки подземных выработок.

Проходка под сжатым воздухом была впервые осуществлена в Антверпене (1897 г.) при постройке тоннельного коллектора под доком (если не считать первой попытки применения сжатого воздуха для подводного тоннелирования Кохраном, 1830 г.). Размер тоннеля 1,6 × 1,3 *м*. В том же году были предприняты в Нью-Йорке Хаскиным тоннельные работы под р. Гудсон. Этот подводный тоннель был круглого сечения, диаметром 5,5 *м*. Обделка тоннеля была из каменной кладки. Однако производство работ на временном креплении под сжатым воздухом при горном способе приводило к ряду аварий. В дальнейшем для окончания строительства пришлось переключиться на щитовой способ. Последний, облегчая процесс кре-

пления выработок, увеличивал темпы проходки и обеспечил надежность и безопасность производства работ.

Трудно указать строго определенные методы для проходки в неустойчивых породах. Во всяком случае на основании опыта можно утверждать, что в неустойчивых породах желательно разрезать профиль таким образом, чтобы предварительно устраивать фундаменты, стены тоннеля и обратный свод при минимальных размерах выработок. При этом вслед за разработкой необходимо вести каменную кладку, а к устройству свода тоннельной обделки приступать, лишь когда имеется уверенность, что фундаменты стен тоннельной обделки остаются незыблемыми и в состоянии воспринять на себя давление от свода тоннельной обделки.

Сооружение тоннелей под сжатым воздухом ведется как методом вертикальных кессонов-тоннелей, так и при горизонтальной проходке.

Горизонтальная горная проходка с пневматикой применялась на ряде подводных тоннелей, а равно на тоннелях Буффало и Колорадо (Америка), Оммерсберг у Шифгаузена (Германия), Гаттико (Италия), деривационный тоннель Мильбук, Таннский тоннель (Япония), Амерсбергский тоннель (Швейцария) и др.

Ряд тоннелей линии Московского метрополитена, залегающих в мощных слоях плывуна, пройден под сжатым воздухом. При этом давление сжатого воздуха колебалось в пределах от 0,4 до 2,8 *ат*.

Кессоны-тоннели применялись при постройке некоторых тоннелей и станций Парижского метрополитена, при сооружении тоннеля Гаттико и тоннелей-кессонов Московского метрополитена.

Тоннель Гаттико (Италия) длиной 3 308 *м* заложен на глубину от 60 до 85 *м* от поверхности. Тоннель однопутный (для железнодорожного движения), пересекает местами морену, а в основном исключительно слабые, водоносные грунты плывунного характера.

Учитывая относительно неглубокое заложение этого горного тоннеля, сложность геологических условий, заданные сроки работ, проходку тоннеля проектировали вести из двух порталов и четырех промежуточных шахт. В морене ориентировались на бельгийский, одноштольневый метод производства работ. Разработка со стороны северного портала производилась в слабоводоносных песках с включениями глины, гравия и гальки. Работы по пробивке штольни велись нормальным порядком, причем на 561 *м* забой штольни со стороны северного портала был соединен с направляющим ходом из шахты № 1.

Дебит вод не превышал при этом 1 000 *л/мин*.

Первая шахта в 778 *м* от северного портала была пройдена не по оси тоннеля, круглого сечения, глубиной 58 *м*. Вторая шахта была пройдена глубиной 63,7 *м*. Направляющие штольни из рабочего крыла второй шахты были сбиты со штольнями, пройденными как из первой, так и из третьей шахты. Скорость проходки штольни была от 2 до 2,4 *м*. Проходка штолен из третьей шахты по оси тоннеля велась с большими затруднениями ввиду пересечения сильно водоносных песков. Штольня из третьей шахты пробивалась навстречу штольне, шедшей из второй шахты, при дебите вод 300 *л/мин*. В период сильных ливней вода прорвалась в штольню с таким притоком, что произошло затопление штольни и самой шахты на высоту 27 *м*.

Интенсивным водоотливом воду удалось откачать. Однако дальнейшее продвижение забоя штольни, уже в исключительно слабом, разжиженном илистом грунте, оказалось весьма сложной задачей.

Те же затруднения в проходке через слабые породы встретились при пробивке штольни от третьей шахты в направлении к четвертой. Здесь даже имел место прорыв илистого грунта, причем затопило сооружаемый тоннель на протяжении 31 *м*.

После усиленной работы началось дальнейшее продвижение забоя. В процессе проходки илистый грунт с большой силой вновь устремился в разработку. Работы пришлось прекратить и установить на расстоянии 310 *м* от третьей шахты, со стороны южного портала, перемычку из каменной кладки. За первой перемычкой установили на расстоянии 100 *м* вторую, а на следующих 100 *м* — третью перемычку. Дебит подземных вод доходила до 10 000 *л/мин*. Была пройдена обходная галлерея, которая начиналась на 430 *м* от третьей шахты и пробивалась параллельно оси тоннеля на расстоянии 14 *м*.

Пробивка этой галлереи была менее затруднительной, поскольку грунт здесь был более устойчивым. Эта галлерея была пройдена на протяжении 69 *м*. Далее она была на-

правлена на сбойку со штольней, шедшей со стороны южного портала. Через обходную галлерэю был засечен перпендикулярно к оси тоннеля ряд сбоек. На расстоянии 29,3 *м* между двумя квершлагами началось сооружение тоннеля при горизонтальной проходке на временном деревянном креплении под сжатым воздухом. Со стороны южного портала работы велись также в условиях водоносных песков, гальки и ила.

Работы производились сначала в морене, как уже было указано, бельгийским, одноштольневым способом с опиранием свода непосредственно на грунт. Впоследствии выклинивания морены грунты оказались настолько податливыми, что после возведения свода на протяжении 60,2 *м* последний сел так, что его ключ оказался на несколько сантиметров ниже лотка тоннеля. Была произведена реконструкция тоннеля итальянским методом, начиная с устройства обратного свода, с применением временного опорного ядра из кирпичной кладки. Проходка горным способом оставшегося несооруженным участка тоннеля окончилась неудачей — частыми прорывами и затоплением тоннеля слабыми породами.

Для преодоления всех этих трудностей пришлось с поверхности опустить вертикальные кессоны-тоннели. Кессоны были длиной 17,27 *м*, шириной 6,87 *м*. Над рабочей камерой создавалась тоннельная секция, которая временно заполнялась сухой кладкой. Были установлены шлюзовые аппараты для шлюзования людей и материалов. В течение двух месяцев кессон-тоннель был опущен на глубину 15,52 *м*, из которых первые 10 *м* были пройдены без сжатого воздуха. Вслед начали спускать второй кессон, который был в течение 65 дней опущен на глубину 17,96 *м*.

Наиболее затруднительным оказалось стыкование этих кессонов между собой. Устройство стыкования сначала пытались осуществить при помощи горизонтальной проходки под сжатым воздухом. Для этого были устроены в кессонах-тоннелях специальные рабочие камеры, сообщавшиеся с шлюзовыми аппаратами. Дальнейшую проходку после опускания двух кессонов-тоннелей пытались провести при помощи временного крепления под сжатым воздухом.

Приступили к пробивке стены кессон-тоннеля и к проходке центральной галлереи, шедшей по отметке лотка сооружаемого тоннеля. После проходки этой галлереи на определенном протяжении засекались боковые части профиля, в которых производилась закладка лотка и стен тоннеля по итальянскому методу производства работ.

Затем приступили к сооружению средней части профиля, закладке стен тоннеля и к последнему этапу — возведению свода обделки.

В зависимости от пересекаемых грунтов в некоторых местах удавалось вести проходку под сжатым воздухом только в нижней половине профиля, а верхняя часть создавалась с помощью металлических кружал без применения сжатого воздуха. Скорость продвижения при этом была весьма незначительной. От этого способа в дальнейшем пришлось отказаться и перейти на опускание целой серии кессонов-тоннелей.

Для сооружения участка тоннеля длиной 55,57 *м* между опущенным кессоном *А* и кольцами уже сооруженного тоннеля были устроены непосредственно шлюзовые камеры (в виде двух бетонных диафрагм) в самом кессоне-тоннеле. Была произведена проходка под сжатым воздухом направляющей геллереи, которая пролегала вначале по лотку тоннеля, а затем перешла непосредственно к своду уже сооруженного тоннеля (рис. 399 а).

Основание прокладываемой штольни везде представляло собой грунт с достаточным коэфициентом крепости.

На рис. 399 а, б видны фазы работ по сооружению элементов тоннеля Гаттико. Проходка под сжатым воздухом велась при давлении 1,5 — 2 *ат*.

* * *

Наиболее тяжелый в геотехническом отношении участок Таннского тоннеля (Япония) был сооружен при горизонтальной проходке под сжатым воздухом. Для преодоления гидростатического напора подземных вод величина воздушного давления доводилась до 2,1 *ат*. Однако большие утечки воздуха через обнаженные поверхности воздухопроницаемых пород, пересекаемых тоннелем, быстро исчерпывали максимальную производительность компрессорных установок. Давление в выработках начинало падать. Для уменьшения утечки воздуха оголяемые поверхности выработок, в особенности лоб забоя, немедленно покрывались торкретным слоем с одновременным тампонажем.

Тоннель Маро на железнодорожной линии Монтобен — Бриве был проложен в известняках, пересеченных значительными трещинами, которые были заполнены плывунами. Про-

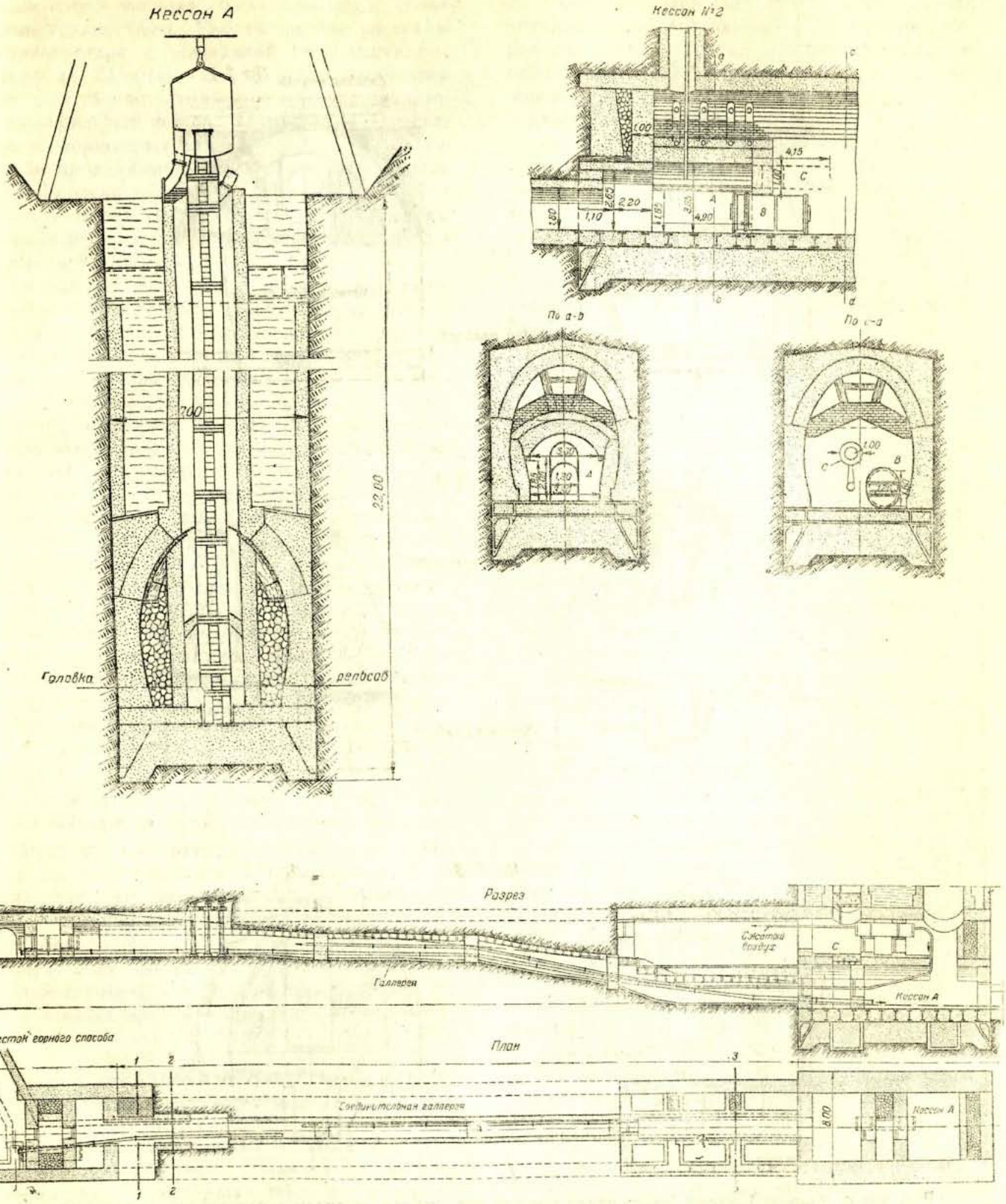


Рис. 399 а. Тоннель Гаттико (опускание кессонов-тоннелей и проходка соединительных галлерей под сжатым воздухом)

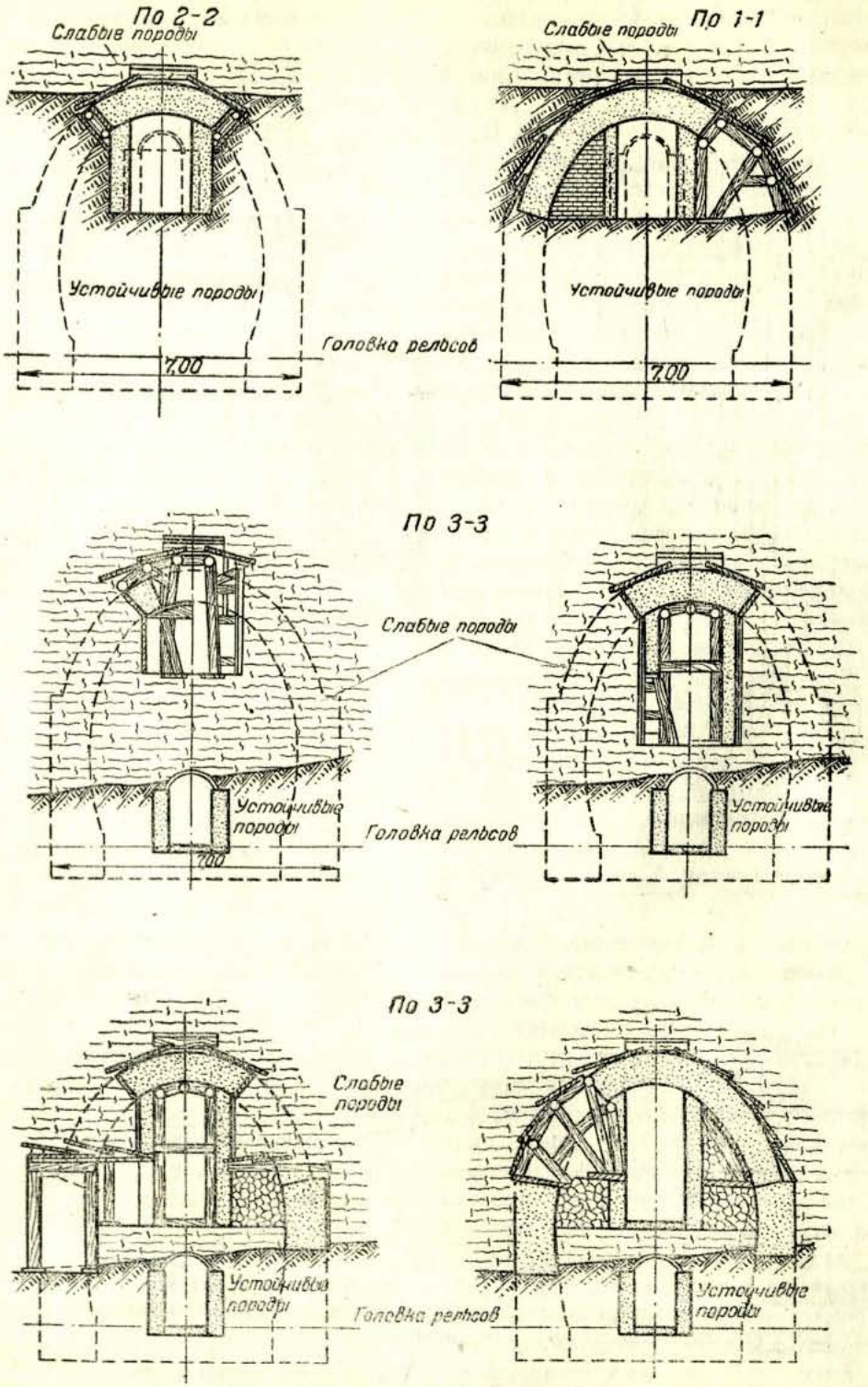


Рис. 399 б. Тоннель Гаттико (сооружение тоннеля под сжатым воздухом в неустойчивых породах)

ходка этого тоннеля была связана с большими трудностями. Работы велись способом опорного ядра с выкладкой стен тоннеля в штольнях. Особые затруднения выявились при пересечении штольнями водонасыщенных тонкозернистых песков. После ряда изысканий всевозможных методов креплений лба забоя и продвижения его вперед был принят комбинированный метод проходки в слабых грунтах путем нагнетания сжатого воздуха. Кровля и борта штольни затягивались рядом полых металлических марчеван, которые зажимались в грунт винтовыми домкратами, причем в отверстия марчеван грунт входил непосредственно и при наличии пробок в конце марчеваны он не выходил внутрь выработки. Длина марчеваны 5 *м*, толщина 46 *мм*, ширина 200 *мм*; толщина листа 3 *мм*; диаметр отверстия 10 *мм*. Лоб забоя просверливался рядом перфорированных буровых труб диаметром 10 *см*, длиной 3,5 *м*, при диаметре отверстий 1 *см*. Эти трубы были снабжены специальными завинчивающимися пробками. Сжатый воздух нагнетался через трубы в грунт под давлением 7 *ат*. После этого открывались пробки, и через трубки устремлялся значительный поток чистой воды. Это мероприятие по вдуванию воздуха в грунт и по извлечению чистой воды повторялось несколько раз. Таким образом удалось реализовать дренаж забоя и произвести значительное осушение массива в пределах зоны, необходимой для разработки тоннеля.

После проходки боковых штолен в них были выложены стены тоннельной обделки.

Раскрытие калоттной части и кладка свода обделки производились в облегченных условиях, так как массив песчаных грунтов уже был осушен при проходке нижних штолен.

Приведенная система нагнетания сжатого воздуха в слабые грунты при пересечении небольших участков плывунов дает определенный технико-производственный эффект.

ТОННЕЛИ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА, ПРОЙДЕННЫЕ В НЕУСТОЙЧИВЫХ ПОРОДАХ

а) Одним из сложных в геотехническом отношении участков являлся комплекс пятнадцати тоннельных переходных камер в месте сопряжения отдельных радиусов Московского метрополитена. Переходные камеры представляют собой довольно сложную конструкцию спаренных тоннелей разных сечений. Из них наибольший пролет выработок доходил до 23 *м*. На протяжении около 220 *м* однопутные тоннели пересекали неустойчивые породы с значительными включениями плывунных грунтов. При сооружении переходных камер, в зависимости от пересекаемых пород, применялись горные методы производства работ. С особой осторожностью производилась подводка средних стен под пяты двухпролетных сводов. В некоторых камерах, там, где своды выходили в нарушенные породы, принимались дополнительные меры в виде укрепления этих пород химическим способом.

Геологические условия проходки участка могут быть представлены следующей характеристикой: под насыпной толщей от 2 до 6 *м* залегали разнозернистые пески и суглинки, насыщенные водой, иногда с валунными субстанциями. На некотором протяжении выклинивались и грунты плывунного характера. Частично выклинивалась моренная глина с включением гравия и крупных валунов, доходивших диаметром от 1 до 1,5 *м*. Четвертичные отложения подстилались юрскими и карбонными глинами, причем первые иногда совершенно эродированы. Карбонные глины подстилались водоносными известняками.

Работы в этих слабых породах было решено вести исключительно методом временного деревянного крепления под сжатым воздухом.

Тоннельные работы на участке общим протяжением 1 190 *пог. м* проводились из двух шахт, имевших подходные штольни и бремсберги. Последние были пройдены между двумя перегонными тоннелями вдоль оси. Они использовались для подачи необходимых материалов и бетона, а спуск породы производился через специальные фурнели. Подходная штольня первой шахты была расширена таким образом, чтобы можно было установить шлюз для работы под сжатым воздухом.

На коротком участке наличие выклиниваний моренной глины представило возможность вести проходку обычным бельгийским способом работ.

Для обеспечения устойчивости близлежащих крупных зданий были применены специальные методы производства работ: сжатый воздух при непосредственной проходке тоннеля на временном деревянном креплении и укрепление, кроме того, кровли выработок за-

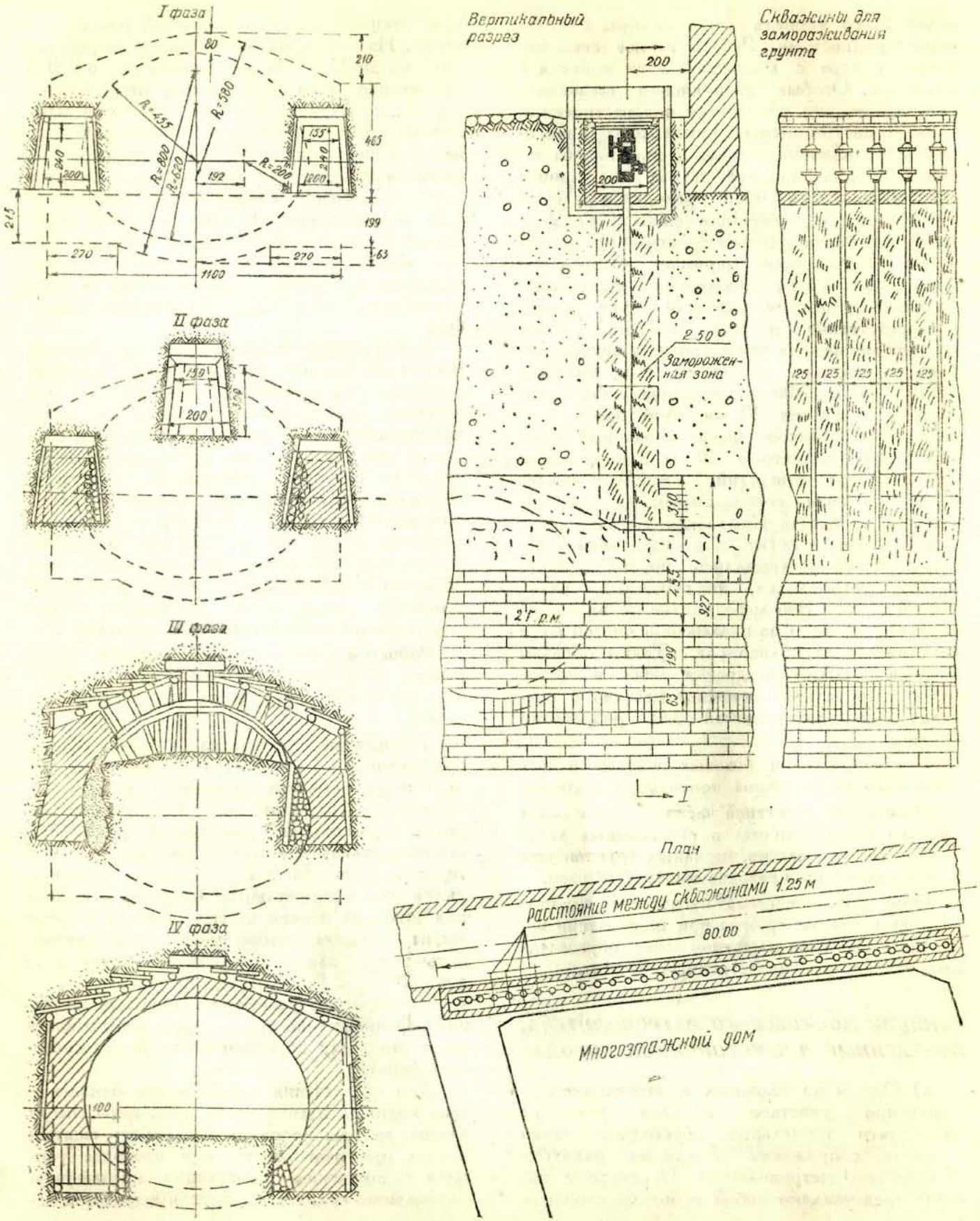


Рис. 400. Проходка тоннеля горным способом под сжатым воздухом с укреплением основания фундаментов близлежащего дома замораживанием грунта

мораживанием, ограждающим грунты основания под фундаментами домов (рис. 400).

Особо сложным был участок слабых пород протяжением 220 *м*, где ограниченность срока производства работ и осторожность, которую необходимо было проявить в связи с наличием зданий, потребовали вести работы по раскрытию профиля малыми участками, но одновременно из нескольких забоев. Всего было открыто 6 забоев, позволявших вести разработки в каждом из них на рабочее крыло протяжением от 30 до 60 *м*.

Вследствие слабости грунтов и их незначительной несущей способности опирание сводов на грунт велось по деревянному ростверку, уложенному под пяты сводов. Таким путем удалось достигнуть соответствующего распределения давления от пят свода на требуемую площадь подошвы калотты, не превосходя допускаемых напряжений на грунт.

После свода сооружалось нижнее полукольцо тоннеля в траншеях шириной 2—3 *м* по оси тоннеля.

Сжатый воздух подавался из компрессорной, через ствол шахты. Имелись три компрессора марки «Борец» производительностью по 20 $м^3/мин$ каждый.

Шлюзовая камера железобетонной конструкции была установлена в подходной штольне и ограждала зону сжатого воздуха от нормального. Шлюзовая камера имела два отделения: людское и материальное для одновременного пропуска трех горных вагонеток. В период развернутого фронта работ людская камера одновременно использовалась и для пропуска вагонеток.

Работы под сжатым воздухом сначала производились под давлением 0,6 *ат*. В дальнейшем, опасаясь прорыва воздуха, удалось вести работы под давлением около 0,4 *ат*.

Следует отметить, что, несмотря на значительно обнаженную поверхность выработок под сжатым воздухом от 600 до 700 $м^2$, не защищенных бетоном, при давлении до 0,4 *ат* не наблюдалось значительных утечек сжатого воздуха, и работы производились при работе лишь двух компрессоров марки «Борец» общей производительностью 40 $м^3$ в минуту.

Так как могли быть осложнения при проходке под сжатым воздухом (прорыв сжатого воздуха), при которых возможен выплыв грунта в разработки, необходимо было обеспечить устойчивость близлежащих домов. Для безопасности ведения работ возле крупного многоэтажного здания предварительно был укреплен его фундамент химическим способом. Грунты, представляющие кровлю тоннеля, были подвергнуты искусственному замораживанию. С поверхности были забурены трубы в виде ножниц, которые в процессе замораживания образовали надежное шатровое перекрытие, ограждавшее калотту от выноса вышележащего грунта.

Вдоль дома из траншеи были пробурены 82 наклонные замораживающие скважины общим протяжением в 570 *пог. м*, при объеме замороженного грунта массива в 1 900 $м^3$.

Замораживанием грунтов при наклонных скважинах было устроено также ограждение соседнего многоэтажного дома, где проводились работы по сооружению больших переходных камер. Процесс замораживания велся на протяжении около 32 *м*. Были заложены еще 45 скважин общим протяжением около 600 *м*, при объеме замороженного грунтового массива 1 600 $м^3$.

Несмотря на наличие таких мероприятий, работы велись малыми участками при исключительно тщательном креплении бортов и кровли выработок. Расстояние между штольневыми рамами было принято до 1 *м*.

Особое внимание уделялось нагнетанию раствора за обделку. Это нагнетание производилось повторно.

Меры по искусственному укреплению грунта и методы производства самих тоннельных работ обеспечили полную устойчивость указанных зданий в период ведения возле них тоннельных работ.

Объем работ на этом участке проходки под сжатым воздухом выразился в 88 000 $м^3$ породы и до 45 000 $м^3$ бетона.

б) Другим сложным участком строительства Московского метрополитена представлялся двухпутный тоннель переходного участка на 33‰ уклоне. Здесь тоннель, пересекая плывунные грунты и староречье, проходил под железнодорожными путями и далее непосредственно под многоэтажным домом. Тоннельные работы были проведены как при горизонтальной проходке на временном деревянном креплении под сжатым воздухом, так и с применением вертикальных кессонов-тоннелей; на некоторых участках было осуществлено замораживание грунтов. Последний метод служил как для закрепления тоннелей, так и для ограждения зданий, расположенных по трассе тоннеля.

Геологические условия по трассе рассматриваемого участка характеризуются следующим. Под насыпным грунтом залегали слабые, водоносные грунты аллювиальных отложений, значительной мощности, заполняющие размыв староречья. Из этого участка около 100 *м* тоннеля имели надежное основание в виде известняка, а дальше тоннель залегал полностью в плывунных грунтах. Сначала проходку предполагалось вести многоштольневым методом, но вследствие исключительной сложности производства работ этим методом, который вызывает значительное увеличение сроков, отражается на устойчивости массива и, несомненно, вызывает ощутимые осадки поверхности, был принят комбинированный способ с предварительной проходкой штольни по среднему горизонту. При длине тоннеля в 274 *пог. м*, пересекавшего зону неустойчивых пород, одна часть участка — 193 *м* — была пройдена на временном деревянном креплении под сжатым воздухом, а другая часть — 81 *пог. м* — при помощи кессонов-тоннелей из трех отдельных секций.

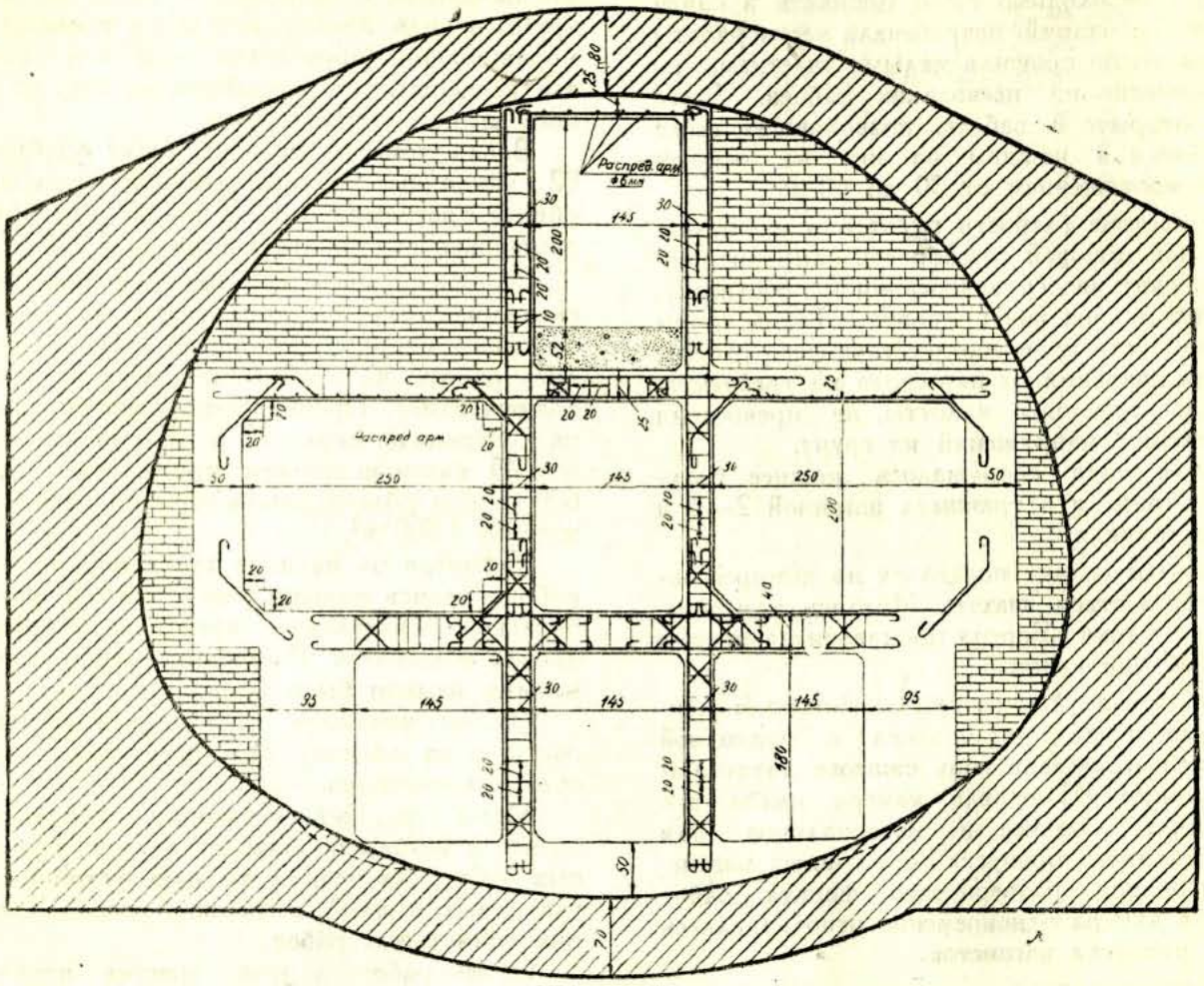


Рис. 401а. Железобетонная горизонтальная шлюзовая камера в тоннеле (поперечное сечение)

При проходке под сжатым воздухом имели место прорывы его, выпуски грунта и образование воронок на поверхности. Повышение давления влекло за собой прорыв воздуха на поверхность, а понижение приводило к тому, что забой стремительно заплывал плывуном и появлялось значительное горное давление, осложнявшее проходку тоннеля. С целью уменьшения утечки сжатого воздуха непрерывно производилась заделка бетонировкой открытой поверхности лба забоя. Крепление производилось шпунтованными марчеванами, при унтерцугах.

Горизонтальная проходка переходного участка производилась из четырех шахт под

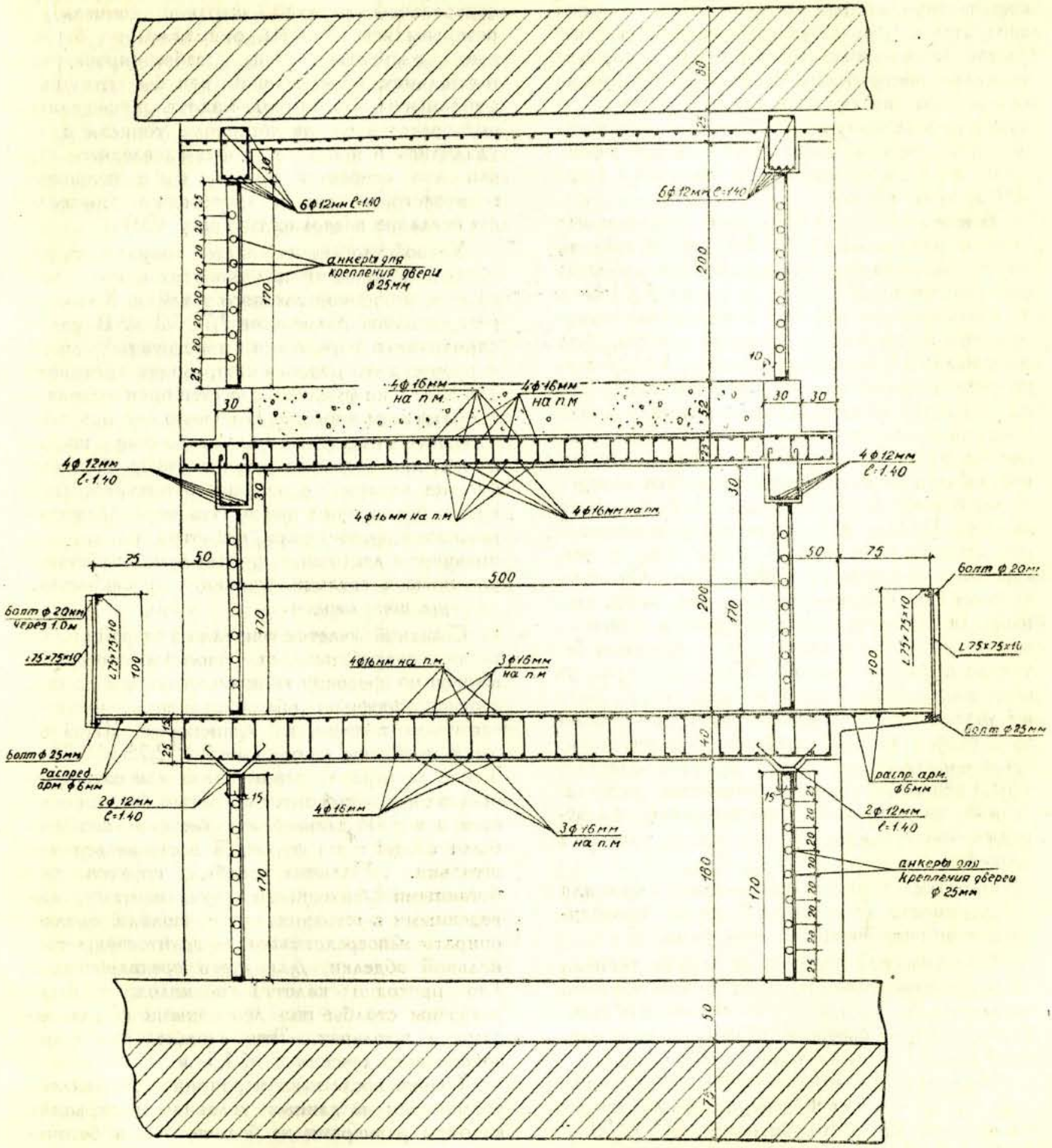


Рис. 401 б. Железобетонная горизонтальная шлюзовая камера в тоннеле (продольный разрез)

сжатым воздухом. В пределах двух шахт для шлюзования породы и людей были устроены специальные шлюзовые камеры в подходных штольнях. В стволе третьей шахты был размещен стационарный потолок с шлюзовыми аппаратами. В пределах четвертой шахты была сооружена шлюзовая камера в готовом тоннеле, построенном в устойчивой породе без применения сжатого воздуха. Эта шлюзовая камера была железобетонной конструкции с кирпичным заполнением; в ней размещались 7 прямоугольных шлюзов (рис. 401 а, б).

В нижнем ярусе было три материальных шлюза размерами 1,8 × 1,45 *м*. В среднем ярусе размещались три людских шлюза: два размерами 2×2,5 *м* и один 2×1,45 *м* для шлюзования рабочих и инженерно-технического персонала. В верхнем ярусе был материальный шлюз размерами 1,45 × 2 *м*, предназначенный для шлюзования материалов по горизонту верхней штольни тоннеля. Длина шлюзовых камер 5 *м*. Шлюзовые камеры, размещенные в первых двух шахтах, были построены в подходных штольнях. Эти камеры, железобетонной конструкции, прямоугольного сечения 3×2 *м*, разделены одной вертикальной стеной толщиной 25 *см* на два шлюза, каждый размерами 1,45×1,3 *м*. Один из шлюзов был специализирован как материальный для пропуска трех вагонеток, а другой — как людской при длине в 6 *м*. Средняя бетонная стенка толщиной 25 *см* была армирована жесткой арматурой из двутавров. Хотя по условиям статического расчета толщина этой стенки в 25 *см* оказалась достаточной, однако опыт эксплоатации шлюзов показал, что принятая толщина является недостаточной по условиям значительной фильтрации сжатого воздуха из одного шлюза в другой.

Проходка тоннеля двухпутного профиля в зависимости от местных условий проводилась комбинированными способами.

Геологические условия залегания тоннеля представлялись тонкозернистыми водоносными песками с выклиниваниями суглинков и глин. Верхняя часть профиля размещалась в слабых песках, подошва тоннеля — в глинах.

Метод производства работ по сооружению двухпутного тоннеля следующий: были пройдены стенные штольни размерами 1,55 × 2,00 × × 2,40 *м* в свету по среднему горизонту, в условиях слабых суглинков, с расположением лежанов штольневых рам в глине. Немедленно после проходки штольни в них бетонировались элементы частей стен тоннеля с включением металлического ростверка из двутавровых балок. Затем следовала проходка центральной верхней штольни тоннеля и раскрывались калотты, опиранием на бетонные элементы стен, забетонированные в штольнях, образовавших как бы ленточные фундаменты. Лонгарины калотт размещались вне пределов очертания свода тоннеля и не удалялись в процессе укладки последнего, так как эта операция привела бы к подвижке грунтового массива и, несомненно, вызвала бы оседание поверхности (рис. 400).

Устройство нижних частей тоннеля осуществлялось методом подводки их в колодцах, опускаемых из-под готового тоннеля. Колодцы раскрывались размерами 2,7 × 2 *м*. В целях наименьшего нарушения конструкций свода в процессе его подводки проходка колодцев для закладки фундаментов стен производилась в шахматном порядке. В первую очередь производилась подводка под рабочими швами сводов для создания мощных опор, без расчета на взаимное сцепление бетона соседних колец, по рабочим швам. Эта мера предосторожности принималась, несмотря на то, что имевшиеся ленточные фундаменты, забетонированные в средних штольнях, перекрывали рабочие швы сводов.

Соседний участок тоннеля из второй шахты также разрабатывался способом стенных штолен по среднему горизонту, но при расширенном профиле, обеспечивающем пропуск вагонеток подземного транспорта. Штольни были пройдены размерами 2 × 2,75 × 3,25 *м*. Такие размеры штольни позволяли сохранять откаточные пути в штольне после бетонировки стен в них. В дальнейшем боковые штольни были сбиты и из фурнелей засечена верхняя штольня. Наличие слабых грунтов под бетонными ленточными фундаментами, выведенными в штольнях, не позволяло, однако, опирать непосредственно на грунт своды тоннельной обделки. Для этого предварительно (до проходки калотт) в колодцах были устроены столбы под ленточными фундаментами в штольнях. Эти столбы размерами поперечного сечения 3 × 1,5 *м*.

Только после этих мероприятий оказалось возможным в данных условиях раскрывать калотты размерами не больше 3 *м* и бетонировать своды.

По мере увеличения длины подземных выработок выявилась значительная утечка сжа-

того воздуха по поверхности разработок. При этом не представилось возможным поддерживать необходимую величину давления воздуха. Для уменьшения утечки воздуха пришлось прибегнуть к временной облицовке штольневых выработок бетоном.

На участке тоннеля третьей шахты, ввиду наличия ярко выраженных плывунов, работы производились следующим порядком. Предварительно были пройдены калотты штольневого типа шириной лишь 2 *м* в свету. Из них опускались колодцы до встречи с надежной породой, устраивались стены, затем ставились кружала и бетонировались своды. Такие двухметровые прорези с тоннельными обделками до надежного грунта производились через 3 *м*. В этих промежутках впоследствии раскрывались калотты и бетонировались своды, связанные арматурой с конструкцией соседних колец, опиравшихся уже непосредственно на устойчивые породы.

При проходке тоннеля вблизи многоэтажного дома во избежание выпуска грунта и деформаций было применено искусственное замораживание грунтов выше шелыги свода тоннеля. Вдоль дома было забурено 8 рядов скважин. Крайний ряд скважин возле дома был забурен до известняков, а остальные скважины были пробурены лишь до шелыги свода тоннеля. Концы труб, попадавших в свод, в процессе производства бетонных работ вырезались. Лонгарины калоттного профиля были вынесены за пределы наружного очертания свода, что создало удобства в устройстве подшивки изоляционного слоя и обеспечении температуры, необходимой для нормального схватывания бетона свода, уложенного в замороженной зоне. Так как замораживание было распространено выше шелыги свода, а слабый грунт выклинивался в калоттной части профиля, то разработка калотты и кладка сводов производились, кроме того, с применением сжатого воздуха. Для этого были использованы шлюзы двухпутного тоннеля четвертой шахты. Величина воздушного давления на этом участке колебалась в пределах от 0,2 до 0,8 *ат*.

При раскружаливании сводов на участке первой шахты на нескольких кольцах свода был обнаружен ряд трещин, которые образовались вследствие осадки свода в период его выстаивания на кружалах. В процессе проходки штольни среднее опорное ядро сильно деформировалось, что привело к осадкам кружал, свода и появлению трещин в последнем. Трещины были ликвидированы путем нагнетания цемента в тело кладки. Имевшие здесь место деформации указывают, что в условиях таких слабых грунтов проходка широких транспортных штолен, при которых в значительной степени ослабляется среднее земляное ядро, является неприемлемым: следует настоятельно выдерживать принцип проходки малыми частями.

При проходке некоторых штолен и выработок, несмотря на исключительно тщательное крепление, имели место выпуски грунта, появление усиленного давления на крепи, деформация верхняков рам в верхней штольне и калотте. Кроме того, проявлялось и тангенциальное давление, приведшее к смещению и деформации штольневых рам. Штендеры некоторых штольневых рам становились под углом 80° к горизонту. Это потребовало производства усиленного крепления специальными подкосами и постановки унтерцугов. Принятыми мерами удалось в значительной степени остановить дальнейший сдвиг штольневого крепления. Под влиянием вертикального горного давления обычные штольневые рамы при наличии полного оклада все же вдавливались в грунт. Выявилась также опасность того, что не будет выдержана проектная толщина свода. Поэтому при проходке верхняк и лонгарины устанавливались с завышением от 15 до 25 *см* против проектной отметки внешнего очертания свода.

При креплении штольневых выработок во избежание выпуска плывунов работы на некоторых участках пришлось вести со шпунтованными марчеванами. Это в значительной степени тормозило работы. Несмотря на наличие сжатого воздуха и довольно мощное крепление, горное давление доставляло строителям тоннеля большие осложнения. Потребовалось весьма тщательно следить за креплением, во-время укреплять, перекреплять и ставить целую систему дополнительных креплений. Некоторые из штолен приходилось иногда забучивать лесоматериалом во избежание полной поломки конструкции рам, претерпевших усиленные деформации. Большие трудности возникали и при пересечении участков выклинивания юрских глин, которые, будучи размыты водой, в разжиженном состоянии также проявляли усиленное давление на установленные крепления.

Забивка шпунтовых ограждений производилась с особой тщательностью; малейшее отклонение шпунта от задаваемого направления

и образование щелей вело к прорывам плывуна, заполнявшего выработки. В особенности это ощущалось при проходке колодцев для устройства в них стен. Требовалось исключительно аккуратно конопатить паклей образовавшиеся щели или прибегать к забивке второго и третьего рядов шпунта.

Следует отметить, что воздушное давление свыше 0,8 *ат* вызывало значительную его фильтрацию и утечку. Вместе с тем и при этой величине давления не представлялось возможным отжать воду и осушить грунты. Приняли следующие меры: объем выработок и поверхность их обнажения были сведены к минимуму, все щели между марчеванами по кровле и по бортам выработок оштукатурены цементом. Затем была установлена специальная воздухонепроницаемая перемычка в нескольких метрах непосредственно у забоя и подведена магистраль для подачи сжатого воздуха с доведением расхода его до 100 $м^3/мин$. Несмотря на эти меры, все же не удалось в значительной степени удерживать сжатый воздух и избавиться от имевших место просадок и воронок, куда устремлялся сжатый воздух. Тампонирование воронок также не давало особых результатов, так как воздух находил себе другие тракты и места для прорывов на поверхность.

Вследствие невозможности в местных геотехнических условиях поднять давление выше 0,8 *ат* вода с грунтом проникала непосредственно в забой. Была опасность, что вода с грунтом в состоянии забить пространство между забоем и перемычкой. При таком положении пришлось отказаться от перемычек в непосредственной близости к забою. Подземная обстановка настолько осложнялась, что дальнейшая проходка под сжатым воздухом не представлялась возможной. Проходку участка слабых грунтов было решено провести с применением замораживания грунтов. Большие затруднения возникли при пробивке фурнелей для соединения нижней штольни с верхней. Предпринятые попытки приводили лишь к выпуску грунта. В одном случае пробивка фурнелей снизу вверх привела к выпуску слабого грунта в объеме до 80 $м^3$.

Следует отметить исключительно тяжелые условия разработок по кровле замороженного грунта в верхней штольне. Дело в том, что кровля верхней штольни представляла замороженный, крепкий массив, требовавший для своей разработки применения отбойных молотков, в то время как нижнюю часть профиля прорезали плывуны. Таким образом, рабочим приходилось работать в присутствии значительного притока воды и разжиженного грунта, несмотря на наличие сжатого воздуха под давлением 0,3 *ат*. Под этим давлением отжать воду в выработках не удалось. Работы по проходке указанного штольневого профиля производились следующим образом. Сначала раскрывался верхний ярус забоя, примерно на $^2/_3$ по высоте, и производилось его раскрепление. Остальная часть профиля из слабых грунтов охватывалась шпунтовым ограждением с раскреплением системой филат и ремантин. Плывун ограждался, таким образом, с четырех сторон и затем удалялся. Подобные затруднения, но еще в большей степени, появлялись также и при проходке калотт.

Мощность компрессорных установок для проходки под сжатым воздухом участка была 678 $м^3/мин$.

в) Сложный комплекс работ был проведен при сооружении тоннеля, поперечное сечение которого в нижней части включало коренные устойчивые породы карбонного комплекса, а в верхней пересекало плывунные породы размыва староречья. При проходке нижней штольни этого тоннеля в известняках уже был выявлен значительный приток подземных вод. Проходку указанного участка было решено провести, применяя сжатый воздух. Шлюзовая камера была устроена на полное сечение двухпутного профиля тоннеля. Камера включала семь шлюзов, из них три людских и четыре материальных. Длина шлюзовой камеры 6 *м*. Во избежание значительной утечки воздуха через известняки нижняя штольня была закреплена бетоном. Вначале работы под сжатым воздухом велись при давлении 0,8 *ат*. Впоследствии, в связи с насыщением грунта сжатым воздухом, оказалось вполне достаточным держать давление в 0,5 ат. Разработка верхнего профиля велась с передовой штольни, штендеры которой ставились непосредственно на известняк. Это и вызвало различные размеры штольни по высоте: от 2,5 до 3,5 *м*, а иногда и до 5 *м*. При этом сечение штольни с 8 $м^2$ доходило до 25 $м^2$. Разработка калотты велась также под сжатым воздухом, причем штендеры ставились непосредственно на известняк во избежание возможных осадок при проявлении усиленного горного давления вышележащих неустойчивых пород. Проходка нижней штольни

в известняках, производившаяся вначале взрывным способом, при наличии сжатого воздуха велась отбойными молотками, что в значительной степени снижало темпы проходки. После проходки штольни, во избежание значительных утечек воздуха через известняк, потолок и кровля немедленно бетонировались. Калотты разрабатывались шириной 3 *м*. Был установлен строгий порядок последовательности раскрытия калотт. К раскрытию калотты последующего кольца приступали после того, когда свод предыдущего кольца был полностью забетонирован. Верхнюю штольню вели заходкой лишь на длину 3 *м* от раскрываемой калотты, несмотря на возможность форсированной проходки ее. Во избежание увеличения объема выработок под сжатым воздухом, а равно необходимости держать временное крепление лишнее время система последовательного раскрытия калотт была строго выдержана.

При раскрытии профиля были применены металлические лонгарины из рельсов или двутавровых балок, которые оставались за сводом, чтобы не нарушать окружающего грунта в период перекрепления.

Особое внимание уделялось затяжкам кровли, бортов и «маскировке» лба забоя, чтобы исключить возможность значительных утечек сжатого воздуха и выпуска неустойчивых пород. Производилась тщательная конопатка швов между марчеванами. В процессе проходки тоннеля под сжатым воздухом был встречен ряд замораживающих скважин, которые предназначались для укрепления верхней зоны грунта у домов во избежание выпуска породы. Таким образом, приходилось вести проходку под сжатым воздухом, пересекая замороженный массив. Замораживающие трубы, прорезавшие профиль тоннеля и входившие в калотту, частично срезались, будучи предварительно выключены из общей циркуляционной замораживающей сети. Трубы, которые не были еще включены в замораживающий массив, срезались и в них забивались пробки как снизу, так и сверху. Однако имел место случай, когда выбило пробку в трубе и получился прорыв сжатого воздуха вместе с песком на высоту до 12 *м* от поверхности. Это сопровождалось значительным снижением воздушного давления в тоннеле.

В электронагреве бетона не было прямой необходимости (как это предполагалось первоначально), так как, несмотря на наличие замороженного массива, в присутствии сжатого воздуха температура была порядка 10—12° С. Достаточной теплоизоляцией являлись марчеванные доски при законопаченных швах.

К разработке штроссного профиля приступили после десятидневного возраста бетонного свода, который достигал тогда своей проектной прочности в 130 *кг/см*^{2}. Дальнейшая разработка боковых частей штроссы и подводка стен (уже без сжатого воздуха) производились при помощи аммонала. В определенных случаях взрывные работы применялись также и при проходке под сжатым воздухом. В период производства паления шпуров все находившиеся в зоне сжатого воздуха рабочие выводились за пределы шлюзовых камер.

Следует отметить, что процесс проветривания производился в условиях сжатого воздуха частично через известняки, которые довольно интенсивно поглощали сжатый воздух с продуктами взрывов.

В данных условиях опыт комбинированной проходки под сжатым воздухом при замороженном массиве доказал возможность успешного сооружения тоннельной обделки в условиях пород с резко отличающимися коэфициентами крепости (плывун и скала в одном поперечном сечении тоннеля).

г) *Сооружение тоннелей Московского метрополитена методом опускания кессонов-тоннелей.* На участке трассы тоннеля, пересекавшего мощную толщу плывунов, были опущены три кессона-тоннеля длиной по 25 *м* каждый, с разрывом в 3 *м* между отдельными секциями. Кессон-тоннель представлял собой железобетонную конструкцию, которая, помимо тоннельной секции, имела внизу рабочую камеру. Общая длина участка кессонов-тоннелей составляла $(3 \times 25) + (2 \times 3) = 81$ *м*. Конструкция кессонов сооружалась в котловане; по дну его была сделана песчаная подготовка слоем в 1,5 *м* с целью обеспечения равномерной осадки кессона в процессе его бетонирования. Кессоны были опущены до проектной отметки с постановкой их на известняк. После вскрытия котлована и укладки песчаной подушки толщиной в 1,5 *м* были уложены лежни и произведен монтаж ножа и установка внутренней и внешней опалубки кессона, а затем приступили к бетонированию его. После снятия кессонов с подкладок установили арматуру и опалубку тоннельной секции, при одновременном монтаже шлюзовых аппаратов. После бетониро-

вания тоннельной секции, устройства изоляции и внутренней защитной железобетонной рубашки тоннель-кессон был готов к опусканию. Опускание кессона-тоннеля до уровня

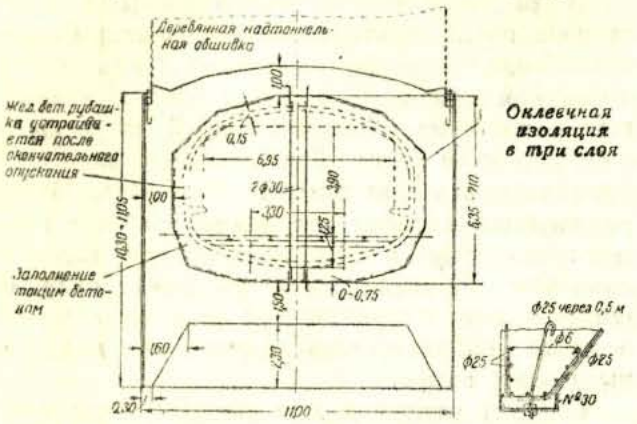


Рис. 402. Конструкция кессона-тоннеля

грунтовых вод производилось без применения сжатого воздуха.

Конструкция кессона-тоннеля проверялась расчетом по нескольким этапам работ, а именно: а) в период снятия кессона с подкладок, когда в сечениях элементов потолка развивались моменты порядка 313 *т/м*, б) в период опускания кессона без сжатого воздуха, когда расчетные моменты в сечениях элементов потолка достигали 136,7 *т/м*, и в) в период опускания кессона под сжатым воздухом. Конструкция потолка рассчитывалась как на положительный, так и на отрицательный момент при изгибе потолка вверх под давлением в 20 *т/м*^{2} (рис. 402, 403).

На каждый кессон вес арматуры был около 50 *т* (при расходе арматуры на 1 *м*^{2} площади кессона около 212 *кг*). Производство бетонных работ по тоннельным секциям № 1 и 2 велось в зимнее время, а по тоннельной секции № 3 — в весеннее время. Кессон выдерживался в опалубке в продолжение 20 дней. Снятие кессонов с подкладок производилось с большой осторожностью, так как напряжение на растяжение, развиваемое при этой операции в конструкции, должно быть минимальным. После снятия кессона с подкладок все же были обнаружены волосяные трещины, не имевшие, однако, практического значения.

Производство работ по опусканию кессона под сжатым воздухом сначала было запроектировано с применением обычных шлюзовых аппаратов при наращивании шахтных труб в процессе опускания кессонов-тоннелей. Однако такой способ производства работ требует обычно снятия кессонного аппарата в период наращивания шахтных труб, что задерживает производство основных работ. Для устранения этих неудобств была применена система, при которой шлюзовые аппараты устанавливаются непосредственно в тоннельной секции, причем длина шахтных труб остается

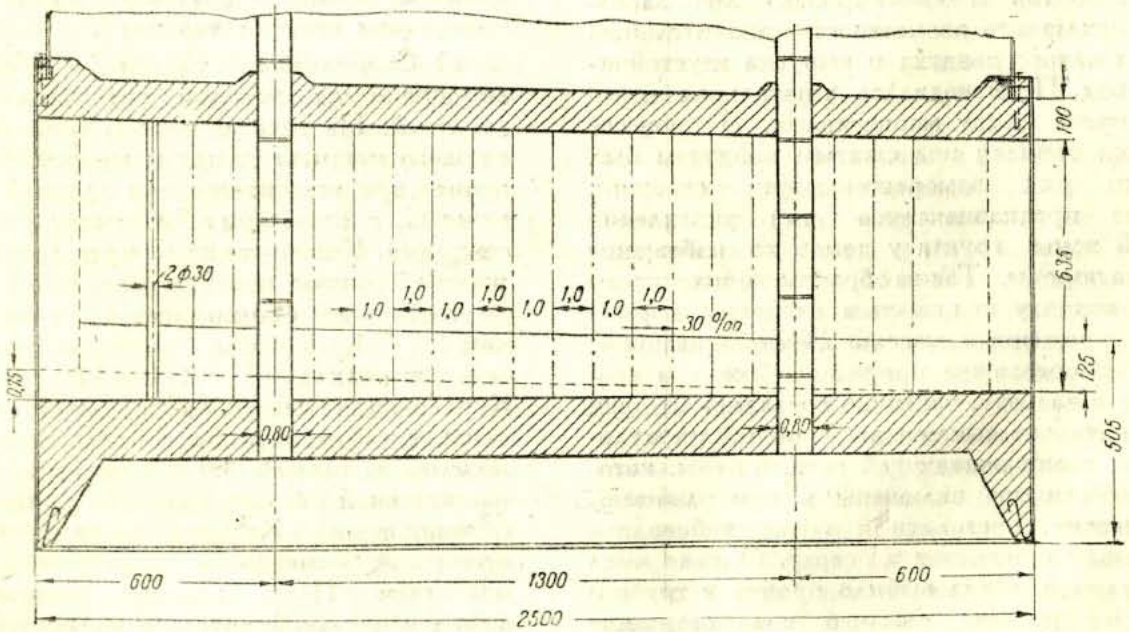


Рис. 403. Конструкция кессона-тоннеля

постоянной. В тоннельной секции были устроены две шахты: одна диаметром 1,5 *м* и другая диаметром 3 *м*. Через первое отверстие выдавалась порода, а второе отверстие было оборудовано для людского прохода, пропуска трубопроводов и дополнительных двух бадей.

борка породы из-под ножа при уменьшении давления сжатого воздуха. Выдаваемая из рабочей камеры порода непосредственно укладывалась на конструкцию опускаемого кессона-тоннеля.

Для примера приводим последовательность

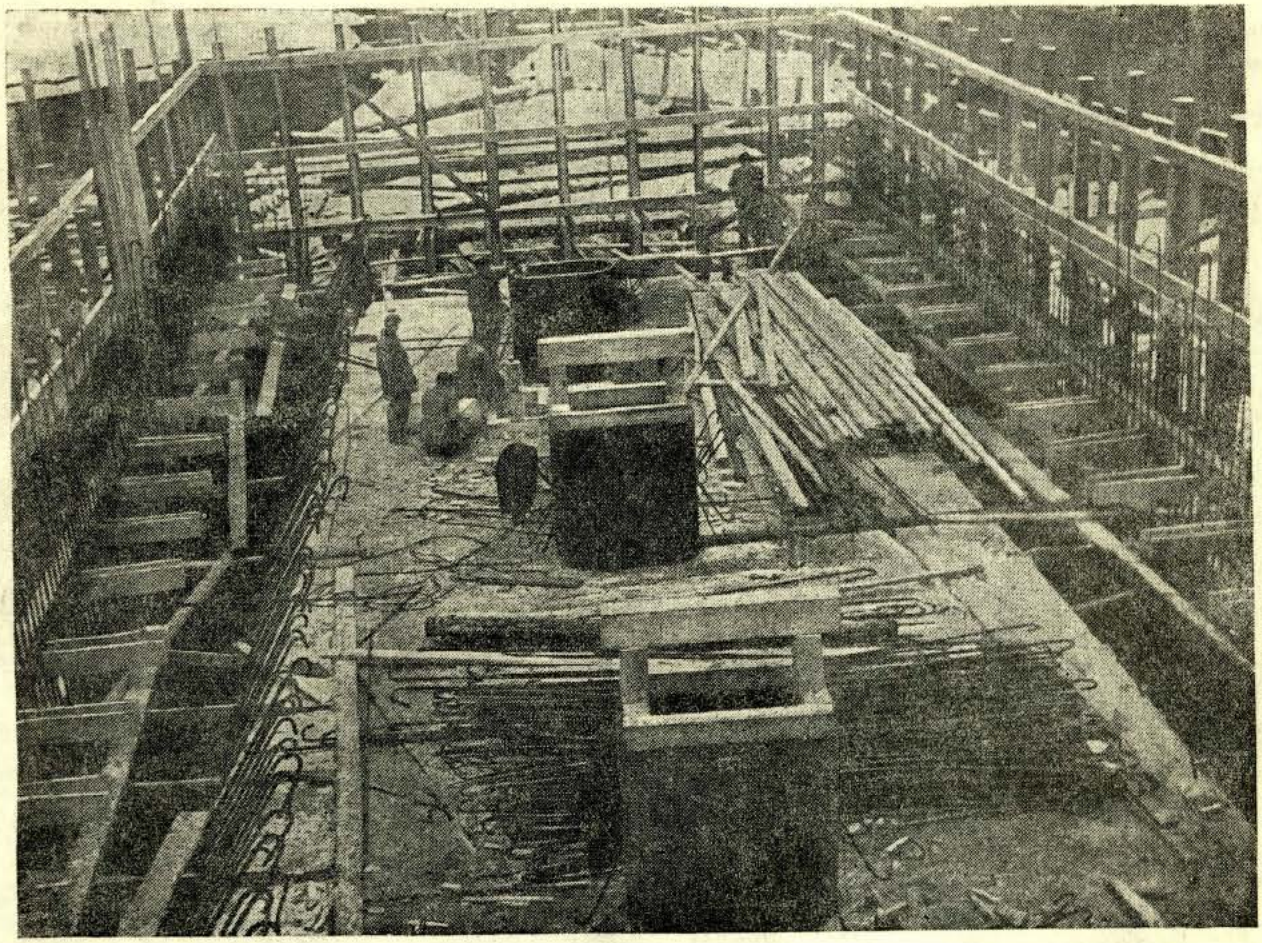


Рис. 404. Вид работ по сооружению кессона-тоннеля

Этим удалось в значительной степени увеличить пропускную способность шлюзовых аппаратов и ускорить самый процесс опускания кессонов-тоннелей. В каждой тоннельной секции были устроены по три шлюзовых аппарата (рис. 404, 405).

Вес каждого кессона-тоннеля составлял около 5 000 *т*. Вначале под влиянием собственного веса кессон-тоннель был опущен со скоростью до 1,5 *м* в сутки; при этом посадка кессона производилась без стравливания сжатого воздуха и выемки породы из-под ножа. По мере углубления кессона до 12 *м* в связи с нарастанием трения боковых поверхностей производилась значительная вы-

работ по сооружению кессона-тоннеля № 3. Предварительно был вырыт котлован глубиной 4,7 *м* и собрана кессонная секция. Опускание тоннеля до уровня грунтовых вод производилось без сжатого воздуха. Дальнейшее опускание осуществлялось под сжатым воздухом. Рабочая камера имела высоту 2,3 *м* и объем 485 $м^3$. Расход воздуха в период опускания кессона-тоннеля равнялся 25 $м^3/мин$. Отклонение кессона в плане от проектного направления не превышало 15 *см*, что составило лишь 50% имевшегося запаса в габарите тоннеля на отклонение (проектом предусматривалось 30 *см*). Относительно отметки подошвы тоннеля следует указать, что

посадка кессона-тоннеля была произведена по проекту. Окончательная отметка была получена дополнительным выравниванием бетона в лотке кессонной секции.

Опыт опускания тоннелей-кессонов выявил следующее среднее распределение времени по стадиям изготовления и опускания конструкции: а) на сооружение собственно кессона требовалось около 30% времени, б) на сооружение тоннельной секции — 14%, в) на опускание кессона-тоннеля — 56% времени.

Стыкование тоннельных секций между собой было произведено открытым способом сверху. Используя торцовые стены тоннеля, производилось соответствующее крепление откосов котлована стыковой зоны.

Снабжение кессонов № 1 и 2 сжатым воздухом обеспечивалось двумя компрессорами общей производительностью в 53 $м^3/мин$. Расход воздуха по кессону № 2 в период его опускания оставался примерно постоянным — 27 $м^3/мин$.

Опыт проходки тоннелей под сжатым воздухом на временном деревянном креплении при каменной обделке и опускании кессонов-тоннелей на указанных участках выявил, что стоимость 1 *пог. м* сооружения при тоннелях-кессонах примерно на 10% больше, чем сооружение тоннеля горным способом под сжатым воздухом. Однако следует отметить, что опускание кессонов-тоннелей может быть произведено, в зависимости от местных условий и глубины заложения, гораздо более быстрыми темпами, чем горизонтальная проходка под сжатым воздухом.

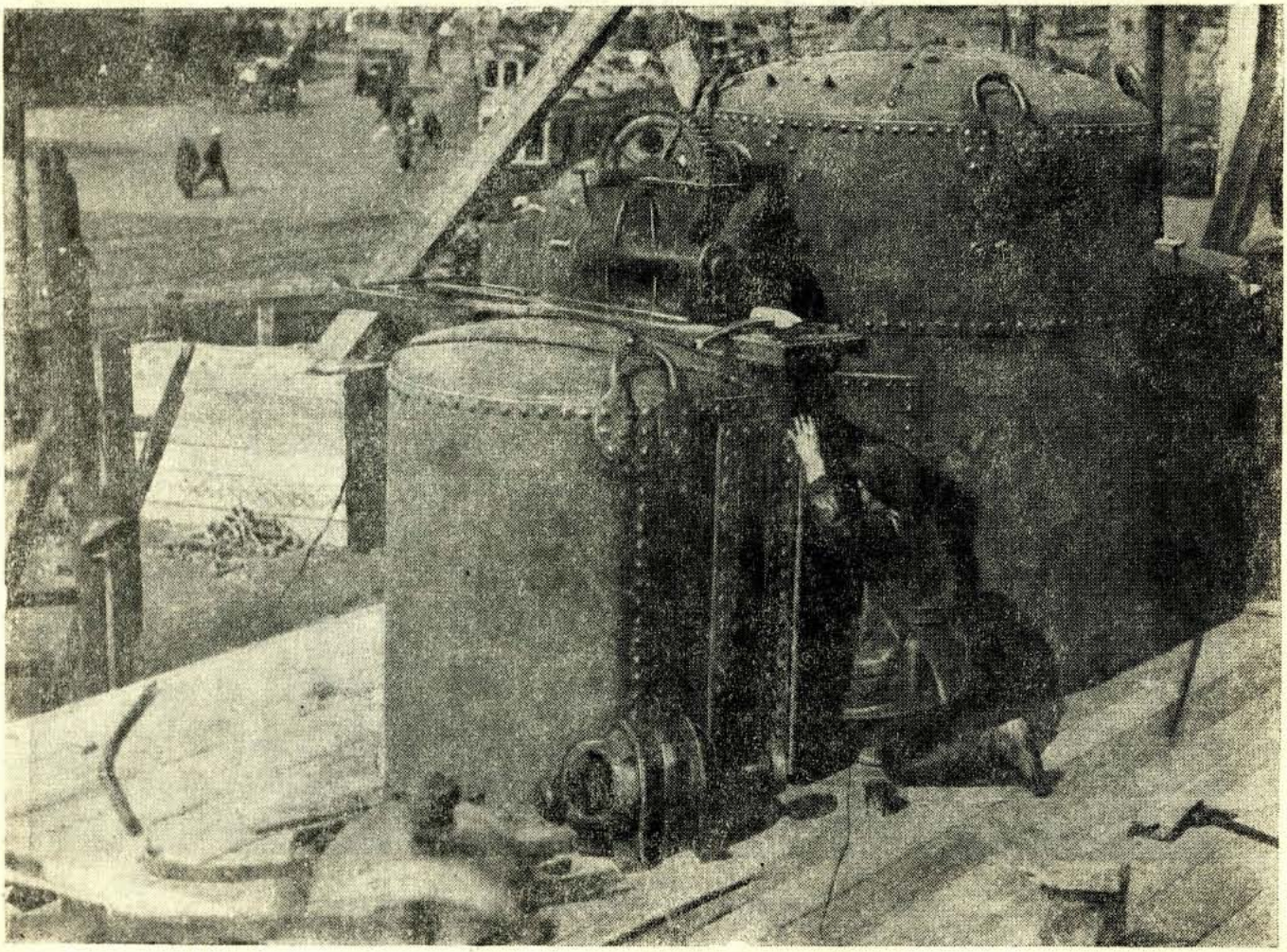


Рис. 405. Вид шлюзовых аппаратов кессона-тоннеля

3. ХИМИЧЕСКОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ

Метод химического закрепления грунтов получил в последнее время в Советском Союзе и за границей большое распространение.

Сущность этого метода заключается в том, что под влиянием последовательного нагнетания под давлением двух химических реагентов в слабый, даже плывунного характера грунт может произойти мгновенное закрепление его в массивный конгломерат.

Первый реагент является концентрированным раствором кремнекислого натра или калия, а второй — соляным раствором. Рецептура их держится за границей в секрете.

Под давлением до 100 *ат* через цельнотянутые стальные трубки диаметром 25 *мм* растворы эти проникают в самые мелкие поры, вытесняют содержащуюся в грунте воду и скрепляют между собой частицы грунта. Эффект в значительной степени зависит от физико-химических свойств грунта, а главное — от степени содержания кремния. Особенно хорошо закрепляются гравелистые грунты и кварцевые пески. Глинистые примеси значительного влияния на процесс химического закрепления (как это имеет место при цементации) не оказывают. Величина сопротивления химически закрепленного массива в значительной степени зависит от крупности частиц грунта, давления вводимых растворов, концентрации хамикалий и их количества. Сопротивление химически закрепленного песчаного грунта колеблется в пределах 12—35 *кг/см*^{2} для мелкозернистых песков. Имеются случаи закрепления гравелистых грунтов с пределом прочности до 100 *кг/см*^{2}, что подходит уже к крепости бетона.

Сопротивление закрепленного массива растяжению составляет от 1,5 *кг/см*^{2} до 12 *кг/см*^{2}, что равняется $^1/_8$ от величины сопротивления на сжатие.



Рис. 406. Кривые проф. Гутлана, характеризующие устойчивость химически закрепленного бетонного образца против агрессивных факторов сравнительно с нормальным образцом

Преимущества этого метода весьма значительны. Строители получают возможность вести тоннельные работы без подвижек, осадок и нарушения земляного массива, что в условиях городского тоннельного строительства имеет особое важное значение. Закрепление производится моментально и не связано с затратой времени на схватывание. Немедленно после окончания процесса химизации закрепленный массив может быть подвергнут рабочей нагрузке. При этом значительно возрастает удельный вес и плотность закрепленного грунта (примерно на 10—13%). В последнее время достигают водонепроницаемости тоннельных сооружений при химическом закреплении грунтов, а главное—устойчивости против вредного воздействия агрессивных грунтовых вод. В этом отношении чрезвы-

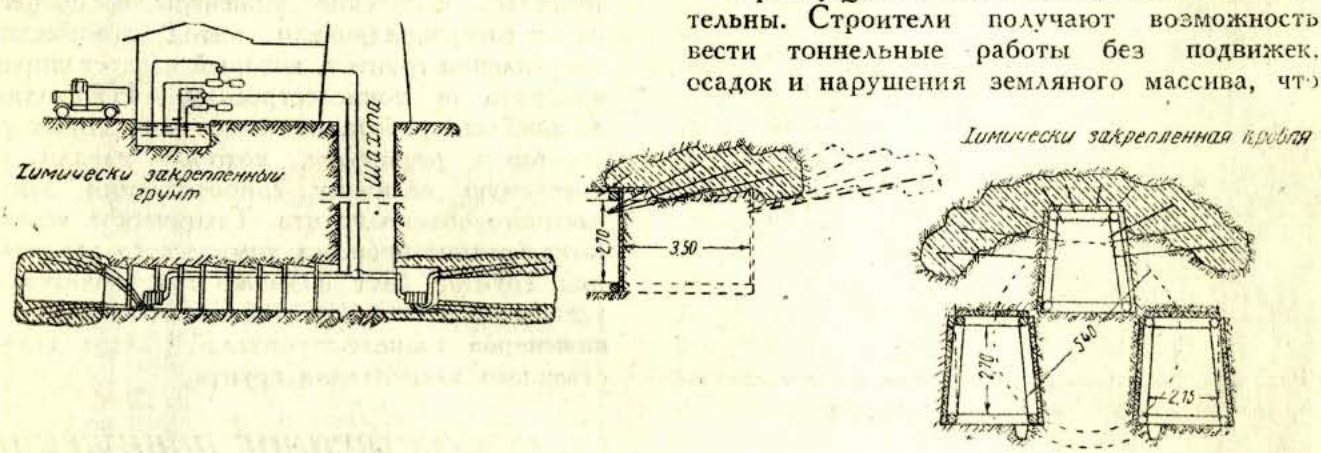


Рис. 407. Проходка тоннеля Московского метрополитена при химическом укреплении грунта

чайно интересны результаты лабораторных испытаний, произведенных проф. Гутланом с образцами из цементного раствора 1 : 10 при 7% воды. При семидневном возрасте

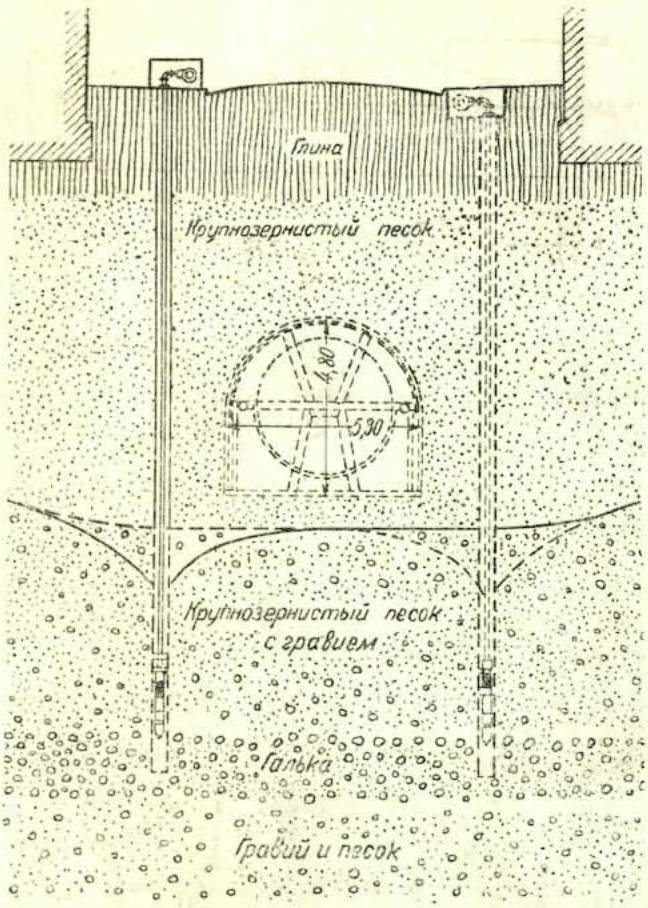


Рис. 408. Сооружение тоннеля при искусственном водопонижении (кривая депрессии)

в нормальных условиях часть образцов была подвергнута химическому закреплению; после этого они были опущены в десятипроцентный «агрессивный» раствор сернокислого натра. После 28 дней обычные образцы имели сопротивление 59 *кг/см*^{2}, а химически закрепленные—202 *кг/см*^{2}. По истечении полугода первые имели сопротивление 37 *кг/см*^{2}, вторые — 265 *кг/см*^{2} (рис. 406). После 300 дней пребывания в растворе обыкновенный образец разваливался, а химически закрепленный образец в этом же возрасте имел временное сопротивление около 258 *кг/см*^{2}.

Этим свойством устойчивости химически закрепленного грунта от вредного действия агрессивных вод сейчас широко пользуются для строительных целей. При проходке шахт глубиной до 500 *м* применяли химический метод для глушения напора воды до 40 *ат*.

При проходке тоннеля в слабых грунтах удается химически закреплять временный земляной свод, под защитой которого сооружается постоянная тоннельная обделка.

Стоимость химического закрепления грунтов колеблется в весьма широких пределах и зависит от объема работ, количества и концентрации вводимых реагентов, характера грунта, назначения работ. Для ориентировочных подсчетов можно принимать стоимость 1 *м*^{3} химически закрепленного грунта равноценной стоимости 1 *м*^{3} бетонной кладки.

Большие успехи в отношении химического закрепления грунтов достигнуты советскими инженерами при проходке тоннелей на первоочередной линии Московского метрополитена под руководством проф. Б. А. Ржаницына (рис. 407). Был открыт ряд реагентов, позволивших в широком производственном масштабе провести сложные работы по укреплению грунтов в связи с прокладкой тоннелей. Советские инженеры в процессе работ совершенствовали метод химического закрепления грунтов, который следует широко внедрить в тоннелестроении. Необходима дальнейшая работа по изысканию новых реагентов и рецептуры, которые давали бы требуемую величину сопротивления закрепленного объема грунта. Техническое усовершенствование процесса химического закрепления грунтов даст возможность значительно удешевить этот чрезвычайно заманчивый для инженеров тоннеле-строителей метод искусственного закрепления грунта.

4. ИСКУССТВЕННОЕ ПОНИЖЕНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД

Прокладка тоннелей в водоносных песчаных грунтах может быть произведена при помощи искусственного понижения уровня грунтовых вод. При непрерывной откачке через трубчатые колодцы из равномерно отдающего воду пласта грунтовой поток принимает форму гиперболической поверхности вращения, поднимающуюся вокруг оси колодца (рис. 408).

Исключительный эффект дает водопонижение в том случае, когда имеются песчаные гравелистые грунты, свободные от примесей глины.

Работы по водопонижению начинаются с закладки по контуру прокладываемого тон-

неля системы колодцев ниже подошвы его. Через вставленные в колодец всасывающие трубы производится откачка притекающей воды. Труба (диаметром 150—280 *мм*) снабжена в нижней части водонепроницаемыми фильтрами с отверстиями, обернутыми вокруг сеткой из медной или латунной проволоки (конструкция фильтров в каждом отдельном случае устанавливается в зависимости от физико-механических свойств пересекаемых грунтов и гидрогеологических условий массива), обеспечивающей от выноса грунта водой в процессе откачки. Откачка производится через вставленные в колодец всасывающие трубы диаметром 50—100 *мм*, соединяющиеся всасывающими сборными магистралями, идущими к насосам. Применением центробежных насосов уровень грунтовых вод в трубчатом колодце обычно понижается на 3—5 *м*. Больше понизить не удается вследствие ограниченности величины нормального всасывания и потерь в трубопроводах. Необходимость более глубокого понижения грунтовых вод привела бы к многоступенчатой системе в виде двух, трех, четырех и больше ярусов трубчатых колодцев. При многоярусной системе сначала включается в работу верхний ярус; когда достигается понижение горизонта на 4—5 *м*, включается второй ярус, и т. д.

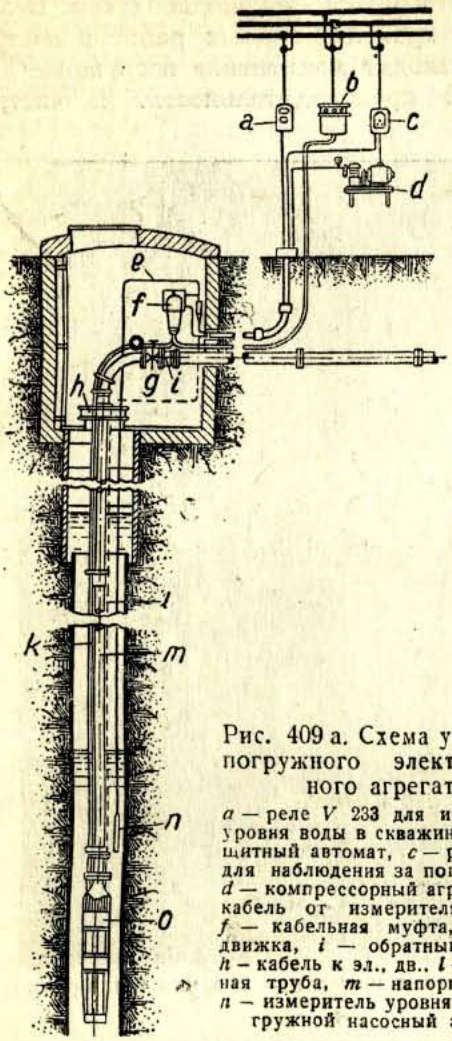


Рис. 409 а. Схема установки погружного электронасосного агрегата:

а — реле *V* 233 для измерителя уровня воды в скважине, *b* — защитный автомат, *с* — реле *V* 242 для наблюдения за погр. эл. дв., *d* — компрессорный агрегат, *е* — кабель от измерителя уровня, *f* — кабельная муфта, *g* — задвижка, *i* — обратный клапан, *h* — кабель к эл., дв., *l* — воздушная труба, *m* — напорная труба, *n* — измеритель уровня и *o* — погружной насосный агрегат

Многоступенчатая система применена в условиях открытого способа работ. Например, при постройке шлюзов в Эмбеле применением многоярусной системы удалось достигнуть водопонижения на 22 *м*.

Для поддержания пониженного уровня воды во время постройки должна быть обеспечена полная надежность и непрерывность работы всей системы. В резерве надо обязательно иметь два независимых друг от друга источника энергии, так как в случае аварии единственного источника энергии затопление тоннельных работ было бы неизбежно. В практике водопонижения находят применение гидроцентробежные насосы типа ВК, КЯТО и других систем, действующие давлением воды, и мамут-насосы, работающие под сжатым воздухом. Мощность насосов рассчитывается в строгом соответствии с дебитом грунтовых вод, поступающих к колодцам, ибо преувеличенная мощность насосов может привести к разрыву струи. Для правильной проектировки водопонижающей установки необходима пробная откачка, исследование всего комплекса физико-механических свойств грунта, режима грунтовых вод, положения водо-

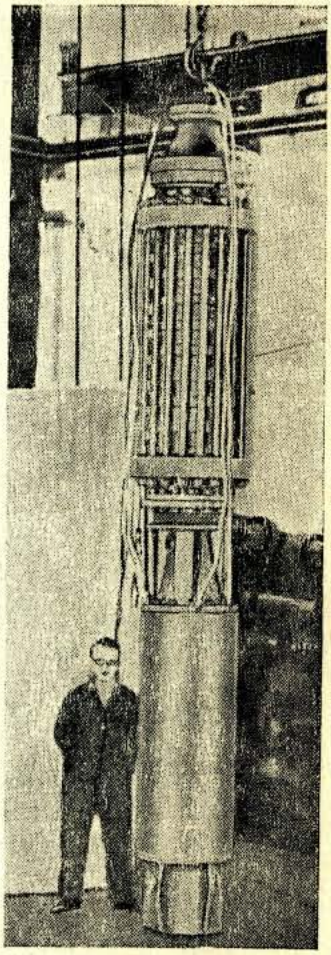


Рис. 409 б. Погружной насос системы Тайлора мощностью 350 *л. с.*

носных пластов и установление коэфициента водопроницаемости данного грунта.

В настоящее время большое распространение получили нагнетательные глубинные насосы, снабженные герметически защищенными от воды моторами, опускаемые в буровые скважины на нужную глубину (рис. 409 а).

По трассе, за пределами сечения прокладываемого тоннеля, вводятся обсадные или фильтровые трубы диаметром 350 *мм;* в такую трубу и погружается глубинный насос мощностью 22 *квт*, достаточный для эффективного водопонижения по данному радиусу. При закладке ряда скважин с насосами удается достигнуть такой схемы водопонижения, при которой с любой глубины под требуемый напор подается вода с соответствующим расходом. Применяя глубинные насосы, избавляются от ряда недостатков, с которыми неразрывно связана обычная система водопонижения: при малейшей неплотности прокладок соединений всасывающих труб происходит всасывание воздуха и разрыв струи воды в скважинах, идущих к насосу, а перерыв в откачивании воды неизбежно вызывает затопление работ.

Наблюдение за работой одного глубинного насоса или группы их может вести один человек на центральной станции по щиту, где концентрируется сигнализация по каждому агрегату. Проникающая через чехол грунтовая вода вытесняется сжатым воздухом. В американской практике горных работ в настоящее время находят применение погружные насосы большой производительности. В частности, имеются в виду электронасосы системы Тайлора мощностью до 350 *л. с.* (рис. 409 б).



Рис. 410. Тоннель под р. Шельдой (комбинирование водопонижения и сжатого воздуха при проходке)

На основании опыта установлено, что при правильном ведении водопонижающих работ значительных осадок не происходит. При хороших фильтрах удаление воды из песчаных грунтов обычно почти не сказывается практически на изменении объема грунта.

Метод искусственного водопонижения нашел широкое распространение при производстве городских тоннельных работ в условиях водоносных грунтов. Его правильное применение не вызывает нарушения окружающего массива и, не давая осадок, позволяет избегнуть деформации подземных сооружений и строений на поверхности.

В зависимости от местных топографических

условий и характера напластования водоносных грунтов метод искусственного водопонижения может применяться и для некоторых горных тоннелей. Это особенно важно при пересечении нарушенных контактных зон, когда применение обычного водоотлива с выносом частиц, грозит опасностью вовлечь породу в движение и как результат получить значительное горное давление на крепи и осложнение самих тоннельных работ.

В тех случаях, когда гидростатическое давление требует для своего уравновешивания большой величины сжатого воздуха, является весьма целесообразным характеризуется понижением уровня воды до отметки 6 *м*; при этом давление сжатого воздуха удалось довести до 1,4 *ат*.

Эта комбинированная система водопонижения и сжатого воздуха требовалась и на береговых участках, там, где тоннель наполовину проходил в боомской глине, а в верхней части своего профиля попадал в пески. Водопонижающая установка включалась в работу в тот момент, когда щит уже подходил на расстояние 20 *м* от осушаемого участка.

Применению этой системы предшествовал ряд опытов и пробных откачек. Понижение уровня воды наблюдалось через ряд контроль-

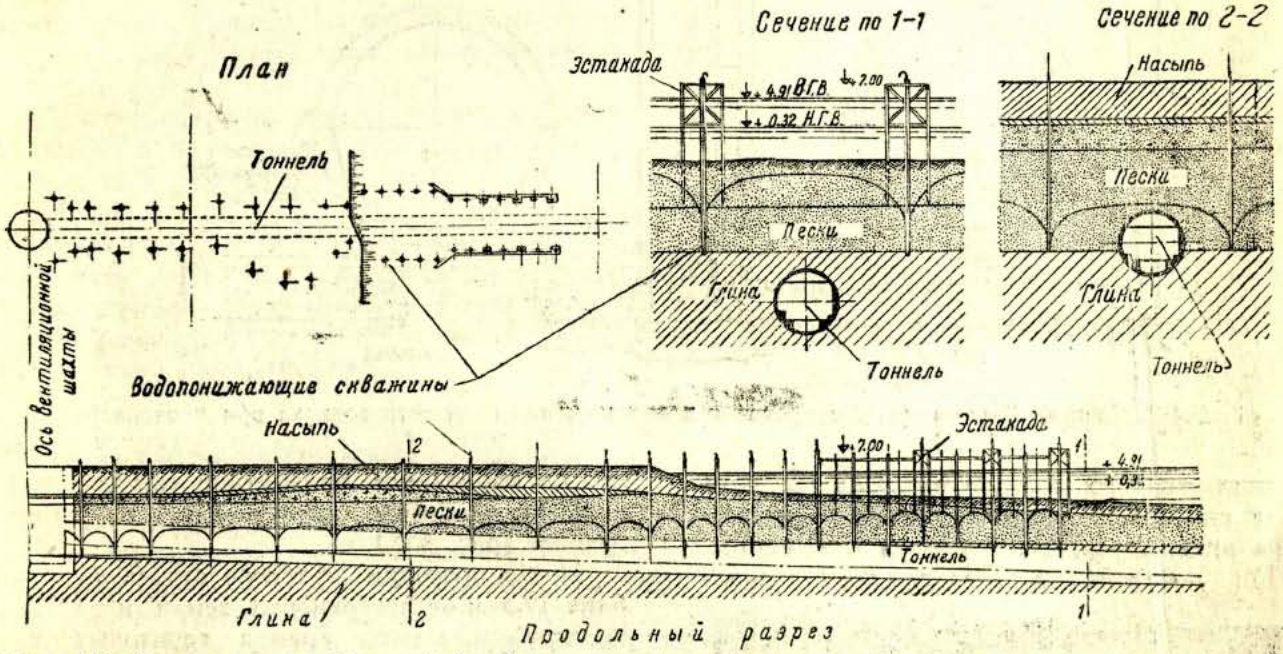


Рис. 411. Тоннель под р. Шельдой (комбинирование водопонижения и сжатого воздуха при проходке)

снять до пределов возможности гидростатический напор методом водопонижения, а оставшийся столб воды стжимать при помощи сжатого воздуха (рис. 410, 411). Эта система была применена при проходке щитом под руслом р. Шельды (в Антверпене). Водопонижение было осуществлено при помощи нагнетательных глубинных насосов, снабженных герметически защищенными от воды моторами, опускаемыми на требуемую глубину в буровые скважины. Со специально проложенной эстакады (с воды) было произведено бурение двадцати четырех скважин. Были пробурены обсадные трубы диаметром 350 *мм*. В каждую из труб помещался глубинный насос мощностью в 22 *квт*, достаточный для эффективного водопонижения по данному радиусу. Эффект, достигнутый при водопонижении, ных скважин. При этом выявлялись кривая депрессии, радиус кривой депрессии, величина коэфициента фильтрации грунта. Коэфициент фильтрации в *м/сек* в грунтах р. Шельды оказался равным 0,0000475—0,0000551. При расчете водопонижающей установки базировались на известном уравнении Форхгеймера:

$$y^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi kn}\left(ln\frac{x_1}{r_0} + ln\frac{x_2}{r_0} + \ldots ln\frac{x_n}{r_0}\right),$$

где:

y — высота какой-либо точки поверхности воды на расстоянии x от оси колодца, h — высота воды в колодце над водонепроницаемым слоем, r_0 — радиус действия колодца, n — количество колодцев, Q — дебит воды, откачиваемой из всех n колодцев $\left(q = \frac{Q}{n}\right)$, k — коэфициент фильтрации (*м/сек*).

Примененная система дала большой эффект. Впервые она вводилась после опыта применения комбинации сжатого воздуха и водопонижения, успешно проведенного в Чикаго при сооружении тоннельного коллектора диаметром 3 *м* в водоносных грунтах, при

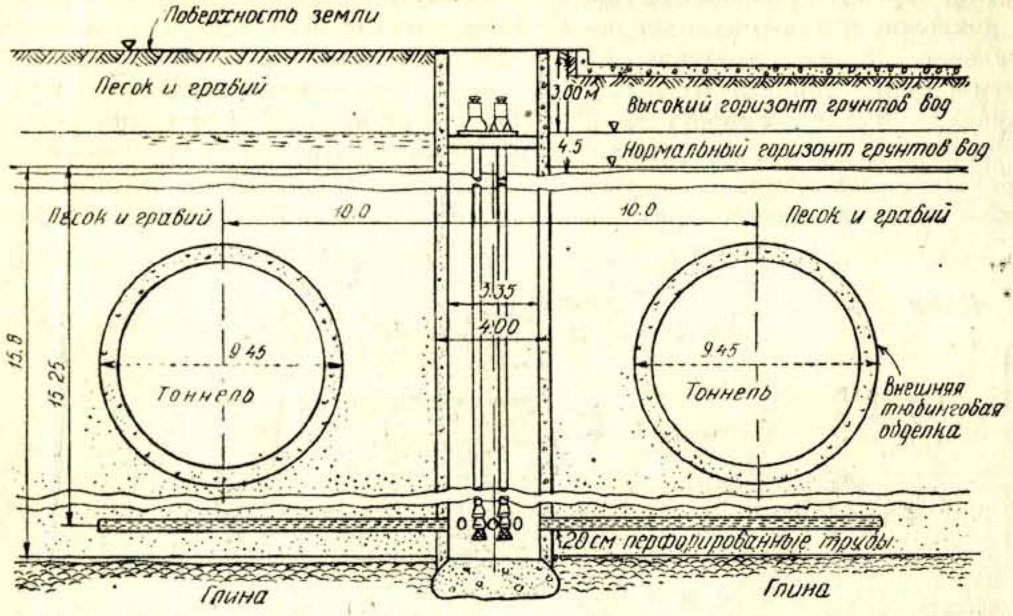


Рис. 412. Тоннель Баттери (комбинирование водопонижения и сжатого воздуха при проходке)

давлении сжатого воздуха в 1,5 *ат*. В этом случае система водопонижения была произведена рядом дренажных штолен и колодцев.

При постройке в 1943 г. двух парал-

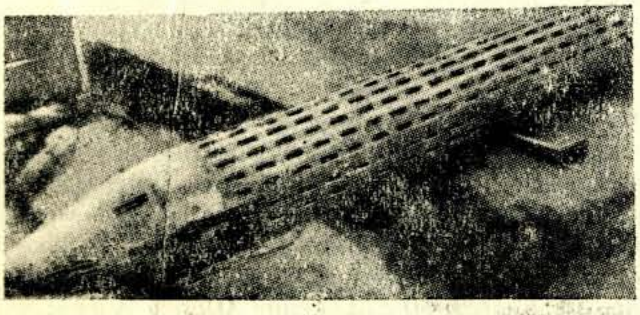


Рис. 413. Вид перфорированной трубы для водопонижения

лельных тоннелей Бруклин — Баттери для автомобильного движения, залегающих в мощном слое водоносных песчаных грунтов, был успешно применен щитовой метод проходки в сочетании с искусственным водопонижением.

Этот метод был вызван тем обстоятельством, что при наличии незначительной кровли над шелыгой свода тоннелей (3—6 *м*) применение сжатого воздуха приводило бы неминуемо к прорывам его на поверхность. Необходимо было пройти два тоннеля диаметром по 9,45 *м* на протяжении 130 *м* до места, где кровля является надежной и возможно нормальное применение сжатого воздуха в сочетании с искусственным водопонижением (рис. 412).

После проходки шахтного ствола на глубине 19,5 *м* от поверхности земли и на 15 *м* от первоначального уровня грунтовых вод была забурена в горизонтальной плоскости система двенадцати перфорированных дренажных труб диаметром по 200 *мм* с наконечником, общей длиной 330 *м*. Трубы непосредственно из ствола задавливались домкратами, отдельными отрезками по 2,4 *м*. Внутрь указанных труб вводились трубы диаметром 50 *мм*. Отверстия в трубах были размерами 38 × 13 *мм*, по 858 штук на каждой трубе (рис. 413). Кольцевое пространство между концентрическими трубами забивалось крупнозернистым песком, что препятствовало выносу грунта при откачке воды во время работы установки. Вода откачивалась тремя глубинными вертикального типа насосами, производительностью до 8 $м^3/мин$ каждый.

После 15 дней работы водопонижающей установки был достигнут дренажный эффект, позволявший вести нормальным образом щитовые работы по проходке тоннелей.

В Калифорнии был пройден гидротехнический тоннель в водоносных, разнозернистых песках, без применения сжатого воздуха, с помощью водопонижающих скважин, пробуриваемых из тоннеля по мере продвижения забоя. При обделке тоннеля из стальных тюбингов в подошве его были уложены специальные сегменты с отверстиями для скважин. Эти отверстия после окончания работ закрывались пробками. Скважины бурились на взаимном расстоянии 0,9 *м* по длине тоннеля. С целью осушения забоя вблизи последнего бурилась вначале система наклонных водопонижающих скважин. Но поскольку последние являлись помехой при производстве проходческих работ, перешли на систему вертикальных скважин, размещаемых непосредственно у забоя.

Система искусственного водопонижения в тоннеле в процессе его проходки оказалась на практике весьма эффективной.

Метод искусственного понижения уровня грунтовых вод успешно и в широком масштабе применялся при сооружении ряда тоннелей и подземных вестибюлей станций (открытый способ производства работ) на строительстве Московского метрополитена.

5. ЗАМОРАЖИВАНИЕ ГРУНТОВ

Опыт широкого применения замораживания на Метрострое (при проходке вертикальных шахт и наклонных ходов) доказал высокую техническую эффективность этого метода в борьбе с плывунными грунтами (см. главу VI). При строительстве Московского метрополитена было также в широкой степени применено замораживание грунтов в тех местах, где геологические условия являлись исключительно неблагоприятными для проходки тоннелей. Замораживание было принято для проходки наклонных ходов и вестибюлей станций 1-й, 2-й, 3-й и 4-й очередей строительства. Наклонные тоннели пересекали весьма мощные плывуны (мощность их от 20 до 30 *м*). Помимо проходки наклонных ходов, было осуществлено замораживание средних частей ряда станций глубокого заложения. В последнем случае тоннели станции пересекали глубокий размыв староречий. Закрепление этих грунтов было произведено путем замораживания грунтов. Однако застроенность поверхности, интенсивное уличное движение, густота подземного хозяйства не позволили производить бурение непосредственно с поверхности. В связи с этим был применен комбинированный способ подземного замораживания из штолен. Последние были пройдены в условиях сухих песков выше уровня грунтовых вод и имели поперечное сечение 2,5 × 3 *м*. Из этих штолен была создана защитная кровля тоннеля при помощи замораживающих скважин (рис. 414).

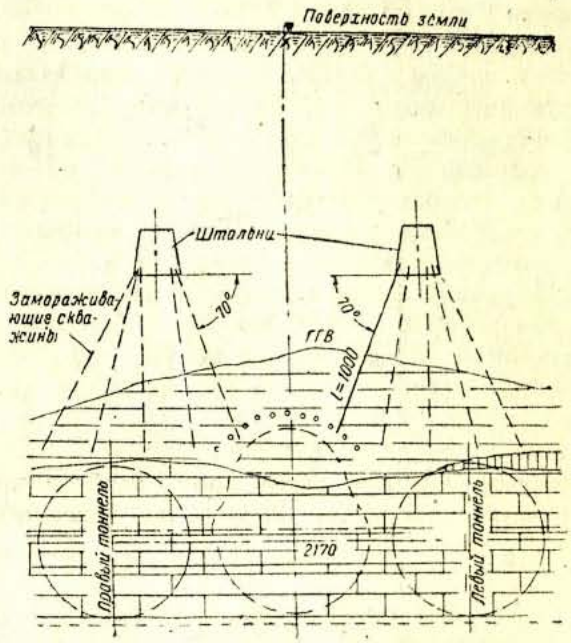


Рис. 414. Схема замораживания грунтов из штолен при проходке тоннелей

Процесс бурения был максимально механизирован применением буровых станков для ударного или вращательного бурения. Из станков ударного типа для глубоких скважин применялись станки систем Турка, Армстронг, «УА-75», Вирта; из станков вращательного бурения — Крелиус типа КА-300 и КА-500, обеспечивающие бурение скважин (под заданным углом к горизонту) в вертикальном, наклонном и горизонтальном направлениях. В мягких и плывунных грунтах основной эффект был получен при вращательном бурении станками Крелиуса. Предварительно бурились обсадные скважины диаметром 150—200 *мм*, с промывкой глинистым раствором удельным весом 1,2. В настоящее время на Метрострое, как правило, бурение замораживающих скважин производится без обсадных труб, с закреплением стенок скважин глинистым раствором, что дает резкое увеличение скорости процесса бурения, снижение стоимости буровых работ, полностью удовлетво-

ряя техническим условиям. Объем грунтов, подлежащих замораживанию на одной очереди строительства Московского метрополитена, составлял до 180 000 $м^3$. При этом было поставлено до пятнадцати компрессорных станций общей холодопроизводительностью в 7 000 000 нормальных калорий. Расстояние между скважинами для наклонных ходов доведено до 94 *см*, а для вертикальных скважин от 1,5 до 2,5 *м*. В процентном отношении стоимость замораживания по отдельным элементам работ выразилась следующим образом: а) бурение скважин, устройство форшахт и укладка коллектора и рассолопроводов — 69,5% стоимости; б) постройка замораживающей станции и необходимые монтажные работы — 23,5%; эксплоатация замораживающей станции — 7%.

При составлении проекта замораживания грунтов в связи с сооружением тоннелей в неустойчивой среде производят калорические расчеты, базируясь на нижеследующих данных.

Определив геометрический объем v замороженных пород, вычисляют необходимое количество холода X. Исходя из уравнения:

$$X_1 = (v - v_1)\,1000\,p\,(t_0 + t_1)\,C + 1000\,v_1\,(t_0 + 80 + 0{,}5\,t_1),$$

где:

v — объем замороженного массива, v_1 — объем воды в массиве, t_0 — начальная температура, t_1 — температура замораживания, C — теплоемкость породы, ρ — объемный вес породы, 80° — скрытая теплота плавления льда и 0,5 — теплоемкость льда, вычисляем X. Для этого к вычисленной величине X_1 необходимо прибавить 100% холода, идущего на охлаждение окружающего замороженного цилиндра массива, и 15% — на потери в холодильной установке.

Тогда полная холодопроизводительность выразится величиной:

$$X = 2{,}15\,X_1.$$

При холодопроизводительности установки, равной Y, время T, потребное на замораживание грунтового массива:

$$T = \frac{X}{Y}.$$

Средняя скорость образования замороженного массива в сутки можно определить по формуле, предложенной инж. Я. А. Дорманом:

$$l = \frac{24\,\pi\,d\,k}{1{,}3a\,[(1-m)\,p\,C\,(t_1 - t_0) + m\,(t_0 + 80 + 0{,}5\,t_1)]},$$

где:

a — расстояние между скважинами, m — процентное содержание воды в породе, d — диаметр замораживающих труб, k — коэфициент передачи холода на 1 $м^2$ поверхности труб (200—250 кал/час).

Прочность искусственно замороженных грунтов на основании опытов Альби выражается формулой $R = 0{,}153t^2 + 11t + 20$, где t — температура замороженного грунта, а R — временное сопротивление на сжатие в $кг/см^2$. По опытам Альби временное сопротивление замороженного кварцевого песка достигает следующих величин: при температуре 0° 20 $кг/см^2$, при температуре —10° до 120 $кг/см^2$ и при температуре —25° до 200 $кг/см^2$. Аналогичные результаты испытаний замороженных образцов грунта получены проф. Н. М. Беляевым.

Глинистый грунт относительно плохо поддается замораживанию. Величина временного сопротивления замороженного глинистого массива достигает примерно 50% прочности по отношению к замороженному песчаному массиву.

Опыт показал, что наиболее эффективные результаты дает замораживание песчаных грунтов. Примесь глины в значительной степени понижает величину временного сопротивления. Максимальная величина временного сопротивления искусственно замороженного песчаного массива достигается при 65—70% заполнения пустот водой. Вместе с тем больший процент пустот приводит к значительному понижению величины временного сопротивления на сжатие.

Для примера приведем данные о сооружении подземного вестибюля и наклонного эскалаторного хода станции Московского метрополитена.

Подземный вестибюль станции размерами в плане 18 × 12 *м* представляет собой двухэтажную конструкцию. Верхний этаж, предназначенный для пассажирского вестибюля, имеет высоту 3,8 *м*; нижний, высотой 4,3 *м*, предназначен для машинного помещения эскалаторов.

Конструкция вестибюля запроектирована в виде железобетонной рамы. Перекрытие вестибюля железобетонное, опирающееся на сте-

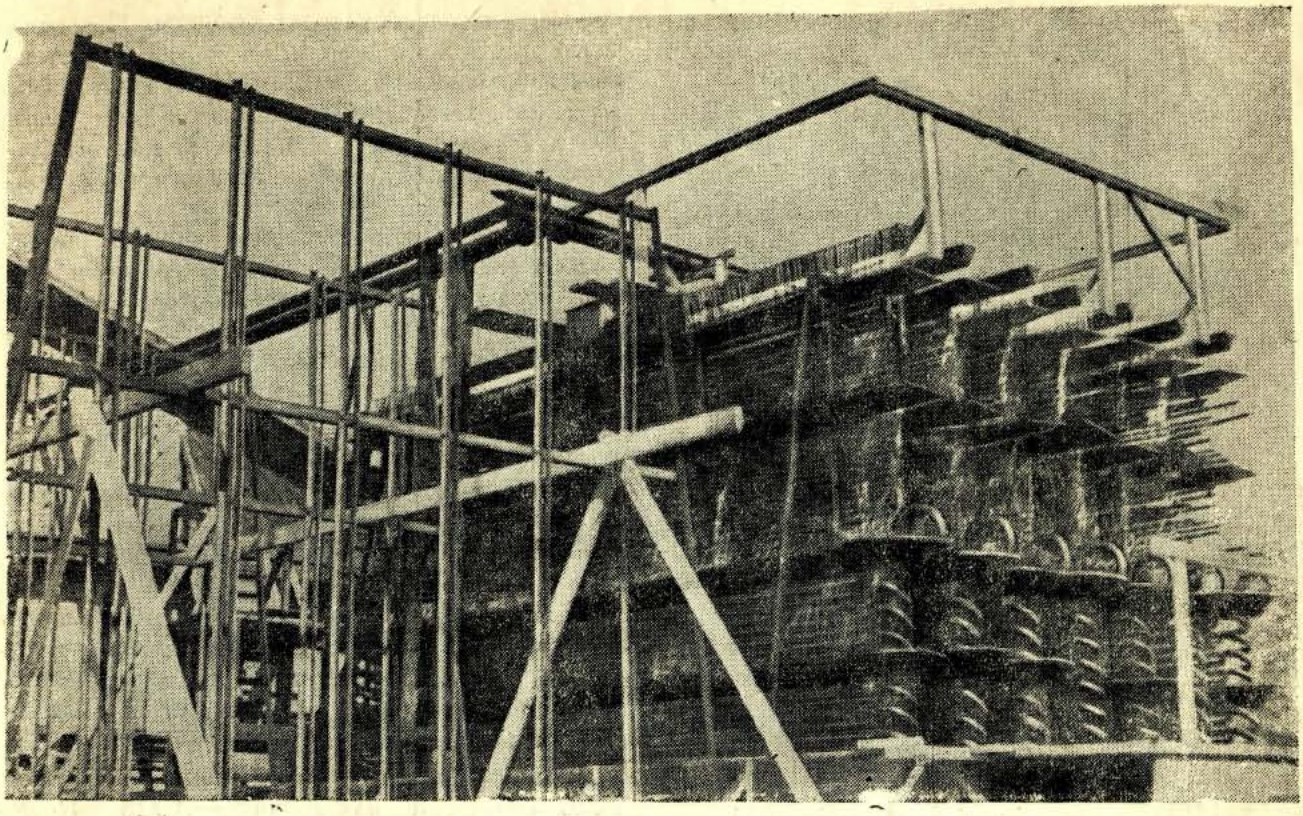


Рис. 415. Оросительный конденсатор

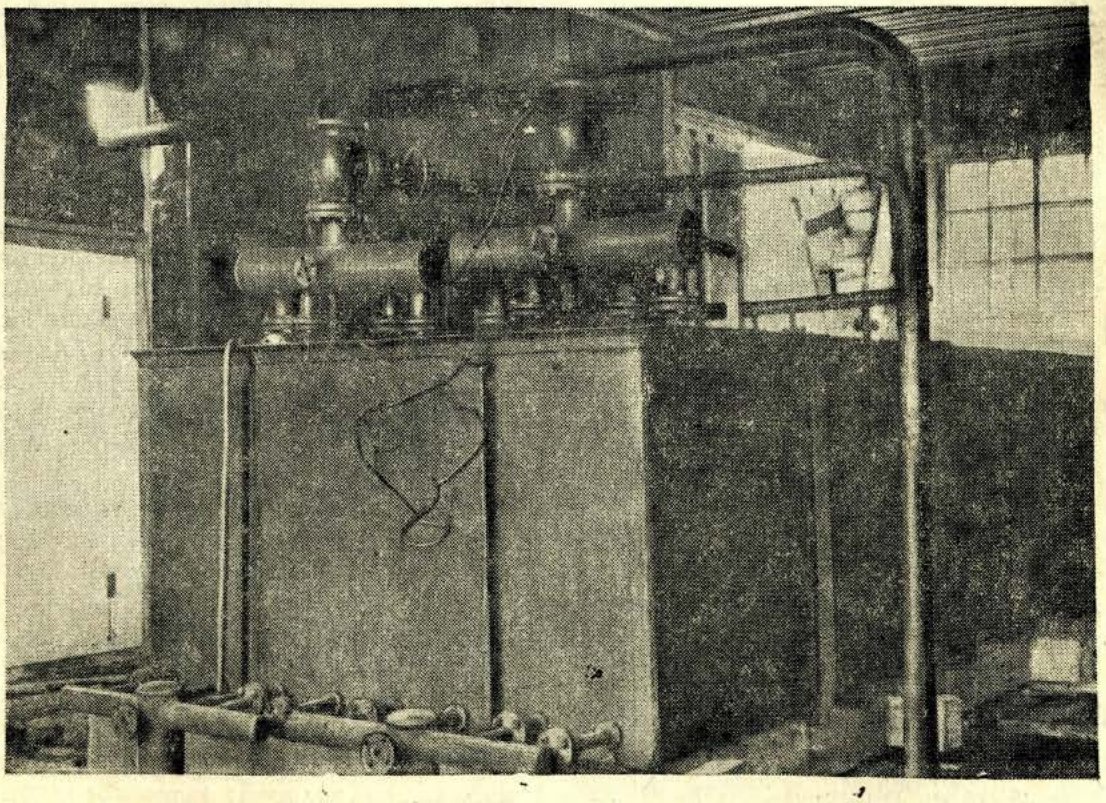


Рис. 416. Испаритель системы Линде

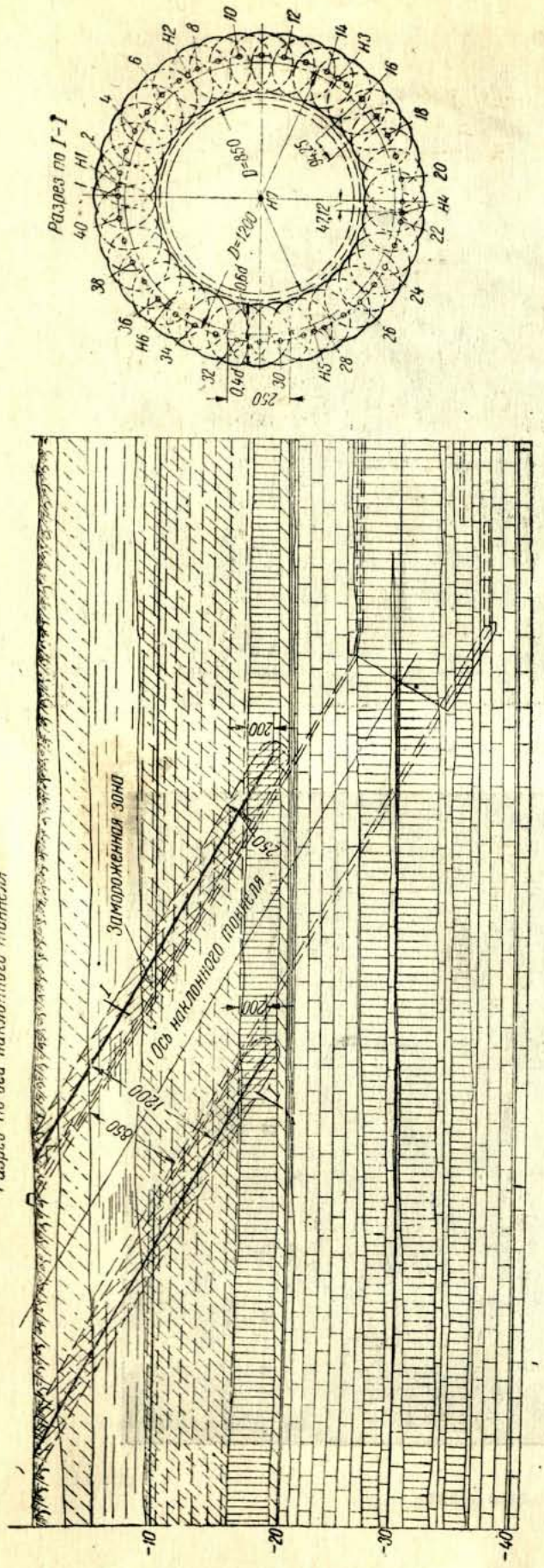


Рис. 417 и 418. Схема замораживания грунтов для наклонного эскалаторного тоннеля

ны и на железобетонные колонны. Передняя часть вестибюля сопрягается железобетонным наголовником с наклонным эскалаторным тоннелем. Последний расположен под углом 30° к горизонту и предназначен для эскалатора. Внешний диаметр эскалаторного тоннеля 8,5 *м*.

Конструкция наклонного тоннеля представляет собой трубу из чугунных тюбингов шириною 75 *см* при высоте бортов 30 *см*.

Ввиду наличия в месте проходки наклонного хода мощных плывунов был избран наиболее надежный способ замораживания грунта.

Для замораживания грунтов при проходке наклонного хода тоннеля и для ограждения контура подземного вестибюля было намечено к бурению 105 скважин, из них 48 наклонных скважин под углом 30° (для проходки эскалаторного тоннеля) и 57 вертикальных скважин (для ограждения контура вестибюля). Для наклонных скважин было принято взаимное расстояние 0,9 *м*, а для вертикальных скважин — 1,5 *м*.

Общая длина вертикального бурения 1 026 *пог. м* и наклонного — 1 728 *пог. м*, а всего 2 754 *пог. м*. Скважины проходились при механическом бурении (с применением станка Крелиус). Исключительное внимание обращалось на верность направления скважины; при этом не допускалось отклонение больше 1,5%. Для дачи правильного направления наклонной скважины, точно по инструменту под углом в 30°, устанавливается кондуктор в виде десятидюймовой трубы, которую после тщательной проверки бетонировали. Основное внимание на правильность направления скважины обращалось до глубины 15 *м*. Из имевшихся наклонных скважин были пройдены 31 с отклонением до 1%, 12 — с отклонением до 1,5% и 5 — свыше 1,5%. Отклонения были вызваны как деформацией штанг бурового инструмента, так и встречей с валунами.

Параллельно с бурением велись работы по строительству зданий для замораживающих установок. Велась прокладка рассолопровода, и монтаж оборудования замораживающей станции. Были установлены два холодильных аммиачных компрессора системы завода «Компрессор» (типа Л-55) холодопроизводительностью 820 000 нормальных калорий и ГМ-11/12 холодопроизводительностью 200 000 нормальных калорий; кроме того, три секционных конденсатора типа «Блок» (рис. 415) и

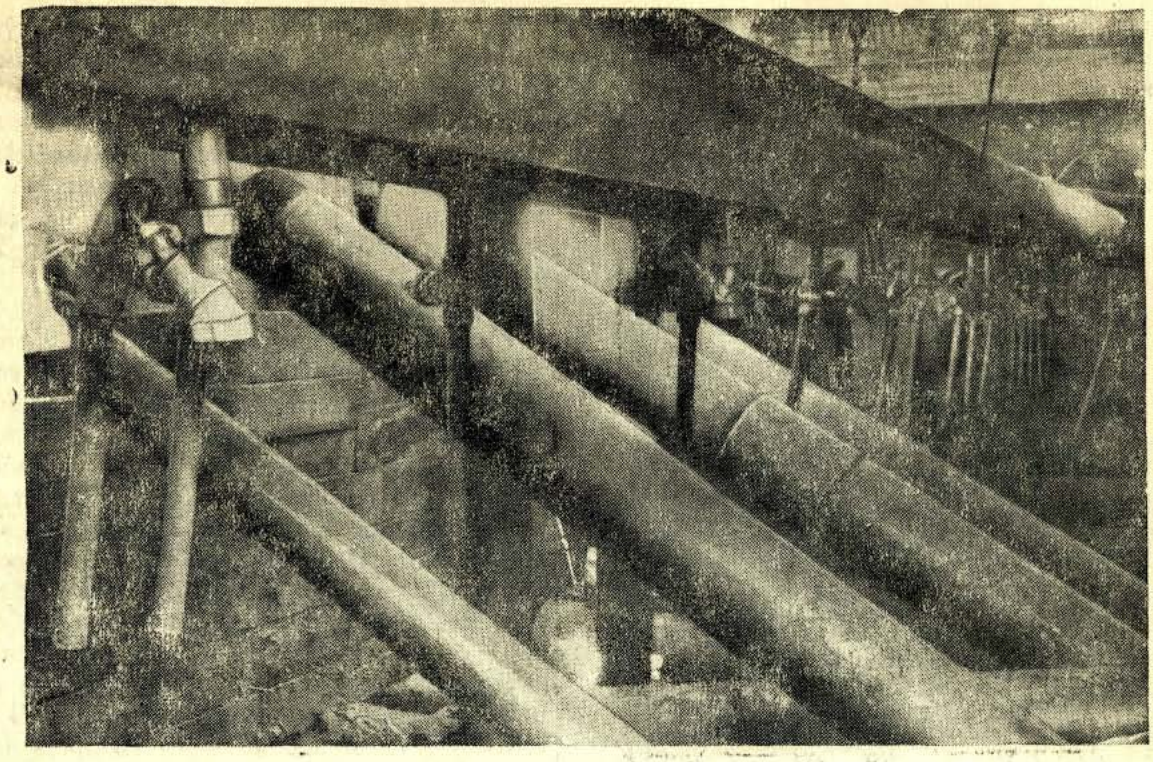


Рис. 419. Наклонные буровые скважины

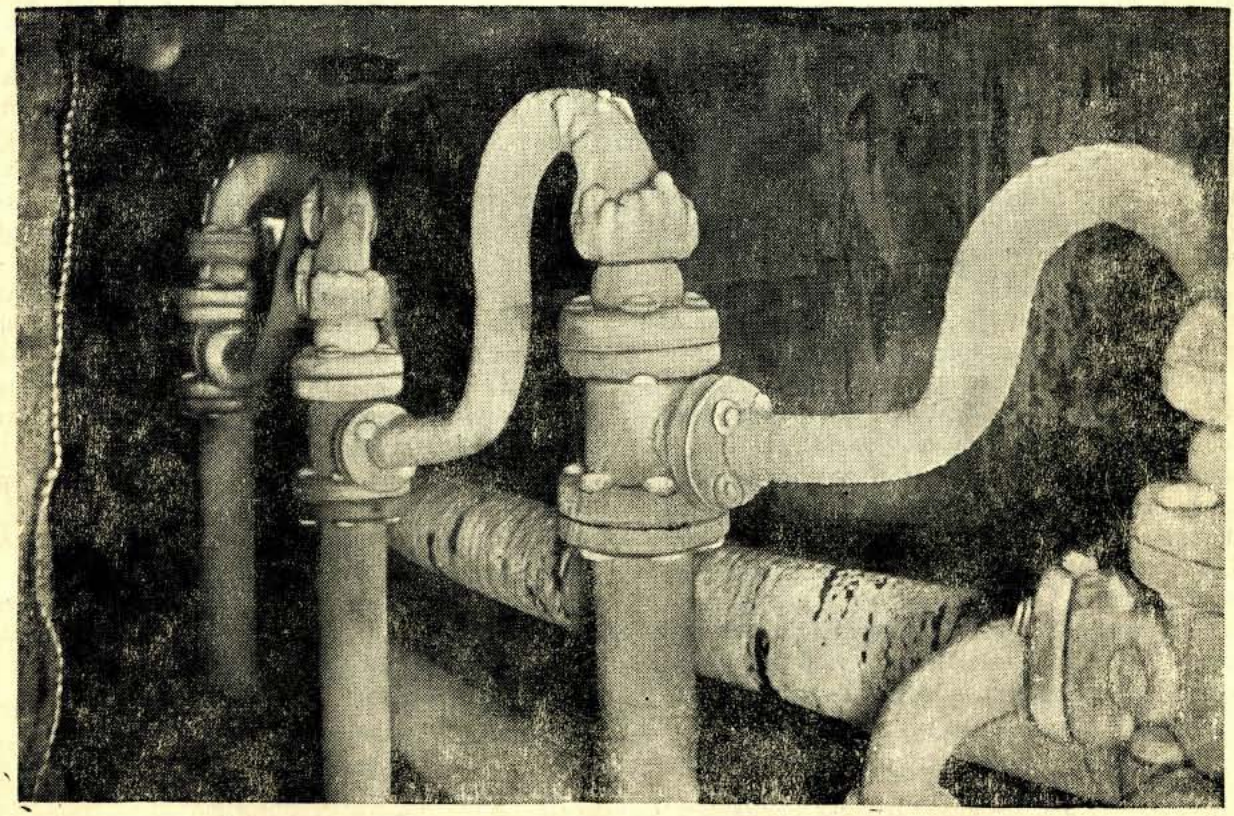


Рис. 420. Коммуникация замораживающих колонн

испаритель с 8 змеевиками (рис. 416), при общей поверхности охлаждения 160 $м^2$. Одновременно монтировались необходимые насосы для перекачки рассола и воды. Чтобы равномерно распределить рассол и нормально питать скважины, была применена установка по



Рис. 421. Работа в забое при замороженном грунте

системе Тихельмана. Были установлены водомеры и термометры для выявления скорости движения рассола и температуры обратной струи. Через 25 дней после начала процесса замораживания радиус замороженной зоны по вертикальной скважине был установлен около 1,5 *м*, а в наклонном ходе 1 *м*. При дальнейшем замораживании радиус замороженной зоны вокруг скважины доходил до 2 *м* (рис. 417, 418, 419, 420). Замораживание превратило плывун в устойчивый массив, в котором представилось возможным вести без временного крепления проходку наклонного хода диаметром 8,5 *м*, при разработке забоя впереди тюбинговых колец на 1,5 *м*. Проходка наклонного хода в замороженном массиве производилась сразу на полный профиль.

При помощи пневматических отбойных молотков (типа ОМ-5) велась разработка породы (рис. 421), а сзади применением наклонного эректора — монтаж тюбингов. Во избежание деформации колец в связи с наличием пустот из-за перебора породы осуществлялась расклинка между кольцами и породой и заполнение цементным раствором под давлением до 3 *ат*. Был установлен специальный цементационный насос производительностью 15 $м^3$/*час*. Цементация производилась после проходки шести колец. Всего на нагнетание по наклонному уходу ушло около 500 $м^3$ раствора.

Способ проходки неустойчивых пород в Стокгольме (система Фресса). В Стокгольме был пройден в слабых грунтах тоннель небольшого протяжения особым способом замораживания. В портальной части были установлены агрегаты, подающие холодный воздух при температуре — 55° С. Эти агрегаты вырабатывали воздуха до 707 $м^3$/*час*. Холодный воздух заполнял камеру портальной части, ограниченную с одной стороны лбом забоя, подлежащего замораживанию, а с другой — деревянной стеной (перемычкой), заполненной древесным углем. После непрерывной работы агрегатов в течение 60 часов слабые грунты забоя, через которые должен был пройти тоннель, превращались в крепкую породу, требовавшую выломки. Закрепленная часть породы достигала 1,5 *м* толщины в основании выработки и до 30 *см* в верхней части профиля.

После закрепления грунта замораживанием открывалась дверь перемычки и впускались рабочие для разработки грунта и устройства тоннельной обделки. В процессе работ температура в камере повышалась до 0°.

Продолжительность цикла работ по устройству обделки составила около 12 часов.

Хотя этот способ работ и не давал значительных темпов (всего лишь 30 *см* в сутки), все же удалось закрепить тоннель протяжением 25 *м* без вывалов породы, осадок на поверхности и повреждений домов, расположенных по трассе тоннеля.

Несмотря на элементы некоторой кустарщины этого оригинального приема работ, он все же заслуживает быть отмеченным как технический прием борьбы с плывунами на небольших тоннельных участках, где применение специальных замораживающих установок и бурения является экономически и производственно не всегда приемлемым.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ПРОИЗВОДСТВА ГОРОДСКИХ ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

Особые случаи производства городских тоннельных работ предусматривают сооружение наклонных эскалаторных тоннелей и подземных станционных вестибюлей, а равно проходку под существующими подземными сооружениями.

1. СООРУЖЕНИЕ НАКЛОННЫХ ЭСКАЛАТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Наклонные тоннели предназначаются для размещения в них эскалаторов (движущихся лестниц), соединяющих надземные и подземные вестибюли непосредственно с платформами глубоких станций метрополитена.

Эскалаторные тоннели имеют уклон в 30° к горизонту. Наклонные ходы могут располагаться как параллельно, так и под углом к направлению трассы тоннелей метрополитена. Обычно наклонные ходы в городских условиях пересекают слои слабых грунтов. В Лондонском метрополитене пласты плывунов, пересекаемых эскалаторными ходами, имели мощность около 6 *м*. На Московском метрополитене толща плывунов достигает 20—30 *м*.

Пересечение эскалаторными ходами пород под углом в 30° представляет собой исключительной трудности инженерную задачу. Вопрос осложняется тем, что тоннели располагаются под оживленными уличными артериями и интенсивным движением, вблизи домов, под сложной сетью сооружений городского подземного хозяйства.

При сооружении наклонных тоннелей в слабых грунтах обычно приходится сталкиваться с двумя неразрывно связанными между собой задачами, а именно: искусственным закреплением пересекаемого земляного массива и методом проходки и обделки наклонного тоннельного хода.

Сооружение наклонных эскалаторных тоннелей может производиться преимущественно одним из следующих шести способов:

а) проходкой на полный профиль в замороженном грунте при обделке из чугунных тюбингов;

б) пилот-системой с обделкой из чугунных тюбингов при искусственном закреплении грунта;

в) методом опускания кессонов-тоннелей, включающих в свою конструкцию эскалаторные ходы;

г) сооружением наклонного хода кессонированным пилот-щитом;

д) методом сплошного металлического шпунтового ограждения;

е) сооружением наклонного тоннеля многоштольневым способом при искусственном закреплении грунта.

Искусственное закрепление слабых грунтов может быть произведено замораживанием, а равно силикатизацией (химическим закреплением грунта) или тампонажем. Пересечение слабых, водоносных грунтов возможно с применением сжатого воздуха или искусственного понижения уровня грунтовых вод.

а) *Проходка на полный профиль в замороженном грунте при обделке из чугунных тюбингов.* Этот метод применялся при сооружении эскалаторных тоннелей Московского метрополитена. При закреплении грунтов замораживанием производятся следующие операции:

1) вертикальное или наклонное бурение скважин;

2) нагнетание замораживающего раствора для образования защитной ледяной стенки вокруг зоны, подлежащей тоннельной разработке;

3) поддержание замораживания на время производства тоннельных работ и крепления;

4) процесс оттаивания породы после полного окончания тоннельных работ.

При закреплении грунта замораживанием

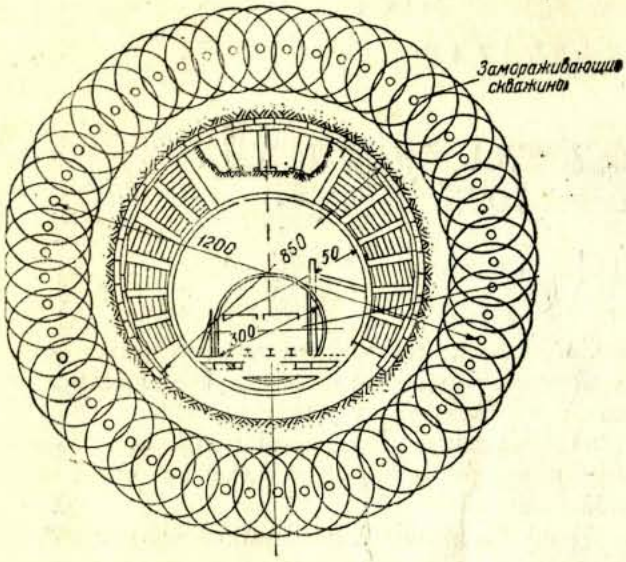


Рис. 422. Замораживание грунта при проходке наклонного хода

тоннеля в 8,5 *м*, по окружности диаметром 12 *м*, вокруг эскалаторного тоннеля были пройдены 48 наклонных скважин. При расчете была принята зона распространения холода от каждой скважины в 2,5 *м*, что создавало защитное кольцо замкнутого контура мерзлого грунта такой же толщины (рис. 422). Бурение наклонных скважин под углом в 30° проводилось в СССР впервые: при этом не было обнаружено значительных отклонений. Это обстоятельство давало уверенность в том, что получится замкнутый ледяной цилиндр, защищающий от плывунов на время производства работ. Распределительные и коллекторные кольца монтировались в специальной галлерее, закрытой настилом из досок и термоизоляцией. На замораживание грунта при проходке эскалаторного тоннеля был установлен срок в 45 дней. После закрепления земляного массива приступили к проходке наклонного тоннеля на полный профиль с обделкой из чугунных тюбингов, при выдаче грунта из забоя скипом и при монтаже обделки наклонным эректором. Таким способом была осуще-

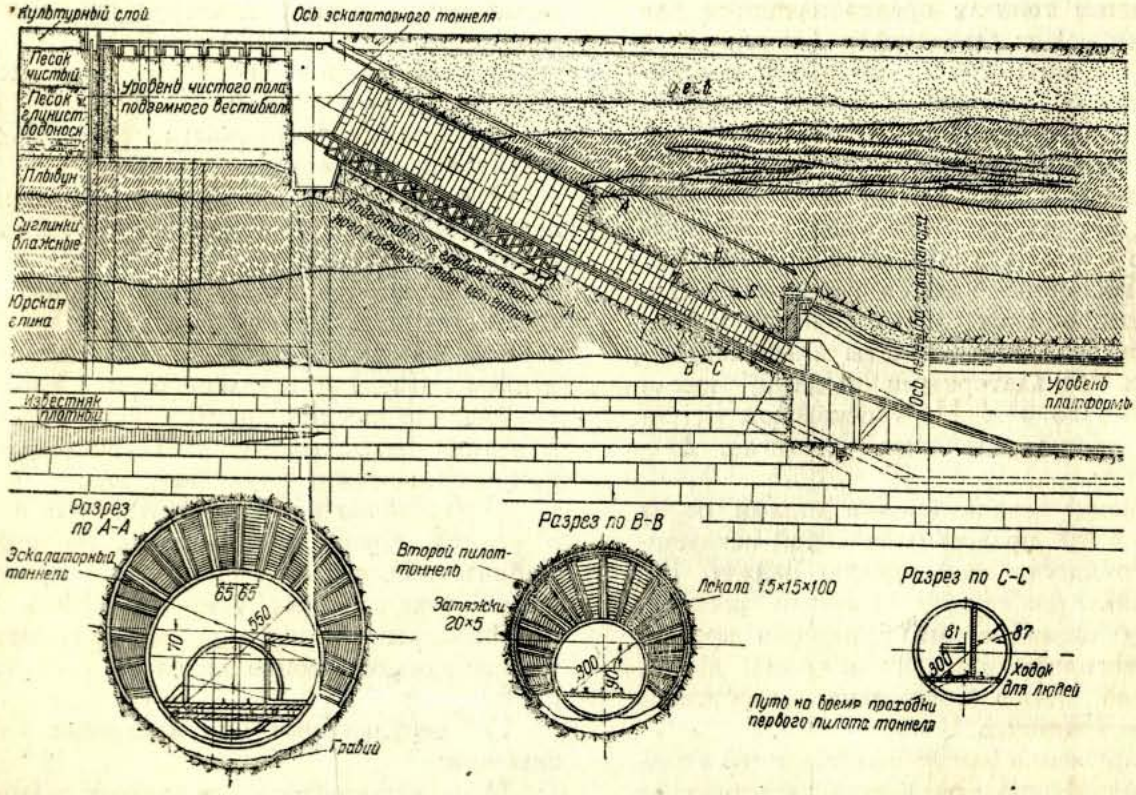


Рис. 423. Проходка наклонного хода эксцентрической пилот-системой

для проходки эскалаторных тоннелей Московского метрополитена работы производились следующим порядком. При диаметре сечения

ствлена проходка наклонных эскалаторных тоннелей на 2-й, 3-й и 4-й очередях строительства Московского метрополитена (рис. 426).

б) *Проходка по пилот-системе.* При проходке по пилот-системе работы ведутся следующим порядком. Предварительно проходится пилот-тоннель диаметром 2,5—3 *м*, который располагается эксцентрично в профиле эскалаторного тоннеля при совпадении вертикальных диаметров их (рис. 423, 424). Сама проходка в большинстве случаев ведется по уклону сверху вниз, а иногда, в зависимости от местных условий, наоборот, снизу вверх. Вслед ведется раскрытие тоннеля на промежуточный диаметр, около 4,5—5 *м*, с использованием первого пилот-тоннеля (опорное ядро). Третий этап — раскрытие окончательного профиля эскалаторного тоннеля. В зависимости от местных условий и квадратуры сечения эскалаторного тоннеля можно итти на раскрытие профиля в две фазы, проводя при этом пилот-систему концентрически (рис. 425). Крепление тоннеля производится тюбингами (рис. 427), причем монтаж их, в зависимости от веса сегментов, может производиться лебедками или наклонным эректором.

Применяемый на Метрострое наклонный эректор для монтажа тюбингов эскалаторных тоннелей отличается легкостью своей конструкции по сравнению со щитовым эректором.

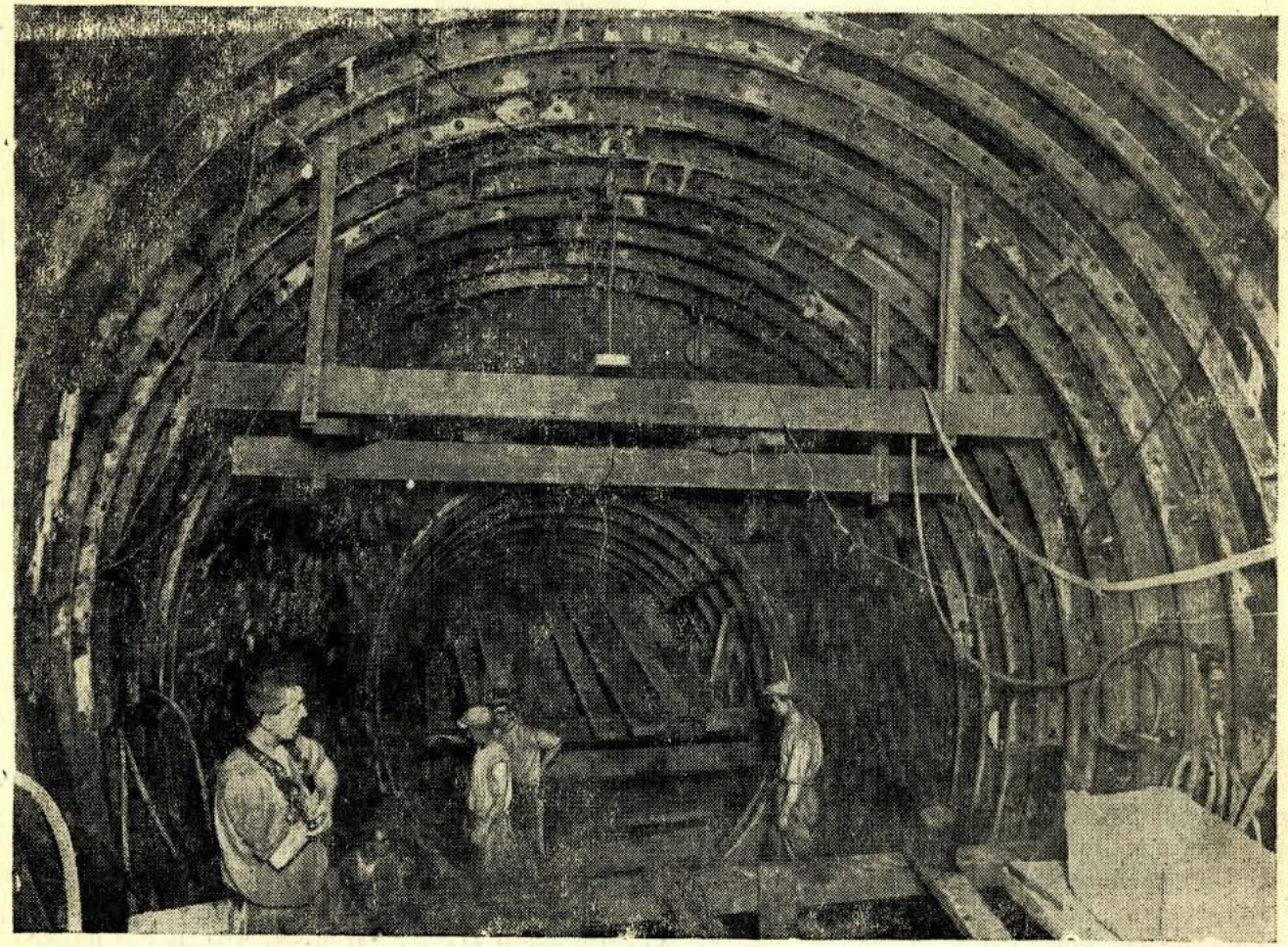


Рис. 424. Общий вид проходки по пилот-системе в английской практике

Эректор смонтирован на металлической раме сварной конструкции. Рука эректора и привод для вращения выполнены сварными (за исключением шестерен из стального литья). Штанга наклонного эректора имеет поступательное движение в радиальном направлении, от электромотора мощностью 6,1 *квт* при 750 *об/мин*; электромотор установлен непосредственно на самом корпусе штанги.

Несмотря на осложнения, обусловленные

работой эректора в наклонном положении, удалось облегчить элементы конструкции, избегнуть сложных деталей и узлов и получить агрегат, успешно выполняющий свои функции в подземных условиях.

В отличие от кустарных методов монтажа тюбингов обделки наклонных ходов, еще при-

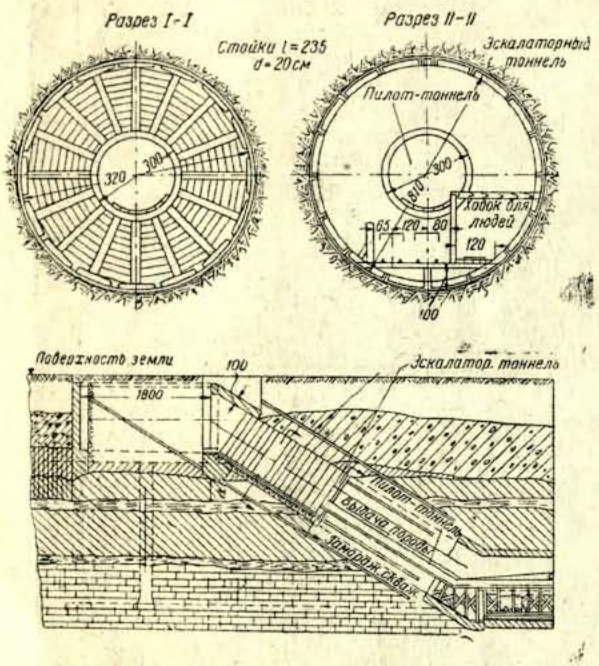


Рис. 425. Концентрическая пилот-система

меняемых в заграничной практике ручным способом при помощи лебедок, советским инженерам удалось механизировать этот трудоемкий процесс, применяя наклонный эректор.

в) *Сооружение эскалаторных тоннелей вертикальными кессонами.* Сооружение наклонных ходов под углом в 30° возможно осуществить при наличии соответствующих городских условий опусканием до надежных горных пород ряда вертикальных кессонов. Учитывая заранее отметку опускания каждого из кессонов, назначают конструкции, включающие обделку наклонного тоннеля. В расчет принимается возможность отклонения кессонов при посадке в плане и профиле. При этом габарит тоннелей заранее проектируется с соответствующим запасом. Метод опускания кессонов отдельными секциями дает весьма надежную конструкцию; однако он требует большой строительной площадки, что в городских условиях в местах сооружения станций метрополитена, которые обычно располагаются на оживленных пунктах, далеко не всегда возможно.

г) *Сооружение наклонных ходов кессонированным пилот-щитом.* Механизированной системой проходки наклонных эскалаторных тоннелей, запроектированных для проходки эскалаторных тоннелей Лондонского метрополитена, является система кессонированных пилот-щитов. В этом случае специальный кессонированный щит диаметром около 4,5 *м* передвигается под углом в 30° сверху вниз. Учитывая тенденцию щита в процессе проходки «клевать», конструкцию его снабжают впереди обратным аванбеком. Для удобства производства работ по выборке породы и монтажу обделки рабочие платформы расположены в щите не по уклону, а горизонтально. Щитовые работы по проходке наклонного тоннеля в плывунах ведутся в сочетании со сжатым воздухом при дополнительной шлюзовой диафрагме, установленной в подземном вестибюле.

Вслед за первым пилот-щитом пускается сверху вниз щит окончательного диаметра эскалаторного тоннеля (см. главу VIII).

д) *Метод сплошного металлического шпунтового ограждения.* Проходка наклонного тоннеля при помощи вертикальных металлических шпунтов непосредственно с поверхности производится следующим порядком: при помощи парового или пневматического молота забивается шпунтовое ограждение через плывуны, причем шпунты на 2,5—3 *м* должны войти в коренные породы (водоупор) (рис. 428). Дальнейшие работы могут быть произведены как открытым способом (при системе расстрелов, распирающих шпунты), так и тоннельным методом. Последний применяется, чтобы избежать излишней выемки огромного объема вскрыши. Предполагается, что после забивки шпунтов, ликвидирующих подвижность плывунов, сооружение наклонного хода тоннельным способом особых затруднений не представляет. Однако этот способ, так же как и опускание кессона, ограничен в своем применении из-за специфических городских условий.

е) *Сооружение наклонного тоннеля многоштольневым способом при искусственном закреплении грунта.* При пересечении слоя плывуна небольшой мощности можно применить и многоштольневую систему опорного ядра при обделке бетоном. В этом случае обделка эскалаторного тоннеля может быть сооружена в десяти-двенадцати штольнях, пройденных по периметру. Штольни проходятся последовательно (по две), при одновременной бето-

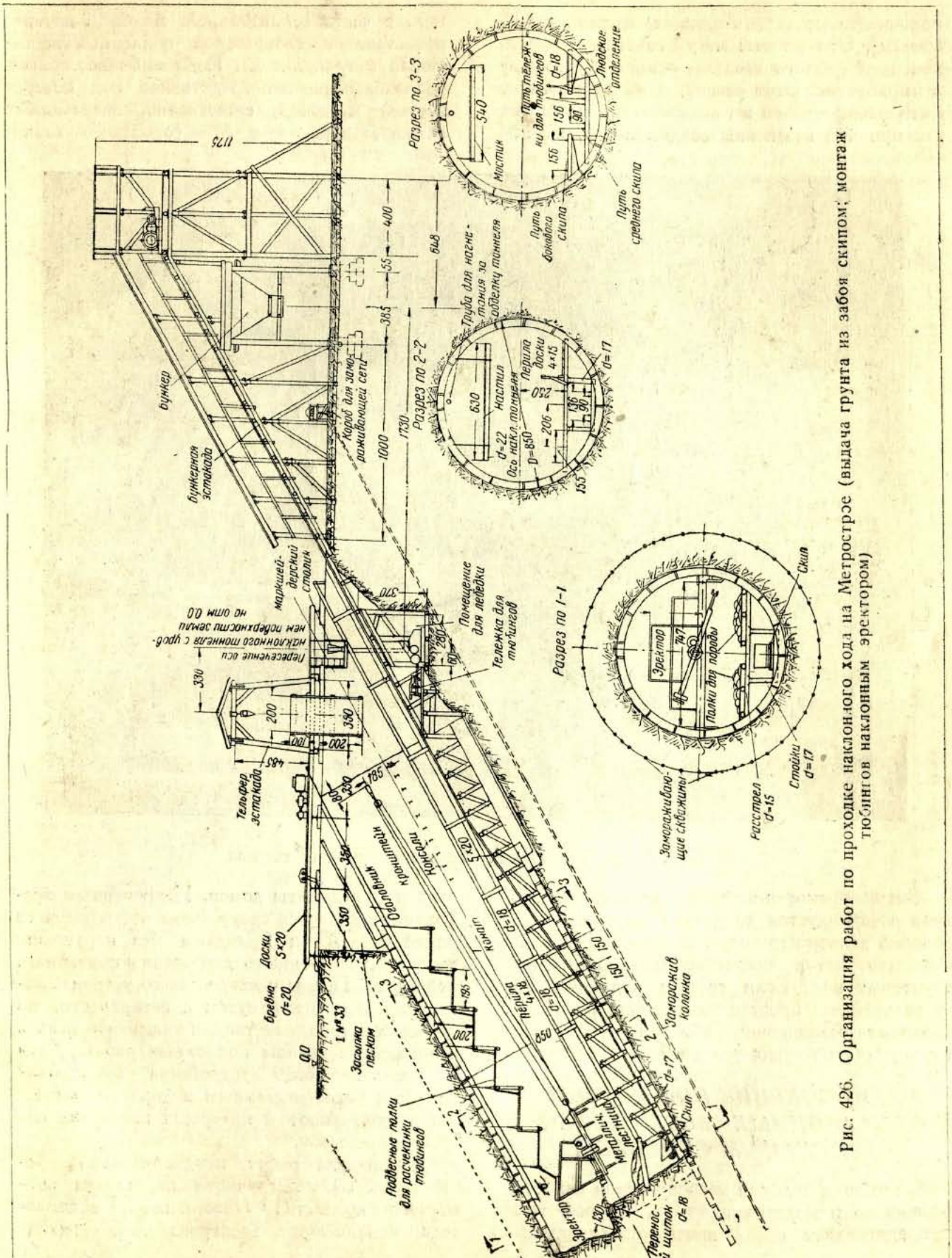


Рис. 426. Организация работ по проходке наклонного хода на Метрострое (выдача грунта из забоя скипом; монтаж тюбингов наклонным эректором)

нировке элементов, входящих в тоннельную обделку. Эти работы могут сочетаться с применением сжатого воздуха, отжимающего воду в выработках. Этот способ, однако, не может быть рекомендован в городских условиях, так как при нем возможны осадки поверхности.

ного в части строительной. Большой интерес представляет сооружение подземных вестибюлей метрополитена. Подземные вестибюли, расположенные непосредственно под поверхностью мостовой, естественно, затрагивают сложную подземную сеть городского хозяй-

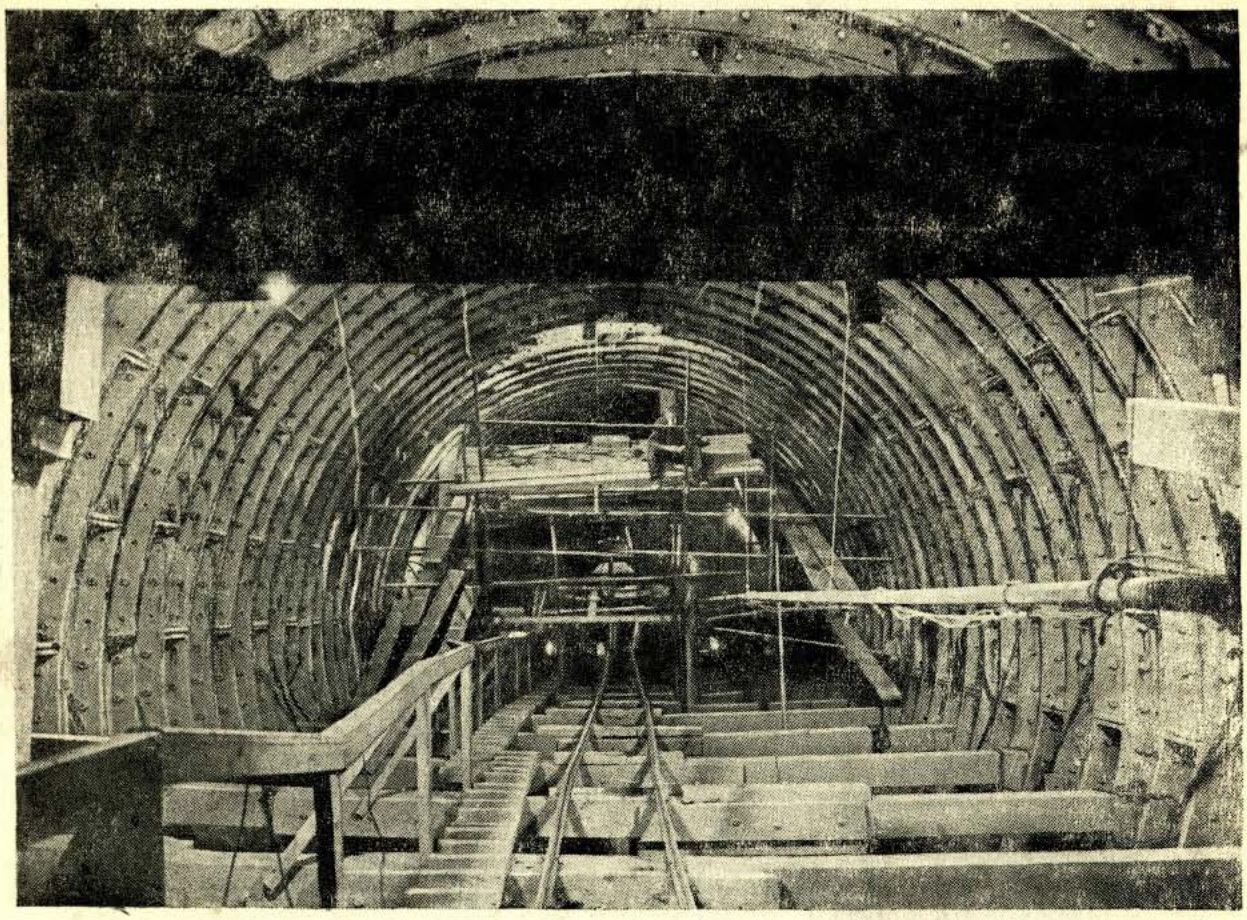


Рис. 427. Готовый участок наклонного тюбингового тоннеля

Вне зависимости от системы проходки тоннеля рекомендуется до начала работ по пересечению наклонным ходом водоносных грунтов испытать метод искусственного понижения грунтовых вод. Если грунты отдают воду, то дальнейший процесс тоннельных работ не вызывает осложнений, ибо он проводится в относительно сухих условиях.

2. СООРУЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ СТАНЦИОННЫХ ВЕСТИБЮЛЕЙ ТОННЕЛЬНЫМ СПОСОБОМ

Вестибюли станций метрополитена бывают надземного и подземного типа. Первый тип не представляет собой ничего исключительного в части строительной. Большой интерес представляет сооружение подземных вестибюлей метрополитена. Подземные вестибюли, расположенные непосредственно под поверхностью мостовой, естественно, затрагивают сложную подземную сеть городского хозяйства и фундаменты домов. Непременным требованием является сооружение вестибюлей со всеми входами и выходами без нарушения интенсивного уличного движения и подземного хозяйства. Проще и скорее всего устроить вестибюли открытым путем с поверхности, но требования города заставили инженеров искать специальные методы подземных работ. Хотя подземный способ устройства вестибюлей является более медленным и дорогим, все же его предпочитают в интересах населения открытому способу.

До начала работ предварительно производится соответствующая перекладка подземного хозяйства (газопровода, водопровода, канализации, электрокабелей, сигнали-

зации, оборудования связи, гадравлических магистралей) без перерыва движения. Помимо урегулирования вопросов с подземным хозяйством, обычно производят весьма ответственные работы по укреплению оснований и подводке фундаментов расположенных поблизости зданий. Иногда приходится проходить непосредственно под домами.

При этом учитываются местные условия, расположение рабочих площадок, шахт, зданий, направление уличного движения, подземное хозяйство и т. п. В результате расположение балок несущего перекрытия может иметь самое причудливое направление. Сущность системы, применяемой при сооружении вестибюля подземным путем, заключается в следующем.

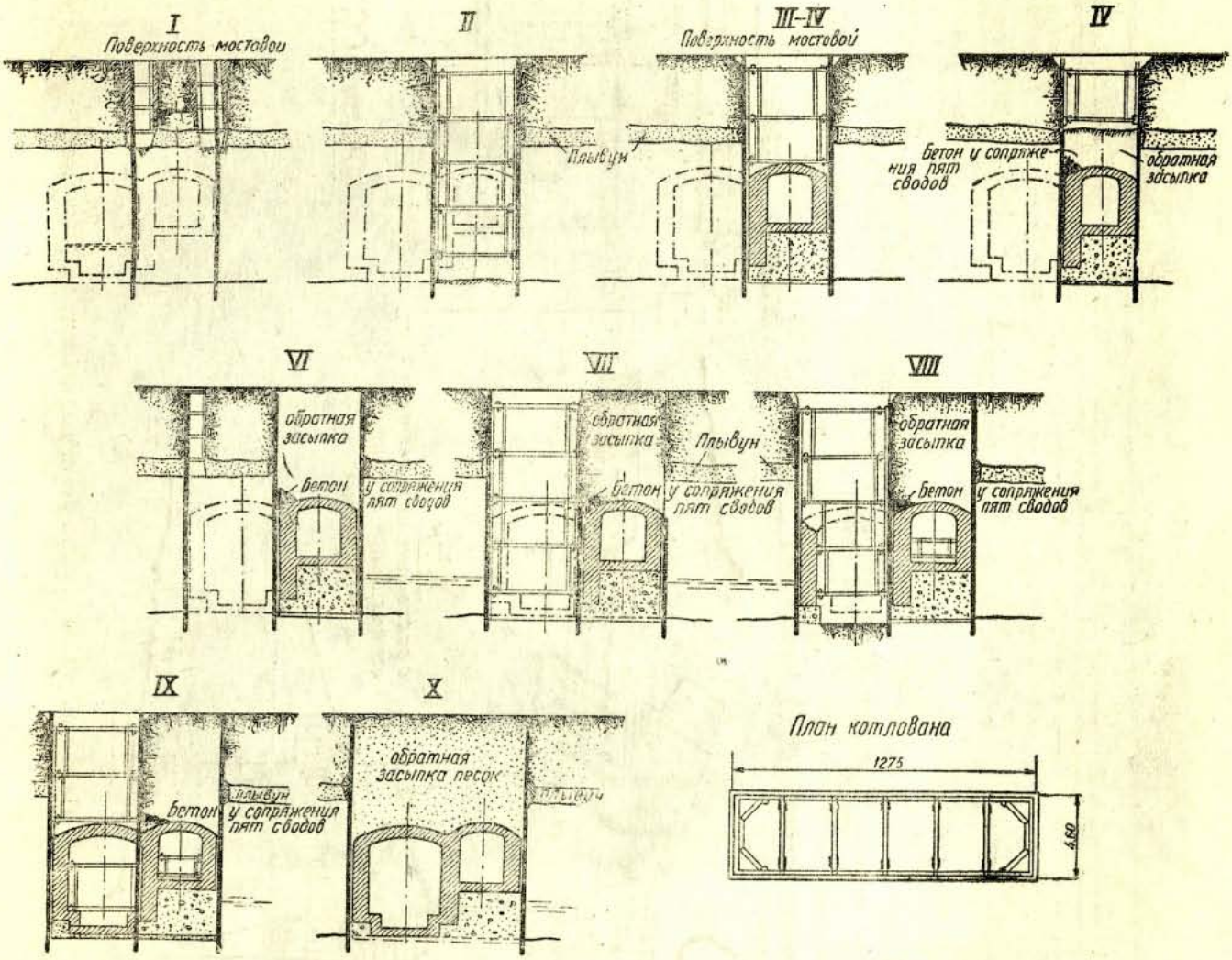


Рис. 428. Сооружение наклонного хода при шпунтовом ограждении

Подземный вестибюль представляет собой конструкцию с плоским перекрытием, поддерживаемым системой колонн. Анализируя конструкции перекрытий и положение балок подземных вестибюлей Лондонского метрополитена (рис. 429), можно выявить, что расположение последних продиктовано не конструктивными соображениями, а практическими возможностями производства работ.

Рядом штолен в нескольких горизонтах (а в зависимости от местных условий и колодцами) подземным способом возводят стены вестибюля. По требуемому контуру из нескольких точек ведутся подходные галлереи к месту расположения колонн, откуда проходят «слепые» колодцы до проектной отметки подошвы башмака колонны. Закладываются фундаменты колонн и ведется установка последних подзем-

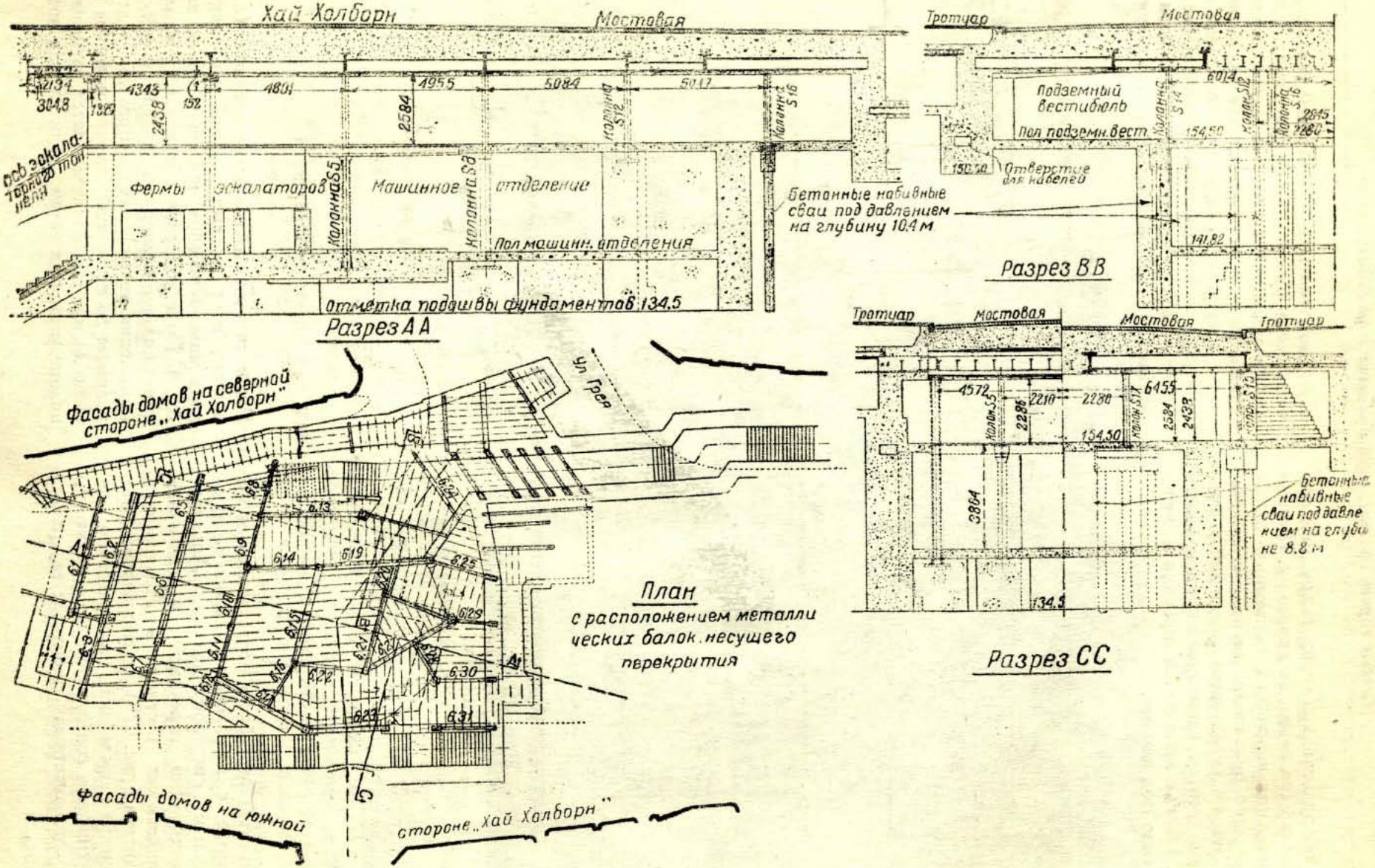


Рис. 429. План и разрез подземного вестибюля станции метрополитена

ным путем в колодцах. В штольнях укладываются балки несущего перекрытия по возведенным колоннам и стенам. В исключительных случаях приходится укладывать некоторые балки открытым путем в ночное время, без перерыва движения (рис. 430). Когда весь основной конструктивный скелет (стены, колонны и перекрытия) готов, приступают к извлечению земляного ядра вестибюля подземным путем, не опасаясь осадок на поверхности. Работы по сооружению подземных вестибюлей ведутся из рабочих площадок, которые располагаются по улице таким порядком, чтобы не стеснять движения. На узких улицах рабочую площадку последовательно перемещают, оставляя проезд в одну сторону и перенося на параллельную улицу движение в обратном направлении. При наличии слабых пород в основании подземного вестибюля приходится иногда закладывать искусственное основание в виде бетонных набивных свай непосредственно из колодцев или из штолен. Изоляция подземных вестибюлей делается внешней оклеечной (из битумных материалов) или внутренней (из специальных чугунных сегментов).

Сооружение подземных вестибюлей может также производиться открытым способом, но под защитой временного моста для пропуска уличного движения (рис. 431), который должен быть устроен предварительно, до приступа к земляным работам.

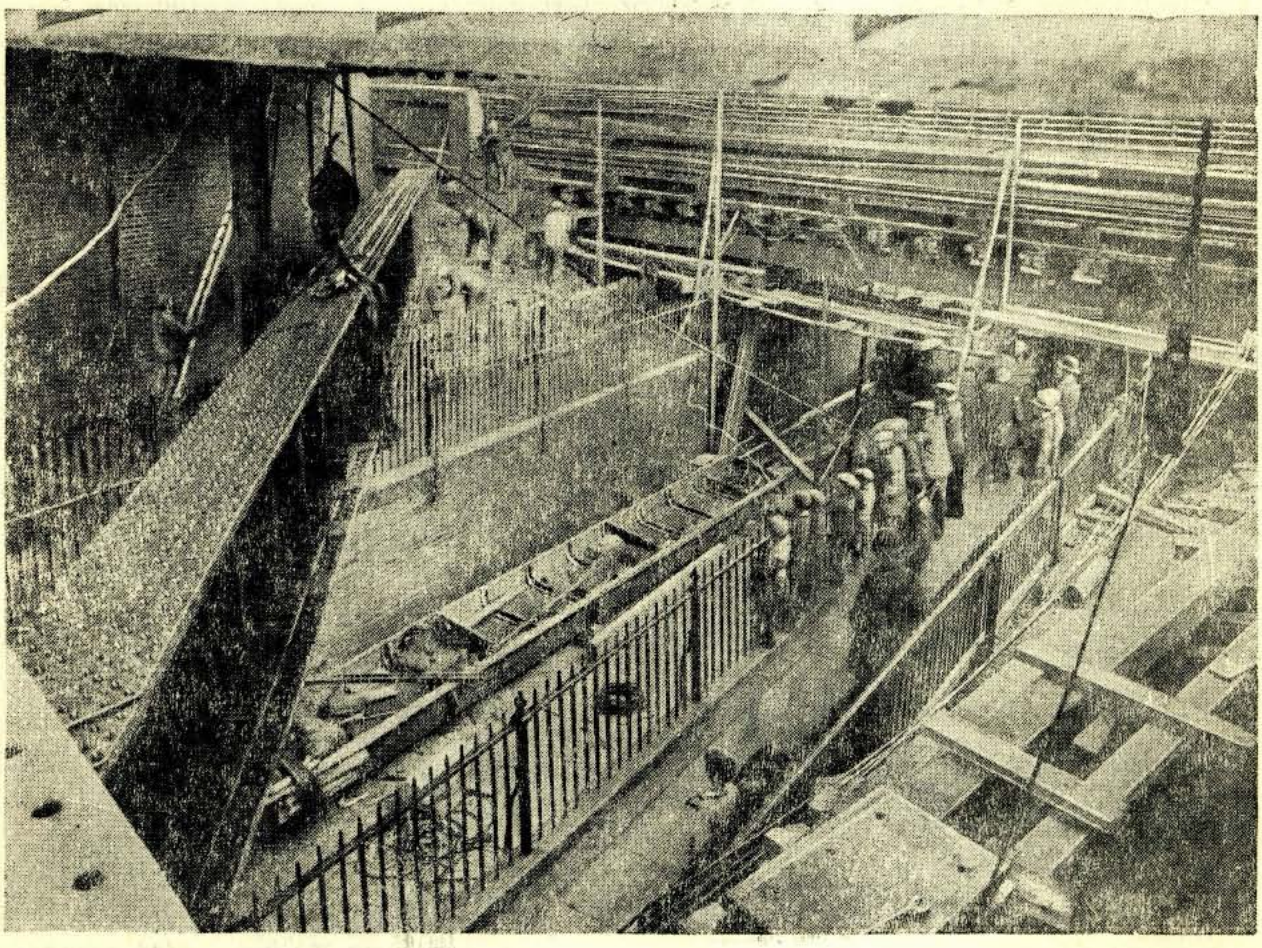


Рис. 430. Монтаж металлических конструкций перекрытия вестибюля

Заслуживает внимания метод сооружения подземного вестибюля, осуществленный на Метрострое. Работы были запроектированы без перерыва уличного движения под временными мостами (рис. 432). Мосты состоят из системы металлических балок, опирающихся на специальные опоры. Для установки опор вырывались колодцы на глубине 3,5 *м* и специальные траншеи глубиной 0,4 *м*. Металлические балки временного перекрытия располагались таким образом, чтобы иметь возмож-

ность вскрыть траншеи для бетонирования стен по контуру вестибюля (рис. 433). Место опор временных мостов также выбиралось с расчетом, чтобы под мостом можно было вести бетонирование перекрытия и изоляцию его. Порядок производства работ под мостом установлен был следующий: 1) вскрытие траншей и бетонирование стен и колонн конструкции вестибюлей; 2) бетонирование перекрытия вестибюля; 3) производство перекрепления элементов моста непосредственно на перекрытие вестибюля; 4) удаление земляного ядра вестибюля; 5) бетонирование пола вестибюля.

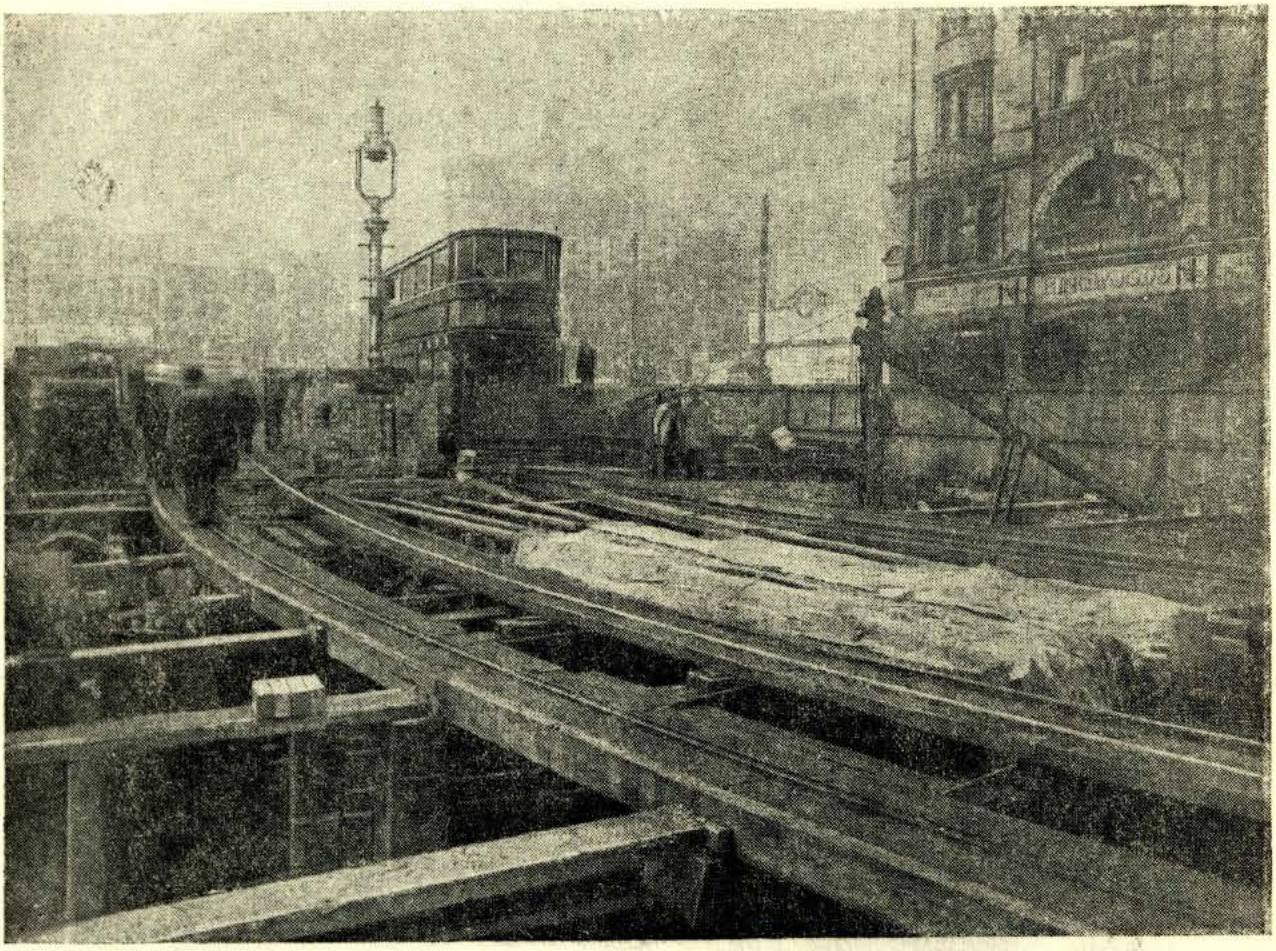


Рис. 431. Временный мост при сооружении подземного вестибюля

Сооружение подземного вестибюля станции Пикадилли-Сиркус. Станция лондонского Андерграунда Пикадилли-Сиркус, построенная в 1906 г., была оборудована лифтами для сообщения между поверхностью и платформами и обслуживала до полутора миллионов пассажиров в год. При дальнейшем интенсивном развитии центрального делового района, обслуживаемого этой станцией, на пересечении двух подземных линий— Пикадилли и Бакерлоо Лайн — потребовалась коренная реконструкция этой станции.

При глубине заложения тюбов линии Пикадилли на 31 *м* от поверхности земли и линии Бакерлоо на 26,2 *м* от поверхности были запроектированы 11 эскалаторов двухмаршевого типа.

В 1925 г., после составления проекта реконструкции станций, была сделана полная модель, воспроизводящая все сложные узлы входов, выходов, платформ, вестибюлей, коридоров, наклонных ходов, тюбов. После тщательного изучения этой модели и внесения необходимых изменений были составлены окон-

чательный проект и рабочие чертежи и приступлено собственно к работам по реконструкции станции Пикадилли-Сиркус.

Непременным условием, поставленным городом перед строителями, было обеспечение бесперебойного уличного движения и сохранность сложного подземного хозяйства.

Для производства тоннельных работ в центре площади Пикадилли-Сиркус, на месте памятника, который на время строительства убрали, была отведена рабочая шахтная площадка. По окончании работ памятник был водворен на прежнее место.

Шахта диаметром 5,5 *м*, заложенная на глубине 28 *м*, была оборудована для выдачи породы и подачи материалов. Предварительно по периферии сооружаемого подземного вестибюля эллиптического сечения 48 × 44 *м* (рис. 434) был пройден специальный тоннельный ход круглого сечения диаметром 3,66 *м*, облицованный чугунными сегментами и предназначенный для укладки огромного количества сооружений сети подземного хозяйства.

В зависимости от положения подземных магистралей, лежащих под шестью улицами, радиально сходящимися к площади, специаль-

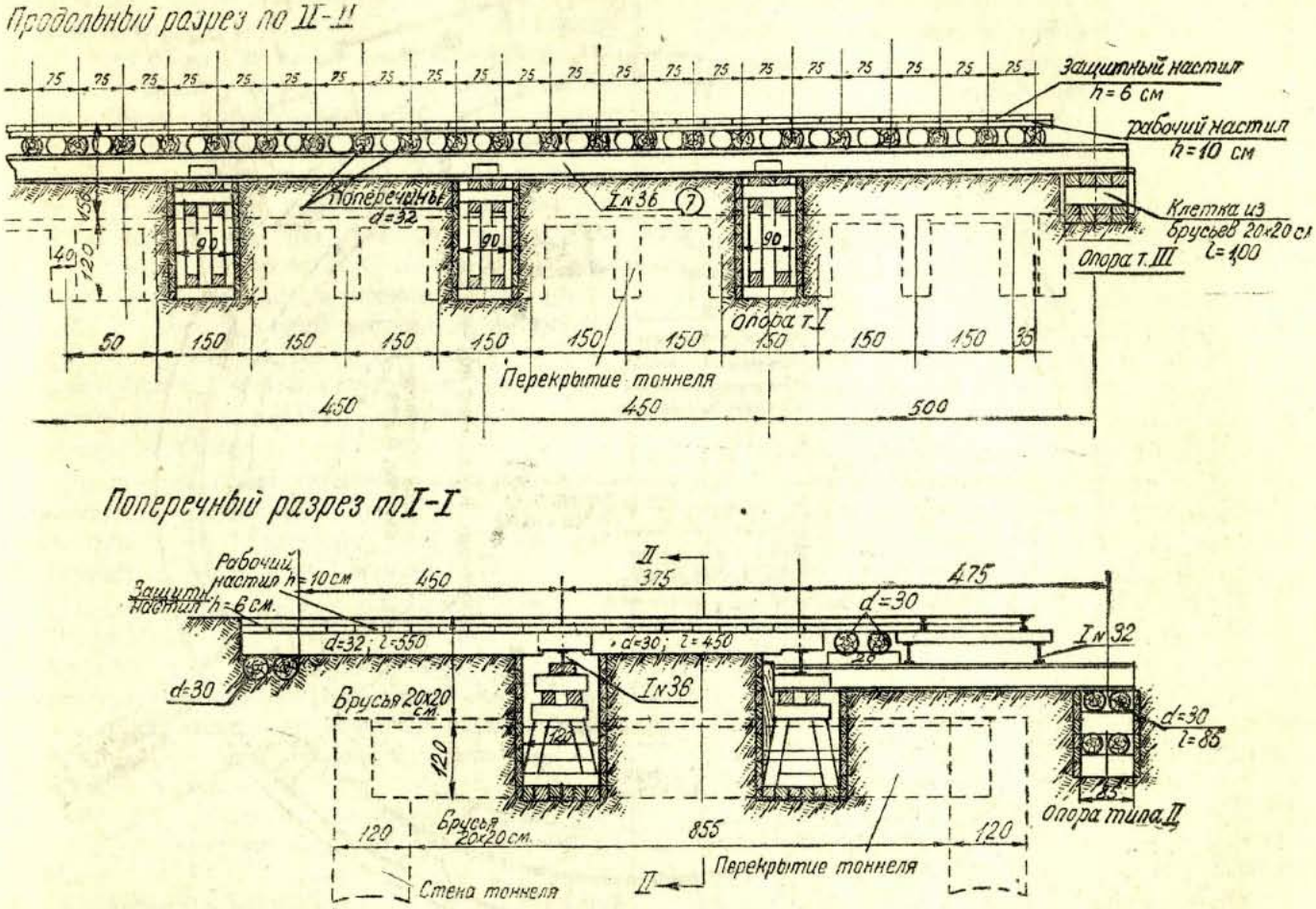


Рис. 432. Сооружение конструкции подземного вестибюля под временным мостом

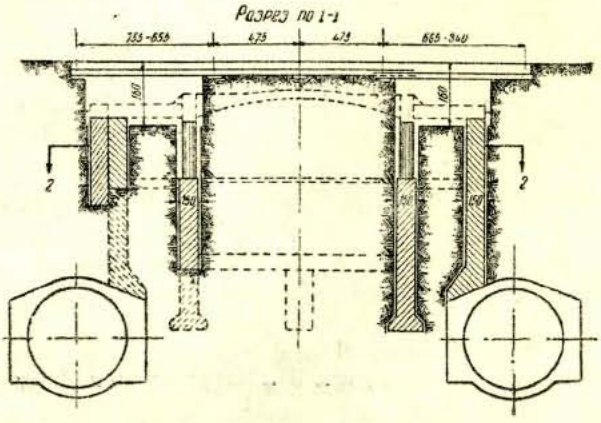


Рис. 433. Сооружение конструкции подземного вестибюля под временным мостом

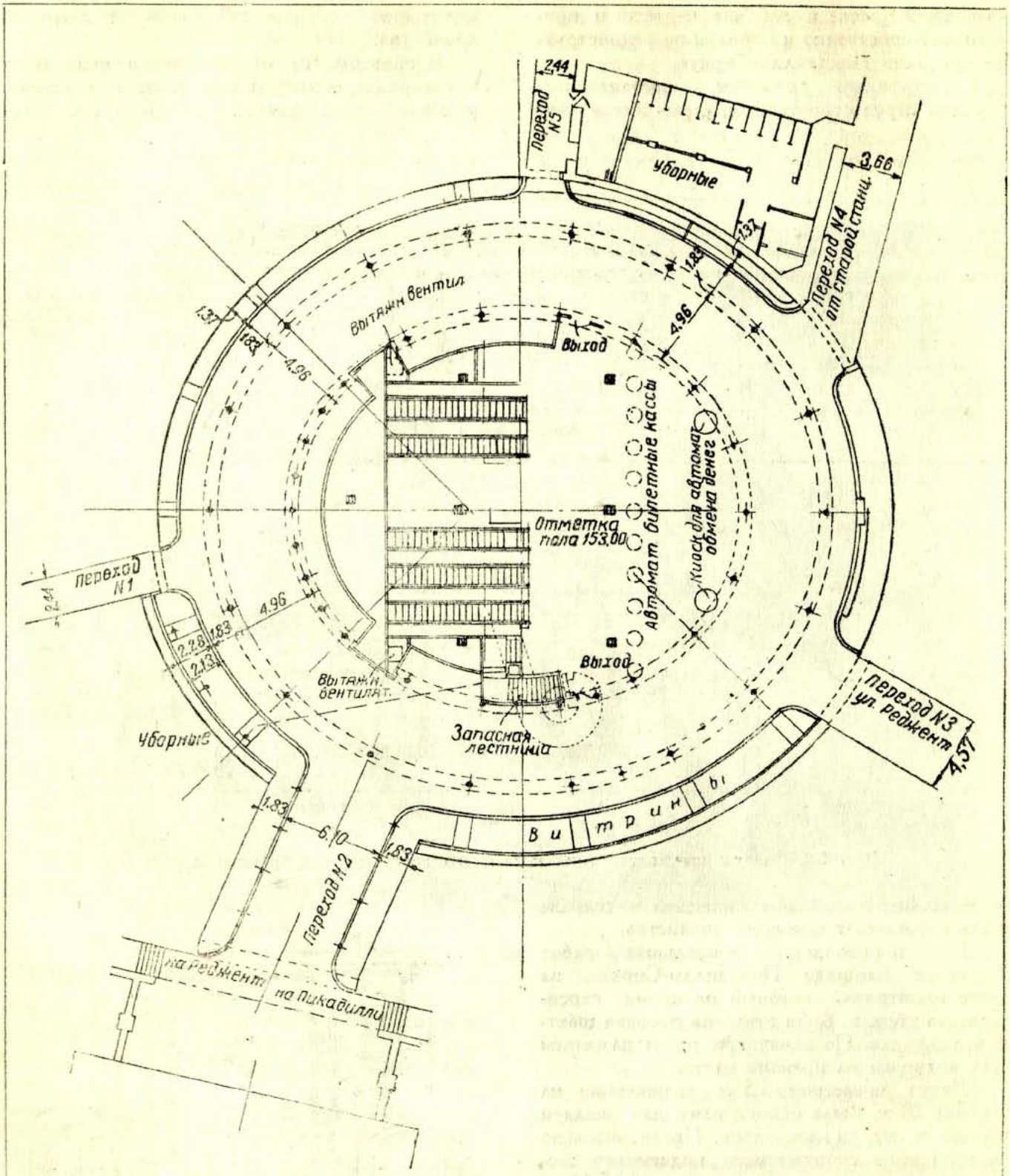


Рис. 434. Метрополитен Лондона (план вестибюля Пикадилли-Сиркус)

ный ход прокладывался в разнообразных направлениях и уклонах, на глубине 4,6—9,1 *м* от поверхности. Длина кольца этого специального хода 168 *м*, при длине наклонных подходов, соединяющихся с подземным хозяйством под радиально примыкающими уличными магистралями, в 914 *м*. После укладки всех городских подземных сооружений во вновь сооружаемый ход и включения их в работу было прекращено функционирование лежащих под площадью элементов сети, которым могла угрожать опасность повреждения. Производству основных подземных работ по сооружению наклонных тоннелей для эскалаторов, камер и подземного вестибюля геологические условия в основном благоприятствовали. Верхний слой состоял из насыпного грунта и песка с гравием (*балласт*) при незначительном дебите грунтовых вод. Ниже залегал мощный пласт водонепроницаемой лондонской глины.

Наиболее ответственным представляется сооружение подземного вестибюля тоннельным путем при толщине грунта над несущим перекрытием от 0,8 до 1,2 *м*.

Подземный вестибюль эллиптического сечения 48 × 44 *м* в плане состоял из обрамляющих стен, из крупного (тяжелого) лондонского кирпича и трех рядов концентрически расположенных колонн, поддерживающих плоское перекрытие из металлических клепаных балок.

Общее количество колонн — 64, при расчетной нагрузке на каждую из них от 80 до 150 *т*.

Сооружение вестибюля велось следующим порядком. По линии стен вестибюля были пройдены штольни, из которых опускались колодцы для закладки фундаментов стен. Отступая, производилось заполнение самих штолен кладкой стен для подземного вестибюля. Закладка колонн производилась через штольни в колодцах по проектному положению. Металлические элементы несущего перекрытия укладывались на возведенные стены и колонны также подземным путем в специальных штольнях без нарушения уличного движения. После устройства несущего перекрытия была произведена выборка внутреннего земляного ядра вестибюля. Часть породы удалялась по пройденным наклонным ходам для эскалаторов рабочими поездами, подходившими к платформам станций Андерграунда ночью, в период перерыва движения (рис. 435).

3. ОПЫТ ПРОХОДКИ ТОННЕЛЯМИ ПОД ИСКУССТВЕННЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ И УСТРОЙСТВО ТОННЕЛЬНЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ

а) *Проходка тоннелем под коллектором Клиши.* Тоннельный коллектор Клиши (Париж) имеет сечение в свету 5 *м* (рис. 436). При проходке тоннелем метрополитена непосредственно под келлектором, без специальных мероприятий, можно было ожидать значительных деформаций и повреждения коллектора общесплавной канализационной системы. Поэтому до начала работ решено было произвести укрепление коллектора на всем протяжении пересечения железобетонной плитой, способной принять на себя усилия, возникающие в коллекторе, в случае осадки грунта под ним.

Для этого с поверхности были пройдены две шахты, через которые параллельно стенам коллектора последовательно были пробиты две галлереи на протяжении 14 *м*. Из последних небольшими заходками под основание коллектора была уложена арматура и производилась бетонировка. Таким путем удалось выложить железобетонную плиту под коллектором.

В дальнейшем проходка велась при раскрытии калотты шириною в 1,6 *м*, причем каменная кладка свода велась до подошвы массива выложенной железобетонной плиты.

В результате сооружение конструкции пересечения тоннеля метрополитена с коллектором Клиши удалось провести без особых осложнений. При проходке тоннелями метрополитена под коллектором Клиши имеются случаи предварительного укрепления последнего внутренней, защитной металлической рубашкой.

б) *Пересечение тоннеля-канала с тоннелем метрополитена.* На участке строительства линии Парижского метрополитена от Пляс де-ла-Репюблик представляет технический интерес осуществление пересечения тоннеля метрополитена с тоннелем-каналом шириной в 12 *м*, куда входят суда из Сены (рис. 437).

Работы производились в глинах и мергелях. Иногда в профиль выработок вклинивались пески, насыщенные водой. Однако дебит грунтовых вод был незначительный, и с ним справлялись два насоса производительностью по 30 $м^3/час$. Во избежание вымывания песка ставилась двойная опалубка и сенные фильтры.

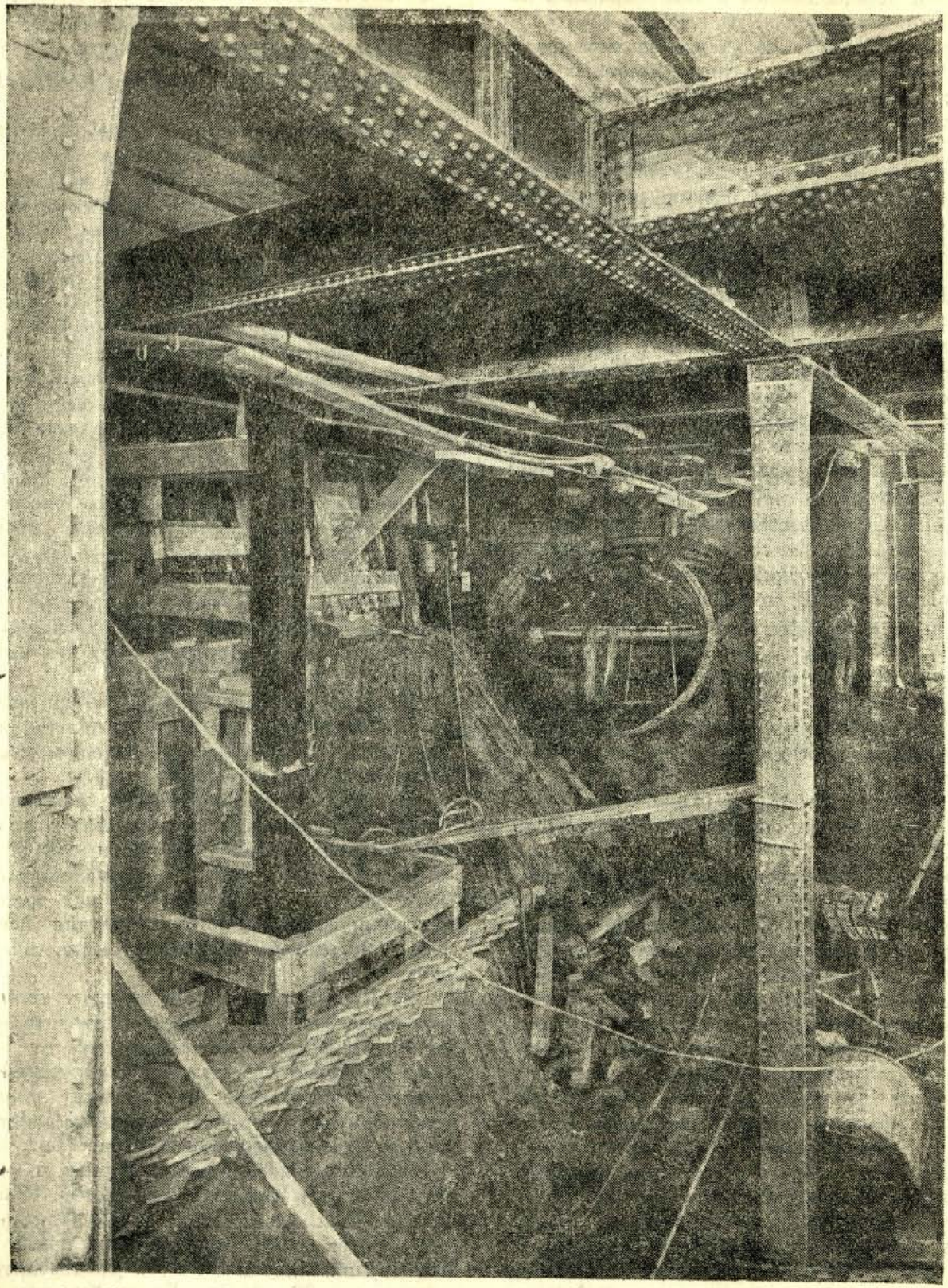


Рис. 435. Совмещение проходки наклонного хода и подземного вестибюля

Пересечение тоннеля-канала со строившимся двухпутным тоннелем метрополитена было осуществлено следующим образом. В четырех углах внешних линий контура пере-

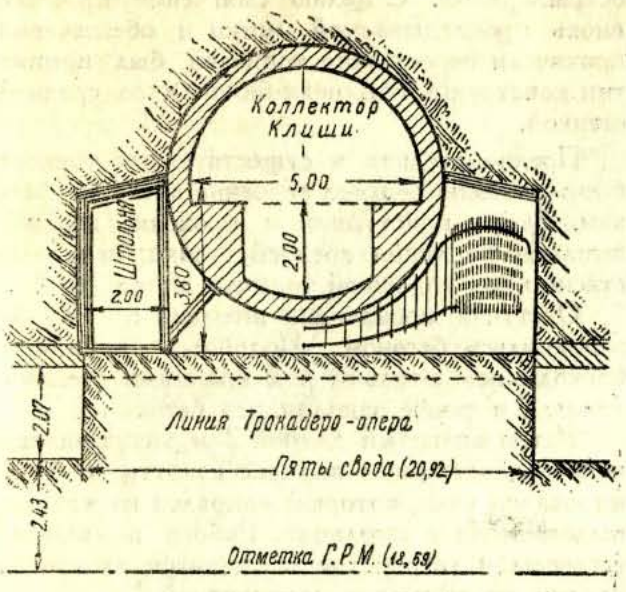


Рис. 436. Конструкция пересечения тоннелей метрополитена и коллектора

сечения сооружений были заложены четыре шахты, причем на уровне пяты существующего свода тоннеля-канала пройдены штольни с рядом колодцев, с подходом непосредственно под пяты свода тоннеля-канала. Вынутый объем колодцев и штолен был забетонирован на всем протяжении места пересечения.

В дальнейшем по торцам пересечения были устроены барражи, и сквозное движение судов было прекращено на 15 дней.

За этот период непосредственно из тоннеля-канала, огражденного по торцам барражами и освобожденного временно от воды, сверху (со стороны обратного свода тоннеля-канала) была вынута порода калоттного профиля тоннеля метрополитена и устроен бутовый свод толщиной в ключе 95 *см*. Поверх свода был уложен бетон и восстановлено движение по каналу.

При пересечении двух тоннельных сооружений в мировой практике придерживаются принципа непосредственного соприкасания конструкций между собой, предпочитая даже создание цельного элемента конструкций. Ни в коем случае между конструкциями пересекаемых сооружений не должен оставляться слой грунта менее 2 *м*. В противном случае при незначительном слое нарушенного грунта неизбежны подвижки грунта и деформации самих сооружений.

в) *Проходка тоннеля метрополитена под коллектором Даснир.* Проходка тоннеля Парижского метрополитена линии Трокадеро — Опера под тоннельным коллектором Даснир общесплавной канализационной системы, имеющего сечение в свету 5,6 *м*, представляла чрезвычайно ответственную инженерную задачу. Отвести этот коллектор основной магистрали не представлялось возможным.

Задача была разрешена следующим образом. Предварительно в коллекторе были уложены две металлические трубы диаметром поперечного сечения по 0,8 *м*, способные пропустить расход вод коллектора в месте пересечения с линией метрополитена. Воду из коллектора откачали, и основной расход проходил через уложенные трубы.

Из противоположных участков прокладываемого тоннеля метрополитена, где уже были выложены своды, на сбойку была пройдена штольня шириной 2 *м*, которая постепенно поднималась в соответствии с очертанием обратного свода обделки коллектора. Отступая, штольня была полностью заложена временной кладкой на растворе в нижней части и бетоном в месте ключа свода.

Таким путем была возведена средняя двухметровая опора под коллектор.

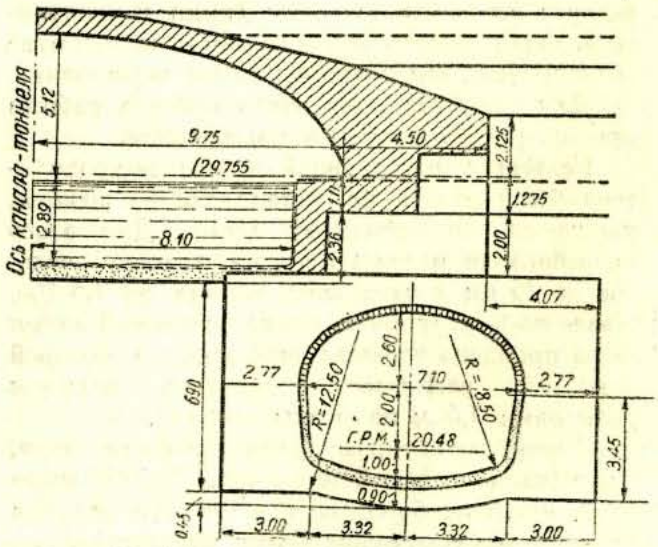


Рис. 437. Конструкция пересечения тоннеля канала и метрополитена

Аналогично были пройдены штольни по линии стен тоннеля метрополитена и также заложены бетоном. В нижних углах штолен была установлена опалубка для образования

части внутренней поверхности свода. Промежутками 1,8 *м* был до конца раскрыт калоттный профиль и уложен свод основного тоннеля.

В дальнейшем обычным порядком была произведена выборка штроссного профиля, подводка стен и кладка обратного свода.

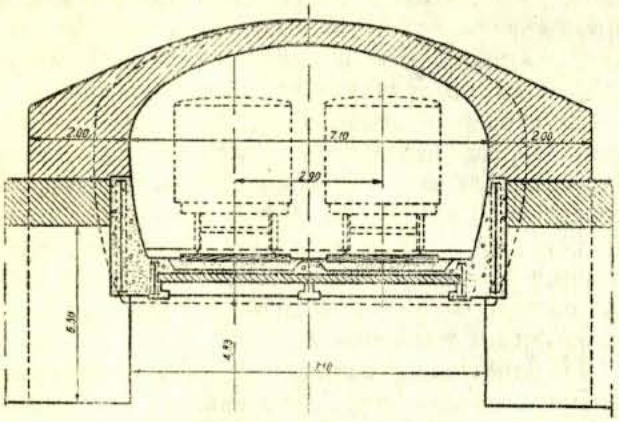


Рис. 438. Конструкция тоннельного пересечения метрополитена

При изложенном методе ведения тоннельных работ коллектор Даснир не потерпел заметных деформаций.

г) *Прокладка тоннеля Парижского метрополитена под линией № 7.* Чтобы избежать трудностей, связанных с опусканием головки рельсов по профилю новой линии метрополитена, было решено пойти на общее перекрытие лотка и свода конструкции в месте пересечения.

Для осуществления этого проекта работы производились в следующем порядке.

Рельсы существующей линии метрополитена были взяты на металлические пакеты, уложенные по бетонному лотку. Для этого потребовался подъем отметки головки рельсов на 25 *см* и изменение уклона до 7,5 ‰. Далее по центру вновь прокладываемой линии была пройдена верхняя штольня, из которой боковыми заходками опускались колодцы размерами 1,6 *м* по стене тоннеля.

Лоток, по которому уложены были пути, укреплялся системой подпорок. После этого были пробиты борозды в лотке для укладки главных металлических балок несущего перекрытия. Малыми частями, при последовательной выломке существующего лотка, в ночное время укладывались поперечные металлические балки и кирпичные сводики.

Выборка ядра при готовом перекрытии и стенах велась без перерыва движения поездов (рис. 438).

д) *Проходка тоннелей линии Трокадеро — Опера под линией № 3 Парижского метрополитена и пересечение линии Норд — Зюд.* Пересечение этих двух линий происходит под острым углом. С целью смягчения профиля вновь прокладываемой линии и обеспечения прочности пересечения тоннелей был принят тип конструкции тоннеля-бинокля со средней стенкой.

Предварительно в существующем тоннеле было уложено верхнее строение путей по балкам. Затем приступили к проходке верхней штольни по линии средней стенки, непосредственно под подошвой тоннеля линии № 3.

Отступая, пройденная штольня полностью заполнялась бетоном. Подобным порядком проходились штольни под крайними стенами тоннеля и также заполнялись бетоном.

Затем кольцами длиной 2 *м* раскрывались в последовательном порядке калотты и бетонировался свод, который опирался на кладку, выложенную в штольнях. Работа по выемке штроссы и устройству оставшихся элементов кладки не вызывала затруднений.

В процессе работ на линии Норд — Зюд была предусмотрена возможность сооружения пересечения с линией Трокадеро — Опера.

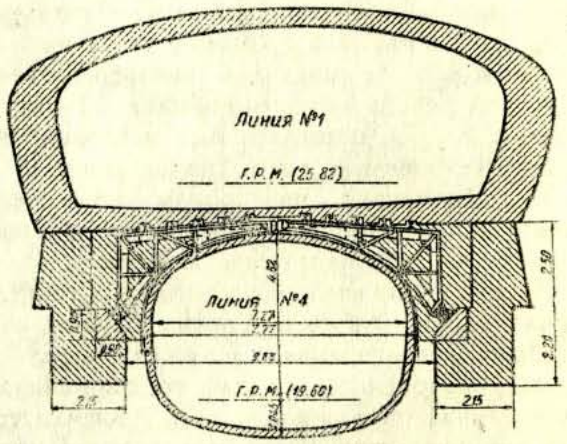
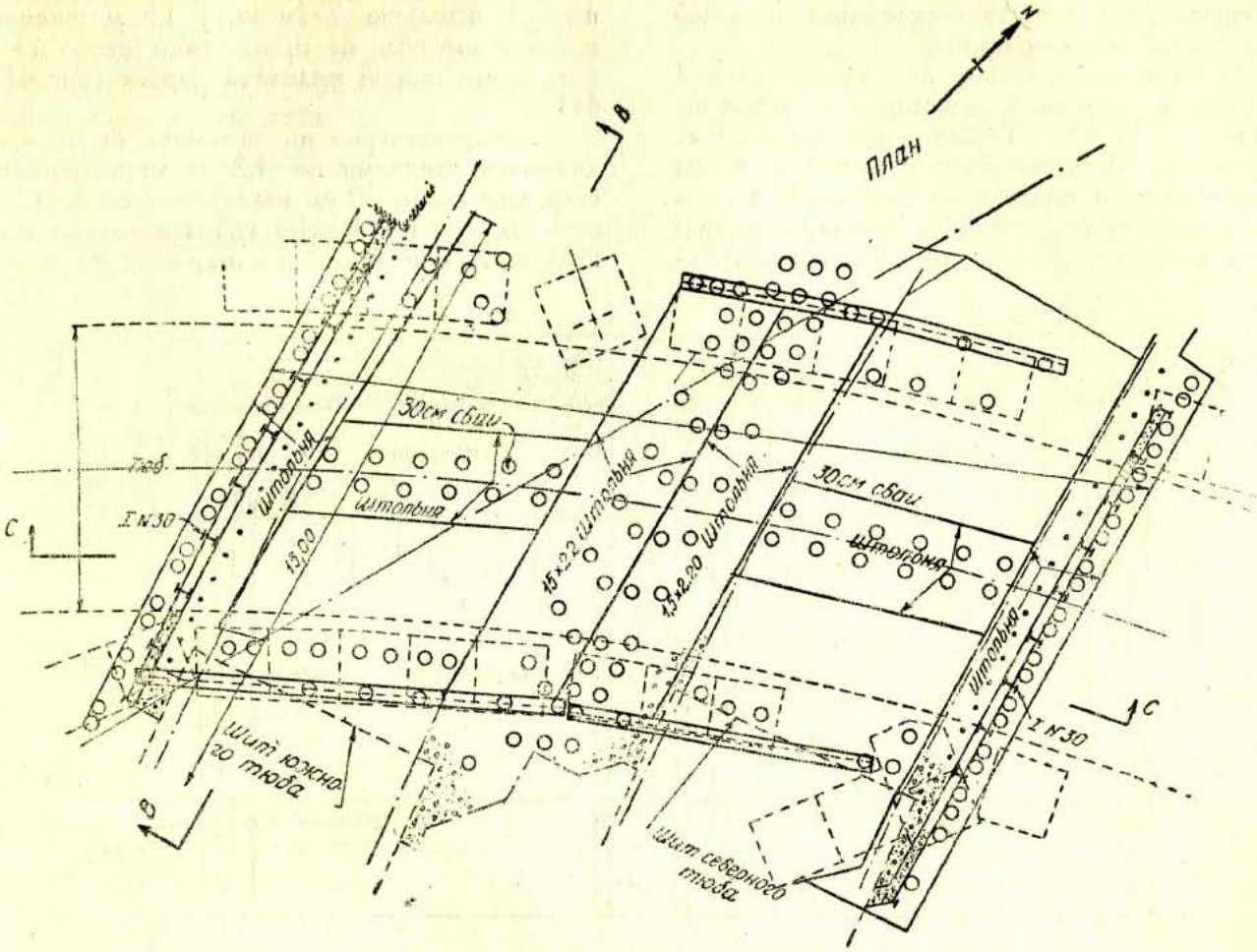


Рис. 439. Конструкция тоннельного пересечения метрополитена

В связи с этим были предприняты следующие работы. В существующем своде тоннеля Норд — Зюд были пробиты 8 отверстий для устройства бетонных подушек под четыре главные металлические балки с целью образования несущего перекрытия в месте пересечения. Своды линии Норд — Зюд были сломаны и системой поперечных балок уложены по главным балкам с кирпичными



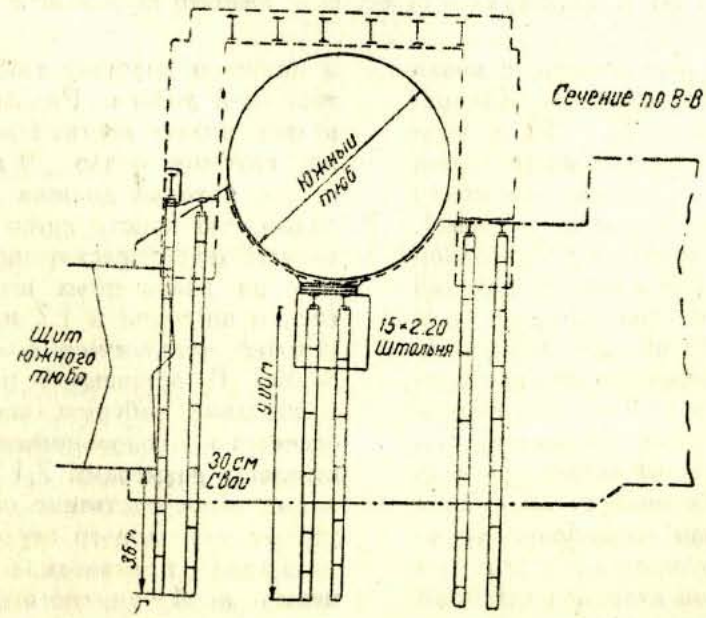


Рис. 440. Конструкции пересечения тоннелей метрополитена

сводиками. На рис. 439 показана специальная разгрузочная металлическая конструкция арочного типа в месте пересечения тоннелей двух линий метрополитена.

е) *Прокладка тюбов под существующей подземной железной дорогой на Фултон-стрит (США).* Трасса прокладываемых тюбов по Фултон-стрит пересекала тюбы существующей подземной железной дороги под углом 45° в плане. Потребовалось произвести соответствующие укрепления конструкции тюбов в месте их пересечения с вновь прокладываемой подземной дорогой. Квадратура пересечения составляет 12 × 20 *м*, причем длина (20 *м*) идет в направлении тюбов старой подземной дороги. Глубина заложения этих тюбов 10 *м* от поверхности мостовой. Предварительно были пройдены штольни параллельно оси тюбов (по внешней боковой поверхности их) и заполнены бетоном для образования мощных бетонных ленточных фундаментов с целью поддержания расположенного вблизи крупного здания. До начала проходки под тюбами старой подземной дороги было произведено укрепление в виде металлических свай и бетонных ленточных фундаментов. При наличии водоносных грунтов (уровень грунтовых вод находился на 1,5 *м* над подошвой тюбов старой подземной железной дороги) было забурено около 80 скважин глубиной по 6 *м* каждая для искусственного водопонижения. При понижении грунтовых вод примерно на 1,8 *м* удалось пройти штольню размерами 1,5 *м* ширины и 2,2 *м* высоты, на протяжении около 19 *м* под тюбом старой железной дороги (рис. 440, 441 а).

Непосредственно из штольни были «задавлены» звеньями по 1,2 *м* металлические сваи диаметром 30 *см* на глубину около 12 *м* при помощи 100-тонных гидравлических домкратов. Гидравлические домкраты упирались в нижнюю подошву тюбов старой подземной железной дороги. Рядом со сваями задавливались также вертикальные балки I № 30 на глубину около 10 *м* с целью создания стены, которая должна ограждать вновь создаваемую конструкцию тоннелей, прокладываемых под существующими тюбами. В каждой из заложенных штолен бетонировались стенки шириной в 1,2 *м*, включающие в себя головы металлических свай и двутавровых балок. В оставшееся пространство (60 *см*) в штольне забуривались трубы для искусственного водопонижения. Смежные две штольни размерами 2,1 × 2,1 *м* проходились также непосредственно под старым тюбом по центру тоннельного пересечения.

Далее производилась выемка грунта между пройденными штольнями на ширину около 3 *м* и бетонные работы по устройству средней массивной стены, служащей опорой

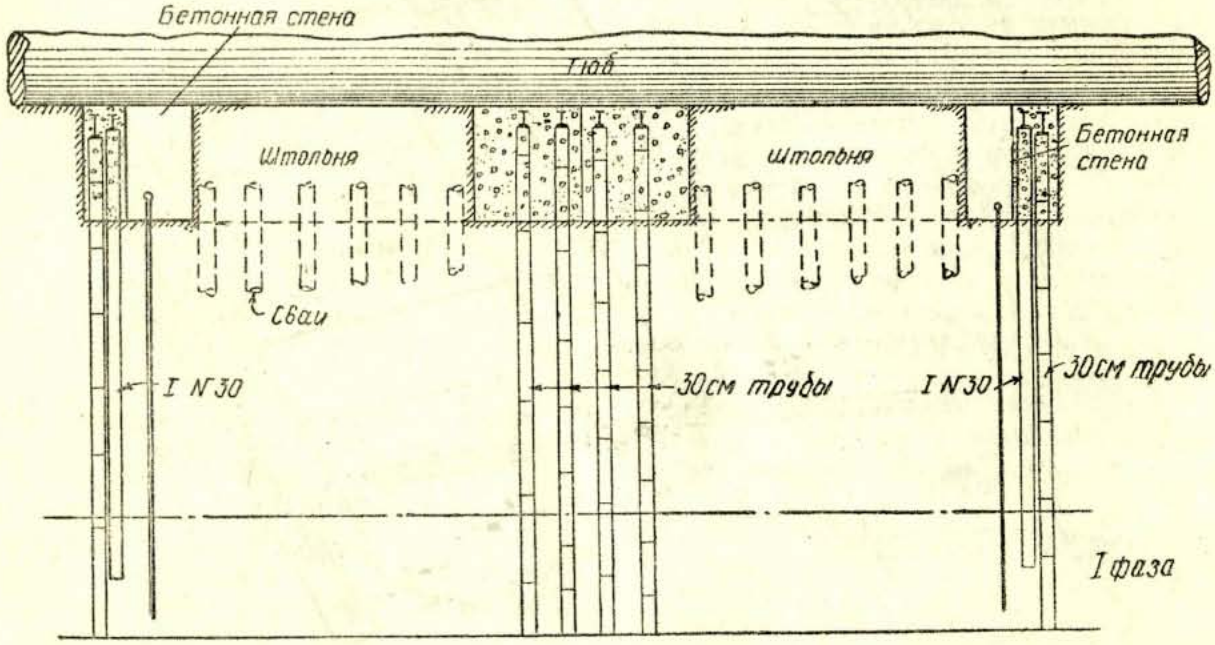


Рис. 441 а. Конструкции пересечения тоннелей метрополитена

в центре пересечения под старым тюбом, а также бетонные работы по устройству крайних ограждающих стен (рис. 441 б).

В процессе работ производилась срезка металлических свай, служивших временной опорой для старого тюба.

ж) *Сооружение тоннелей у домов.* Если позволяют геологические условия и характер фундирования данного здания, при сооружении тоннелей близ домов пытаются обойтись без особых подводок фундаментов и во всяком случае стараются

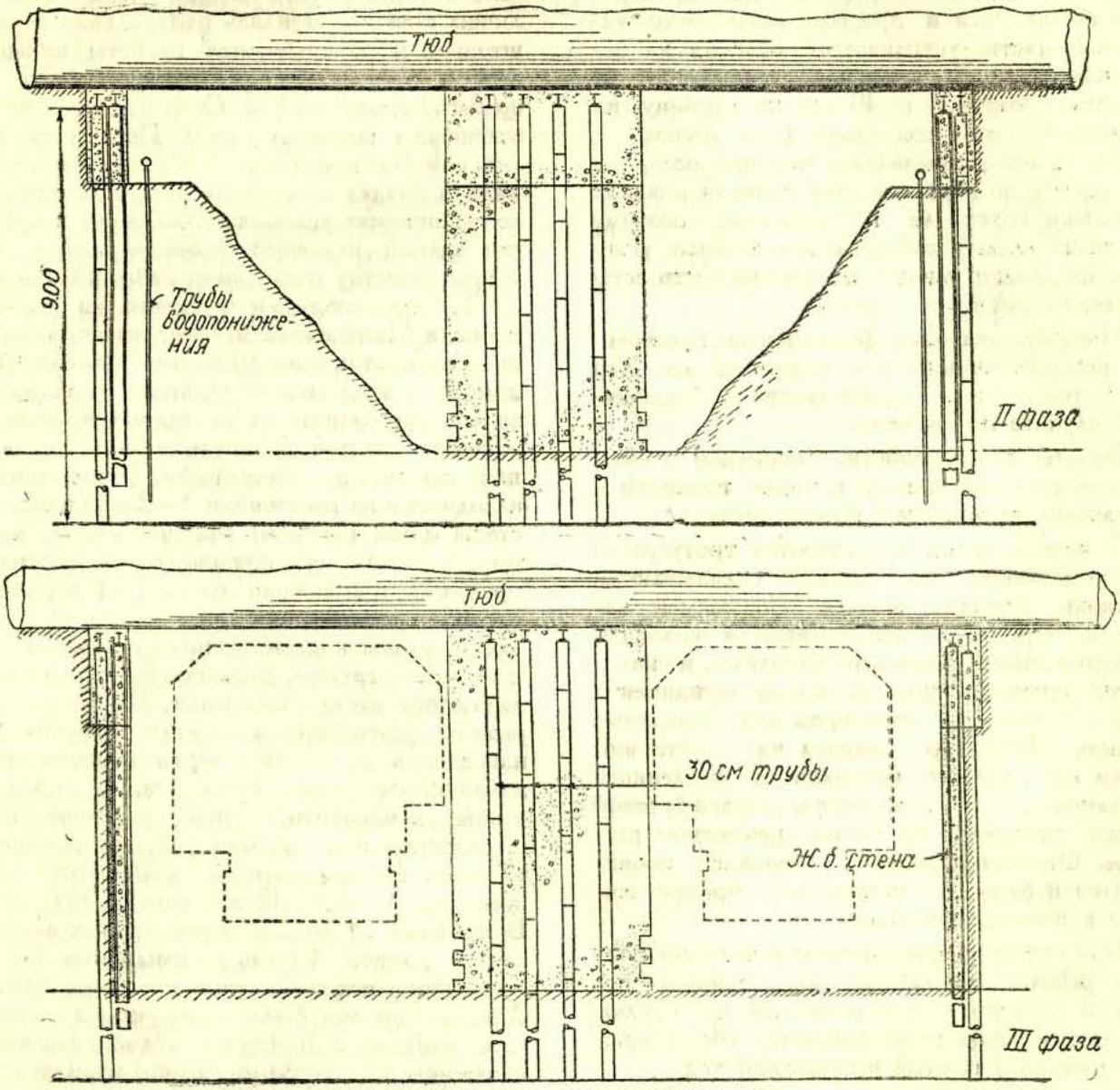


Рис. 441. Конструкции пересечения тоннелей метрополитена

Сооружение этого сложного пересечения при трехсменной работе было произведено в 9 месяцев.

Большое количество сложных конструкций тоннельных пересечений сооружено при взаимном пересечении радиальных и кольцевой линии тоннельной сети Московского метрополитена.

свести работы по усилению фундаментов к минимуму. Считается, что работы, связанные с укреплением фундаментов, дают в некоторых случаях гораздо большие деформации, чем при проходке самим тоннелем возле дома, без предварительного укрепления последнего.

При прокладке тоннелей метрополитена

вблизи домов применяются разные системы укреплений, причем в некоторых случаях большой процент работ, связанных с укреплением фундаментов, входит в тело самой тоннельной обделки. В парижской практике в грунтах сухих, но неустойчивых, где может произойти выползание грунта из-под подошвы фундамента в процессе разработки калоттной части, устраивается бутовая на цементном растворе защитная стенка «mur de masque» толщиной в 40 *см*, на глубину из расчета 45° от пяты свода (для песков).

На практике выявлено, что при осторожной работе по подводке стен тоннеля никакой подвижки грунта не наблюдается, поэтому предпринимаемая работа в нормальных условиях не должна влиять на устойчивость естественного основания здания.

Никакой подводки фундаментов, проведенной непосредственно под подошвой их, для целей тоннельного строительства в большинстве случаев не делается.

Работы по устройству защитной стенки ведутся при небольшой глубине подводки и не глубоко заложенных фундаментах.

В ночное время вскрываются тротуары и непосредственно на грунт укладываются верхняки будущих штолен, обшиваемые настилом. Через 20 *м* закладываются колодцы, оборудованные обычными воротами, и начинается проходка штолен вдоль фундамента дома с установкой штендеров под уложенные верхняки. Штендер ставится на расстоянии 50 *см* от лицевой поверхности оголенного фундамента, и вслед ведется выкладка бутовой стенки толщиной 40 *см* на цементном растворе. Откатка породы и материалов производится в бадье по монорельсу, прикрепленному к потолку штольни.

При глубоких фундаментах и наличии подвала работы проводятся аналогичным порядком, но с той только разницей, что исключительно осторожно продвигается (без вскрытия тротуара) полный штольневой ход.

При сооружении станции Рю де-Криме под улицей шириной в 14 *м* для сохранения установленных габаритов станций пролетом в 12,7 *м*, при ширине платформ в 4,1 *м*. стены станции попадали под дома. Чтобы исключить связанные с этим явлением осложнения, было принято устройство стен из железобетона толщиной 65 *см*.

Работы производились вдоль фундаментов домов отдельными колодцами размером в плане 2 × 3,2 *м*. В колодцах закладывали железобетонные стены, и на них возводились коллекторы дублированной системы, заменяющие коллекторы, попадающие в сечение тоннеля станции и подлежащие уборке. При наличии стен проходилась центральная верхняя штольня и раскрывались калотты кольцами в 3 *м* при налегающей толще грунта над щелыгой свода в 3,9 *м*. Свод опирался на выведенные в колодцах стены. После раскружаливания производилась уборка штроссного ядра и кладка обратного свода. В сложных геотехнических условиях надлежащее укрепление зданий надлежит провести до приступа к производству тоннельных работ вблизи них.

Так при сооружении одного из участков тоннеля Московского метрополитена, залегающего на протяжении 80 *м* под многоэтажным домом, в виде дополнительного мероприятия по его укреплению было применено замораживание грунтов. Тоннель залегал на большой глубине от поверхности. Стены тоннеля находились на расстоянии 1—2 *м* от плоскости стены дома. На этом участке лежала, кроме того, сложная сеть подземных сооружений и проходил трамвайный путь. Под насыпным слоем залегали разнозернистые пески с примесью глины и щебня, а ниже тонкозернистые плывунные грунты, составляющие заполнение размытого русла староречья. Чтобы не прерывать трамвайного движения, бурение производилось не только вертикальными, но и наклонными скважинами таким образом, чтобы заморозить грунты, лежащие непосредственно под путями. Было пробурено 6 рядов вертикальных и наклонных скважин на глубину 18 *м*, числом 359 штук. Всего было пробурено вертикальных скважин общей длиной 4,5 *км*, а наклонных 1,6 *км*. Расстояние между скважинами было принято 2 *м*, причем они были пробурены в шахматном порядке в водоупор. Замораживающие скважины по контуру дома бурились на взаимном расстоянии 1,5 *м*, с тем чтобы создать мощный ограждающий массив от выпуска плывуна из-под дома. Всего было заморожено 14 000 $м^3$ грунта.

Проходка тоннеля на этом участке в условиях слабых грунтов не повлияла на устойчивость указанного многоэтажного здания.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

РАЗРАБОТКА ГОРНЫХ ПОРОД В ТОННЕЛЬНОМ ЗАБОЕ

ОБЩИЕ ДАННЫЕ

В тоннельном строительстве проходка подземных выработок осуществляется в самых разнообразных геотехнических условиях, от которых зависит решение основного тоннельного процесса — разработка и крепление лба забоя.

Наряду с ручными инструментами — обычной проходческой лопатой и кайлами для разработки мягких грунтов — при небольших объемах работ в современной практике применяются механические инструменты: пневматические лопаты (рис. 442, 443), пневматические и электрические отбойные молотки (рис. 444, 445). По породам высокой крепости производится бурение перфораторами для производства взрывных работ. В последнее двадцатилетие начали применять специальные тоннельные машины, полностью механизирующие процесс экскавации породы в забое. Имеются попытки разработки забоя гидравлическим способом, применением водяной струи гидромонитора под большим напором, при одновременном гидравлическом транспортировании породы из забоя на поверхность (шахта № 7 Метростроя).

Разработка забоя является важнейшей операцией тоннельного процесса, от успешности производства которой зависит успех скоростного строительства (рис. 446).

Успешное ведение операции по выемке грунта из забоя обусловливает определенную скорость сооружения тоннеля. Ни одна из последующих операций не должна являться узким местом, могущим задержать дальнейший ход работ. Порода от разрабатываемого забоя должна непрерывно убираться погрузочной машиной, питателем и через внутритоннельный транспорт на поверхность, по поточной системе. Устройство обделки тоннеля осуществляется при этом параллельно. Если проследить эволюцию развития тоннельного дела в историческом аспекте, то можно усмотреть, что только с изобретением пороха был осуществлен разительный сдвиг в подземном строительстве. Порох вызвал к жизни создание целой серии машин и оборудования для производства буровзрывных работ. Сейчас мы уже располагаем мощными перфораторами, буровыми и отбойными инструментами (рис. 447, 448, 449), специальным буровым хозяйством, а равно рядом новых тоннельных машин для резания, скалывания, дробления и бурения породы без применения взрывных работ.

Имеются попытки применения физико-химических воздействий на породу, подлежащую выемке.

Несмотря на существующие в нашей и заграничной практике серии различных агрегатов, инструментов и приспособлений, нет до сих пор универсального тоннельного агрегата, который бы удовлетворял полностью требованиям строителей. Отдельные агрегаты дают лишь частичный эффект, и их можно рассматривать как опытные экземпляры. Базировать и даже ориентировать полностью крупное тоннельное предприятие на указанные агрегаты пока не представляется возможным.

Подходя непосредственно к типам тоннельных машин и экскавирующих агрегатов применительно к конкретным геологическим условиям, представляется возможным отметить, что при выборе системы и принципа работы машины необходимо учитывать факторы физико-механических свойств пересекаемых пород.

РАЗРАБОТКА СКАЛЬНЫХ ПОРОД

Наиболее эффективным методом проходки в скальных породах с высоким коэфициентом крепости $f > 2{,}5$ является буровзрывной метод работ.

Тоннельные машины, базирующиеся на принципе резания малой стружкой при незначительной подаче, по существу дела не

дают технико-экономического эффекта, поскольку их работа связана с абразивным процессом превращения породы в мелочь, пыль при значительном расходе электроэнергии.

Создание нового типа тоннельных машин



Рис. 442. Разработка породы в забое при помощи пневматической лопаты

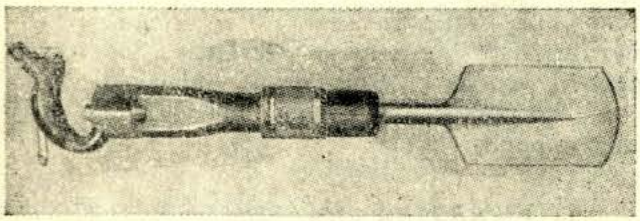


Рис. 443. Пневматическая лопата

для разработки скальных пород необходимо обосновать на следующих принципах (с учетом опыта работы примененных на практике отдельных экземпляров).

а) *Принцип скалывания пород.* Вращающиеся бары, оснащенные рядом зубков, ножей из твердых сплавов (комбайн Чихачева, машина Уайтекера — рис. 451, 452, комбайн «штрекенбагер» типа ПК-1 и др.).

Комбайн Чихачева был испытан как опытный образец при проходке штрека (1935 г.) на шахте в Донбассе в условиях песчаных сланцев. Машина оснащена впереди крестовым баром с насаженными на нем зубцами из твердых сплавов. Разработка забоя основана на принципе вращательного бурения (рис. 453, 454, 455). Машина Чихачева в породах с коэфициентом крепости $f = 4$, при диаметре выработки круглого сечения в 3 *м*, запроектирована обеспечить скорость продвижения забоя

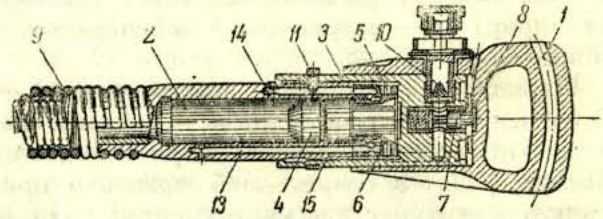


Рис. 444. Отбойный молоток ОМ-5 завода „Пневматик":

1 — рукоятка, *2* — ствол (рабочий цилиндр), *3* — корпус молотка, *4* — поршень-ударник, *5* — золотниковая коробка, *6* — трубчатый золотник, *7* — пусковой клапан, *8* — пружина пускового клапана, *9* — пружина для удержания пики, *10* — сетка фильтра, *11* — стопор *12* — кольцевая полость вокруг золотниковой коробки, *13*, *14* — каналы, *15* — выхлопное отверстие

от 0,3 до 1,5 *м/час* (без крепления выработки).

Все элементы машины смонтированы на общей платформе и перемещаются на гусеницах. Мощность мотора, вращающего бар, 85 kW. Скорость вращения бара 4,9 *об/мин.* Длина машины 10 *м*, габариты поперечного сечения корпуса в свету $1{,}7 \times 2{,}2$ *м*.

В испытании находится и проходческий комбайн ПК-1 («штрекенбагер»). Впереди комбайн оснащен двумя спаренно смонтированными в вертикальной плоскости барами с зубками из твердых сплавов по типу врубовых машин. Отколотая в забое порода падает на скребковый конвейер и далее на подземный транспорт. Машина перемещается на гусеничном ходу. Мощность мотора режущей части 20,5 kW. Эффект работы от комбайна ПК-1 можно ожидать при работе по углю и по хрупким породам (рис. 456, 457).

б) *Принцип дробления пород.* Машины оснащены в головной части целой группой тяжелых электрических молотов, скалываю-

щих и дробящих скальную породу по лбу забоя выработки. Имеется в виду американская машина системы Апп. Раздробленная порода подается с забоя по специальному транспортеру, составляющему один из элементов машины, в вагонетки подземной откатки. При этом отпадают операции производства буровзрывных работ (бурение, взрыв, вентиляция и т. п.). Достигаемая машиной скорость штольневой проходки 0,5—1,2 *м/час* (рис. 450). Однако ввиду высокой стоимости машина не получила большого распространения.

В Америке производилось испытание машины системы Сигафу для проходки штольни диаметром 2,5 *м* без взрывных работ (рис. 458). Агрегат Сигафу состоял из 8 мощных ударников, расположенных по

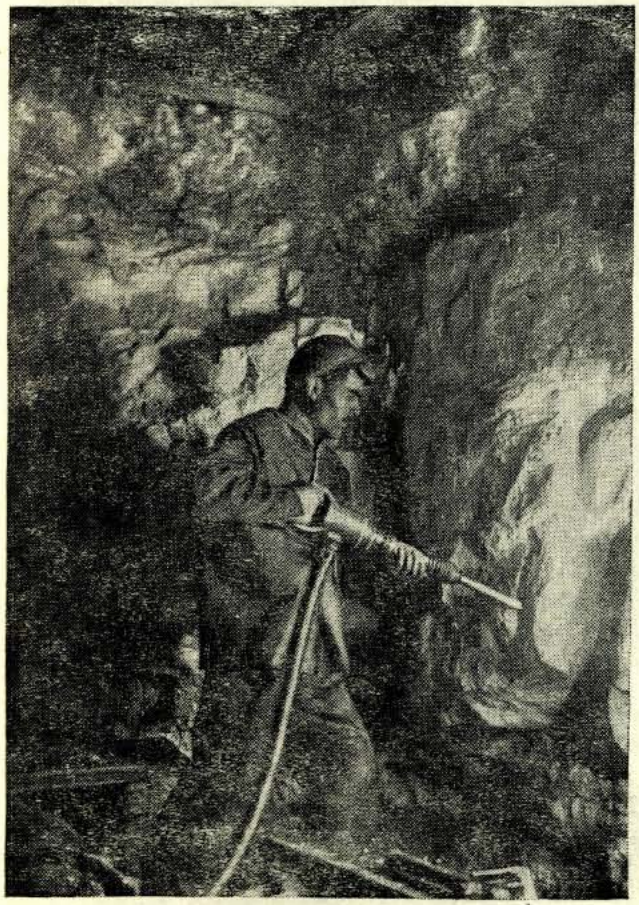


Рис. 445. Работа в тоннельном забое

контуру выработки, и 2 ударников, размещенных центрально. Дробление породы по забою происходило рифленой поверхностью ударника, имеющего вращение вокруг своей оси и одновременно получающего дополнительное перемещение в связи с вращением всего агрегата. При этом не требуется взрывных работ. Мощность двигателя 150 *л. с.* Раздробленная порода удалялась гидравлическим способом.



Рис. 446. Работа в тоннельном забое

На аналогичном принципе работает агрегат, где рифленые поверхности ударников заменены *чаннелерами* — комплектом буров, производящим сильные и частые удары по породе, нормально к плоскости забоя (рис. 459).

При проходке пилот-штолен ($5 \times 4{,}1$ *м*) тоннеля Форт-Пэк применялась машина, работавшая на принципе врубовки. Она давала возможность выпиливать породу в забое.

Машина Джеффри для проходки горизонтальных выработок оснащена врубовками по трем плоскостям, подсекающими забой по подошве и по бокам выработки. Рабочим инструментом врубовок являются зубки, закрепленные на режущей цепи. После того как целик имеет щели, зарубленные врубовками глубиной до 1,8 *м*, начинает работать механический ударник — зубило гидравлического действия, дробящий породу по лбу забоя. Отбитая порода падает на транспортер, лежащий в плоскости подошвенной врубовки, и передается на подземный транспорт (рис. 460, 461).

В зависимости от давления рабочей жидкости в гидравлических домкратах имеется возможность регулировать силу ударного действия механического зубила в соответствии с крепостью пород и откалывать значительный процент крупных кусков и глыб.

Кинематическая схема машины обеспечивает шарнирность действия рычага механического ударника, который имеет возможность дробить породу в любой точке забоя.

Машина Джеффри применяется в угольной промышленности. При этом скорость проходки штреков в пять раз выше проходки обычным методом.

отбойных молотков. Последние поставлены под уклон к забою; при одновременном вращении агрегата они имеют возможность производить отбойку породы каждый раз по новой точке поверхности забоя (рис. 462).

Отбитая порода забирается по жолобу на транспортер или удаляется гидравлическим способом. Устройством специальной упругой

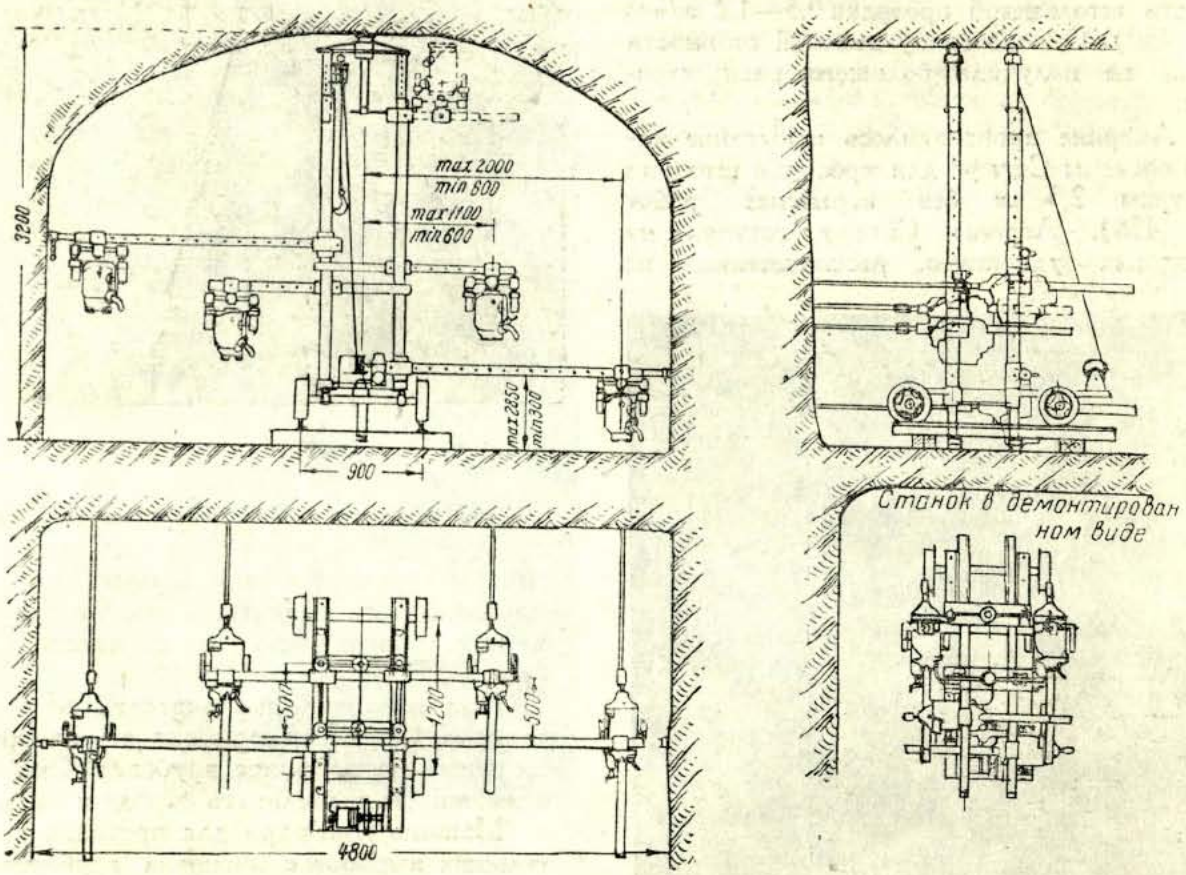


Рис. 447. Станок для группового бурения забоя

Комбинированием режущего действия врубовых машин и дробителя создан агрегат, позволяющий эффективно вести механическую разработку и погрузку породы в забое без взрывных работ, особенно по углю, глинистым сланцам, вулканическому туфу, мелу. В зависимости от физико-механических свойств пород необходимо устанавливать форму режущих элементов машины, материал зубка и величину давления рабочей жидкости в домкратах дробителя.

Следует отметить проект машины динамического действия, оснащенной впереди специальным крестообразным баром, на который насажена группа (до шести на каждом крыле) прокладки ослабляются сотрясения при работе машины.

в) *Принцип бурения пород.* Имеется в виду бурение по забою скважин больших диаметров полным сечением, с использованием опыта бурения шахт в Калифорнии, где бурились шахты диаметром до 3 *м*, с выемкой керна весом до 6 *т*, а также принципов новых буровых агрегатов инж. Щепотьева и инж. Маньковского. На рис. 463 показана схема буровой машины с удалением измельченной породы из забоев при помощи шнека.

г) *Принцип физико-химического воздействия на скальные породы.* Используя переменный режим высоких и низких температур,

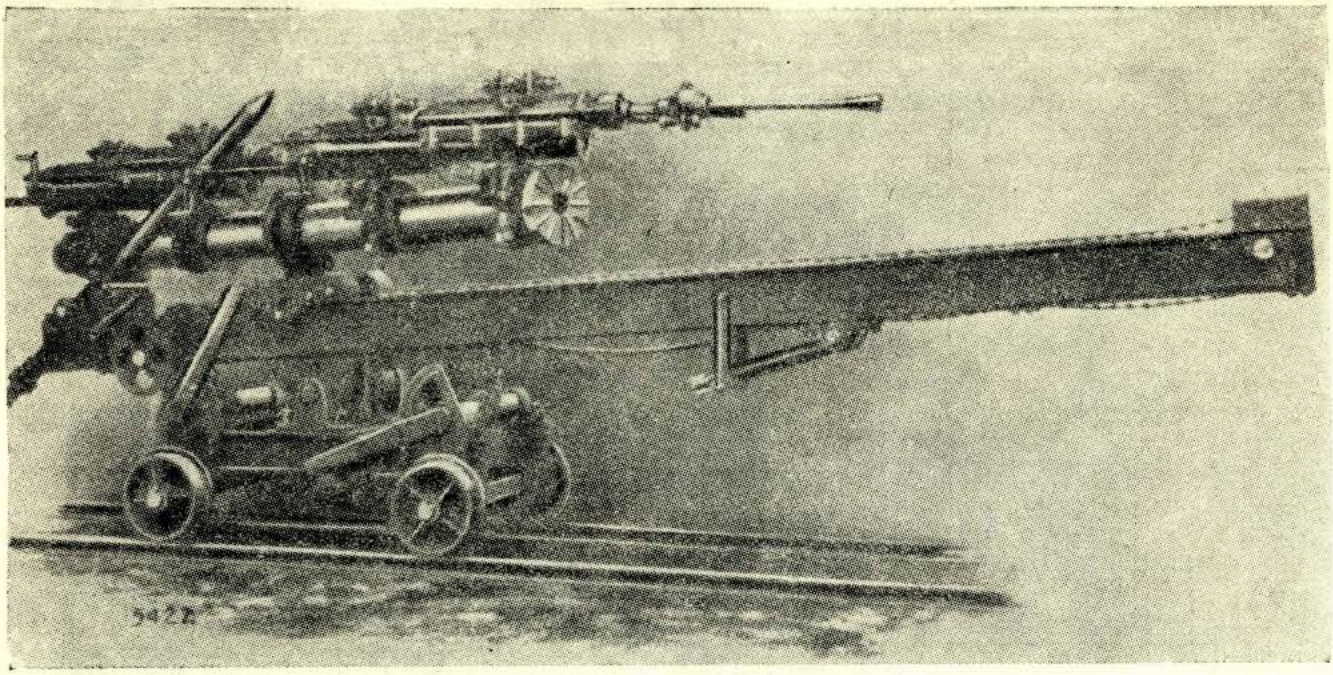


Рис. 448. Буровая тележка для проходки штольни

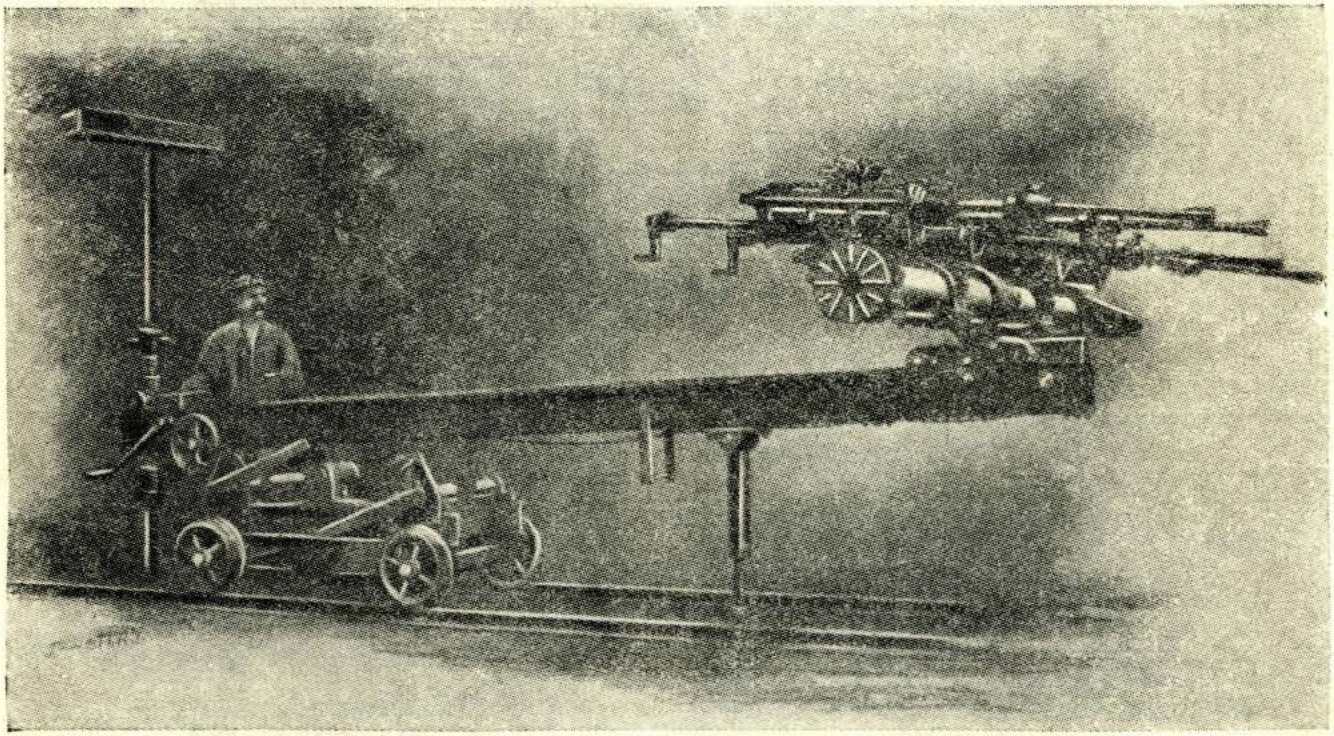


Рис. 449. Буровая тележка для проходки штольни

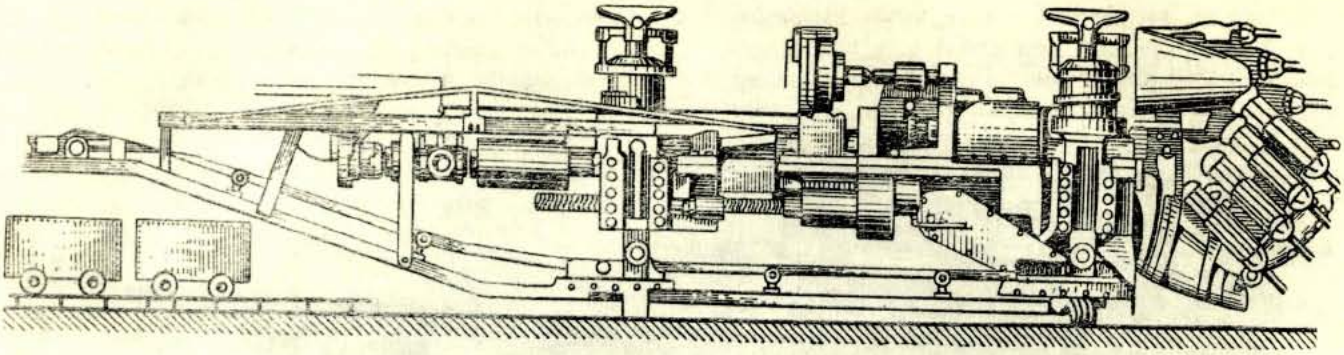


Рис. 450. Тоннельная машина сист. Ани

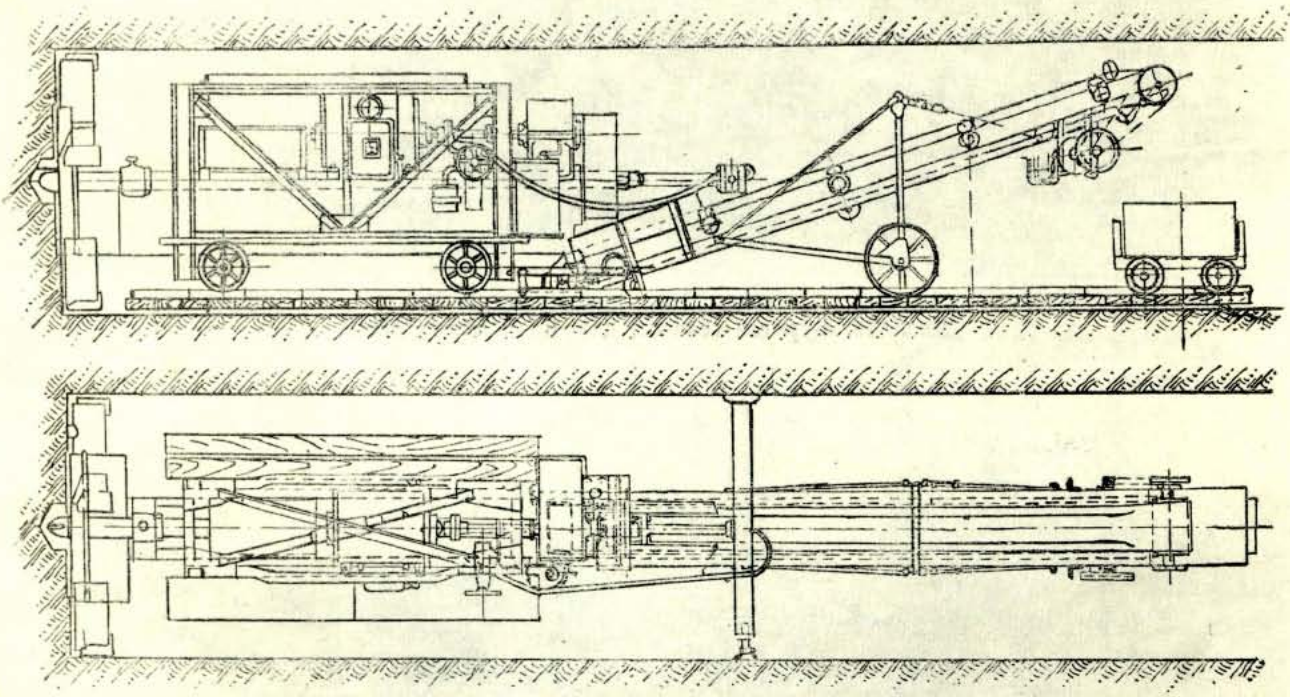


Рис. 451. Схема тоннельной машины Уайтекера

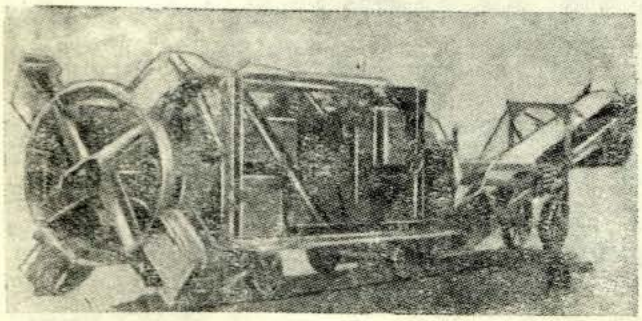


Рис. 452. Тоннельная машина Уайтекера

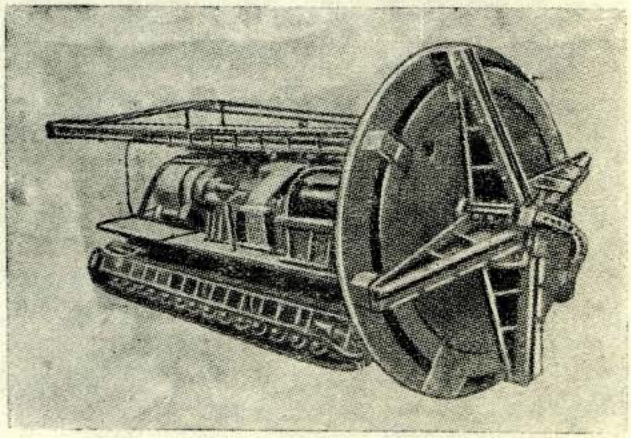


Рис. 453. Комбайн системы Чихачева

а равно воздействие на определенные породы химическими реагентами, можно достигнуть нарушения крепости пород и эффективности экскавации забоя. Однако в этом направлении сделано очень мало. Здесь необходимо и скалывания пород. К ним относятся щиты системы Прайса, Томпсона, Уайтекера и др. (см. главу VIII).

В условиях глинистых пород с успехом может быть применен и гидравлический раз-

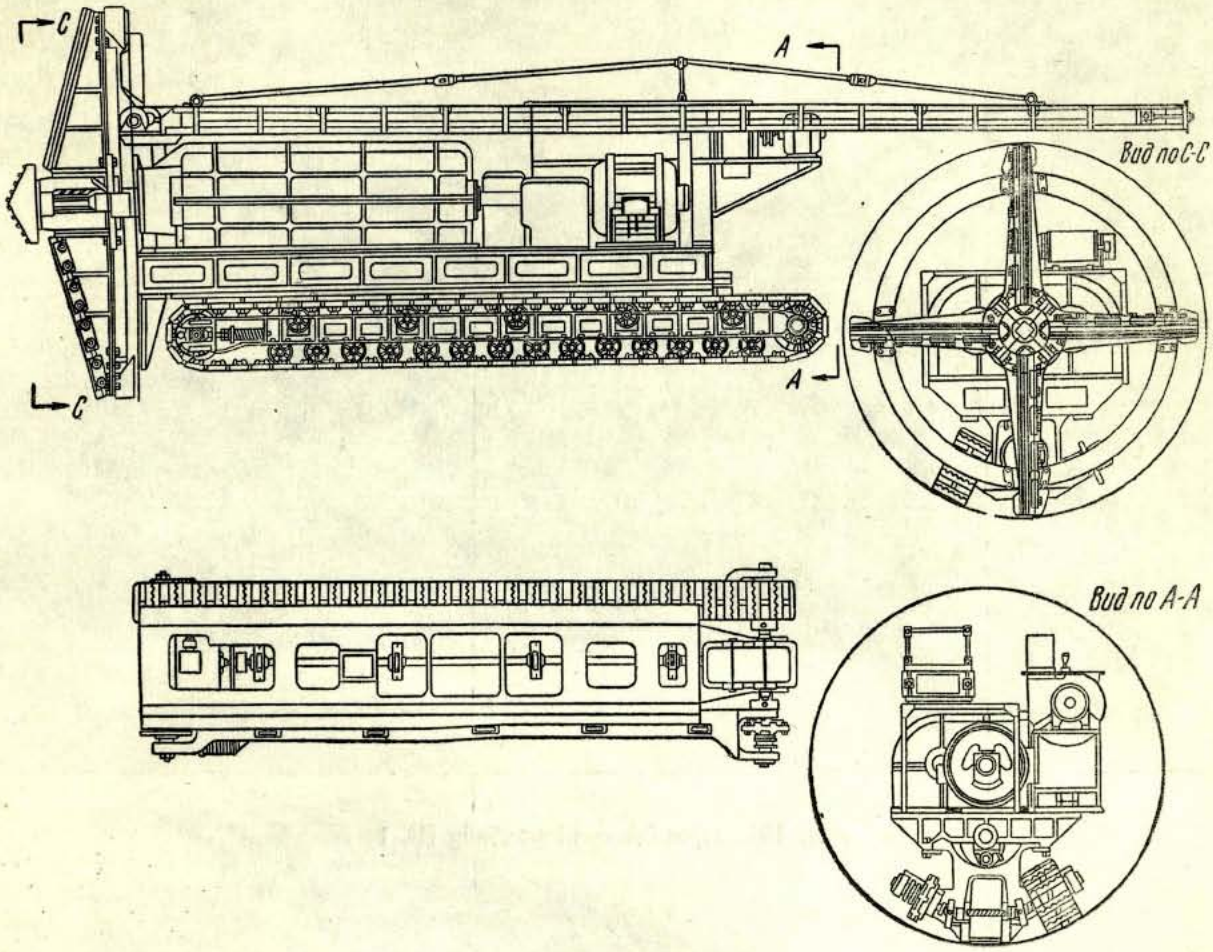


Рис. 454 и 455. Схема комбайна системы Чихачева

провести большую научно-исследовательскую и экспериментальную работу физикам, химикам и инженерам.

д) *Принцип комбинированных методов.* Имеется в виду нарезка целой серии щелей по лбу забоя при помощи врубок, с последующим скалыванием, дроблением и отбойкой породы мощными молотами или с изломом целиков гидравлическими патронами.

РАЗРАБОТКА МЯГКИХ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Механизированная экскавация забоя в мягких грунтах уже не представляется проблемой и успешно разрешена в ряде механизированных щитов, работающих по принципу резания

мыв породы при помощи гидромониторов. Однако необходимо учесть ряд особенностей гидромеханической проходки в части пуска воды в забой, где чрезмерный размыв контура выработки может привести к нарушению окружающей породы, и пассивного отпора к развитию горного давления при поломке элементов конструкции обделки.

Работа может вестись с использованием системы центрального гидравлического вруба с последующей срезкой грунта по контуру ножом щита под действием гидравлических домкратов. При этом должна быть обеспечена непрерывная выдача пульпы из забоя при помощи гидротранспорта во избежание размыва основания тоннеля. На строительстве

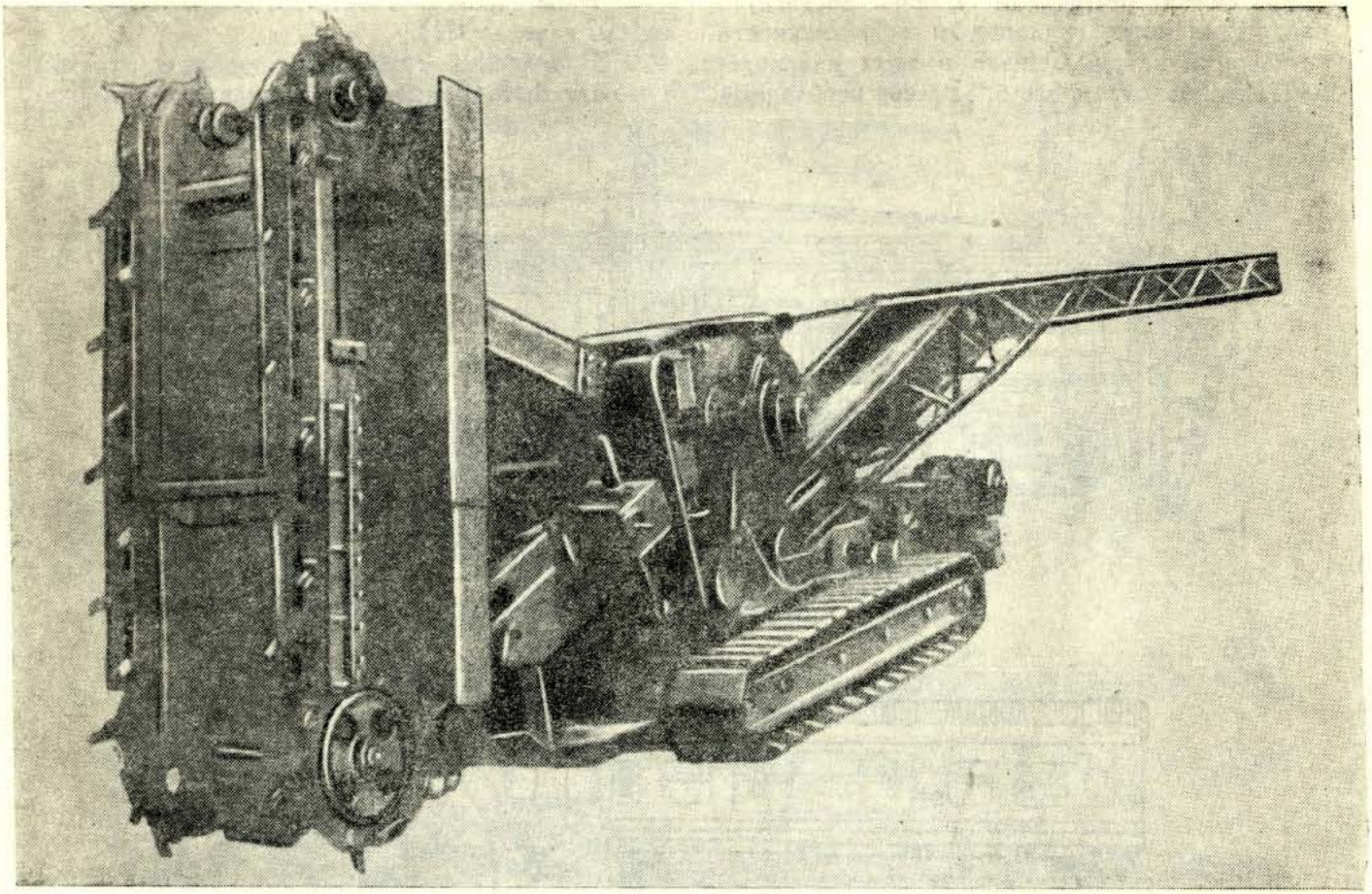


Рис. 456. Проходческий комбайн ПК-1

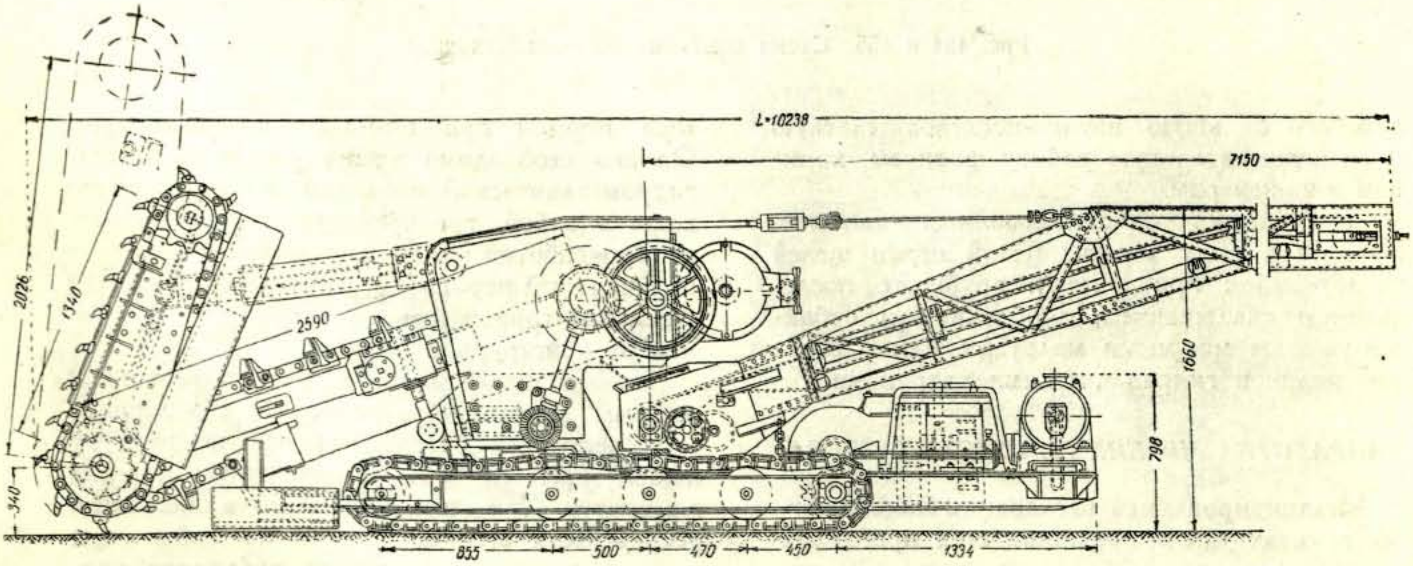


Рис. 457. Схема проходческого комбайна ПК-1

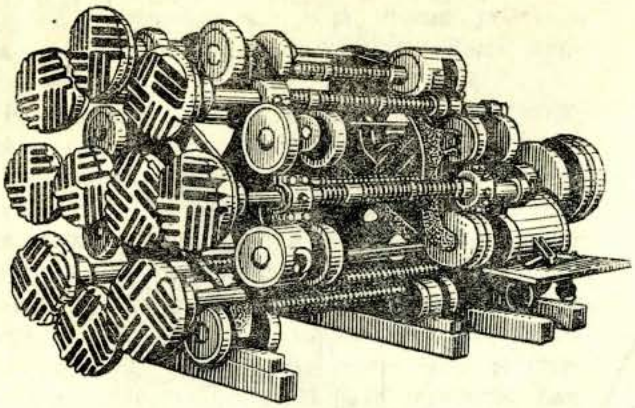


Рис. 458. Тоннельная машина системы Сигафу

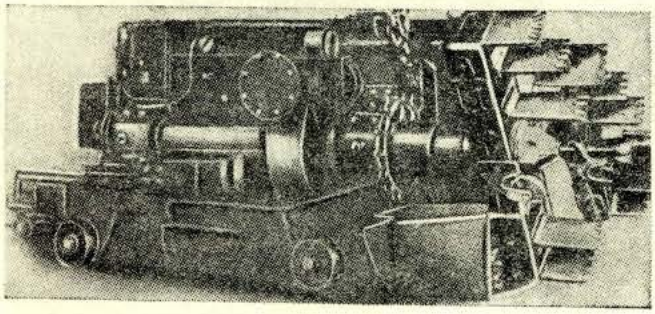


Рис. 459. Тоннельная машина, оснащенная „чаннелерами"

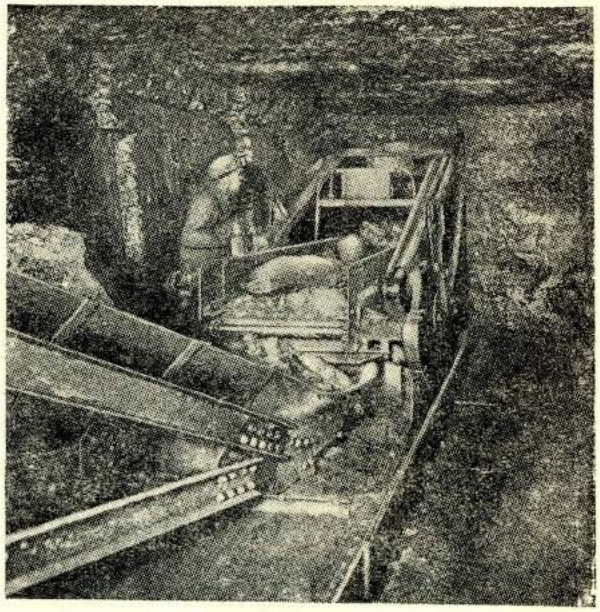


Рис. 460. Проходческая машина Джеффри (в забое)

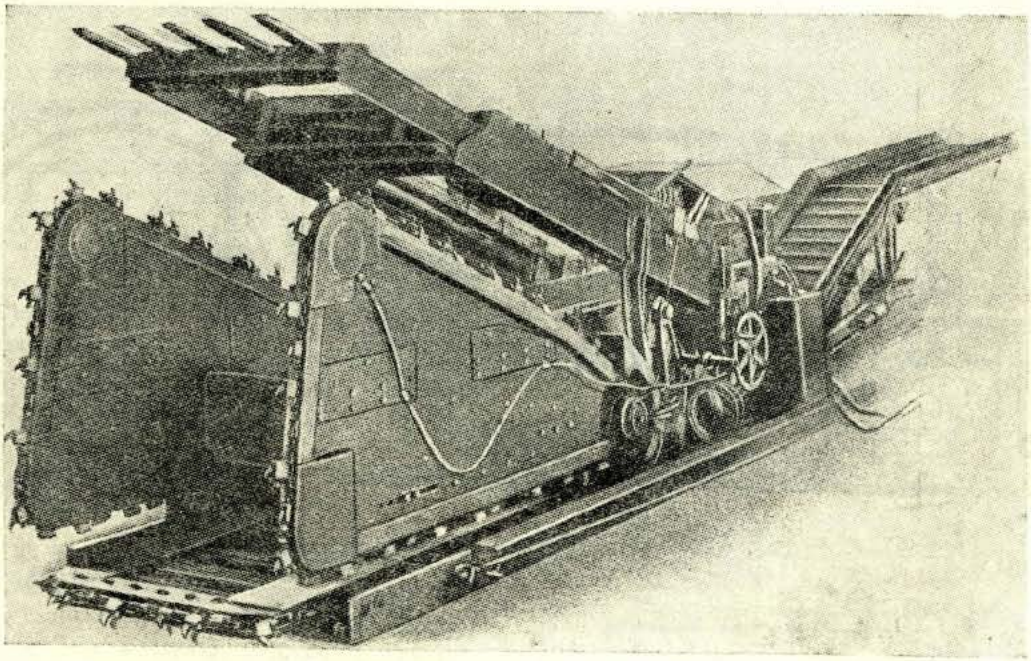


Рис. 461. Проходческая машина Джеффри

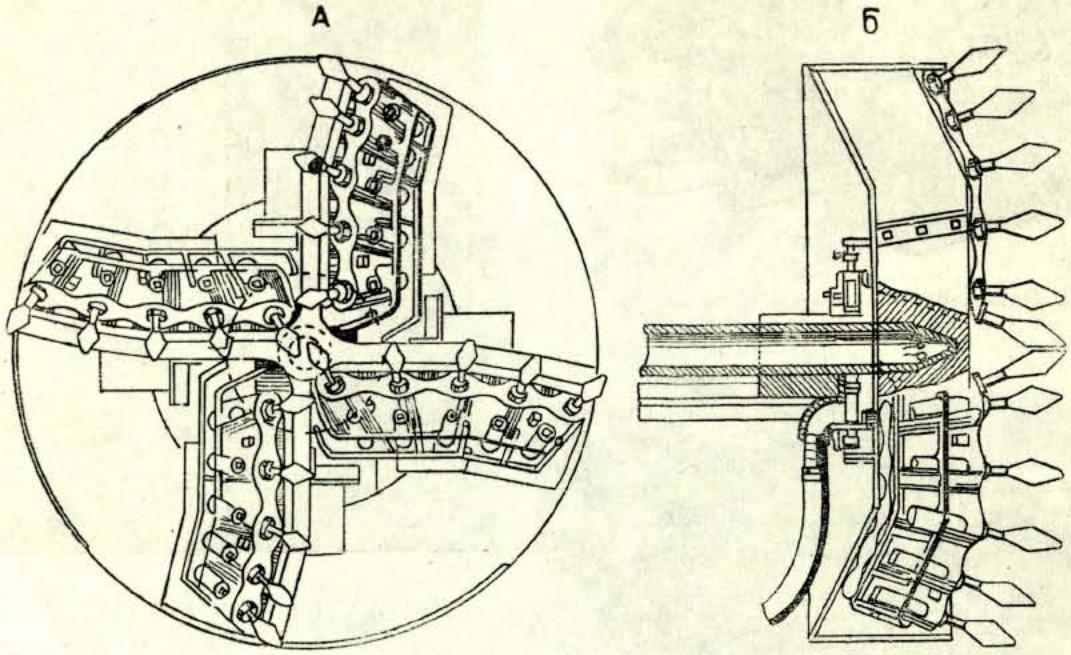


Рис. 462. Тоннельная машина, оснащенная баром с отбойными молотами

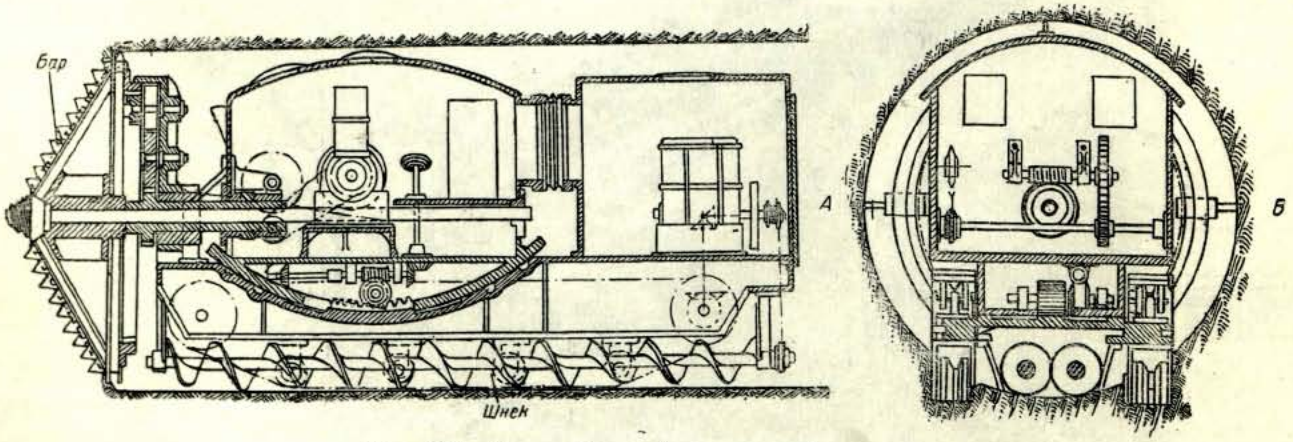


Рис. 463. Схема буровой тоннельной машины

метрополитена в Чикаго (1941 г.) проходка тоннелей в мягкой голубой глине успешно велась применением специальных ножей серповидного типа.

В последнее время для прохождения подземных выработок малых сечений ($\varnothing = 2$ *м*) в устойчивых породах с коэфициентом крепости $f = 3—5$, нашла применение проходческая машина, оснащенная в забойной части режущим органом, работающим на принципе резания пород. При этом режущие элементы совершают планетарное движение по лбу забоя выработки. Подача машины вперед осуществляется при гусеничном ходе агрегата. Выдача грунта за пределы призабойного пространства достигается применением ленточного транспортера со скоростью 1,1 *м/сек* (рис. 464, 465, 466 и 467).

Режущий орган машины представляет собою два корончатых диска $\varnothing = 850$ *мм* с двенадцатью резцами каждый. Ковшевой диск машины снабжен двадцатью четырьмя скребковыми ковшами, служащими для приема породы в забое в процессе резания и выдачи на транспортер. Ковшевой диск получает движение по часовой стрелке, а корончатые диски — против часовой стрелки. Это обусловливает равномерную экскавацию забоя при планетарном движении корончатых дисков.

При одном обороте ковшевого диска машины каждый из корончатых дисков совершает пять оборотов. Скорость резания пород 1,5—2,5 *м/сек*. Мощность электромотора режущего органа 10 *квт*. Все элементы проходческой машины смонтированы на металлической раме.

Следует отметить, что поскольку машина не имеет тоннельного щитового корпуса, она не может быть использована в породах, где ожидаются вывалы породы. Имеющийся в верхней части машины защитный металлический лист не является достаточно надежным и не может обеспечить нормальной работы машины в случае проявления горного давления в процессе проходки.

РАЗРАБОТКА В СМЕШАННЫХ И ПЛЫВУННЫХ ГРУНТАХ

Для ведения разработки в смешанных грунтах с резко отличающимися коэфициентами крепости (глине, известняке, суглинке, песках), встречаемых в одной плоскости забоя, решение механизированного экскавирующего агрегата представляется технически весьма осложненным. В каждом отдельном случае

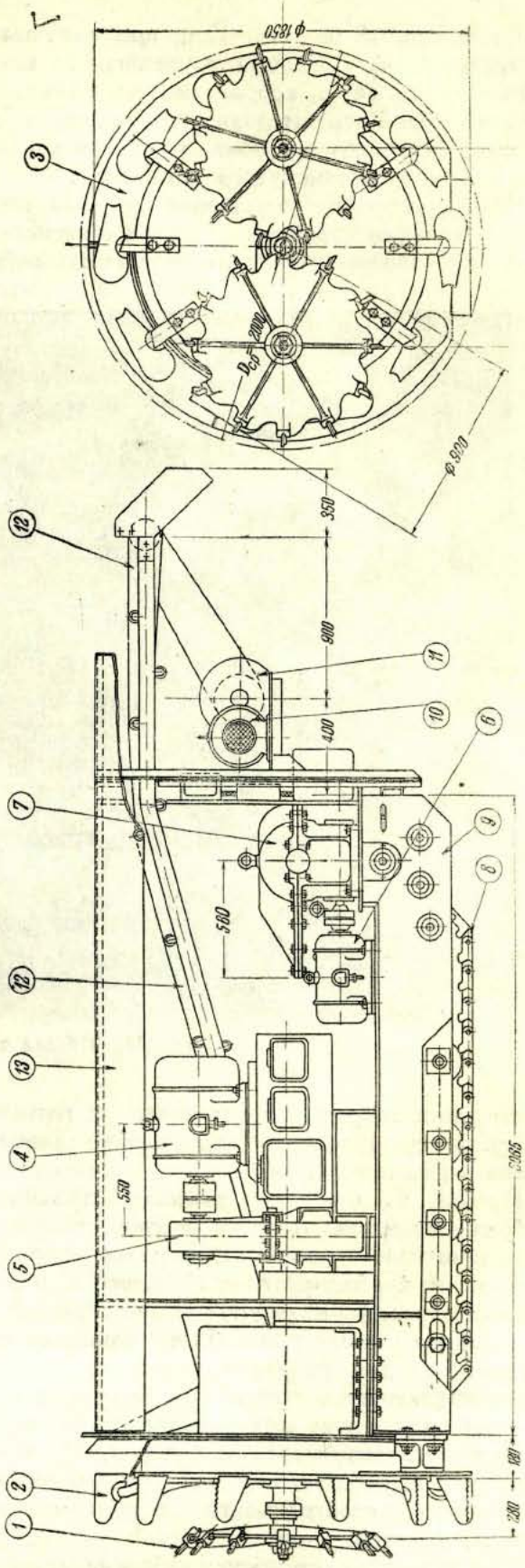


Рис. 464 и 465. Схема машины для прохождения подземных выработок малых сечений

требуется особый подход. Так, при наличии в штроссной части профиля устойчивых коренных пород, а в кровле слабых грунтов экскавирующий агрегат должен быть запроектирован, базируясь в основном на конструкцию полущита незамкнутого контура.

При пересечении плывунных грунтов вопрос экскавации неразрывно связан с креплением лба забоя, с созданием специальной конструкции закрытой груди щита, с герметизацией щита (закрытием строительного зазора в хвосте его).

Приняв во внимание изложенные выше соображения, можно притти к выводу, что если для проходки мягких глинистых пород (юрская и карбонная глины) имеется возможность ввести в работу экскавирующие, механизированные, тоннельные машины и агрегаты, то для проходки скальных пород высокоэффективных типов конструкции тоннельных машин пока еще не создано.

При пересечении скальных пород, при наличии над выработкой мощной кровли, непосредственной необходимости в применении щита не усматривается.

Для успешной разработки забоя надлежит создать облегченную щитовую крепь, представляющую собой подвижную платформу типа буровой рамы.

В зависимости от размеров поперечного сечения крепь должна иметь несколько ярусов для удобства атаки забоя. Крепь оснащается системой колонковых буров-перфораторов для одновременного обуривания всего забоя. Забойные платформы сочетаются с эректором для укладки тюбингов обделки. Установка перфоратора для бурения шпура не требует физического напряжения бурильщика и осуществляется в течение 2—3 минут. Габариты рамы понизу должны пропускать в забой погрузочную машину; вверху необходимо создать защитный козырек-броню, долженствующий защищать работающих в забое от случайных вывалов. Козырек рассчитывается не на горное давление, а на местный вывал породы порядка 3 $м^3$.

В условиях скальных пород, при отсутствии горного давления, подобная подвижная крепь, оснащенная усовершенствованным оборудованием в забое, может при цикличной организации работ обеспечить высокие темпы проходки.

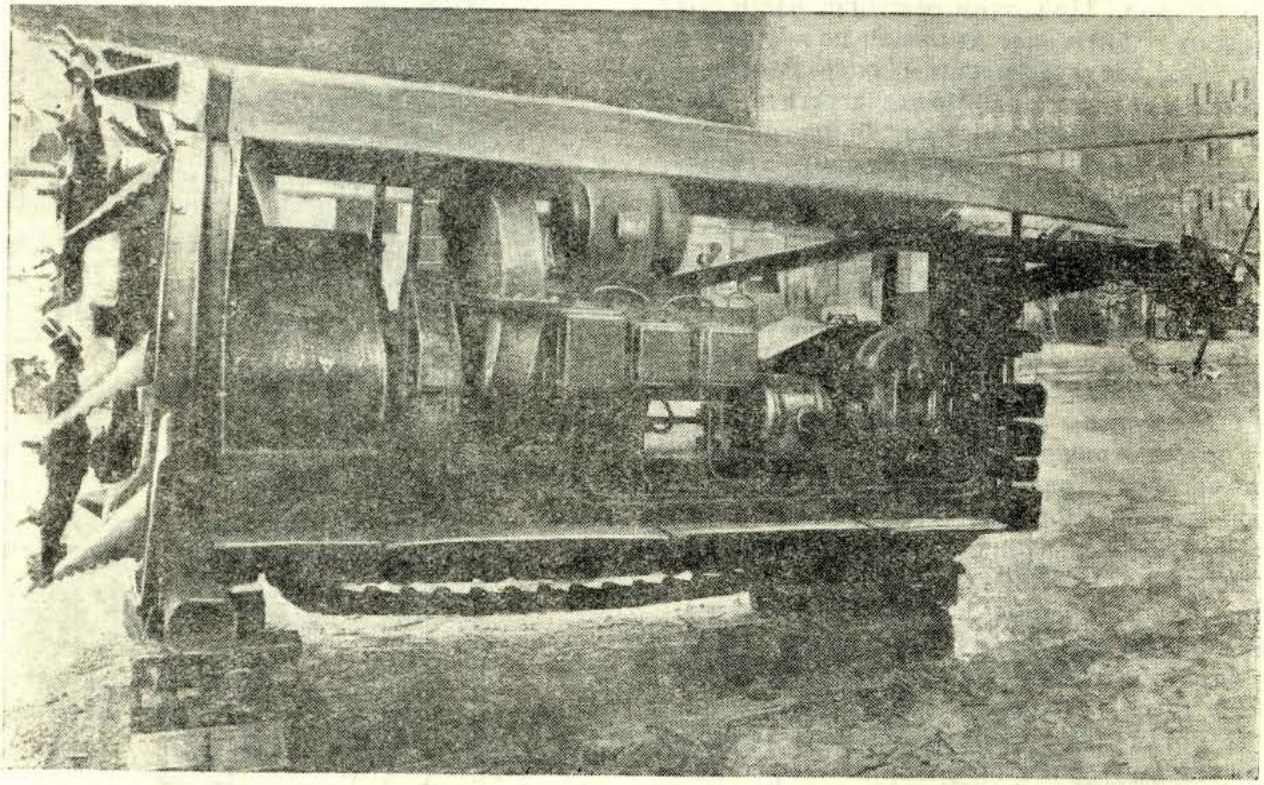


Рис. 466. Общий вид проходческой машины

ПРОИЗВОДСТВО БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ СООРУЖЕНИИ ТОННЕЛЕЙ

Взрывчатые вещества *)

Проходка тоннелей в скальных породах осуществляется преимущественно с применением взрывных работ. С целью достижения максимальной эффективности в проходке необходимо выбрать такие взрывчатые вещества, которые соответствовали бы данным геологическим условиям и физико-механическим свойствам пересекаемых пород, правильно рассчитать длину шпуров и расположение их в забое, определить величину заряда, а равно обеспечить быстрые темпы производства буровых работ и уборку породы из тоннельного забоя.

К взрывчатым веществам (ВВ), применяемым в тоннельном деле, предъявляются следующие основные требования: обеспечение надлежащей силы взрыва, безопасность и удобство в обращении при хранении, перевозке и употреблении в дело, способность взрываться без отказа в соответствии с применяемым способом воспламенения, сохранение постоянства свойств ВВ при долговременном хранении их на складах.

По правилам безопасности при ведении взрывных работ, утвержденным ВЦСПС, допускается пользование ВВ по нижеприведенным табл. 26 и 27.

По характеру своего разрушительного действия ВВ обыкновенно подразделяют на две основные категории:

1) *метательные*, взрывающиеся относительно медленно и обладающие фугасным — метательным действием;

2) *бризантные*, взрывающиеся мгновенно и обладающие при этом сильным дробящим действием.

Наибольшее распространение в тоннельном деле получили ВВ второй категории, преимущественно динамиты и аммониты.

В последнее время в американской практике производства взрывных работ, при проходке тоннелей в скальных породах находят применение *оксиликвиты* — смеси твердых горючих веществ с жидким кислородом, которым пропитываются вещества-поглотители. Действие оксиликвитов базируется на мгновенном, переходящем в детонацию горении вещества-поглотителя (богатого углем) в присутствии жидкого кислорода с выделением большого количества тепла. При этом продукты сгорания в виде CO_2 и паров воды развивают в зарядной камере большое давление и производят разрушение окружающей среды горных пород.

В качестве поглотителей жидкого кислорода применяют сажу, древесный уголь, мох, торф, древесную и пробковую муку. Сила взрыва оксиликвитов зависит главным образом от применяемых поглотителей и может соответствовать по своим действиям аммониту, динамиту и пороху.

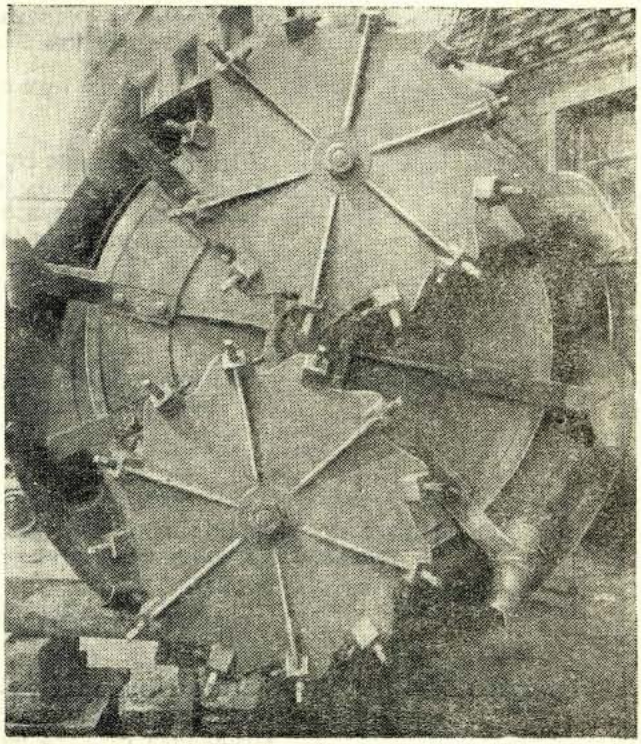


Рис. 467. Вид режущего органа машины со стороны забоя

Наиболее широкое распространение при изготовлении патронов оксиликвитов получили две разновидности поглотителей:

а) углеродистые, состоящие из сажи или активированного угля с добавками различных веществ;

б) целлюлозные (типа Беберлокс), изготовляемые из древесных или пробковых опилок, с добавками других веществ (нафталина, алюминия).

Поглотители типа Беберлокс считаются наиболее безопасными и применяются преимущественно на подземных работах.

* Справочник по взрывному делу, т. 1.

Таблица 26

Правила безопасности при ведении взрывных работ, утвержденные ВЦСПС

Список № 1 ВВ, допущенных к употреблению при взрывных работах

№ п.п.	Наименование ВВ	Состав ВВ	Условия применения
	I. Предохранительные взрывчатые вещества		
	1. ВВ, допущенные к употреблению в рудниках, опасных по газу, по угольной пыли или же по газу и угольной пыли при работе по углю		
	а) Нитроглицериновые ВВ		
1	Гризутин 11%	Нитроглицерин 11,76—12% Коллодионный хлопок 0,2—0,24% Аммиачная селитра 86—88% Сода или мел 0,1%	Предельный заряд 800 г Электродетонаторы № 8 гремуче-ртутно-тетриловые, в медной или латунной гильзе
	б) Аммиачные ВВ		
2	Состав Фавье	Аммиачная селитра 88% Динитронафталин 12%	То же, что и в п. 1. В случае применения на открытых работах и в шахтах, не опасных по газу или пыли, условия те же, что и в п. 4
	2. ВВ, допущенные к употреблению в рудниках, опасных по газу, по угольной пыли или по газу и угольной пыли, но лишь при прохождении выработок по пустым породам		
	Нитроглицериновые ВВ		
3	Гризутин 29%	Нитроглицерин 23—30% Коллодионный хлопок 0,8—1% Аммиачная селитра 69—69,5%	То же, что и по п. 1
	II. Непредохранительные взрывчатые вещества		
	1. ВВ, допущенные к употреблению при подземных работах, не опасных по газу или пыли, а также на открытых разработках		
	а) Нитроглицериновые ВВ		
4	Студенистый динамит 63%	Нитроглицерин 62—63% Коллодионный хлопок 3—3,5% Калиевая, натровая или аммиачная селитра 25—27% Поглотитель 8% Сода или мел 0—0,5%	Электродетонатор или капсюль-детонатор № 8, азидотэновый, гремуче-ртутно-тэновый, азидотетриловый и гремуче-ртутно-тетриловый
5	Сольвенит 8/5	Нитроглицерин 8% Нитросольвент-нафта 5% Аммиачная селитра 83,3% Древесная мука 3% Коллодионный хлопок 0,2% Мел 0,5%	То же, что и по п. 4

Продолжение

№ п. п.	Наименование ВВ	Состав ВВ	Условия применения
		б) Аммиачно-селитряные ВВ	
6	Аммонит подземный	Тринитротолуол (сметки) или тротиловое масло 12—13% Аммиачная селитра 88—87 % Древесная мука 0—2%	То же, что и по п. 4
7	Аммонал подземный	Тринитротолуол 9% Алюминий 5% Аммиачная селитра 86%	То же, что и по п. 4
		2. ВВ, допущенные только к употреблению на открытых работах	
8	Дымный порох сильный	Селитра калиевая или натровая 75% Сера 10% Уголь 15%	Бикфордов шнур или электровоспламенитель
9	Мелинит	Пикриновая кислота	То же, что и по п. 4
10	Аммониты	Тротил или тротиловое масло 12—17% Аммиачная селитра 80—85% Уголь 0—2% Древесная мука 0—4% Алюминий или ферросилиций 0—5%	То же, что и по п. 4
11	Аммотол	Тротил 20—40%	То же, что и по п. 4
12	Тротил	Аммиачная селитра 80—60%	То же, что и по п. 4
13	Динамон	Аммиачная селитра 85% Древесные опилки 15%	То же, что и по п. 4
14	Французская смесь	Динитронафталин 20% Пикриновая кислота 80%	То же, что и по п. 4
15	Оксиликвиты	Патроны-поглотители, пропитанные жидким кислородом	То же, что и по п. 4, но капсюль с азидом свинца

Таблица 27

Список № 2 средств взрывания, допущенных к употреблению при взрывных работах

№ п. п.	Наименование	Состав	Материал оболочки	Размеры в *мм*
1	Капсюли-детонаторы № 8 гремуче-ртутно-тетриловые	Гремучая ртуть 0,5 *г* Тетрил 1 *г*	Медь, латунь, железо, бумага	l=47 d=6,93
2	То же, гремуче-ртутно-тэновые	Гремучая ртуть 0,5 *г* Тэн 1 *г*	То же	То же
3,4	То же, азидотетриловые (азидотэновые)	Азид свинца 0,2 *г* Тенерес 0,15 *г* Тетрил (тэн) 1 *г*	Алюминий, железо, бумага	То же
5	Электровоспламенители мгновенного действия со звонковым проводом	Железисто-родистый свинец 33% Бертолетова соль 33% Пироксилин 34%	То же, что и в п. 1	То же
6	То же, с гупперовским проводом	То же	То же, что и в п. 1	То же
7	Гремуче-ртутно-тетриловые электродетонаторы № 8 мгновенного действия со звонковым проводом	См. пп. 1 и 5	См. п. 1	То же
8	Гремуче-ртутно-тэновые электродетонаторы № 8 мгновенного действия со звонковым проводом	См. пп. 2 и 5	См. п. 2	То же
9	Азидотетриловые электродетонаторы № 8 мгновенного действия со звонковым проводом	См. пп. 3 и 5	См. п. 3	То же
10	Азидотэновые электродетонаторы № 8 мгновенного действия со звонковым проводом	См. пп. 4 и 5	См. п. 4	То же
11	То же, что п. 7, но с гупперовским проводом	См. пп. 1 и 5	См. п. 1	То же
12	То же, что п. 8, но с гупперовским проводом	См. пп. 2 и 5	См. п. 2	То же
13	То же, что п. 9, но с гупперовским проводом	См. пп. 3 и 5	См. п. 3	То же
14	То же, что п. 10, но с гупперовским проводом	См. пп. 4 и 5	См. п. 4	То же
15	Бикфордов шнур белый с двойной оболочкой	Пороховая мякоть: сера 10% селитра 78% уголь 12%	Пеньковая или джутовая пряжа	d=4,5 —5,5
16	Бикфордов шнур гуттаперчевый с двойной оболочкой	То же	То же	5,0— —5,8
17	Бикфордов шнур асфальтированный с двойной оболочкой	То же	То же	То же
18	Бикфордов шнур нетлеющий с двойной оболочкой	То же	То же	То же
19	Детонирующий шнур в хлопчатобумажной оплетке с восковой изоляцией	Гремучая ртуть 78% Парафин 22%	Хлопчатобумажная оплетка	d=5,5
20	Пеньковый фитиль	Пучок пеньковых нитей, пропитанных селитряным раствором	То же	—

Следует отметить, что уже при постройке Симплонского тоннеля была сделана попытка применить для взрывных работ жидкий воздух, при этом оксиликвиты содержали лишь 40% кислорода. В настоящее время применяются оксиликвиты исключительно на базе жидкого кислорода (при удалении азота и резком снижении температуры), содержащие до 99,5% кислорода.

Оксиликвиты как взрывчатое вещество имеют очень ограниченную «жизнеспособность» и теряют взрывную способность после испарения жидкого кислорода.

Для оксипатронов нормального диаметра, принимаемого в 38 *мм*, время испарения жидкого кислорода равно 5—7 минутам.

Действие оксиликвитов зависит от свойств поглотителя, размера патронов (скорость испарения обратно пропорциональна диаметру), свойств оболочки патронов, температуры окружающей среды.

Жидкий кислород и поглотители в отдельности друг от друга никакой опасности не представляют и при доставке в шахту направляются в специальную камеру, где происходит пропитывание поглотителей жидким кислородом. Таким образом, оксиликвиты как взрывчатое вещество существуют только непосредственно в шахте и в течение очень короткого времени (10—15 минут). Никаких складских помещений для хранения оксиликвитов не требуется.

Взрывание заряда производится с помощью капсюлей-детонаторов или детонирующего шнура.

Теоретически при взрыве оксиликвитов в условиях, обеспечивающих положительный кислородный баланс, вредных газов в продуктах взрыва не образуется и должны содержаться лишь CO_2 и пары воды.

Практически, вследствие испарения кислорода, после извлечения пропитанного патрона из термоса в продуктах взрыва может оказаться CO. Для того чтобы избежать CO в газах, оксипатрон должен быть взорван через определенный промежуток времени, обеспечивающий наличие при взрыве хотя бы нулевого кислородного баланса.

Вопрос о газовости оксиликвитов практически еще мало изучен; по данным инж. Г. М. Большедворского, при правильном режиме количество вредных газов при взрывных работах с помощью оксиликвитов может быть меньшим, чем при пользовании другими ВВ. Стоимость оксиликвитов зависит в основном от стоимости жидкого кислорода.

В целях безопасности работ в подземных выработках в последнее время применяется способ *беспламенного взрывания*. Работа взрыва при этом способе основана на переходе вещества из жидкого состояния в газообразное под действием внешнего импульса без изменения химического состояния, но также с увеличением объема, что обусловливает эффективную механическую работу.

В настоящее время существуют два вида беспламенного взрывания: *Кардокс и Гидрокс*.

Действие патрона Кардокс базируется на быстром превращении жидкой углекислоты (CO_2) в газообразное состояние. В патронах Гидрокс взрыв происходит при быстром переходе воды в парообразное состояние. Взрыв сопровождается огромным увеличением объема вещества, что вызывает большое давление на стенки шпура и разрушение окружающей породы.

Беспламенное взрывание имеет большое преимущество, а именно: безопасность при работах в газовой и пыльной атмосфере, безопасность обращения с патронами, их хранения и транспорта.

В настоящее время этот способ получил применение в горном деле, в частности в Донбассе.

Взрывчатые вещества по условиям опасности хранения подразделяются на четыре группы в зависимости от степени и чувствительности их к внешним воздействиям (см. табл. 28).

Согласно «Правилам безопасности ВЦСПС» эти группы следующие (табл. 28).

Таблица 28

I группа	II группа	III группа	IV группа
Нитроглицериновые ВВ	Порох и нагревательные элементы к Кардоксу	Аммиачно-селитряные ВВ	Средства взрывания

Склады, в которых хранятся ВВ, делятся, в зависимости от их емкости и назначения, на базисные, расходные (поверхностные и подземные) и кратковременные.

Базисные склады предназначаются для хранения больших количеств ВВ и для снабжения расходных складов.

В расходных складах производят раздачу материалов взрывникам, направляющимся на подземные работы. *Поверхностные расходные*

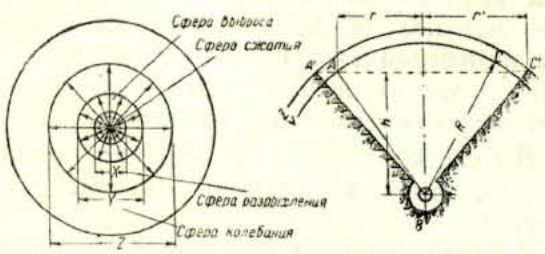


Рис. 468. Схема взрывного действия заряда

склады подразделяются на пять классов (от 125 до 16 000 *кг*).

Кратковременные склады устраиваются непосредственно в районе производства тоннельных работ и могут быть как поверхностными, так и подземными.

Расположение складов, их устройство и содержание должны соответствовать правилам техники безопасности при взрывных работах.

БУРОВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ *

Разрушение горных пород в процессе проходческих взрывных работ производится с затратой определенного количества ВВ в виде зарядов.

При действии заряда ВВ, помещенного в среду горных пород, подлежащих разрушению, происходит следующее:

а) ближайшие к заряду слои нагреваются, раздробляются и сжимаются (*сфера сжатия или измельчения*);

б) в последующей стадии ослабленная волна взрыва производит разрыв среды на куски и выброс (*сфера разрывания или выброса*);

в) за сферой выброса действие взрыва вызывает появление в горной среде трещин и разрыхление ее (*сфера разрыхления и трещинообразования*);

г) далее действие взрыва вызывает в среде только сотрясения (*сфера колебания или сотрясения*) (рис. 468, данные инж. Г. П. Демидюк).

В тоннельной практике сферы сжатия, выброса и разрыхления объединяют одним понятием *сферы разрушения*. Радиус этой сферы в тоннельной практике называется *радиусом разрушения*.

Проявление результатов этого действия на поверхности среды зависит от положения заряда. В тех случаях, когда заряд приближен к свободной поверхности забоя так, что радиус сферы выброса будет больше расстояния до поверхности, происходит выброс и раздробление среды.

Расстояние от заряда до поверхности забоя носит название *линии наименьшего сопротивления*.

Воронка *ABC* называется *воронкой выброса*, а окружающий ее конус — *конусом разрыхления*.

Когда заряд располагается в породе так, что радиус сферы разрыхления касается свободной поверхности забоя, то видимой воронки выброса не образуется, и действие заряда проявляется только в разрыхлении окружающей породы.

Регулируя величину заряда или степень его удаления от свободной поверхности, достигают требуемого взрывного эффекта.

Определение величины заряда

Величина заряда зависит от свойств взрывчатых веществ, сил сопротивления окружающей среды горных пород и пропорциональна объему взрываемой массы. Объем воронки, образуемой действием заряда, пропорционален кубу линии наименьшего сопротивления, а коэфициент пропорциональности зависит от формы воронки. В тех случаях, когда угол между образующими воронку радиусами выброса (*ABC*) прямой, получается нормальная воронка выброса, а заряд, ее вызвавший, является *нормальным зарядом выброса*. Величина такого заряда в общем виде может быть выражена уравнением:

$$C = \alpha Q h^3,$$

где:

C — величина нормального заряда выброса в *кг*, Q — количество ВВ, необходимое для выброса одной объемной единицы взры-

* Г. П. Демидюк, Действие взрыва в среде

ваемой среды в *кг*, a — коэфициент пропорциональности, h — линия наименьшего сопротивления в *м*.

В СССР для расчета величины нормального заряда выброса приняты формулы Лебрена $C = 1{,}83\ Qh^3$ и Гаузера $C = Xh^3$ (см. табл. 29).

В табл. 29 даются значения коэфициента пропорциональности, зависящего от свойства взрываемых пород.

Разнообразие природных условий напластования пород и их физико-механических свойств вызывает необходимость применения различных ВВ. Качество последних, примененных в разных породах, характеризуется коэфициентами, приводимыми в таблице, которой можно пользоваться для приближенного определения заряда, уточняя его величину путем опытных взрывов.

Таблица 29

Наименование горных пород	$C = 1{,}83\ Qh^3$		$C = Xh^3$
	Порох 1,83 Q	Аммонит 1,83 Q	Аммонал X
Песчаная глина (суглинок) . .	2,05	1,37	1,17
Сыпучий песок	2,16	1,44	1,29
Весьма крепкая глина	2,84	1,90	1,65
Скала нетрещиноватая . . .	3,22	1,77	1,86
Скала гранитная или гнейсовая	3,82	2,10	2,20
Кладка на цементном растворе	3,61	1,98	2,07
Бетон	5,40	2,96	3,15

В СССР в последнее время для расчета зарядов при горных работах пользуются также формулой Лареса.

Результаты взрыва во многом зависят от техники закладки шпуров и заряда и качества забойки, а потому эти работы должны производиться с особой тщательностью опытными проходчиками.

В большинстве случаев при разработке забоя желательно получить такое действие взрыва, когда полное разрушение породы внутри конуса ABC происходит при практически незначительном выбросе.

Опытные наблюдения выявили, что когда показатель выброса или отношение $k = \frac{r}{h} <$ 0,75, то видимого образования воронки не обнаруживается, а при $k < 0{,}50$ все действие заряда будет только подземным, без значительных деформаций поверхности.

Величина заряда недогруженного (при $к < 1$) определяется по более точным формулам, приводимым в специальных курсах взрывных работ.

Уравнение для установления величины заряда в общем виде:

$$F = Gf(k),$$

где:

F — величина потребного заряда в *кг*, C — величина нормального заряда выброса в *кг*, $f(k)$ — коэфициент, зависящий от показателя выброса.

Численное значение величины $f(k)$ при различных значениях k дано в табл. 30.

Количество шпуров в забое

Расположение и число шпуров в тоннельном забое зависит от характера физико-механических свойств взрываемых горных пород, условий их напластования, трещиноватости, степени обнажения забоя и от свойств применяемых в дело ВВ. Действие взрыва зарядов должно обеспечить возможно полное разрыхление тоннельного забоя по заданному проектному профилю без перебора.

Закладка недостаточного количества шпуров в забое не обеспечивает надлежащего взрывного эффекта и вызывает необходимость в повторных работах по закладке новых шпуров. Тем самым резко снижается скорость проходки подземных выработок. Наоборот, при закладке излишнего количества шпуров при увеличении расхода ВВ происходит большое сотрясение окружающих выработку напластований пород; в этом случае может нарушиться устойчивость кровли и потребоваться дополнительное крепление выработки.

Когда забой имеет одну плоскость обнажения, для определения примерного числа шпуров, при котором ВВ располагаются наиболее выгодно, пользуются формулой проф. М. М. Протодьяконова, выведенной им на основе практики Донецкого бассейна:

$$n_1 = 2{,}7 \sqrt{\frac{f}{S}},$$

где n_1 — число шпуров на 1 $м^2$ забоя,

Таблица 30

Формула для определения C	$f(k)$	Числовые значения						Примечания
		$k=0$	0,25	0,5	0,75	0,9	1,0	
Лебрен $C=1{,}83\,Qh^3$	$f(\kappa)=\left(\frac{4+3\kappa}{7}\right)^3$	0,187	0,31	0,49	0,73	0,88	1,00	Только для пороховых зарядов
Гаузер $C=Xh^3$ . .	$(\kappa)=\kappa^3$	0	0,016	0,125	0,42	0,73	1,00	Для зарядов бризантных ВВ

f — коэфициент крепости пород в забое, S — сечение выработки в $м^2$.

Количество шпуров по всей площади забоя равно:

$$n = n_1 S.$$

Для определения числа шпуров на забой имеются формулы и других авторов (Суханова, Мищенко), но они также зависят от индивидуальной характеристики физико-механических свойств взрываемых пород. Так, число шпуров на забой по формуле проф. А. Ф. Суханова:

$$n'_1 = 1{,}6 + 0{,}17\ N - S\ (0{,}003\ N + 0{,}027),$$

где N — коэфициент буримости по шкале Суханова.

При наличии в забое двух обнаженных плоскостей потребное число шпуров определяется по общему расходу ВВ на одну зарядку и может быть примерно принято по табл. 31.

Таблица 31

Поперечное сечение выработки в $м^2$	3	4	6	8	10	12
Число шпуров на 1 $м^2$.	4,55	3,45	2,85	2,38	1,96	1,72

Диаметр шпуров и их длина

При работе с ВВ конечный диаметр шпура должен соответствовать диаметру одного патрона или допускать размещение в нем пачки из нескольких патронов (см. табл. 32).

Таблица 32

Число патронов в пачке в шпуре	1	2	3	4	5
Конечный диаметр шпура в *мм* . .	35	65	68	78	88

Увеличение диаметра шпуров соответственно снижает скорость бурения, вызывает неравномерное распределение ВВ по забою, а также сильные сотрясения окружающей тоннельную выработку среды. Большое количество мелких шпуров влечет за собой частые перестановки бурового оборудования, что снимает лишнее время в циклограмме продвижения забоя.

При проектировании организации работ по бурению приходится особое внимание уделять выбору длины шпура.

Увеличение длины шпура несколько уменьшает производительность бурения, так как в этом случае увеличивается трение бура о стенки шпура, а равно возрастают потери полезной работы под влиянием продольного изгиба длинного бура. Затрудняется также удаление буровой муки из скважины.

При коротких шпурах тратится много времени на переход от одного шпура к другому, на перестановку бурового оборудования.

Таким образом, при выборе целесообразной длины и диаметра шпуров приходится учитывать общие условия организации буровых работ в забое в сочетании со всем циклом работ по сооружению тоннеля. Однако следует отметить ярко выраженную за последнее время тенденцию в советской и американской тоннельной практике в отношении перехода к преимущественному бурению длинных шпуров ($L > 3$ *м*), обусловливающих скоростное продвижение забоя.

Следует иметь в виду, что при взрыве в забое порода не отрывается на полную глубину забуренных шпуров. Часть шпуров остается в забое невзорванной, в виде так называемого «стакана».

Отношение длины использованной части шпура к полной его длине называется *коэфициентом полезного действия шпура*, определяющего уход забоя за одну атаку или за один цикл.

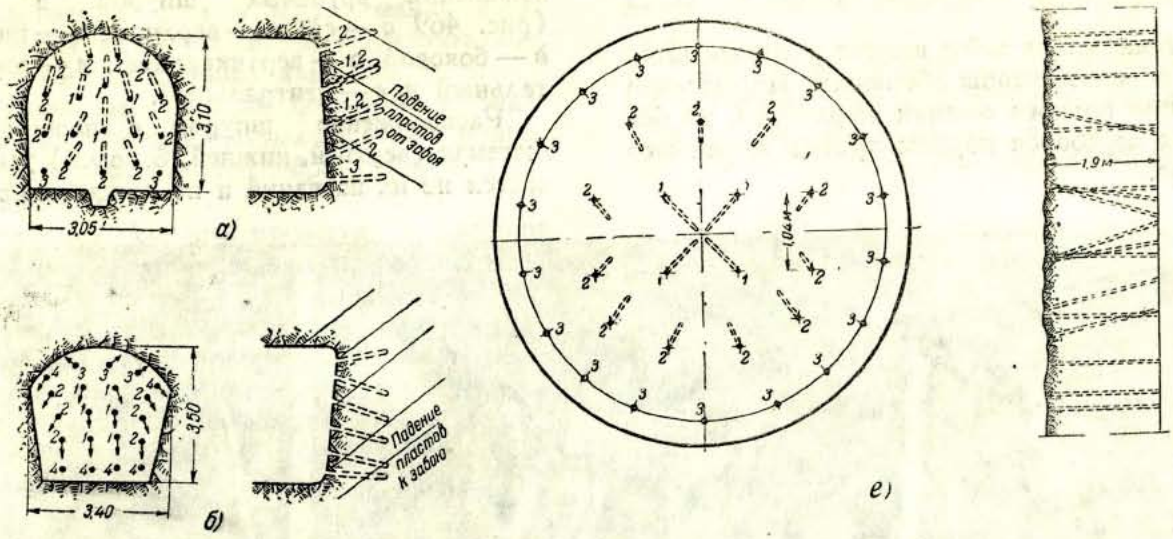
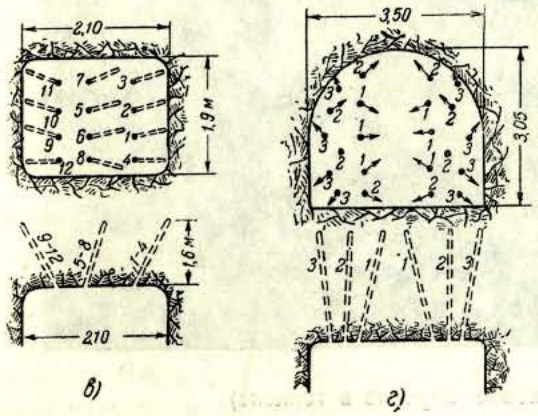
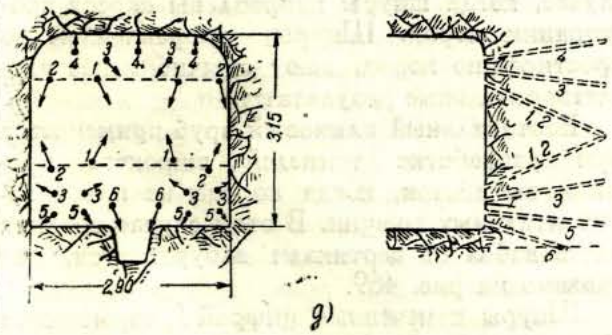


Рис. 469. Схема врубов:

а — верхний вруб, *б* — нижний вруб *в* — боковой вруб, *г* — вертикальный вруб, *д* — горизонтальный вруб, *е* — центральный вруб







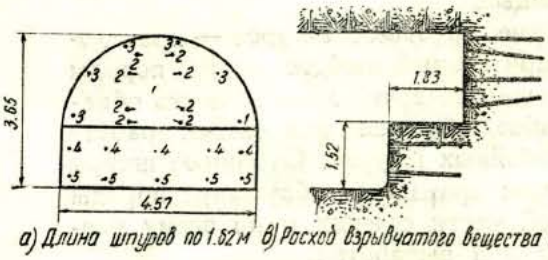


Рис. 469

Рис. 470. Тоннель под р. Мерси (расположение шпуров при взрывных работах в тоннеле)

Расположение шпуров в забое

В тоннельном забое шпуры располагаются таким образом, чтобы обеспечить разрыхление возможно полного сечения выработки, но без лишних переборов породы против проектного контура.

положения врубовых шпуров в забое (рис. 469 *а* — *е*): *а* — верхний, *б* — нижний, *в* — боковой, *г* — вертикальный, *д* — горизонтальный и *е* — центральный.

Расположение шпуров в первых трех системах (верхней, нижней, боковой) усматривается из их названий и не нуждается в поясне-

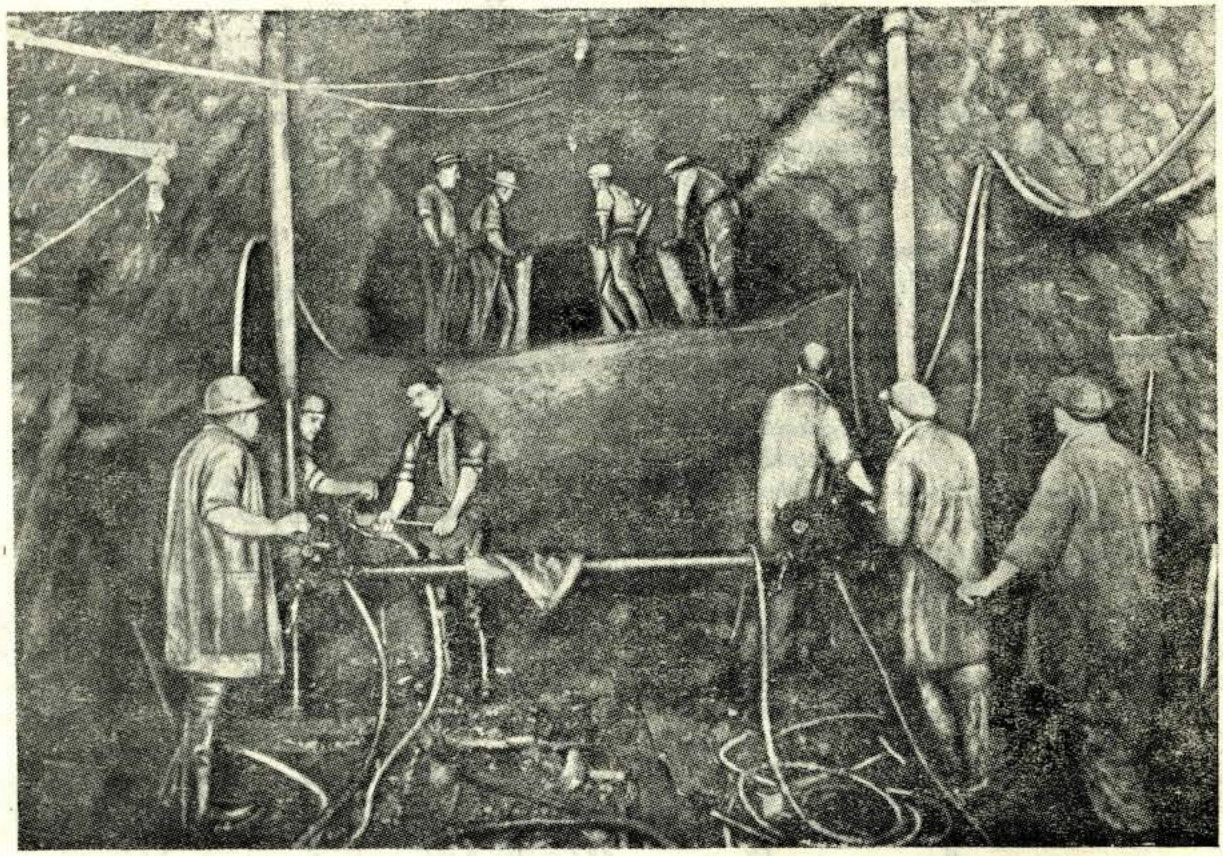


Рис. 471. Тоннель под р. Мерси (колонковое бурение в тоннеле)

В зависимости от характера залегания пород, условий напластования, трещиноватости и размеров выработки принимают различные системы расположения шпуров. Шпуры в тоннельном забое подразделяются на врубовые и отбойные.

Назначение *врубовых шпуров* — производить предварительный выброс части породы и этим создать добавочную поверхность обнажения в забое, облегчая тем самым работу заряда в отбойных шпурах. Отбойные шпуры предназначены произвести обрушение породы на остальной части сечения и по всему контуру тоннельной выработки.

При проходке штолен или тоннелей *слепым* забоем (без передовой штольни) наиболее часто применяются следующие системы расположения врубовых шпуров в забое (рис. 469 *а* — *е*): *а* — верхний, *б* — нижний, *в* — боковой, *г* — вертикальный, *д* — горизонтальный и *е* — центральный.

Расположение шпуров в первых трех системах (верхней, нижней, боковой) усматривается из их названий и не нуждается в пояснении. Следует иметь в виду, что при этих системах взрыв дает лучшие результаты в том случае, когда шпуры направлены вкрест простиранию пород. Шпуры, направленные по простиранию пород, дают обычно менее удовлетворительные результаты.

Вертикальный клиновый вруб применяется при разработке тоннелей широкого профиля выработок, когда порода не имеет горизонтальных трещин. В этом случае средняя часть забоя по вертикали забуривается, как указано на рис. 469.

Шпуры, помеченные цифрой *1*, взрываются детонаторами мгновенного действия с опережением против отбойных шпуров, которые взрываются детонаторами замедленного действия.

В узких и высоких тоннельных выработках при горизонтальном напластовании пород располагают врубовые шпуры горизонтально, образуя горизонтальный клиновой вруб.

В тоннельных забоях большого сечения, в крепких, нетрещиноватых породах применяют центральный конусообразный или пирамидальный вруб.

В породах средней крепости применяют центральный вруб клиновый или пирамидальный.

В высоких выработках большого сечения часто применяют разработку тоннеля уступом с применением комбинированного расположения шпуров, например клиновой вруб в верхней части сечения и вертикальные или горизонтальные отбойные шпуры в нижней части.

* * *

При проходке тоннелей с передовой штольней необходимость во врубовых шпурах отпадает. В этих случаях часто применяют ярусное расположение отбойных шпуров с обрушением лба забоя в несколько приемов.

Более сложно расположение шпуров в забое при проходке тоннелей значительного сечения и в осложненных геологических условиях, как это было, например, при сооружении тоннеля под р. Мерси. Расположение шпуров и порядок производства взрывных работ в этом случае показаны на рис. 470, 471[1].

Тоннель Холливел в Англии, предназначенный для осушения массива свинцовых разработок, заложенный на глубине 150—245 *м* от поверхности, сечением 3,04 × 2,44 *м*, протяжением 9,6 км, в крепких сланцах, проходился взрывным способом.

Атаки забоя осуществлялись тремя буровыми инструментами системы С-17 Ингерсоль-Рэнд, установленными на общей горизонтальной распорной колонне. Средняя продолжительность процесса бурения — 36 шпуров в 2 часа 18 минут. Минимальная продолжительность процесса бурения 1 час 30 минут. Средняя скорость бурения 60—75 *см/мин*.

Из общего количества шпуров по лбу атакуемого забоя тоннеля 8 шпуров проходили глубиной по 2,3 *м*, а остальные глубиной примерно 1,98 *м*. Расположение шпуров в забое и количество динамита для каждого шпура указано на рис. 472. Общий расход динамита

[1] См. В. Л. Маковский, Сооружение тоннелей метрополитенов. М., 1935.

№ 1 на атаку 59 *кг*, что примерно составляет в среднем около 30 *кг* на 1 *пог. м* тоннеля.

В широком масштабе взрывные работы производились при сооружении тоннелей акведука р. Колорадо (США). Тоннели различных сечений сооружались здесь в породах раз-

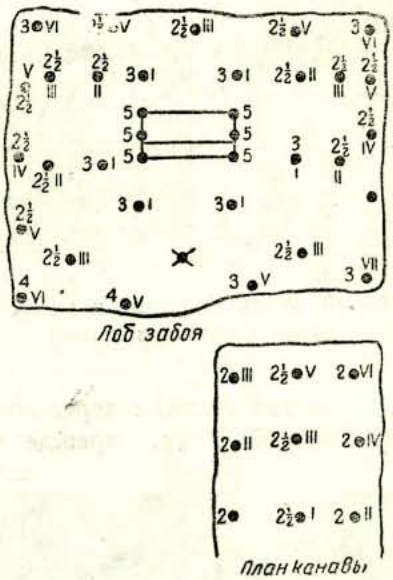


Рис. 472. Тоннель Холливел (шпуры в забое тоннеля) (римскими цифрами показаны номера одновременно взрываемых зарядов, а арабскими цифрами — количество динамита в фунтах)

ной крепости. Ниже даются краткие сведения о методах бурения и взрывных работах при сооружении колорадских тоннелей с указанием различных схем расположения шпуров.

Акведук р. Колорадо имеет своим назначением снабжать водой город Лос-Анжелос и другие города, расположенные в этой части Калифорнии. Акведук проходит на протяжении 157 *км* в тоннелях, 143 *км* в трубопроводах и сифонах и около 110 *км* в открытых облицованных каналах. Вода подается к конечному резервуару в ущелье Коджалио, находящемуся на расстоянии 80 *км* к востоку от Лос-Анжелоса. Оттуда вода самотеком идет по распределительной сети, состоящей из 27 *км* тоннеля и 260 *км* бетонных и стальных трубопроводов.

Главный акведук имеет 28 тоннелей длиной от 100 *м* до 30 *км*, общим протяжением в 157 *км*.

Проходка тоннелей производилась большей частью в гранитных и гнейсовых породах, но

встречались также кварц, диорит, сланец, известняк и конгломераты.

Около трети всех тоннелей было пройдено в устойчивой породе, так что до устройства обделки временных креплений не требовалось.

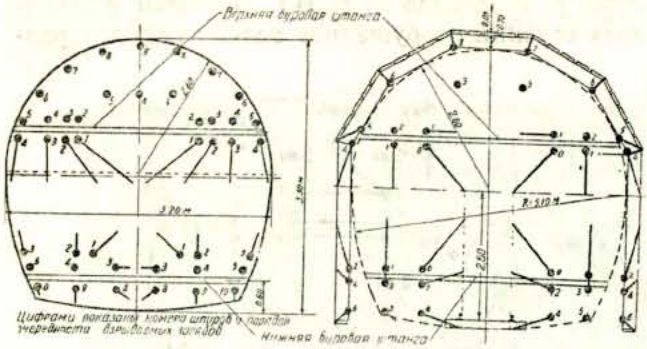


Рис. 473 и 474. Тоннель Коачелло в США (расположение шпуров в забое)

В других местах ставили деревянное крепление в пройденной части, прежде чем при-

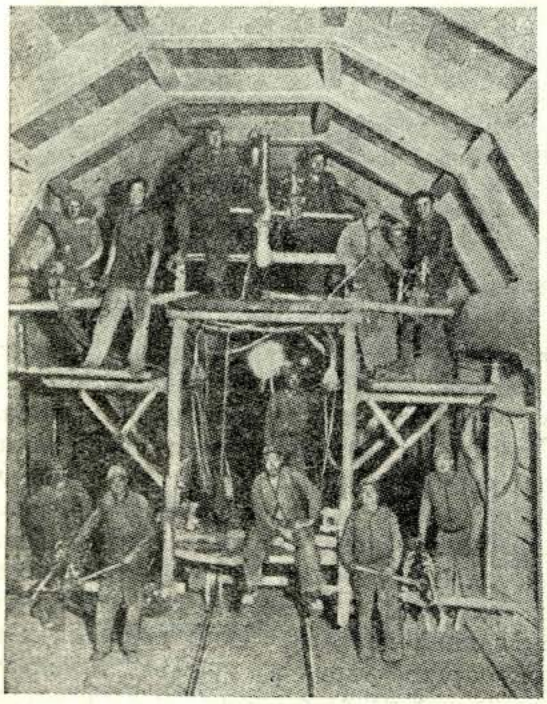


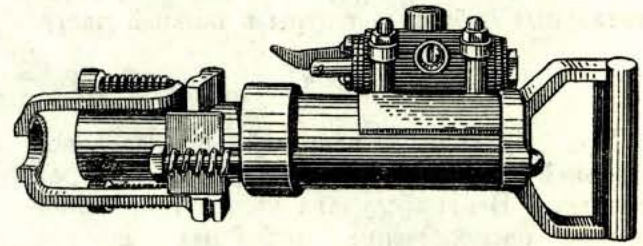
Рис. 475. Буровая тележка колорадских тоннелей

ступить к разработке следующего участка (тоннель № 24).

Главный тоннель был облицован бетоном и имел сечение в виде подковы высотой в 4,8 *м* и шириной 4,7 *м*.

Большая часть тоннеля проходилась при одновременной разработке сплошного сечения. Бурение производилось группой колонковых перфораторов, смонтированных на буровой тележке. Обычно врубовые шпуры располагались в виде пирамиды или конуса, но применялись и другие системы, в зависимости от характера проходимых пород.

Из взрывчатых веществ чаще всего применялся 40-процентный динамит и в некоторых местах аммонал. Расход взрывчатых веществ при проходке в твердом граните и гнейсе составлял 1,6 *кг* на 1 $м^3$ породы. На указанных тоннельных работах применялось исключительно электропаление.



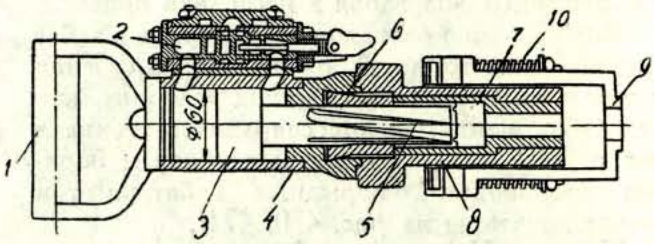


Рис. 476. Перфоратор БМ-13 завода „Пневматик“:
1 — рукоятка, *2* — воздухораспределительное устройство, *3* — поршень, *4* — цилиндр, *5* — шток с бойком, *6* — храповое поворотное устройство, *7* — направляющая букса, *8* — ствол, *9* — бородержатель, *10* — пружина

На рис. 473 и 474 указаны схемы расположения буровых скважин и порядок взрывания шпуров при проходке тоннеля № 27 (Зап. Коачелло — Ущелье Блинд). Тоннель проходился разработкой на все сечение через граниты, диориты, гнейсы. Длина тоннеля 2 050 *м*. Порода изменялась от мягкой до среднетвердой и от мелкоизломанной до крупноблочной. Бурение шпуров производилось пятью автоматическими колонковыми перфораторами, смонтированными на буровой тележке.

Тоннель № 42 проходился через твердый базальт. На буровой тележке были смонтированы 7 буров Лейнерс Вортингтон. Врубовые шпуры располагались конусообразно.

Тоннель № 7 длиной 5 350 *м* через гору Кокскомб проходился через гранит и сланец;

в соответствии с породой менялась и схема расположения шпуров. На буровой тележке были смонтированы 6 колонковых перфораторов Вортингтон (рис. 475).

При проходке тоннеля № 40 (Холл — Инкляйн) длиной 334 *м* бурение велось двумя перфораторами Ингерсоль-Рэнд, установленными на колонках. Разработка осуществлялась в доломитовых известняках с некоторыми участками, заполненными брекчией. Врубовые шпуры располагались клинообразно.

Бурение шпуров и буровое оборудование

Процесс бурения скважин для взрывных работ при сооружении тоннелей в современной тоннельной практике механизирован.

Механическое бурение производится вращательным или ударно-вращательным способом. Буровое оборудование, работа которого основана на вращательном действии, чаще всего приводится в движение с помощью электрической энергии.

При ударно-вращательном действии оборудование приводится в движение пневматикой при помощи сжатого воздуха или электрической энергией. Сжатый воздух для механизации буровзрывных работ при проходке в скальных породах был впервые использован при сооружении железнодорожного тоннеля Мон-Сени через горную цепь Альп в 1859 г.

Использование электрической энергии дает возможность повысить коэфициент полезного действия машины и снизить расход энергии. Применение сжатого воздуха, однако, облегчает устройство машины, делает ее более легкой и надежной в работе. При этом следует отметить, что производительность бурения увеличивается с повышением величины манометрического давления сжатого воздуха, подаваемого в тоннельный забой. Так, по данным проф. А. Ф. Суханова, при повышении воздушного давления с 3 до 6 *ат* производительность бурения возрастает до 450%. В настоящее время наибольшее распространение в тоннельном деле получили пневматические бурильные молоты, или перфораторы (рис. 476 и 477).

Перфораторы по своему весу подразделяются на следующие три категории:

1) легкие (джеки) для работы с руки (вес 10—30 *кг*);

2) среднего веса — телескопные (стоперы) с винтовым или автоматическим вращением бура при помощи сжатого воздуха (рис. 478, 479) (вес 30—50 *кг*);

3) тяжелые — колонковые (дрифтеры), смонтированные на специальных устройствах (вес 35—100 *кг*).

В перфораторах легкого типа подача бура и машины производится вручную.

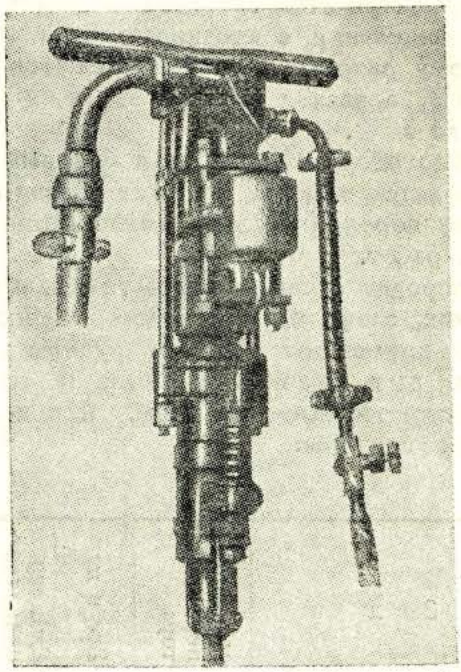


Рис. 477. Тяжелый ручной перфоратор

В перфораторах среднего веса и в тяжелых эта подача осуществляется винтом от руки или автоматически с помощью сжатого воздуха или же силой отдачи.

Пылеудаление при бурении шпуров производится либо применением продувки (*сухое пылеудаление*), либо промывкой водой (*мокрое пылеудаление*). Последнее имеет преимущества перед сухим пылеудалением, так как лезвие бура в этом случае не нагревается, смена буров производится реже, очистка шпура от буровой муки происходит постоянно, и удар от этого получается большой силы. Применение мокрой промывки шпуров при проходке в скальных породах повышает производительность бурения (до 25%).

В последнее время при производстве буровзрывных работ прибегают к применению *понизителей крепости* пород введением в буримый шпур специальных растворов (хлористый натрий, сода, известь, спирт, сахар, фенолы). Проникая по трещинам в процессе ударного бурения, понизители крепости способствуют эффективности бурения по породам

с высоким коэфициентом крепости. Произведенные в Академии Наук СССР акад. П. А. Ребиндером исследования, а равно опытные данные ряда рудников Союза показали, что эффект понижения крепости зависит в основном от физико-химических свойств буримых горных пород и от концентрации раствора. При этом скорости бурения вследствие понижения сопротивления пород механическому разрушению увеличиваются от 10 до 100%, а расход буровой стали снижается от 10 до 30%.

Выбор оборудования для буровых работ производится в зависимости от крепости проходимых пород, размеров сечения тоннеля и объема работ.

В породах средней крепости (слабых известняках, сланцах) при малых сечениях выработок применяются легкие ручные перфораторы, а в крепких породах и сечениях большого профиля — тяжелые, или колонковые, перфораторы.

Основные показатели перфораторов, выпускаемых на заводах СССР, приведены в табл. 33 и иностранных фирм — в табл. 34.

За последние годы (в США) выпущен ряд новых, более усовершенствованных моделей пневматических перфораторов, отличающихся своими размерами, весом отдельных деталей и системой воздухораспределения: 1) Ингерсоль-Рэнд: IB-4 — 23,6 *кг*; IB-5 — 27,3 *кг*; R-48 — 91,1 *кг* и DA-30 — 22,3 *кг*; 2) Гарднер-Денвер: S-45 — 19,9 *кг*, H-81 — 92,1 *кг* и CF-79 — 76,6 *кг*; 3) Чикаго-Пневматик: СП-22 — 12,7 *кг*; СП-32 — 21,3 *кг*; СП-44 — 54,3 *кг* и СП-70 — 94,3 *кг*; 4) Вортингтон: WI-45 — 20,4 *кг*; WI-55 — 26,3 *кг*; 5) Сулливан L-2 — 20,4 *кг*; SS-10 — 54,4 *кг*; S-91 — 43,5 *кг*; T-350 — 70,7 *кг* и H-2 — 19,9 *кг*. Работа перфораторов рассчитана на давление сжатого воздуха от 5 до 7 *ат*.

Перфораторы, работающие с помощью электрической энергии, также создают разных типов — легкие и тяжелые.

Таблица 33

Завод	Марка перфоратора	Вес в *кг*	Диаметр цилиндра в *мм*	Ход поршня в *мм*	Число ударов поршня в мин.	Расход воздуха $м^3/мин$.	Нормальное давление в *ат*	Метод очистки шпура	Максимальная глубина бурения в *м*
I. Ручные перфораторы									
„Пневматик"	БМ-13	17,5	60	45	1 500	1,9	5	Продувание	2,5
„	БМ-15	21,5	60	55	1 700	2,0	5	„	2,5
„	ББ-1	16,5	36	45	—	1,45	5	„	1,5
Невьянский	НР-1	16,6	60	64	2 000	1,8	5	„	—
„	НР-2	22,5	66	48	2 400	2,0	5	Продувание и промывка	—
„	НР-3	15,2	64	54	—	1,8	5	То же	—
„Коммунист"	ПБ	22,0	68	50,8	1 850	2,5	—	—	2,5—4.0
II. Телескопные перфораторы									
„Пневматик"	ББ-3	35,0	50,0	125,0	—	2,0	—	Продувание	5,0
„Коммунист" (Кривой Рог)	П-Е	38,75	75,0	59,8	1 450	2,6	—	„	4,5
Невьянский	Т-1	37,0	67,0	51,0	2 400	2,0	5—6	—	3,0
Кыштымский	ТП-1	44,5	70,0	77,0	1 850	2,8	—	Продувание	—
	ТП-2	45,0	76,0	68,0	—	2,5	—	„	—
III. Колонковые перфораторы									
Невьянский	НК-1	58,25	76,0	70,0	2 100	3,0	4,5	Промывка	4,5
	НК-2	84,6	102,0	89,0	1 500	5,0	—	„	4,5
„Коммунист"	ПЕ	38,75	75,0	70,0	1 700	2,6	—	„	—
	ПР	52,0	76,0	68,0	1 850	2,5	4,7	„	—
	ПС	85,0	100,0	89,0	1 500	5,0	—	„	—

Таблица 34

Фирма, завод	Марка перфоратора	Вес в *кг*	Диаметр цилиндра в *мм*	Ход поршня в *мм*	Число ударов поршня в мин.	Метод очистки шпура	Максимальная глубина бурения в *м*
I. Легкие ручные перфораторы							
Ингерсоль-Рэнд	Р-39	19,5	66,7	50,8	2 400	Продувание или промывка	3,6
»	S-49	13,5	60,3	47,6	2 400	То же	2,5
»	BCR-430	20,5	57,0	51,0	2 100	»	—
Сулливан	L-7	20,4	57,1	58,7	2 100	Промывка	3,6
»	L-8	17,7	63,5	44,4	2 500	»	2,5
Чикаго-Пневматик	СП-8	19,0	63,5	54,0	1 800	Продувание	3,5
II. Тяжелые ручные перфораторы							
Ингерсоль-Рэнд	ДCR-23	26,3	60,3	63,5	1 750	Продувание или промывка	5,0
»	X-59	32,6	76,2	68,3	2 100	То же	9,0
Сулливан	L-5	34,0	73,6	63,5	2 060	»	7,5
III. Колонковые перфораторы (легкие)							
Ингерсоль-Рэнд	L-74	53,2	76,2	68,3	2 100	Продувание или промывка	4,7
»	N-75	65,6	88,9	77,8	1 750	То же	6,0
Чикаго-Пневматик	СП-5	30,5	76,2	69,8	1 700	Продувание	4,5
IV. Колонковые перфораторы (тяжелые)							
Ингерсоль-Рэнд	X-71	95,4	101,6	96,8	1 200	Продувание или промывка	11,0
Чикаго-Пневматик	СП-6	65,8	88,9	69,3	1 700	То же	6,0
Сулливан	Т-5	91,0	101,6	71,4	2 000	»	5,7

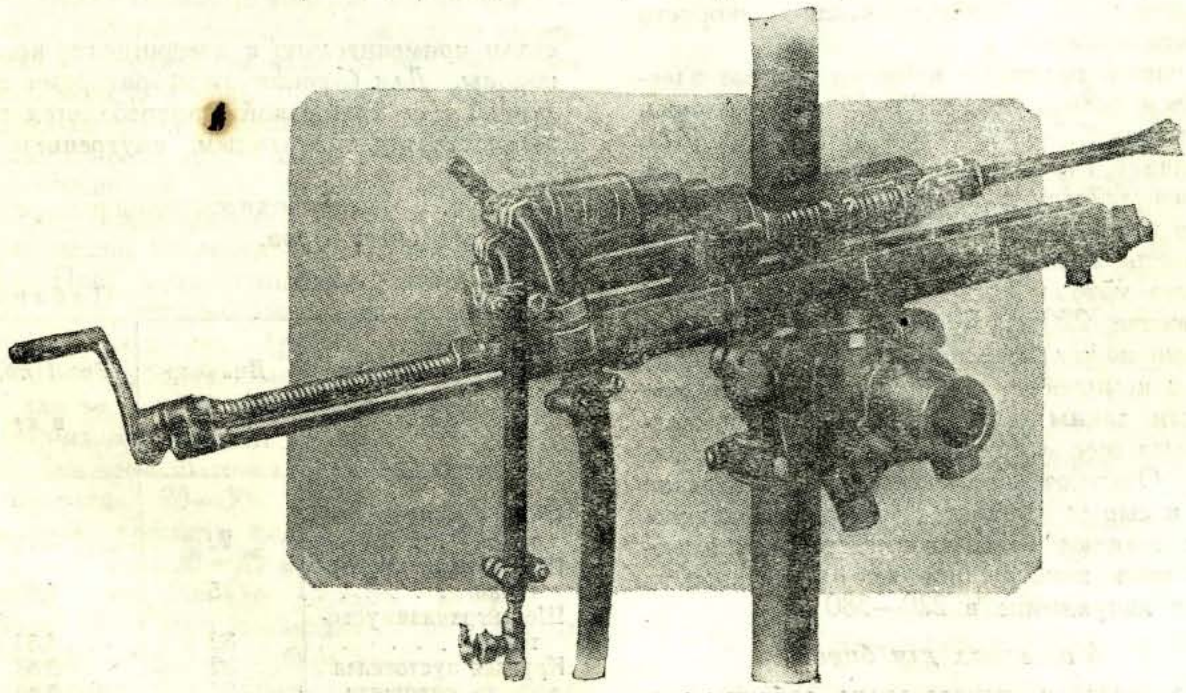


Рис. 478. Колонковый перфоратор с винтовой подачей на забой

Характеристика электрических буровых машин дана в табл. 35.

Основные преимущества электрического перфоратора перед пневматическим заключаются в следующем. Простота подводки энергии; при этом отпадает необходимость в компрессорном хозяйстве. Коэфициент полезного действия электрических бура и сверла 0,7—0,8 по сравнению с коэфициен-

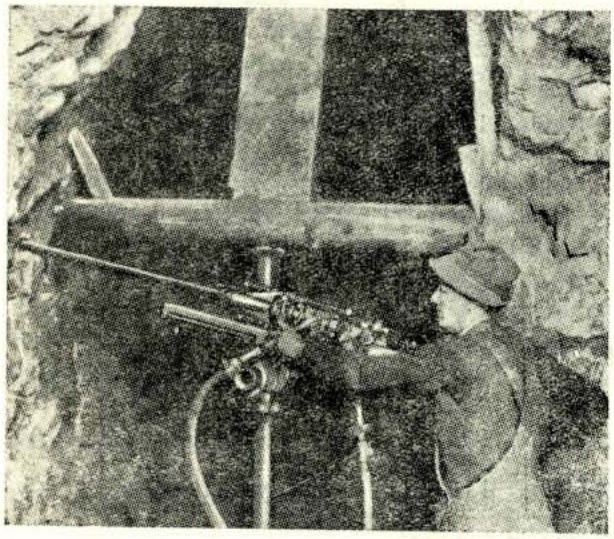


Рис. 479. Бурение шпура в забое колонковым перфоратором

том 0,1—0,2 пневматического бура. Скорость электрического бурения выше скорости пневматического.

В нашей практике имеются ручные электрические сверла весом 12—16 *кг* и колонковые весом 100—200 *кг* (рис. 480, 481). Последние (вращательного и ударно-вращательного действия) применяются при бурении по породам средней и высокой крепости. Мощность моторов от 0,7 до 3 *квт*. Число оборотов мотора до 3000 в минуту. Рабочее напряжение 220 *в*. Бурение электрическими сверлами может быть произведено на глубину до 3 *м* комплектом из буровых штанг при разности длины штанг в 0,7 *м*. За последнее время сверла армируются твердыми сплавами. Опытное применение электрических сверл в сырых забоях ограничивается условиями техники безопасности, так как имеющиеся пока конструкции их рассчитаны на рабочее напряжение в 220—380 *в*.

Материал для буров

Бур является центральным рабочим элементом буровой машины, изготовляется из

Таблица 35

Завод	Тип	Вес в *кг*	Мощность мотора в *квт*	Живая сила удара в *кг/м*	Удары штанги в мин.	Число оборотов штанги в мин.
I. Ручные электросверла						
„Красный металлист" (Конотоп) . .	ЭБР-1	16,5	0,55	—	—	757
Завод им. С. М. Кирова (Горловка)	ДЕ	12,0	0,5	—	—	325
Томский завод Главугля	МР-1	15,0	0,5	—	—	325
II. Электроперфораторы						
„Красный металлист"	Е-153	90	2,2	—	—	193 427
Томский завод Главугля	СПК-1	60	1,5	1,94	1500	200
То же	МР-2	175	1,8	—	—	428
Завод им. С. М. Кирова (Горловка) .	ЭСК-1	160	3,0	—	—	427 286
То же	ЭБК-1	122	3,0	—	—	427
III. Электробуры (проходящие испытание)						
Электробуровой автомат ударно-вращательного действия	ЭБА-1	200	2,3 и 3,0	1,0	960	—

стали применительно к коэфициенту крепости породы. Для бурения перфораторами с продувкой или промывкой употребляется пустотелая сталь с продольным внутренним каналом.

В табл. 36 приводятся основные размеры и вес стальных буров.

Таблица 36

Форма сечения бура	Диаметр в *мм*	Вес 1 *пог. м* в *кг*
Шестигранная пустотелая	22	3,11
Шестигранная пустотелая	25	3,80
Шестигранная пустотелая	32	6,56
Круглая пустотелая .	32	5,83
„ сплошная .	25	3,85
„ „ .	22	2,98

При выборе сорта буровой стали следует иметь в виду коэфициент крепости проходимых пород и характер их трещиноватости, способ заправки бура (ручной или механический), а равно систему организации заправки буров.

Для пород мягких и средних, до IV категории по таблице Протодьяконова (см. главу XXI), применяется буровая сталь с меньшим содержанием углерода — от 0,7 до 0,8%, а для крепких пород сталь с повышенным содержанием углерода — от 0,8 до 0,95%.

При заправке буров вручную и недостаточно оборудованной заправочной предпочтительно брать сталь с меньшим содержанием углерода, так как она не столь чувствительна к термической обработке. При механизированной заправке буров на специальных станках в бурозаправочной мастерской можно применять стали с повышенным содержанием углерода.

Для бурения глубоких шпуров буровые машины снабжаются комплектом буров разной длины и разных диаметров коронок.

При разработке скальных пород с коэфициентом крепости по Протодьяконову $f > 5$ эффективно применять при производстве буровых работ не обычную буровую сталь, а буры, армированные твердыми сплавами (рис. 482 и 483). В состав твердых сплавов марок РЭ-8, РЭ-12 и РЭ-15 входят вольфрам или кобальт в виде пластинок толщиной 8—10 *мм* и высотой 10—20 *мм*. Последние укрепляются в специальном пазе головки стального бура. Твердые сплавы обладают высокой сопротивляемостью истирающим воздействиям. Данные применения твердых сплавов в горной промышленности при бурении по породам с коэфициентом крепости $f = 7$—8 указывают на повышение скорости бурения порядка 25—30%. При этом снижение себестоимости работ за счет экономии по материалам, сжатому воздуху (расход уменьшается до 200%), рабочей силе, транспорту достигает для указанной крепости пород 76—80% по сравнению с работой обычными стальными инструментами. Заточка бура со сплавом РЭ-8 эквивалентна 25—30 заточкам стального бура при крепости пород $f = 9$—12, а со сплавом РЭ-15 20—25 заточкам. Надо иметь в виду, что начало бурения шпура на глубину 15—20 *см* необходимо производить обычным стальным буром во избежание выкрашивания пластинок твердых сплавов.

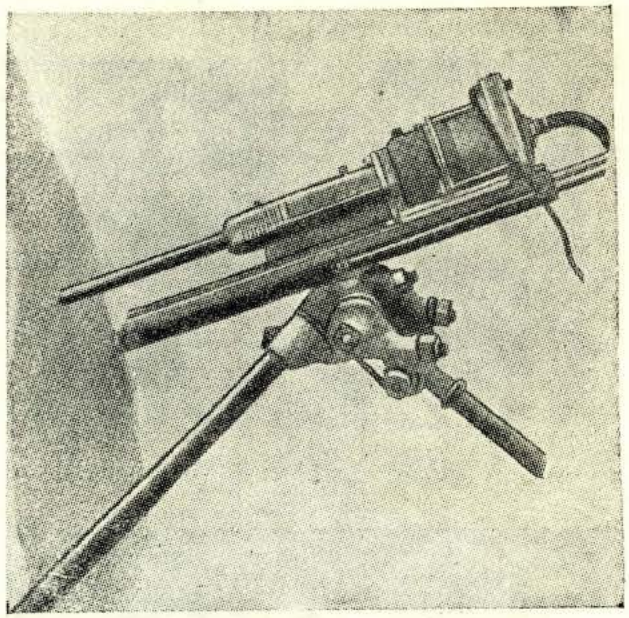


Рис. 480. Электроперфоратор СПК-1 на треноге

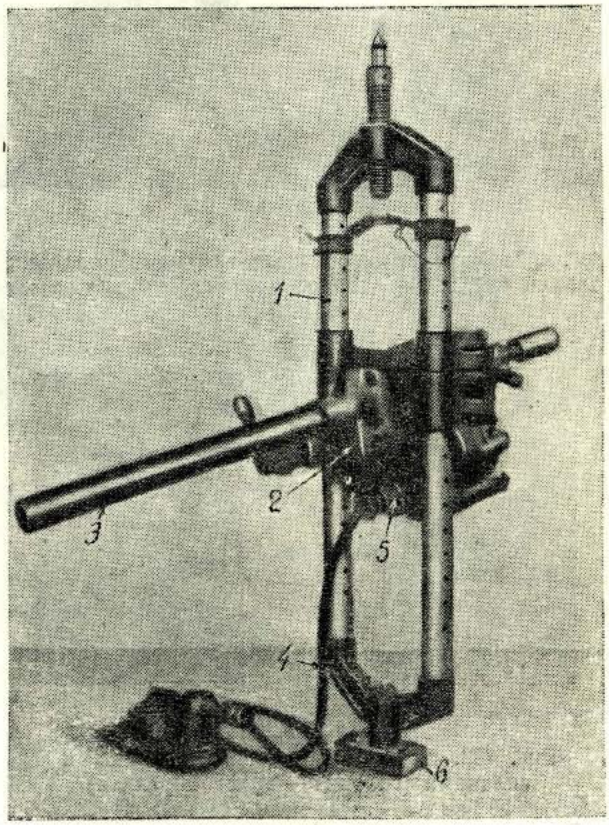
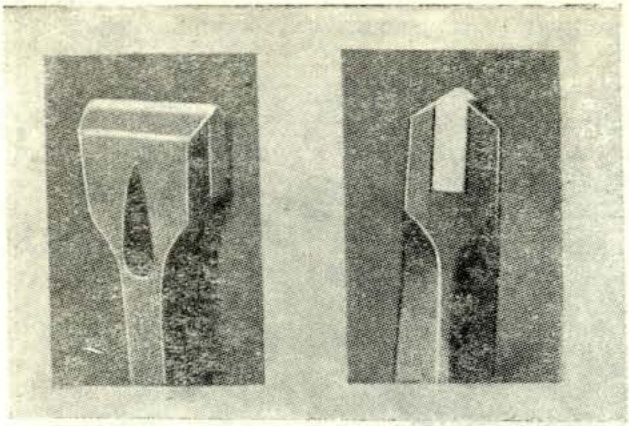
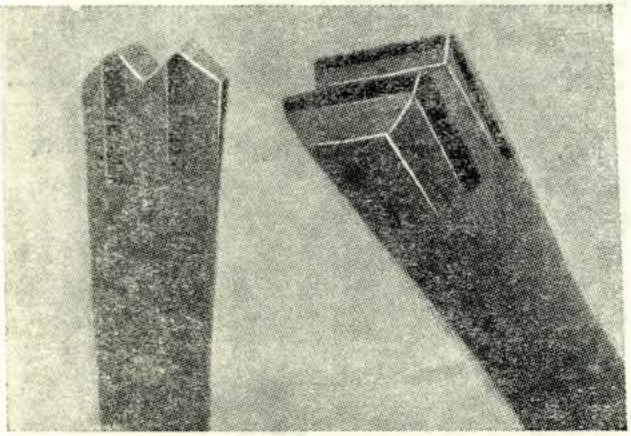


Рис. 481. Электросверло ЭСК-1 с колонкой:

1 — колонка, *2* — корпус электросверла, *3* — штепсельная муфта, *4* — кабель, *5* — выводная коробка кабеля, *6* — колодка



I



II

Рис. 482. Буры, армированные твердыми сплавами (головки бура: I — однодолотчатая, II — двухдолотчатая)

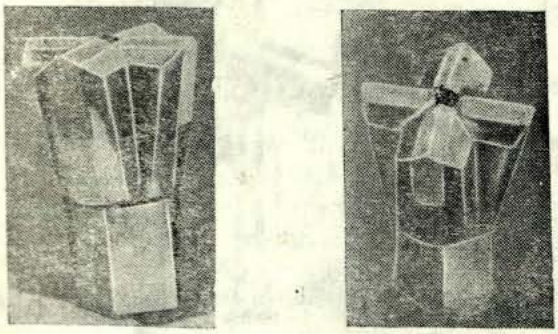


Рис. 483. Буры, армированные твердыми сплавами (головка — крестообразная)

В американской практике широко применяются литые твердые сплавы, главным образом из карбидов вольфрама.

При проходке подземных выработок специального назначения на Гибралтаре в период второй мировой войны успешно и в широком масштабе применяли алмазное бурение и вольфрамисто-карбидные сплавы, обеспечившие высокую производительность буровых работ в скальных породах с высоким коэфициентом крепости.

Опыт применения твердых сплавов в железорудной и марганцевой промышленности показывает увеличение скорости бурения твердыми сплавами по сравнению с каленными бурами (в зависимости от категории крепости пород) по шкале А. Ф. Суханова до 340%.

Таблица буримости пород по Суханову приводится ниже (табл. 37).

Таблица 37

Категория	Степень буримости	Продвигание шпура в минуту чистого времени бурения в *мм*
I	Труднобуримые породы высшей степени . . .	10—12
II	Очень крепкие породы .	15—20
III	Труднобуримые породы	30—38
IV	Породы выше средней буримости	50—60
V	Породы средней крепости	75—100
VI	Породы довольно легкобуримые	150—200
VII	Породы легкобуримые .	300—400

Базируясь на данных табл. 37, была составлена диаграмма, характеризующая (по опыту Криворожского бассейна) увеличение скорости бурения при применении твердых сплавов (рис. 484).

Бур перфоратора состоит из *головки*, или *коронки*, разрушающей породу, *стержня бура* и *хвостовика*, входящего непосредственно в перфоратор.

В тоннельном строительстве применяются различные головки бура: однодолотчатая, двухдолотчатая, крестообразная и шестигранная (звездочка) (рис. 485). Первые три формы головок применяются преимущественно при бурении пород средней крепости. Наибольшее распространение получила крестообразная головка. В породах с высоким коэфициентом крепости применяют преимущественно звездообразную головку бура.

В связи с необходимостью более точной калибровки коронок и механизации процесса их изготовления успешно применяются *съем-*

ные коронки, изготовляемые на заводе и навинчиваемые на стержень бура перфоратора (рис. 486).

Применением съемных коронок удается резко повысить скорость бурения по породам

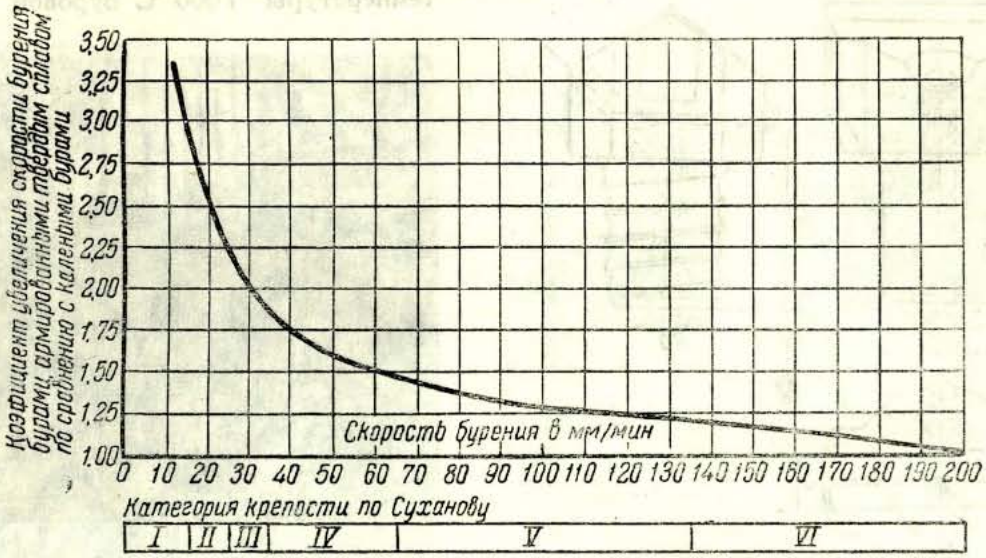


Рис. 484. Диаграмма увеличения скорости бурения при применении твердых сплавов

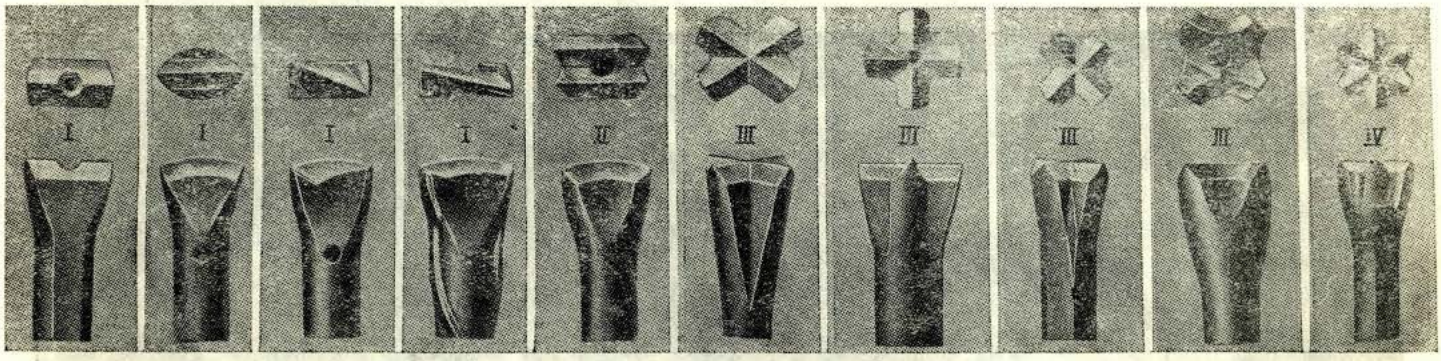


Рис. 485. Формы головок буров: I — однодолотчатая, II — двухдолотчатая, III — крестообразная, IV — звездчатая

высокой крепости за счет хорошего качества заправки и возможности быстрой замены коронки бура при ее затуплении.

БУРОЗАПРАВОЧНАЯ МАСТЕРСКАЯ

Бурозаправочная мастерская на постройке тоннеля предназначается для изготовления и заправки затупленных буров, выходящих из строя в процессе бурения шпуров. Бурозаправочная должна равномерно загружаться бурами, требующими заправки, чтобы полностью использовать станки и своевременно сортировать затупленные буры партиями по длине, видам и размерам головок во избежание потерь времени на смену штампов, матриц и других элементов.

Оборудование бурозаправочной располагается с расчетом, чтобы буры при их заправке перемещались в поточном порядке, в соответствии с последовательностью операций. Имеются в виду сортировка, нагрев, заправка, охлаждение, отжиг и закалка буров (рис. 487).

Широкое распространение в тоннельном деле съемных буровых коронок обусловило необходимость создания ряда приспособлений и станков по заточке коронок и ковке резьбы для навинчивания последних на буровые стержни. В настоящее время имеются автоматы со счетчиками и фотоэлементами, сортирующие буровые коронки на металлической ленте, с производительностью до 2 000 коро-

нок в час. Станки для заточки коронок работают с производительностью до 900 коронок в смену.

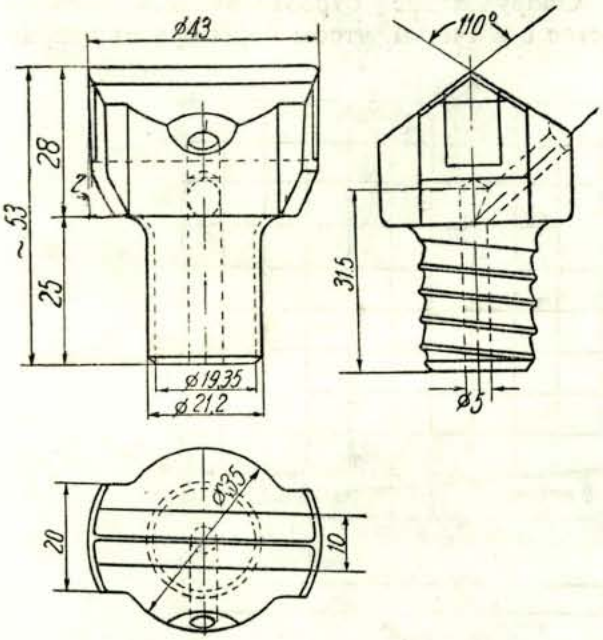


Рис. 486. Коронка бура марки „Перегнала"

Привезенные из тоннельного забоя затупленные буры очищаются от породы и подбираются партиями в зависимости от характера затупления, типа и размера головок (рис. 488). После нагрева в нефтяном горне до температуры 1000° С буровой стержень на-

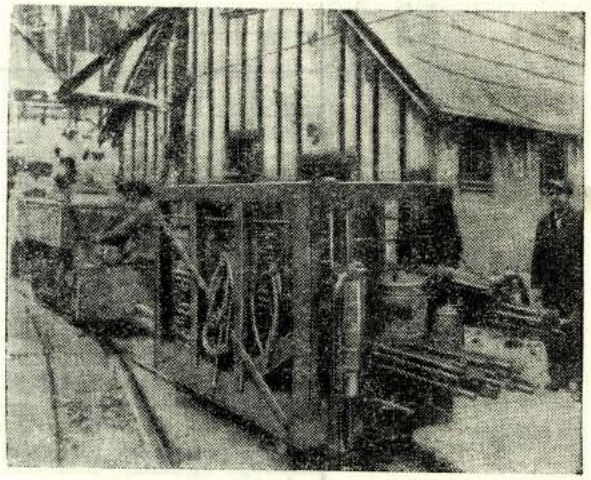


Рис. 488. Транспортировка буров из бурозаправочной в тоннель

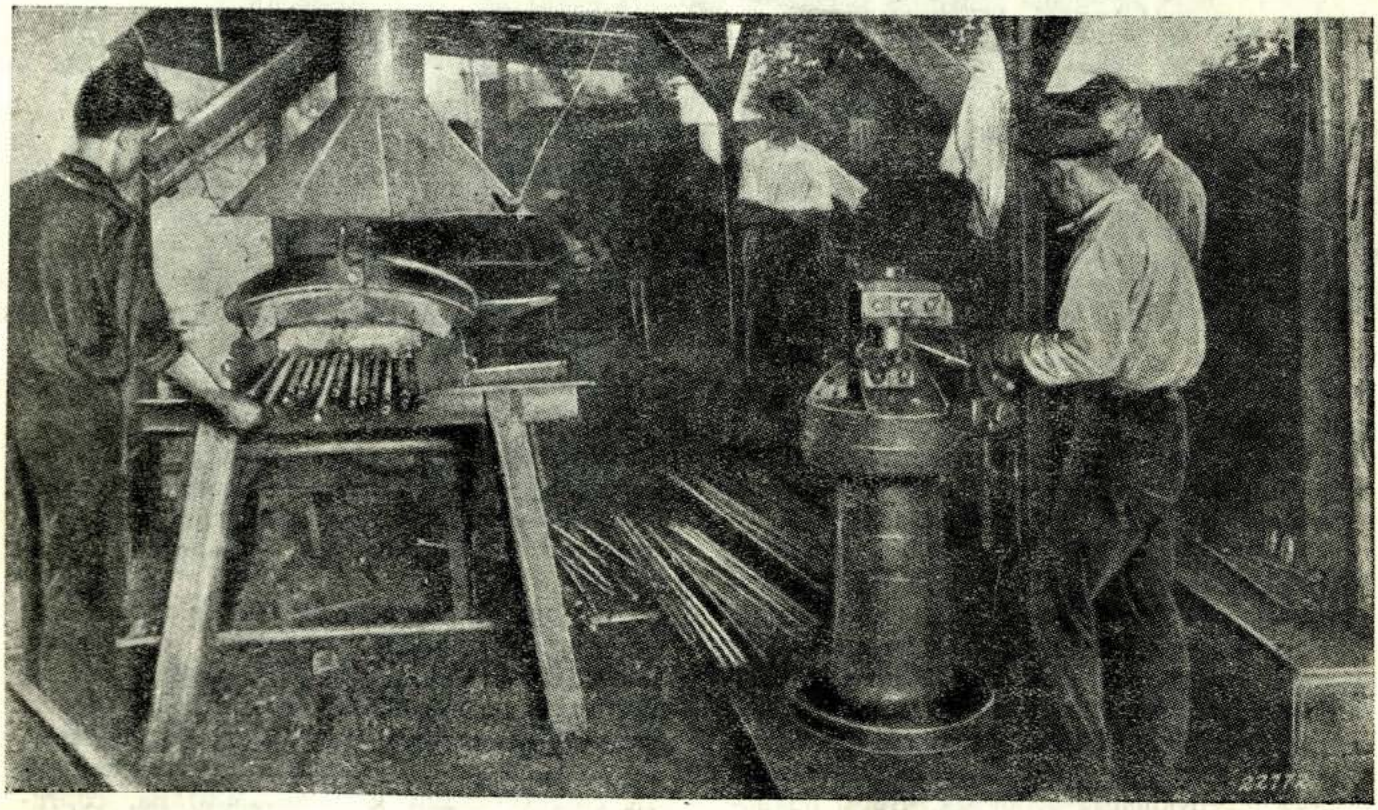


Рис. 487. Бурозаправочная

правляется на бурозаправочный станок. После заправки бура производится отжиг его — специальный нагрев при последующем медленном охлаждении в ящике с известью. Закалка бура — процесс термической обработки стального бура.

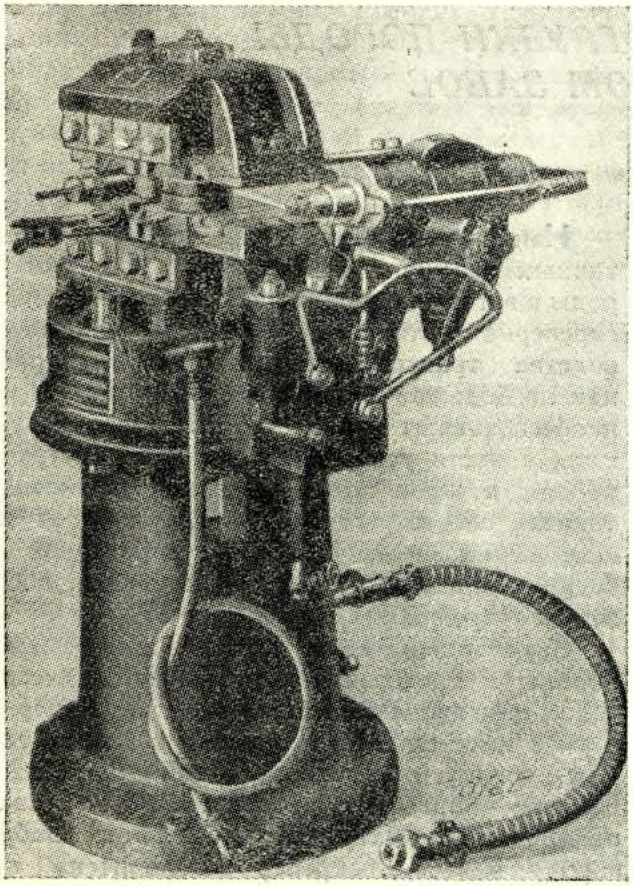


Рис. 489. Станок для заправки буровых коронок

До операции закалки бур нагревают в нефтяном горне по установленным практикой нормам (до 700° С), следя все время за температурой. Закалку стального бура осуществляют в баке с проточной водой при температуре 15—25° С. Для достижения равномерной температуры через воду непрерывно пропускают струю воздуха от общей воздухопроводной сети. Для закалки хвостовиков буров служат масляные баки с водяным охлаждением.

Бурозаправочный станок, имеющий мощный корпус для восприятия ударов и вибрации в процессе заправки буровых стержней и работающий при помощи сжатого воздуха с расходом по 3 $м^3/мин$, показан на рис. 489.

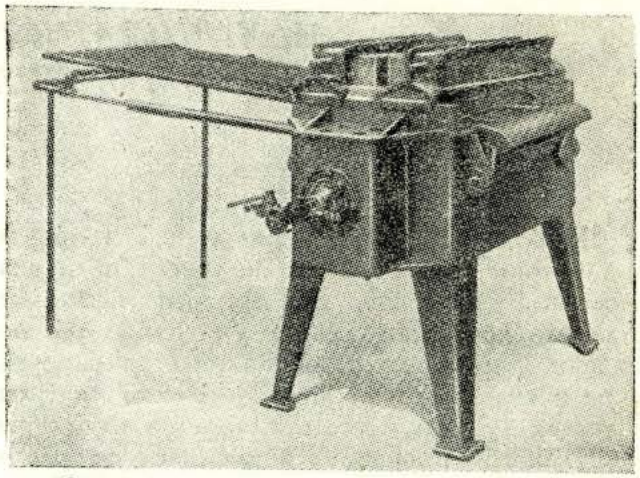


Рис. 490. Нефтяной горн

В СССР бурозаправочные станки типа Лейнера выпускаются Невьянским заводом и Горловским машиностроительным заводом.

Производительность бурозаправочного станка достигает 300—400 буров в смену.

Нефтяной горн представлен на рис. 490.

Расход горючего при работе нефтяного горна составляет 8—15 *л/час*, а расход сжатого воздуха — 0,5 $м^3/мин$.

Для достижения максимального технического и скоростного эффекта буровзрывных работ при сооружении тоннелей необходимо провести следующие мероприятия: обеспечить величину давления сжатого воздуха в забое до 6—7 *ат*, установить оптимальную глубину шпура ($L = 2{,}5—3{,}5$ *м*), применять перфораторы тяжелого типа с пневматическими автоподатчиками, применять водяную промывку буров с понизителями крепости, армировать буры твердыми сплавами, применять съемные головки буров, вести одновременное обуривание забоя с подвижных рам, организовать мощное бурозаправочное хозяйство для заправки и закалки буров.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

МЕХАНИЗАЦИЯ ПОГРУЗКИ ПОРОДЫ В ТОННЕЛЬНОМ ЗАБОЕ

Наиболее трудоемкой операцией в общем цикле тоннельных работ является погрузка породы. Ручная погрузка в забое приводит к длительности операции и снижению темпов проходки, к увеличению количества рабочей силы и стоимости работ. Погрузка породы является узким местом в общем комплексе тоннельного процесса и занимает от 50 до 80% времени полного цикла работ. Здесь чрезвычайно важно привести указание товарища Сталина: «Механизация процессов труда является той новой для нас и решающей силой, без которой невозможно выдержать ни наших темпов, ни новых масштабов производства». Это обстоятельство обусловливает переход к механической погрузке породы применением в забое погрузочных машин, дающих значительный технико-производственный эффект.

Внедрением новых погрузочных машин на Метрострое скорость щитовой проходки возросла в 1,5—2 раза.

На Филиппинах в тоннеле длиной 2 850 *м* при ручной погрузке достигали скорости проходки 75 *пог. м* в месяц. С введением механической погрузки и установкой в забое погрузочной машины Конвейг скорость проходки достигла 400 *м* в месяц (максимальная скорость в смену была 7,5 *пог. м*, в сутки до 17,4 *пог. м*).

При строительстве тоннеля Моно-Бассейн поперечным сечением 3,65 × 3,65 *м* применением гидравлической лопаты Гудмен была обеспечена рекордная скорость до 22 *пог. м* в сутки.

Применением погрузочных машин в забое (рис. 491) достигается: а) увеличение темпов проходки, б) освобождение рабочей силы, в) удешевление работ, г) подъем общей культуры тоннельного процесса.

Наиболее простым и вместе с тем эффективным способом механизации погрузки породы в вагонетки подземной откатки является скреперная установка. Скреперы для производства транспортных и погрузочных работ нашли большое применение в тоннельном деле и обеспечивают удовлетворительные результаты в части ускорения процесса погрузки породы в вагонетки. Скреперная установка в тоннеле состоит из следующих четырех элементов: скреперного ковша, скреперной лебедки с двигателем, канатов и блоков, погрузочного трамплина (платформы).

Скреперный ковш служит для захвата породы и представляет собой металлический совок или ящик без дна и стенки. В первом случае имеется в виду ковш гребкового типа для погрузки крупнокусковой породы, во втором — ковш коробчатого типа для захвата однородного материала и мелочи. Забрав породу в забое, скрепер «волочится» при помощи каната по подошве выработки или по направляющему лотку (дорожке) к месту погрузки породы в вагонетку. Загруженный ковш тянется головным канатом, а порожний в обратном направлении хвостовым канатом. Оба каната намотаны и укреплены на двух барабанах скреперной лебедки, двигатель которой приводит в работу всю установку. Обычно лебедка монтируется на раме погрузочного трамплина, где производится наполнение вагонетки породой (рис. 492 и 494).

В зависимости от объема ковша вагонетка может быть заполнена в один или несколько приемов. Ковш установки имеет разнообразную форму, приспособленную к физико-механическим свойствам породы в забое. Для мягких пород применяются коробчатые скреперы.

Скрепер имеет три металлические плоские стенки из листового железа толщиной в 12 *мм* и сменную режущую часть.

Емкость скрепера 0,15—0,2 $м^3$. Вес его 85 *кг*. Длина 0,9 *м*, ширина 0,9 *м* и высота 0,4 *м*.

Имеются скреперы аналогичной конструкции, но большей емкости (0,6 $м^3$ и выше).

Для работы в породах крепких, с крупнокусковым материалом применяют гребковый скрепер. Этот тип скрепера имеет только заднюю стенку и прикрепленную к ней рукоять в виде скобы. Режущий край стенки снабжен вставными зубьями, или же его лезвие армируется твердыми сплавами. Иногда для лучшего наполнения ковша к нему прикрепляют и боковые стенки, как это делается на скреперах типа Сулливан.

Емкость подобных скреперов достигает 0,75 $м^3$, вес их — 350 *кг*.

Удобны для работы в различных по своей твердости и величине кусках породы также ковши серповидной формы.

Большое значение для успешной работы скрепера имеет не только его форма и очертание, но также вес его и угол режущей стенки ковша (рис. 493). Вес крепера должен обеспечить внедрение его в отвал породы и удерживать ковш от опрокидывания. Угол наклона режущей кромки устанавливается опытным путем — для мягких пород принимается от 12 до 25°, а для твердых крупнокусковых α от 25 до 45°.

Производительность скреперной установки зависит от емкости ковша, скорости движения его и от расстояния между местом забора породы и местом выгрузки ее в вагонетки.

Средняя скорость перемещения скрепера здесь принята равной 1 *м/сек*.

Производительность скреперной установки можно определить по формуле:

$$Q = \frac{3\,600\, v\, V\, \alpha}{l + vt},$$

где:

v — скорость движения скрепера в *м/сек*, V — емкость скрепера, l — длина пробега скрепера в груженом и порожнем состоянии в *м*, t — время в секундах, потребное для загрузки и разгрузки скрепера (по опытным данным t — 40 сек.), α — коэфициент, учитывающий задержки в работе, переноску блоков, возможные простои.

Лебедки, с помощью которых перемещается скрепер, применяются большей частью двухбарабанные. На один из барабанов наматывается головной канат, а с другого сматывается хвостовой канат. Основные

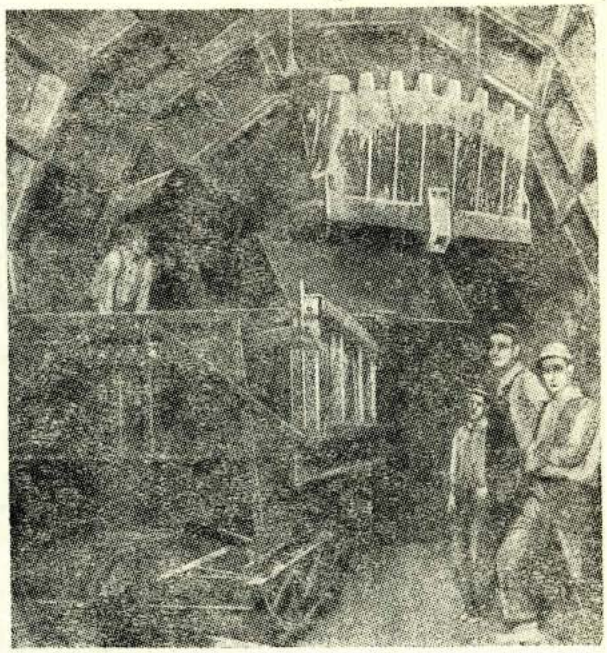


Рис. 491. Механическая погрузка породы в тоннельном забое

характеристики лебедок, применяющихся при скреперных установках, даны в табл. 38.

Таблица 38

Характеристика	Тип лебедки		
	УС-10 завода „Свет шахтера"	ЛР завода „Коммунист"	НДЕ-2 лебедка Сулливан
Мощность электромотора в *квт*	10	11	15
Скорость движения груженого скрепера в *м/сек*	1,0	0,75	1,0
То же, порожнего скрепера	1,25	1,00	1,25
Диаметр грузового барабана в *мм*	290	413	—
Диаметр хвостового барабана в *мм*	350	413	—
Ширина барабана в *мм*	170	190	—
Длина лебедки в *мм*	1 363	1 700	1 670
Ширина лебедки в *мм*	1 000	590	600
Высота лебедки в *мм*	747	610	750
Вес лебедки в *кг*	790	1 075	2 150

Канаты скреперной установки должны быть достаточно прочны, так как в работе они часто подвергаются толчкам, истираются

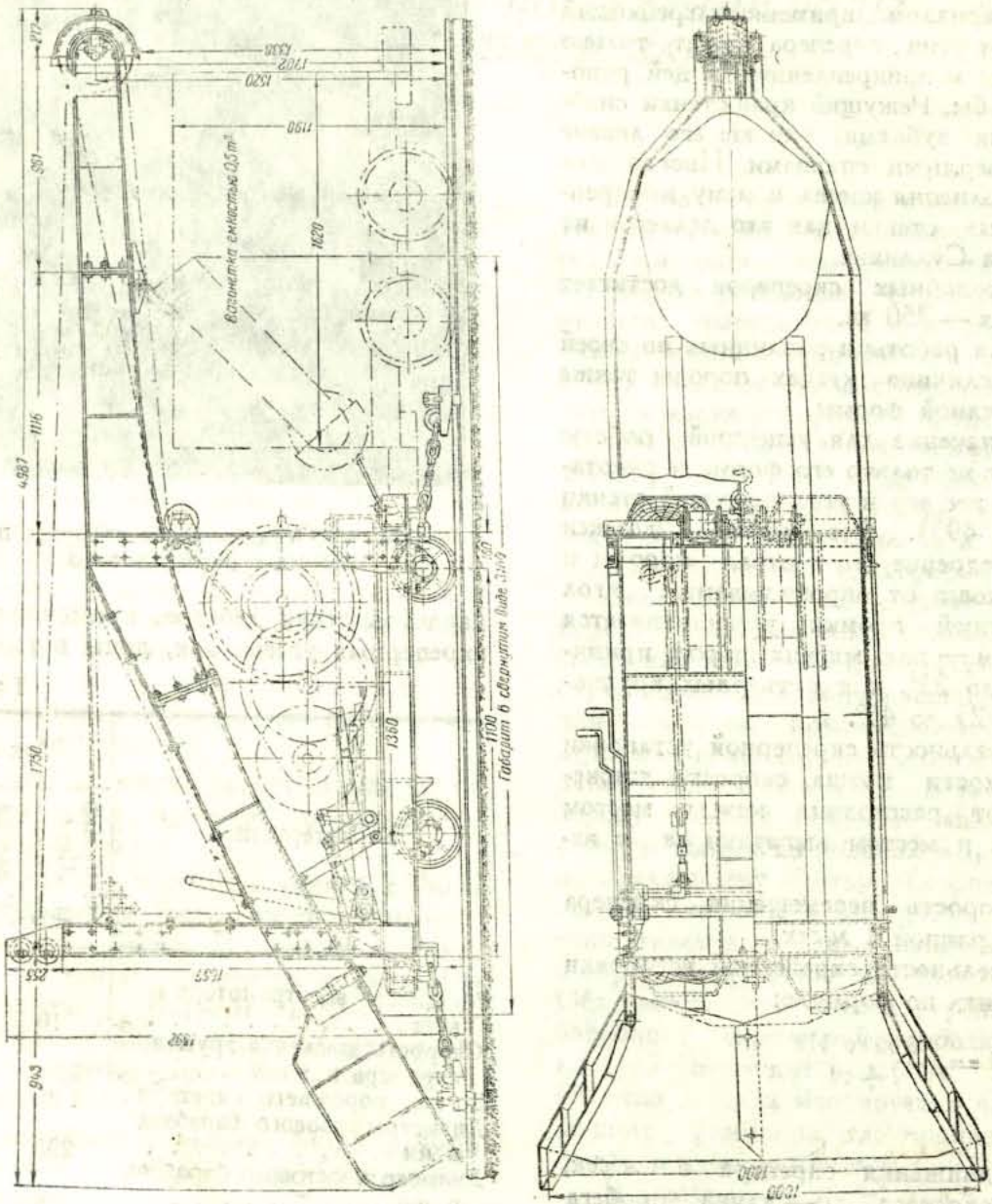


Рис. 492. Скреперный трамплин

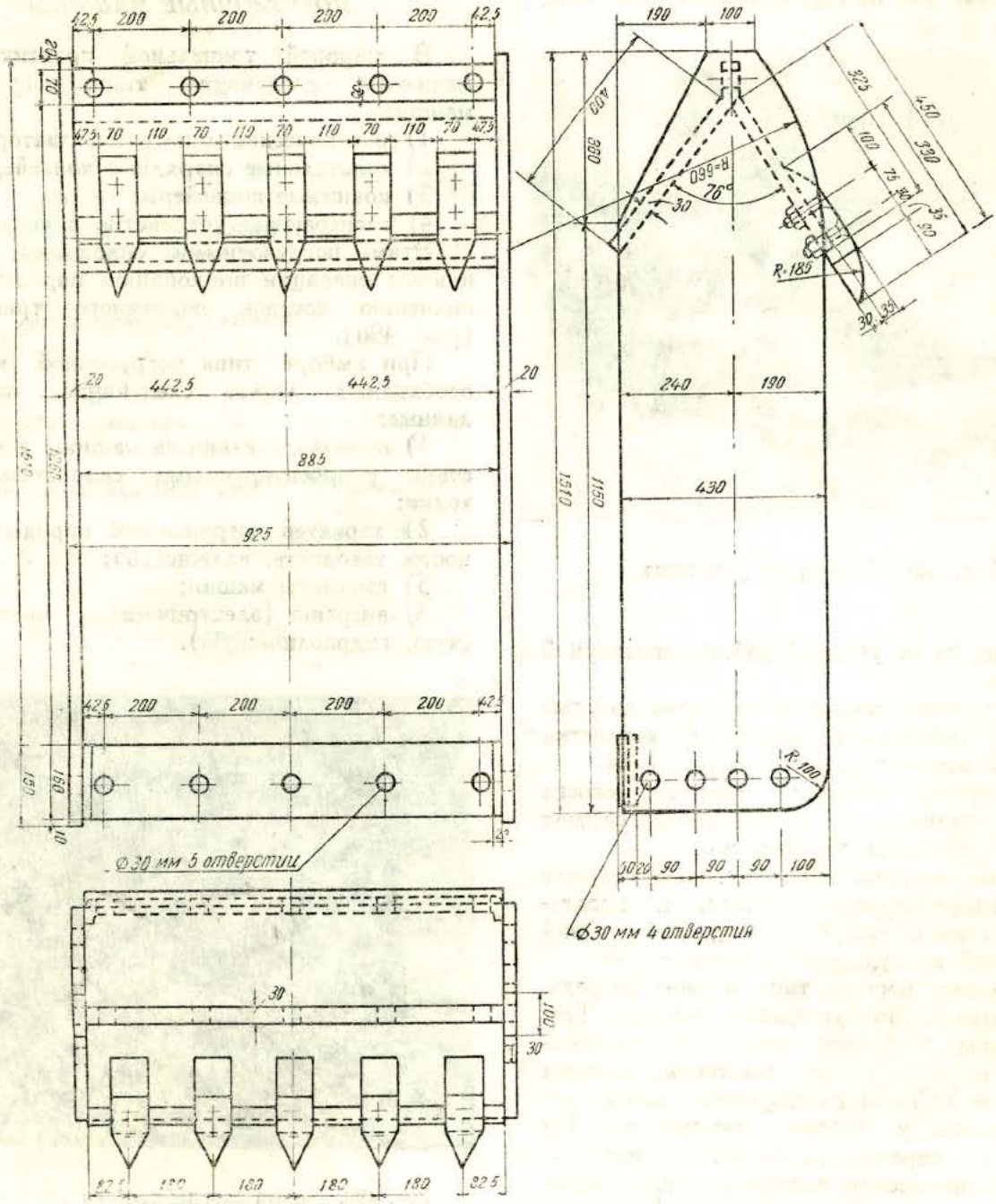


Рис. 493. Скреперный ковш (конструкция)

о породу и изгибаются на барабанах лебедки и роликах. Хвостовой ролик должен быть хорошо закреплен во избежание обрыва. Закрепление ролика осуществляется непосредственно в крепкую породу с помощью распорной колонки или на стреле консольного типа,

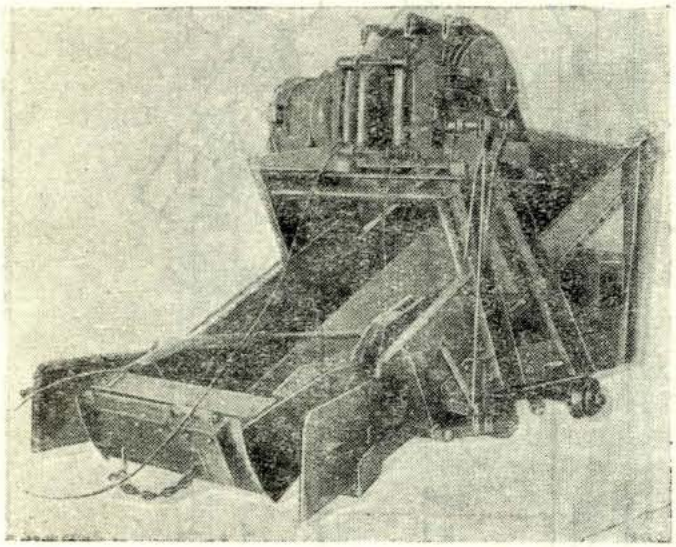


Рис. 494. Скреперная установка

в зависимости от условий работы скреперной установки.

Погрузочные платформы, через которые скреперы выгружают породу в вагонетки подземной откатки, делятся на два типа:

платформы, которые, помимо своего основного назначения, одновременно служат и местом установки лебедки, и

платформы-трамплины, которые служат только направляющим лотком и изготовляются в зависимости от местных условий работы всей погрузочной установки.

Платформы первого типа, в свою очередь, различаются по типу установки лебедки. Так, у скреперных грузчиков типа СГ-10, изготовляемых заводом «Свет шахтера», лебедка УС-10 или УСА-10 размещается внизу, непосредственно у скатов платформы. На платформах скреперных грузчиков, изготовляемых Кыштымским заводом, лебедки помещаются выше жолоба платформы. Недостатком платформы первого типа является неудобство управления лебедкой и плохая видимость забоя из места управления. К недостаткам платформы второго типа относятся их большая высота и незначительная устойчивость.

Скреперная погрузка нашла широкое применение на тоннельном строительстве 1-й, 2-й и 3-й очередей Московского метрополитена (рис. 495).

ПОГРУЗОЧНЫЕ МАШИНЫ

В мировой тоннельной практике применяются следующие типы погрузочных машин:

1) механические лопаты-экскаваторы;
2) копательные снаряды с конвейером;
3) ковшевые конвейеры;
4) загребающее устройство с конвейером.

Этими погрузочными снарядами выполняются операции по копанию породы и наполнению сосудов подземного транспорта (рис. 496).

При выборе типа погрузочной машины необходимо учесть следующие основные данные:

1) производительность машины в соответствии с проектируемыми скоростями проходки;
2) характер погружаемой породы (крупность, твердость, влажность);
3) габариты машин;
4) энергию (электрическую, пневматическую, гидравлическую).

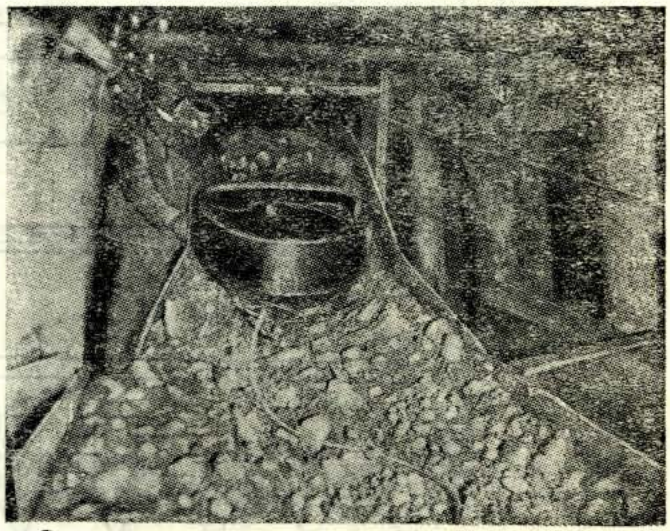


Рис. 495. Работа скреперного ковша в забое

Из огромного количества разнообразнейших видов и систем применяемых погрузочных машин приводим наиболее интересные в технико-производственном отношении типы (табл. 39).

Таблица 39

Система и название машины	Емкость ковша в $м^3$	Производительность $м^3/час$	Габариты в $м$	Мощность мотора в $л.с.$	Примечания
Конвейг (электрический экскаватор)					Число черпаний в минуту — 2 Вес машины в $т$
а) № 20	0,128	39	Длина 5,5—6	20	7
б) № 30	0,17	51	высота 2,7 ширина 2,0	30	10
в) № 50	0,215	63		50	12
г) № 60	0,38	111		60	14
Майерс-Валей (черпак и транспортер, работает электроэнергией и сжатым воздухом)	—	30—50	1,6 × 1,4 2,10 × 2,10 длина 6,6—7,8	20	
Французский штрековый экскаватор	0,35	20	2,80	30	
Бутлер (черпаковый экскаватор)	0,12—0,25	6—10	1,95 × 1,65	Пневматический домкрат	Расход воздуха 4—6 $м^3/мин$
Погрузочная машина типа Джой	Размер загреб. лап 1,58	95	Длина 6,3	На гусеничном ходу	
Машина Кларксона	6 гребков	60	1,2 × 2,0 длина 7,0	60	Вес машины 8,5 $т$
Гудмэн					
Гидравлическая лопата-совок по стреле	1	20	Минимальная высота 1,8	16	—
Погрузочная машина Тью (типа S) (гусеничный ход)	0,4	15	3 × 6	20	Для больших выработок
Механический грузчик типа Эймко-Финлей	0,1	8—10	1,88 × 0,95	20 12 6	Расход воздуха 1,2 $м^3/мин$. Давление 5—6 $ат$. Вес машины 1,7 $т$
Новая модель Эймко-Финлей с хвостовым транспортером	0,2—0,3	16	Длина 7,25 высота 2,00	4 электромотора мощностью 35 $квт$. Вес машины 5,5 $т$	
ПМЛ-4 завода „Коммунист"	0,2	25	1,8 × 2,3	2 × 10	
ПМЛ-3 завода Метростроя	0,2	15	1,8 × 2,3		
Машина Кузнецкого научно-исследовательского угольного института (КНИУИ)		35	2,0 × 2,0	35	

Погрузочная машина типа Конвейг смонтирована на специальной тележке, движущейся от электромотора по рельсам. На основной раме машины установлены транспортер и рычаг с ковшом.

Для зачерпывания породы ковш в нижнем своем положении внедряется в отвал породы движением всего механизма. После этого ковш приподнимается вместе со своей хвостовой частью, и порода равномерно ссы-

пается по жолобу на транспортер машины (рис. 497).

Рычаг с ковшом имеет возможность поворачиваться в горизонтальной плоскости на угол до 100°. Машина работает с помощью электрической энергии. Производительность машины, как видно из таблицы, достигает 111 *м*³/*час*.

Машина типа Конвейг имеет применение при проходке в твердых породах. Во время взрывных работ машина должна быть отведена от забоя во избежание завала породой и поломки отдельных частей.

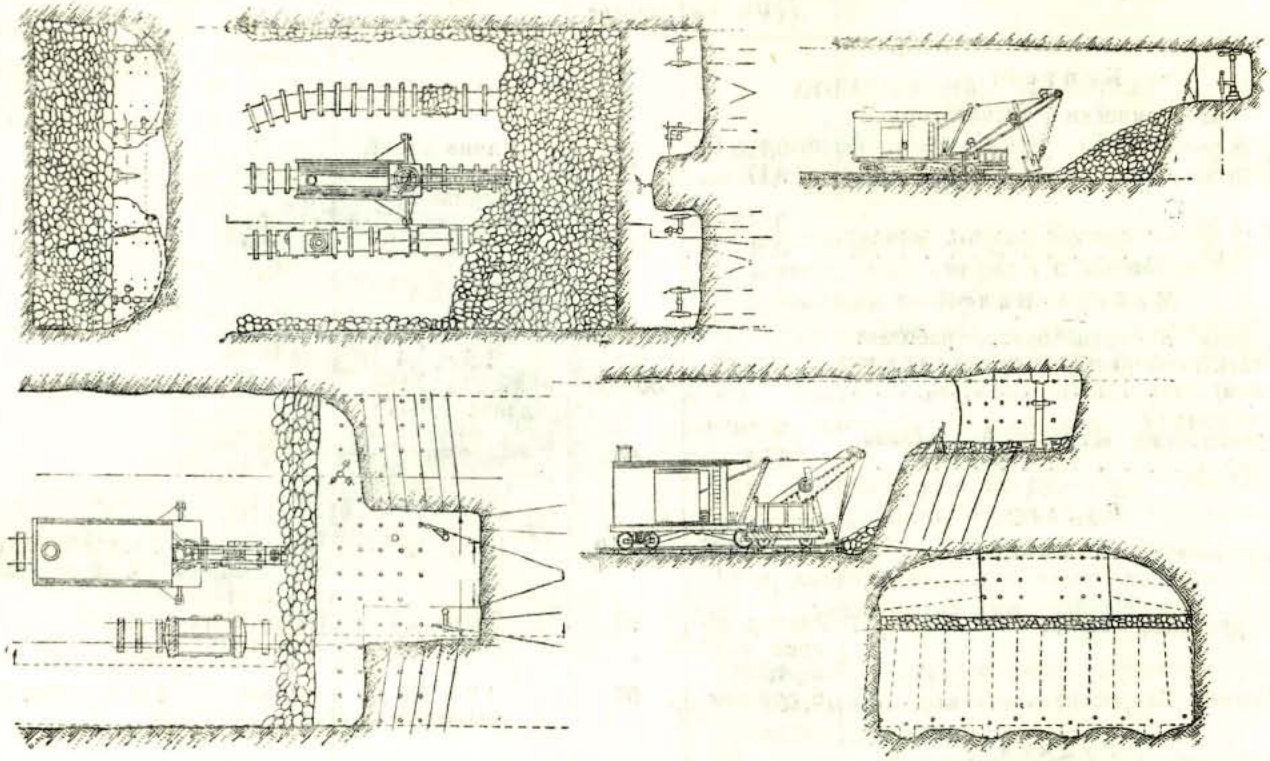


Рис. 496. Тоннельный экскаватор в тоннельном забое при взрывных работах

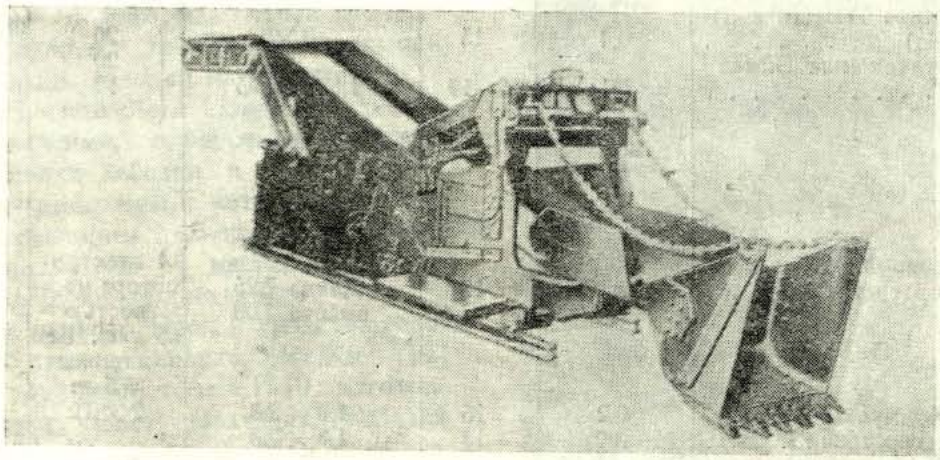


Рис. 497. Погрузочная машина системы Конвейг

Погрузочная машина, созданная Кузнецким научно-исследовательским угольным институтом (КНИУИ), работает по принципу экска-

ватора. Забирая породу ковшом, имеющим возвратно-поступательное движение, машина передает породу на транспортер. Погрузочная машина КНИУИ имеет производительность до 37 *м*³/*час*. Основное преимущество этой машины заключается в ее возможности грузить взорванную в забое породу при размерах кусков до 40—50 *см*.

Машина системы Майерс-Валей также смонтирована на платформе, движущейся по рельсам. На раме машины установлены два транспортера и механизм для забора породы с плоским совком. Для внедрения совка в породу не требуется перемещать весь агрегат, так как механизм ковша по своей кинематической схеме имеет свободное поступательное движение. После забора породы совок приподнимается и ссыпает грунт на транспортеры (рис. 498, 499). Машина работает при помощи электрической энергии и сжатого воздуха. Производительность ее от 30 до 50 *м*³/*час*.

Погрузочные машины типов Майерс-Валей и Конвейг по своей производительности наиболее подходят к применению на тоннельных работах. Габариты по высоте и ширине также не препятствуют этому, но длинная жесткая база затрудняет прохождение этих машин по кривым участкам путей с малыми радиусами. В условиях щитовой проходки большая длина машины также усложняет ее размещение в пределах щита, мешая эректору. Однако при наличии передовой штольни эти погрузочные машины могут работать эффективно при щитовой проходке тоннелей. Недостатком этих машин является также быстрое загрязнение транспортеров при работе по выдаче влажных глин. Но все же погрузочная машина системы Майерс-Валей, как имеющая ограниченно малые габариты по высоте и ширине, весьма приемлема для тоннельных работ.

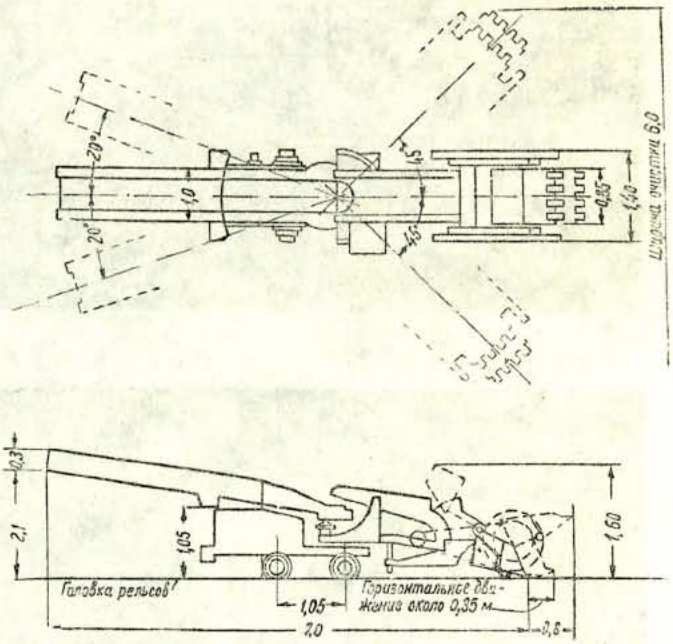


Рис. 498. Схемы погрузочной машины системы Майерс-Валей

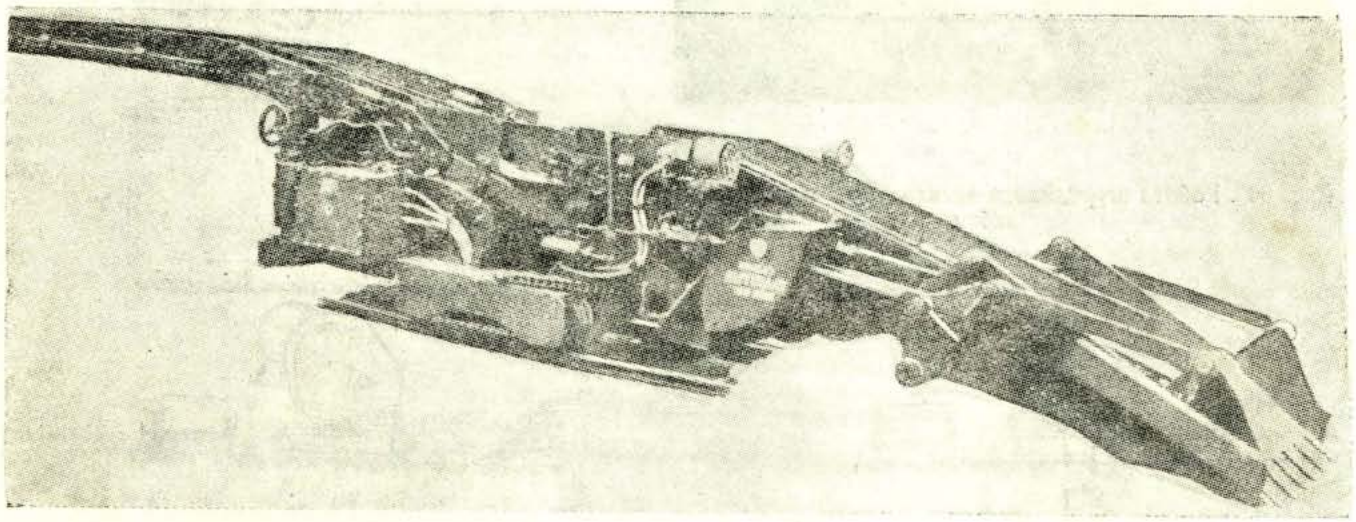
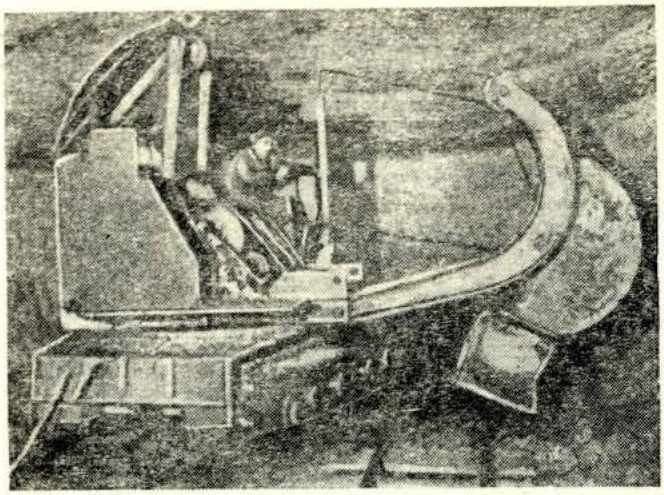
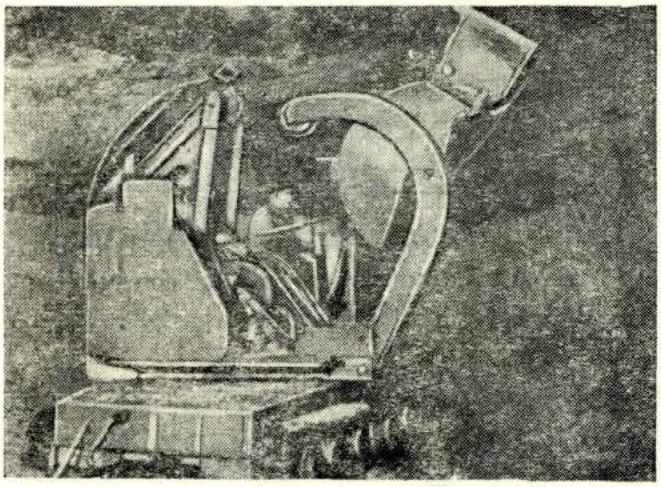
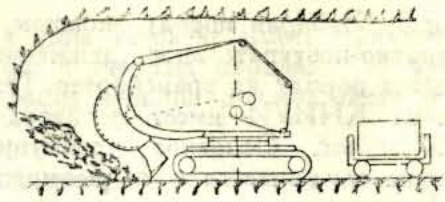
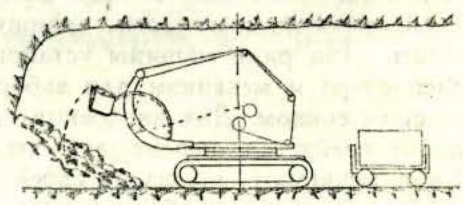


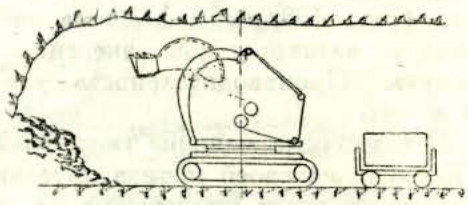
Рис. 499. Погрузочная машина системы Майерс-Валей






III


IV


V

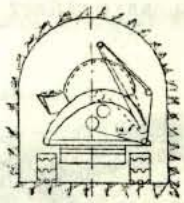
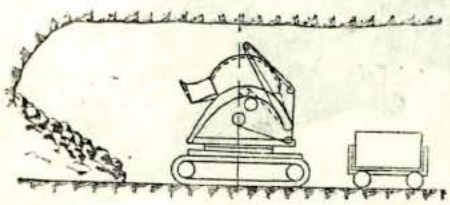
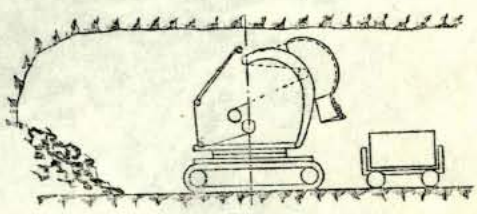
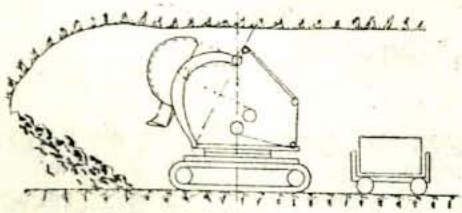
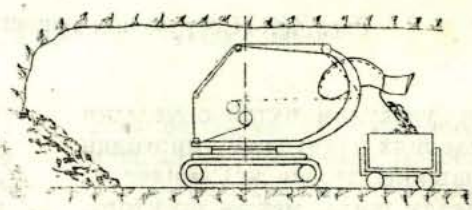

VI

Рис. 500. Работа штрекового экскаватора в тоннельном забое


I


VII


II


VIII


IX

Рис. 501. Фазы работы штрекового экскаватора

Погрузочная машина типа *штрековый экскаватор* представляет собой экскаватор малых размеров с изогнутой стрелой и ковшом, который вращается на хвостовой ча-

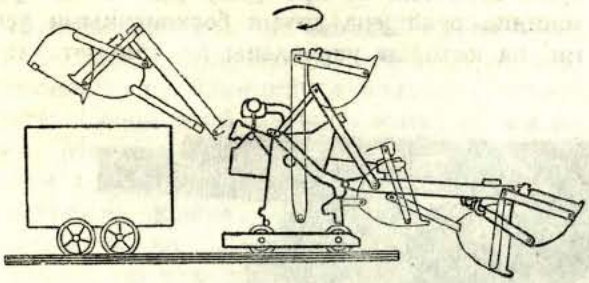


Рис. 502. Схема погрузочной машины системы Бутлера

сти секторного вида. Эта машина появилась на строительстве тоннелей метрополитена Парижа. Кинематика этого механизма позволила сделать его с малыми габаритами, а это дало возможность механизировать процесс погрузки в выработках малого сечения (рис. 500, 501). По мощности своих механизмов экскаватор способен разрабатывать мягкие грунты (вплоть до слабых известняков).

* * *

Погрузочная машина системы Бутлера работает как одночерпаковый экскаватор. Перемещается машина как по рельсовому пути, так и на гусеницах. Главными частями ее являются основная рама с ходовыми частями, механизм для работы заборной части с ковшом. Энергией для машины служит сжатый воздух. Механизм имеет очень сложную кинематическую схему, но весьма компактен, вписывается в габарит сечения выработки 2×2 *м*, позволяет производить работу в тон-

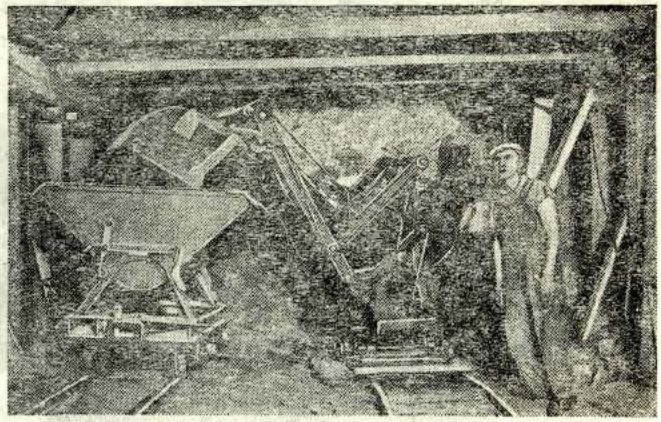


Рис. 503. Погрузочная машина системы Бутлера

нелях с уклоном до 15° (рис. 502, 503). Вследствие своих малых размеров и емкости ковша в 0,12 $м^3$ производительность машины составляет лишь 6—8 $м^3/час$.

Применение машин такого типа возможно и в тоннелях большого сечения, но с установкой одновременно нескольких машин. Это, конечно, затруднит работу в забое, но все же

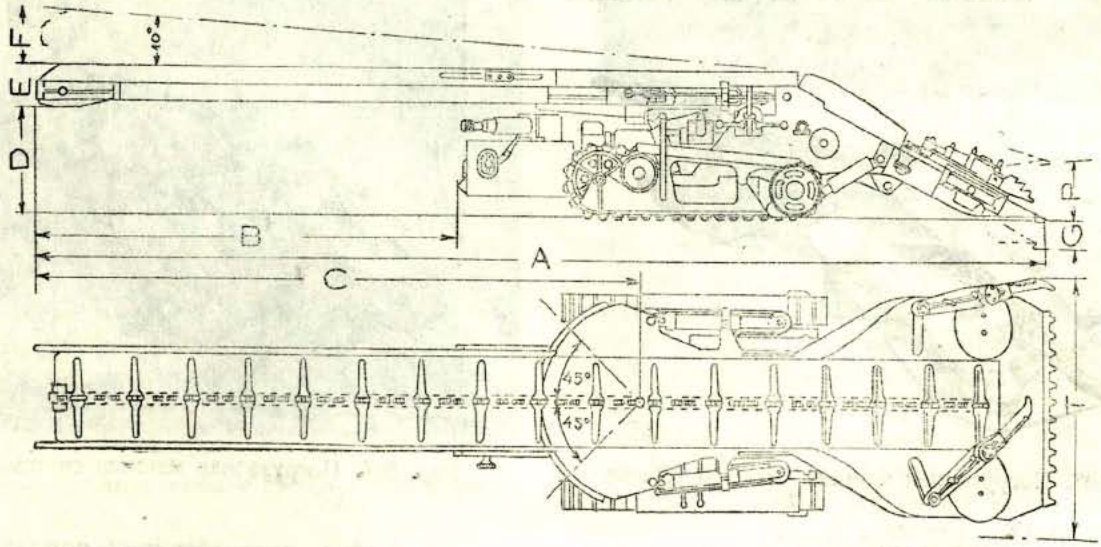


Рис. 504. Схема погрузочной машины типа Джой

при правильной организации работ даст возможность механизировать погрузку. Недостатком машины является довольно значительный расход сжатого воздуха, до 4—6 $м^3/мин$.

* * *

Погрузочная машина типа Джой сконструирована на принципе загребающего действия питающего аппарата, входящего в отвал породы. Машина имеет гусеничный ход. Процесс погрузки породы в забое происходит при помощи загребающих лап, подающих породу по пластинчатому транспортеру на подземный транспорт. Длина машин типа Джой 6,3 *м*. Размер загребающих лап 1,58 *м*. Производительность машины до 95 *м*^{3}/*час*. Машина Джой (рис. 504, 505) с большим успехом работает на сухих скальных породах, но непригодна в условиях липких, размягших глинистых пород, где с большим эффектом применимы машины, работающие по принципу экскавации. Это доказано при испытании машины на тоннельных работах (шахта № 55) 2-й очереди строительства Московского метрополитена.

Погрузочная машина системы Кларксон основывается на работе аппарата загребающего действия по принципу Джоя. Впереди машина оснащена двумя бесконечными цепями, на которых укреплены по три металлических гребка, подгребающих породу забоя на конвейер. Габаритные размеры машины 1,2×2 *м*, по длине в 7 *м*, производительность до 60 *м*^{3}/*час*. Мощность мотора 60 *л. с.*

Машина системы Юмеко имеет шесть гребков, насаженных на бесконечные цепи по типу машины Кларксона.

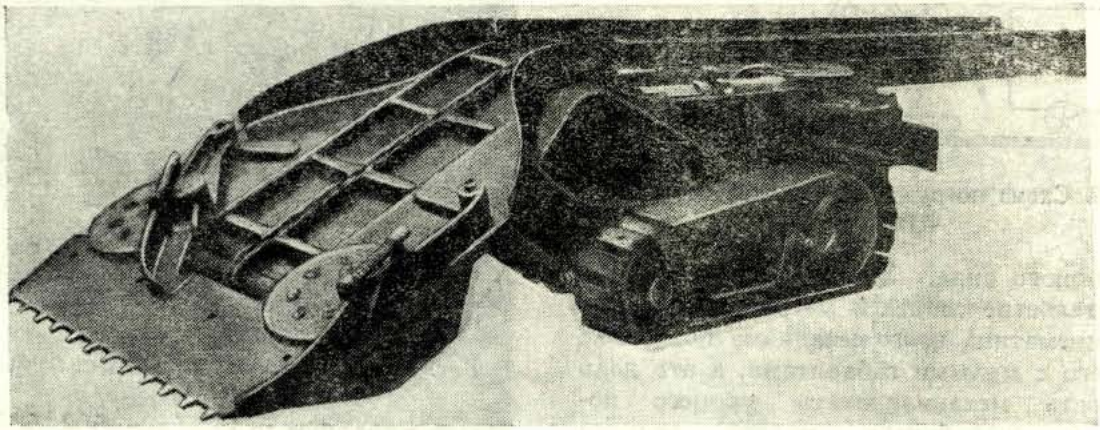


Рис. 505. Погрузочная машина типа Джой

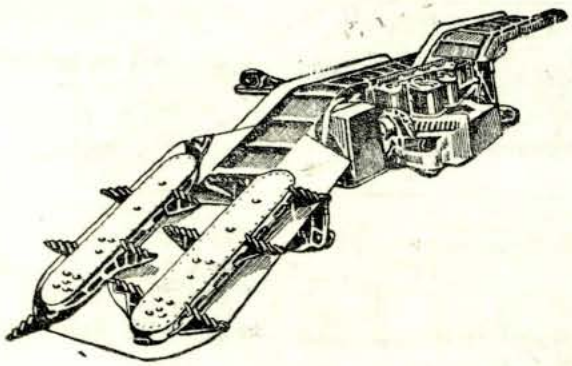


Рис. 506. Погрузочная машина системы Юмеко

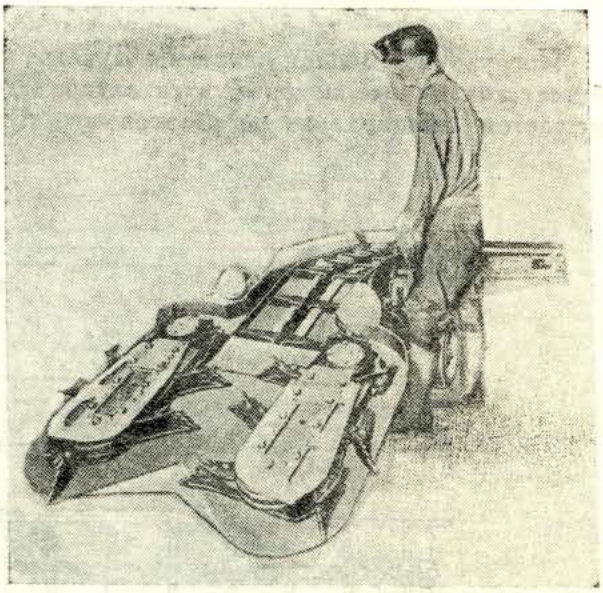


Рис. 507. Погрузочная машина системы Юмеко

На принципе размещения целой серии гребков разной конфигурации бесконечной цепи основаны конструкции погрузочных машин Джеффри и Колодера (рис. 506, 507, 508).

Погрузочная машина завода Гудмен представляет собой электрогидравлическую лопату, работающую по принципу движения обычной лопаты. Совок этой машины имеет объем до 1 $м^3$. Машина состоит из тележки на гусеничном ходу и верхней вращающейся части со стрелой ковша. Электрический мотор в 12 kW служит для поворота вокруг вертикальной оси и для работы гусеничного хода. Мотор питается электрической энергией через бронированный кабель (рис. 509, 510).

Все движения ковша по забору и выгрузке породы осуществляются с помощью гидравлического насоса, работающего от основного мотора. Для устойчивости машины при работе она раскрепляется в выработке вертикальным гидравлическим домкратом, установленным в центре вращающейся платформы.

Стрела ковша имеет три степени движения: поступательное, качательное в вертикальной плоскости и вращательное в горизонтальной плоскости. Забор породы происходит

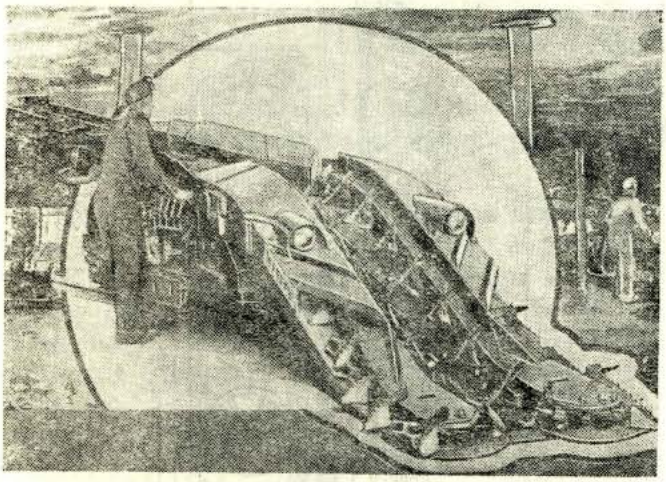


Рис. 508. Погрузочная машина системы Джеффри

путем вдавливания совка в отвал, как обычной лопаты. Ссыпание породы производится выталкиванием ее из совка путем выдвижения задней стенки совка. Это обеспечивает хорошую очистку ковша и делает возможной работу машины даже в липких, глинистых породах.

При работе стрелы ковша эта машина требует больших габаритов, а потому может быть применена только в выработках боль-

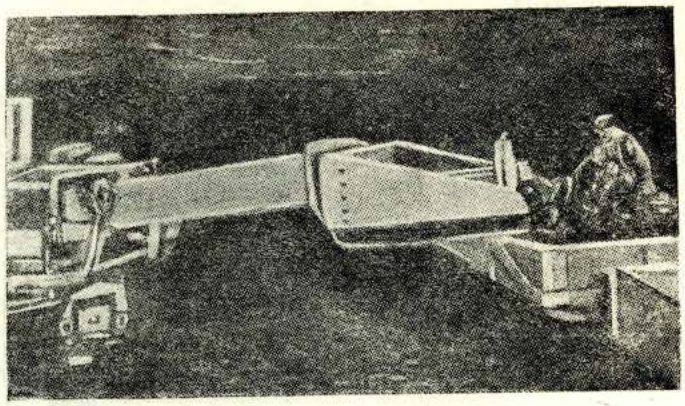


Рис. 509. Лопата-совок типа Гудмен

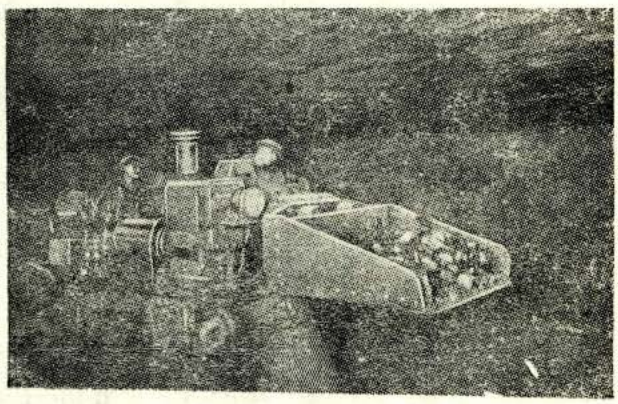


Рис. 510. Лопата-совок типа Гудмен

шого сечения, не стесненных другими механизмами, например в тоннелях, проходимых горным способом в твердых породах без крепления или с полигональным креплением.

Производительность машины достигает 20 $м^3/час$.

Погрузочная машина Тью типа *S* или Сью-Лорен представляет собой экскаватор, приспособленный для работ в тоннеле. Машина состоит из трех частей: а) тележки на гусеничном ходу, б) поворотной платформы на ней и в) стрелы с ковшом. Машина имеет три мотора, которые установлены на поворотной платформе. Один из них, мощностью 20 *л. с.*, служит для перемещения тележки и напорного движения с целью внедрения в отвал черпающего органа машины (рис. 511,

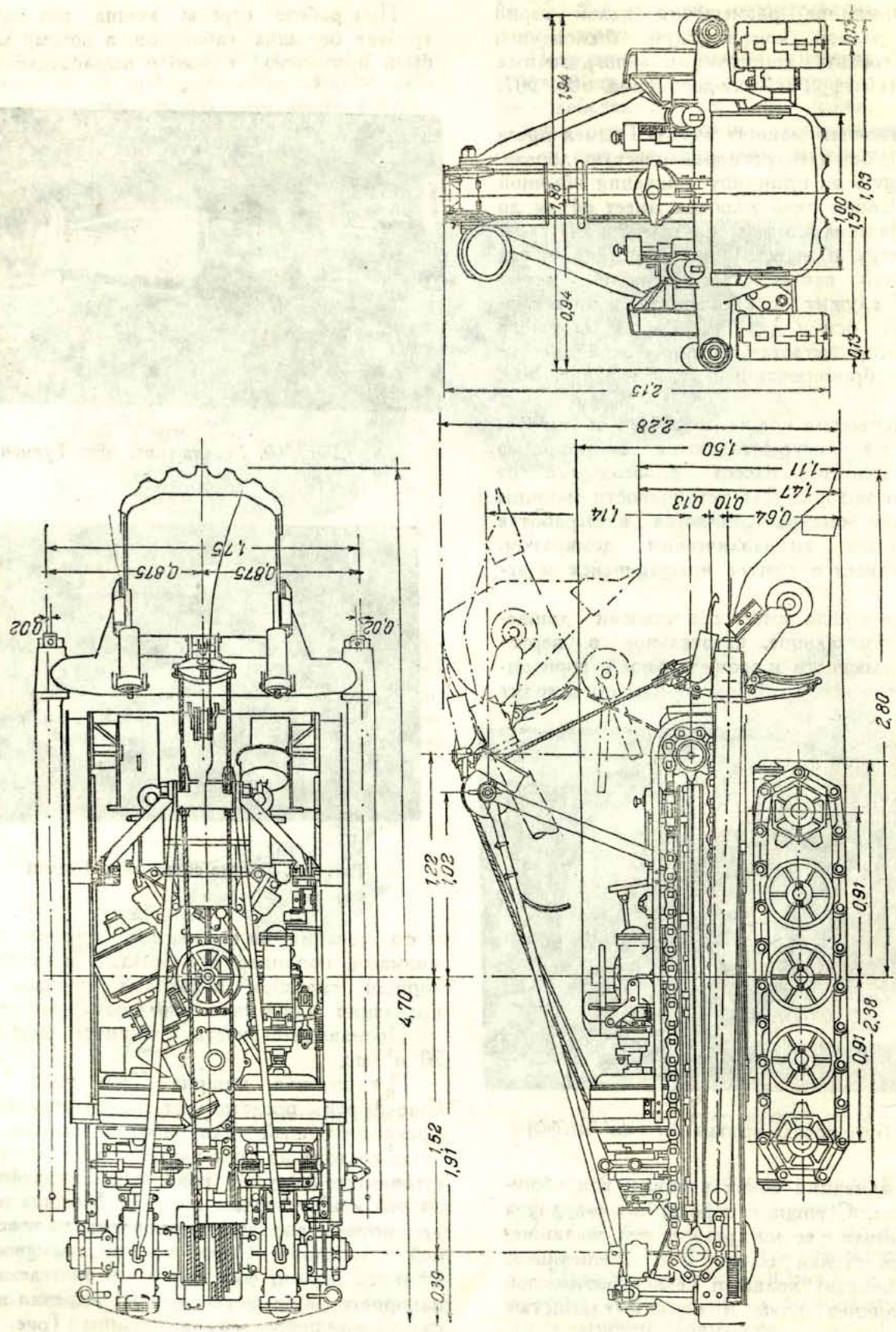


Рис. 511. Схема погрузочной машины Тью (Сью-Лорен)

512). Другой, тоже в 20 *л. с.*, служит для подъемных движений, третий — в 12 *л. с.* — для поворота платформы.

Ковш машины емкостью в 0,4 $м^3$ получает при работе силу напора в отвал породы в 12 *т* и перемещается при заборе породы со скоростью 15 *м* в минуту.

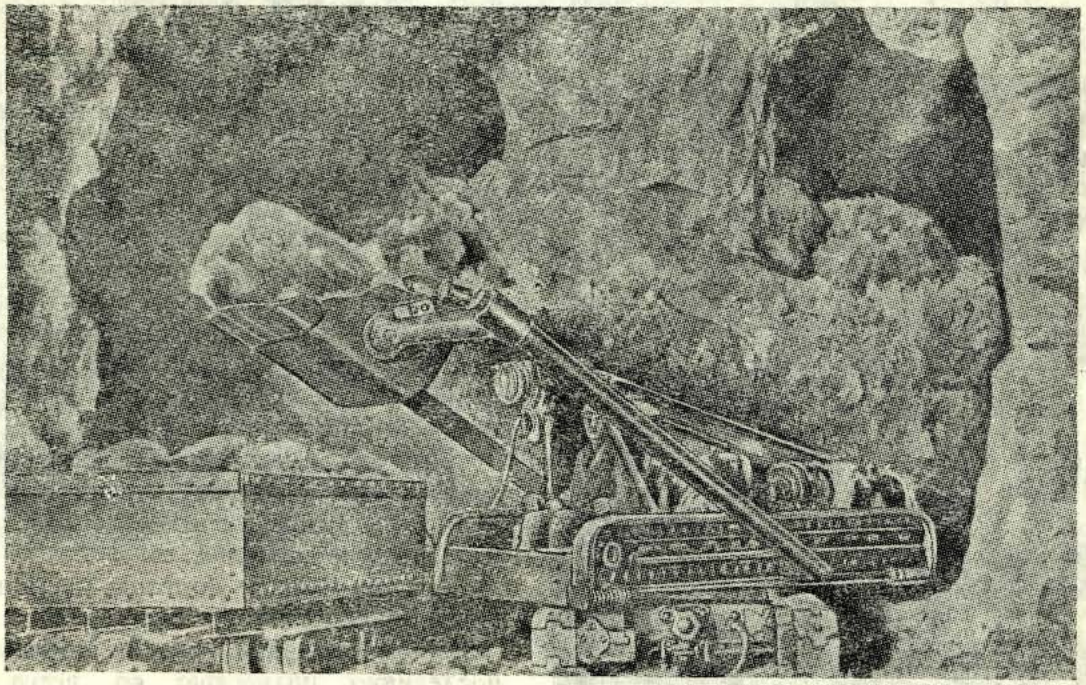


Рис. 512. Погрузочная машина Тью (Сью-Лорен)

После набора породы ковш с помощью стрелы и канатов устанавливается над вагонеткой и опрокидывается машинистом в вагонетку. Производительность лопаты машины Тью около 15 $м^3/час$. Применяется она при проходке тоннелей на полный профиль в твердых породах, где нет креплений, загромождающих выработку.

Погрузочная машина типа Эймко-Финлей (серийного выпуска) представляет собой пневматическую лопату, установленную на тележке, к которой прикреплены скаты, вращающиеся на роликовых подшипниках. Кузов тележки вращается в горизонтальной плоскости, и в нем размещены рабочие механизмы, которые приводят в движение тележку и ковш машины (рис. 513).

Эта машина работает с помощью сжатого воздуха давлением в 5—6 *ат*. Емкость ковша этой машины 0,1 $м^3$, а производительность составляет около 8 $м^3/час$ (рис. 514).

Преимущество машины типа Эймко заключается в ее незначительных габаритах

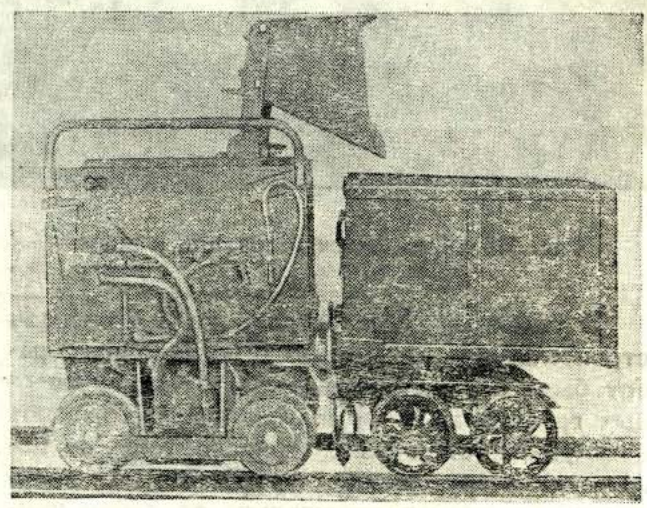


Рис. 513. Погрузочная машина типа Эймко-Финлей

(1,88×0,95 *м*), в весе (1 700 *кг*), что дает возможность при ее применении механизировать погрузочные работы в забое при весьма стесненных условиях разработок (рис. 515).

Аналогичного типа погрузочные машины— ПМЛ-3 — выпускаются заводом «Коммунист» и механическим заводом Метростроя. Этот тип машин с успехом применяется на ряде шахт при проходке штолен 4-й очереди строительства Московского метрополитена.

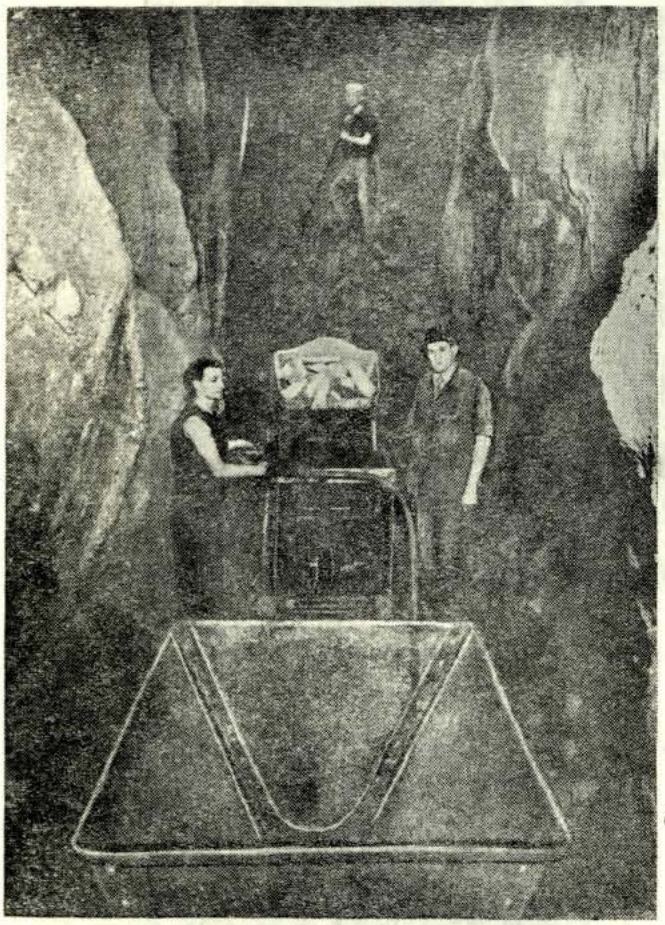


Рис. 514. Механический грузчик в забое

В условиях Метростроя на 2-й очереди строительства механизация погрузочных работ была осуществлена при помощи скреперных грузчиков, которые не полностью решают задачу. Металлические транспортеры не являются погрузочным средством, а лишь инертным транспортирующим от забоя приспособлением. Требуется создать новый тип погрузочной машины, которая удовлетворяла бы специфическим особенностям горной и щитовой проходки и тяжелым геологическим условиям. По этому вопросу уже развернута проектно-творческая работа наших инженеров и рабочих.

Достаточно указать, что в Америке над совершенствованием погрузочной машины Майерс-Валей работали в течение тридцати лет. В наших условиях стахановского, творческого труда мы можем, используя передовую технику, достигнуть еще больших успехов. При этом необходимо учесть приведенные ниже технические требования, предъявляемые к машинам для погрузки породы в тоннельном забое в производственных условиях Метростроя.

Требования, предъявляемые к машине для погрузки породы в тоннельном забое:

1. Машина должна грузить и выдавать за пределы забоя, на подземный транспорт, породы следующих категорий: куски известняков (до 40 *см* в диаметре) после производства взрывных работ; карбонные и юрские глины, находящиеся частично в разжиженном состоянии.

При этих условиях не должно происходить застревание крупных кусков известняка и налипание глины, мешающие работе машины и влияющие на износ ее.

2. Погрузочные органы машины должны быть приспособлены к профилю и к геометрическим размерам отвала породы, забирая последнюю полностью со всего рабочего участка забоя.

Забор породы производится в поступательном направлении по оси тоннеля от 0 до 1,5 *м* и с поворотом на угол 130° для забора породы с боков. При этом желательно, чтобы корпус самой машины оставался неподвижным.

Забор породы машиной производится до отметки подошвы выработки по проектному контуру, при радиусах кривизны в 6 и 9,5 *м*.

3. Производительность машины должна обеспечить погрузку в среднем до 50 $м^3$/*час*.

Машина должна допускать возможность постановки под одновременную погрузку четырех вагонеток типа Горный Коппель емкостью до 0,75 $м^3$ или выдачу породы непосредственно на конвейер.

Машину необходимо оснастить устройствами против просыпания породы при движении, а равно и в момент загрузки.

4. Машина должна иметь габариты, позволяющие разместить ее для работы в ячейке щита размерами 1,8 × 1,8 *м* с возможностью иметь проход для осмотра и ремонта. Корпус машины не должен выходить за пределы ножевого кольца щита. Машина должна

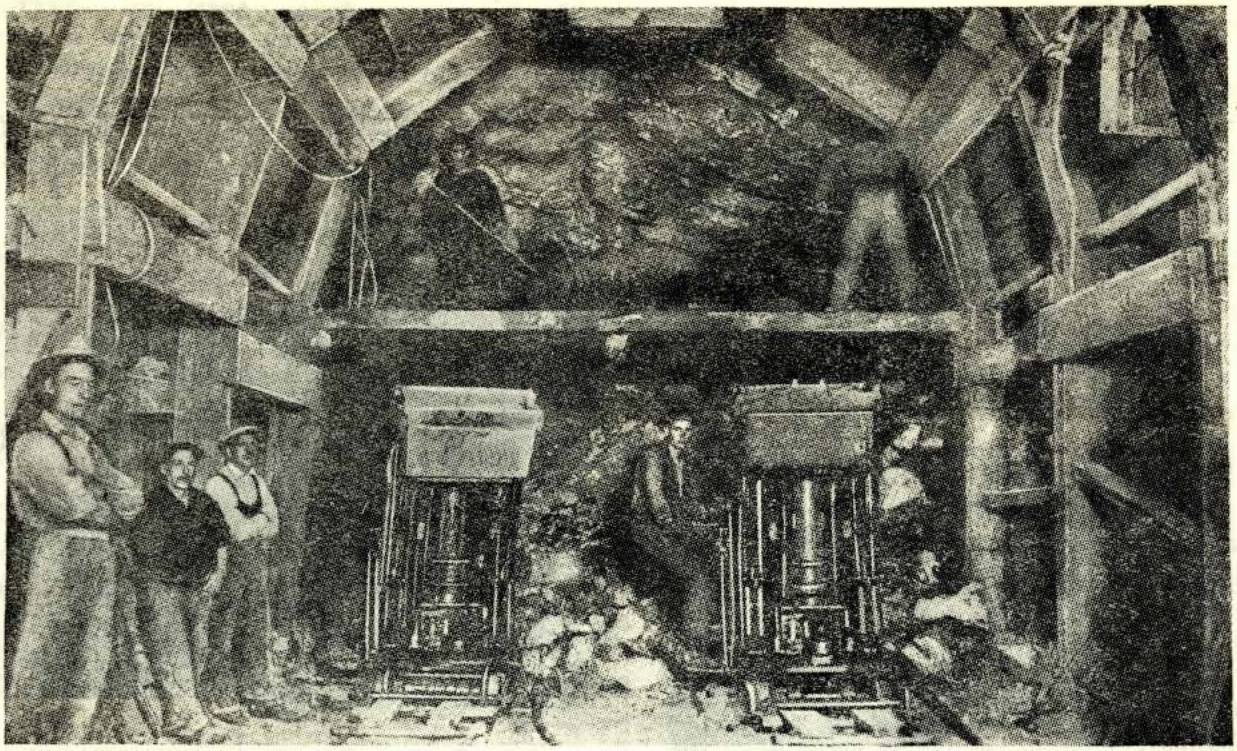


Рис. 515. Работа двух погрузочных машин в тоннельном забое, разрабатываемом на полный профиль

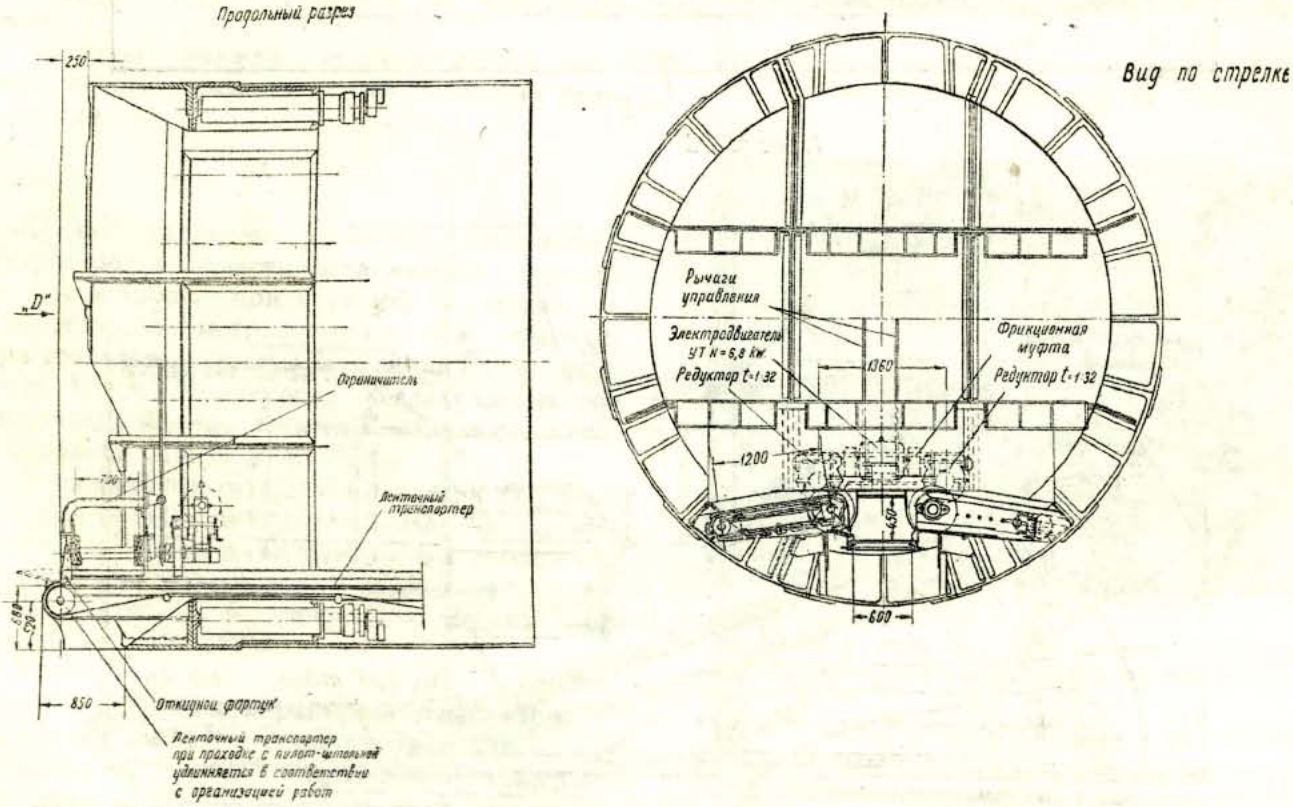
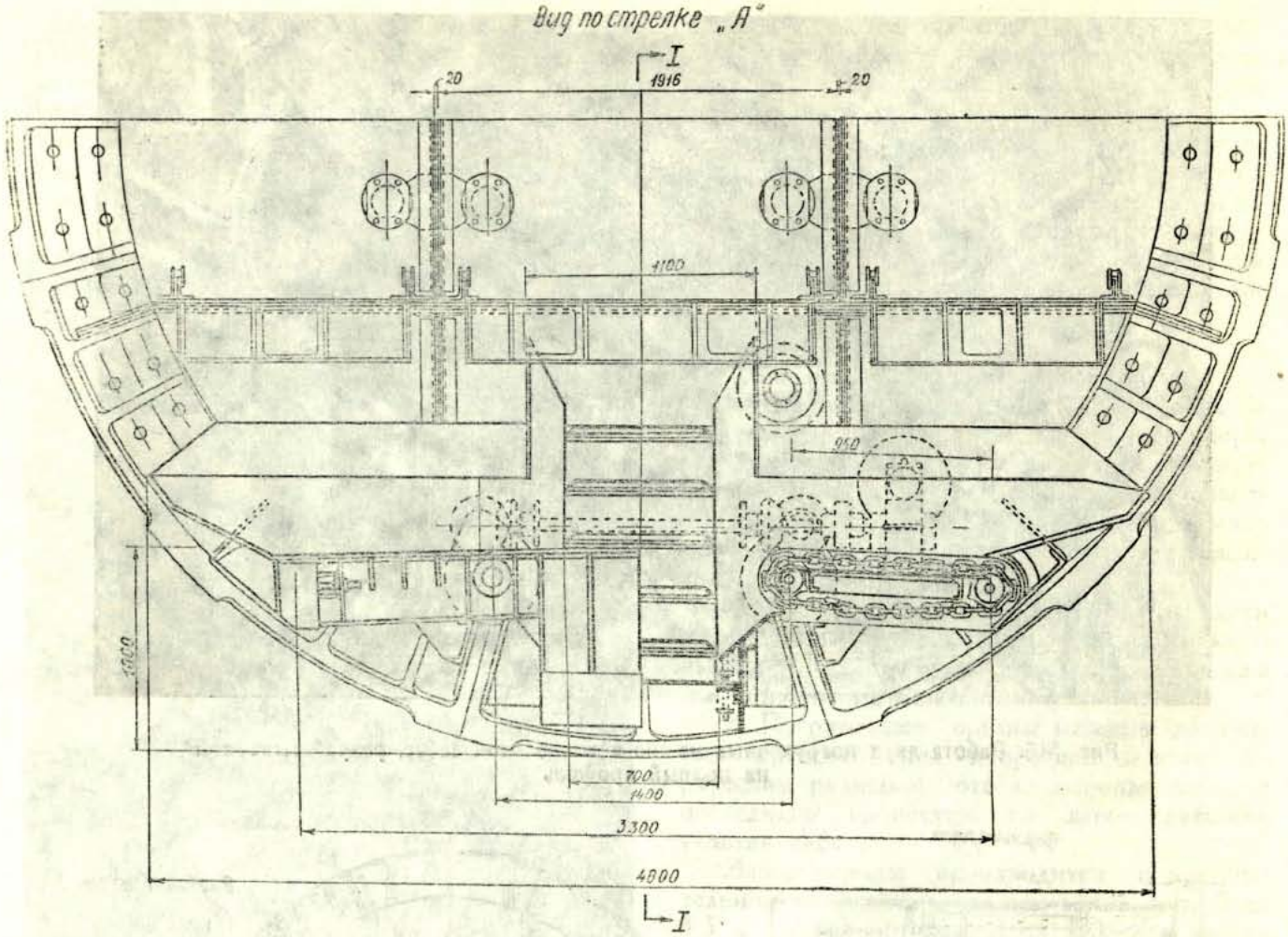


Рис. 516. Размещение погрузочного агрегата системы инж. М. А. Самодурова в перегонном щите (поперечные грузчики)



Разрез по I-I

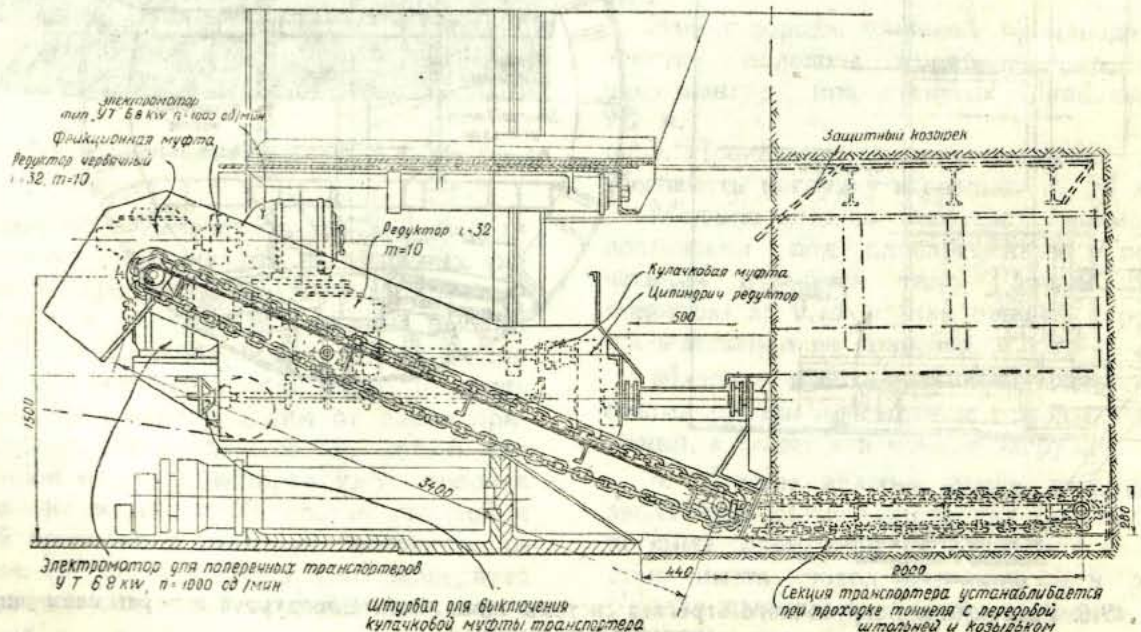


Рис. 517. Схема погрузочного агрегата системы инж. М. А. Самодурова в перегонном щите (поперечные грузчики)

допускать по мере надобности быструю уборку и вторичную установку ее.

5. Механизмы машины и моторы должны быть защищены от механических повреждений при производстве взрывных работ и не расстраиваться при сотрясении.

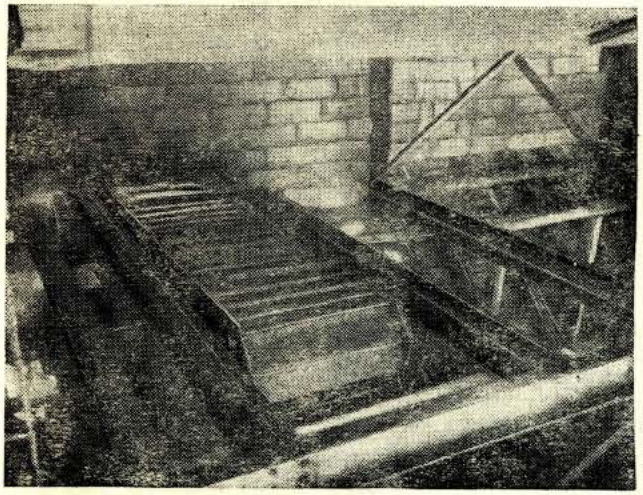


Рис. 518. Поперечный скребковый грузчик в монтаже

Механизмы и моторы машины следует защитить от попадания на них воды, песка.

Машина должна соответствовать всем требованиям, предъявляемым техникой безопасности.

* * *

Особо надлежит отметить достижения Метростроя в области механизации погрузки породы в забое, при щитовой проходке, на строительстве метрополитена 3-й очереди. При сооружении тоннелей станции Бауманская (инж. М. А. Самодуров) была создана погрузочная система, давшая возможность механизировать погрузку до 85%.

В нижней части щита в пределах аванбека был расположен механизм в виде двух поперечных скребковых металлических питателей, под которые центрально подходил металлический пластинчатый транспортер по оси тоннеля (рис. 516, 517).

Разработанная в забое порода улавливалась поперечными питателями (размещенными под углом 10° к горизонту) и подавалась к центру на средний пластинчатый транспортер, далее в бункер и в вагонетки внутритоннельного транспорта. При этом после выпала происходила непрерывная выдача породы из забоя.

Питатели — мощной конструкции из калиброванных корабельных цепей, на которых укреплены металлические скребки (рис. 518). Длина секции питателя между звездочками равна 2660 *м*. Мощность электродвигателя 11,8 *квт*. Скорость движения цепи равна 0,08 *м/сек*. Производительность погрузочного механизма составляла до 80 $м^3$/*час* породы.

Смонтированные на станционных щитах погрузочные скребковые питатели в сочетании с выдающим центральным транспортером показали положительные результаты, доведя процент механизированной погрузки до 85.

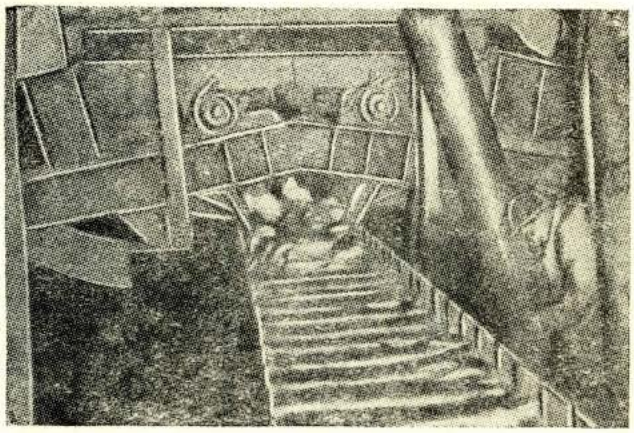


Рис 520. Организация выдачи породы в станционном тоннеле при поперечных грузчиках

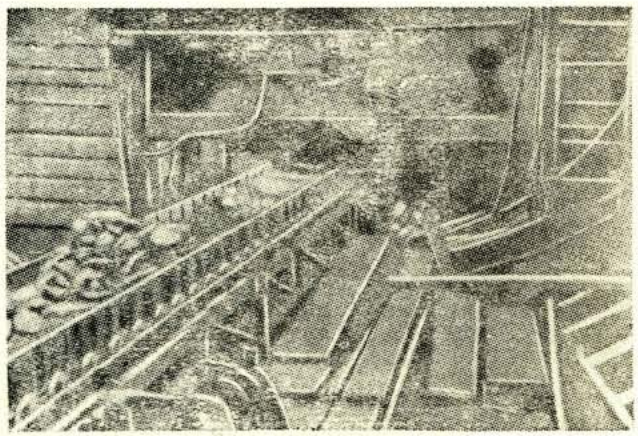


Рис. 521. Организация выдачи породы в станционном тоннеле при поперечных грузчиках

В дальнейшем удачный опыт механизированной погрузки шахты № 3—4 Метростроя

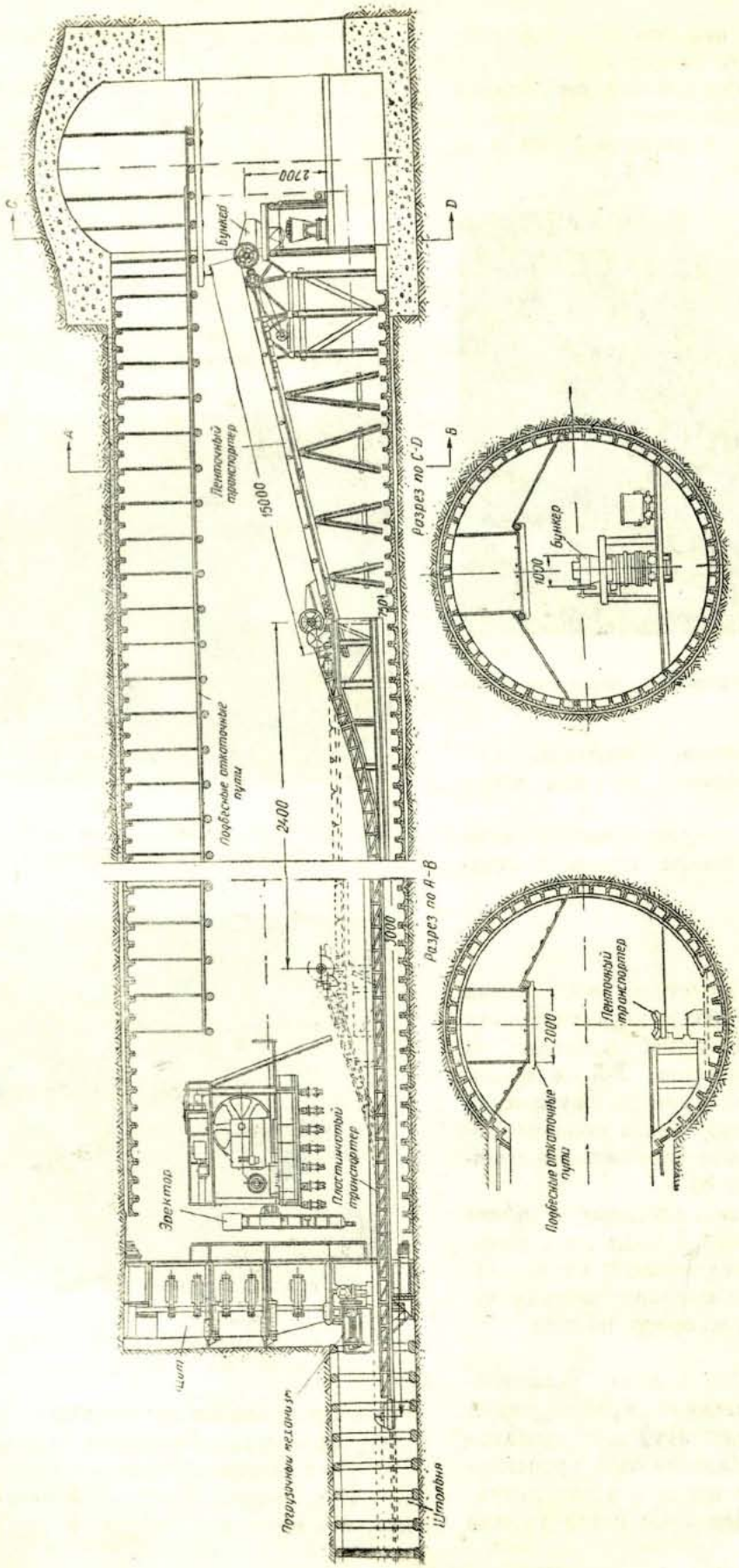


Рис. 519. Организация выдачи породы при щитовой проходке станционного тоннеля с применением поперечных грузчиков (продольный разрез)

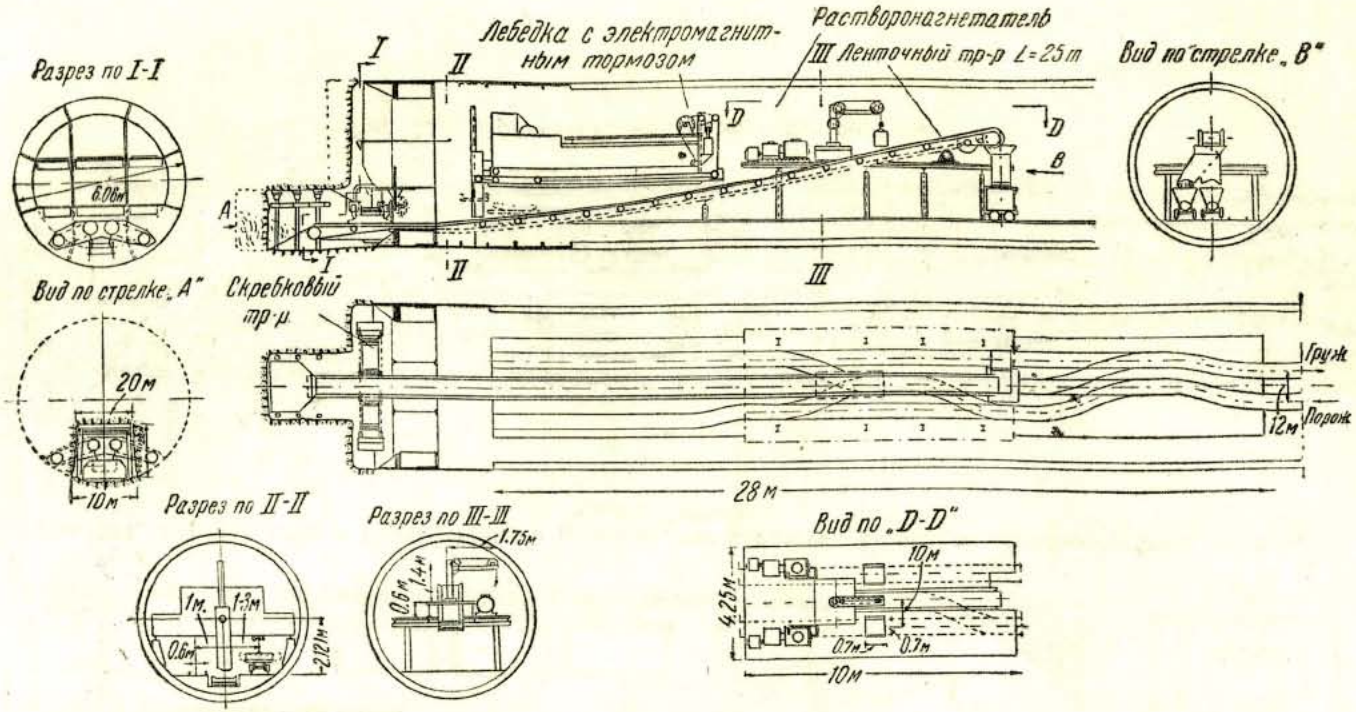


Рис. 522. Организация выдачи породы в перегонном тоннеле при поперечных грузчиках

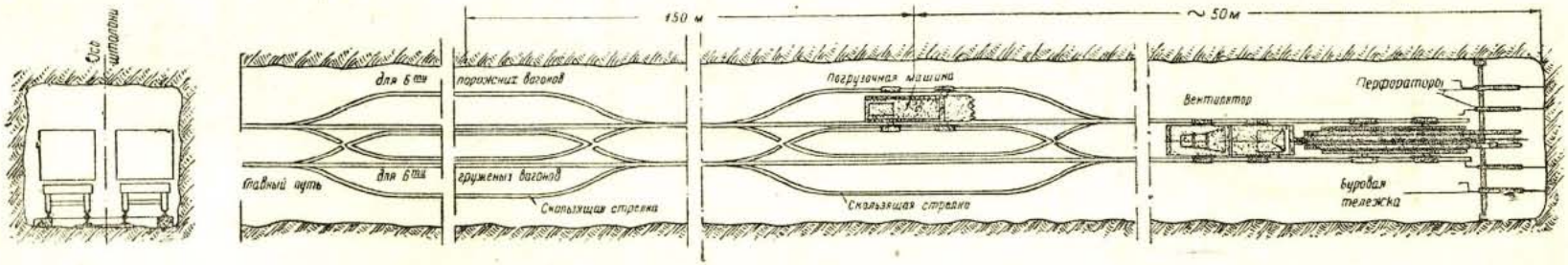


Рис. 523. Скользящая стрелка при погрузке породы

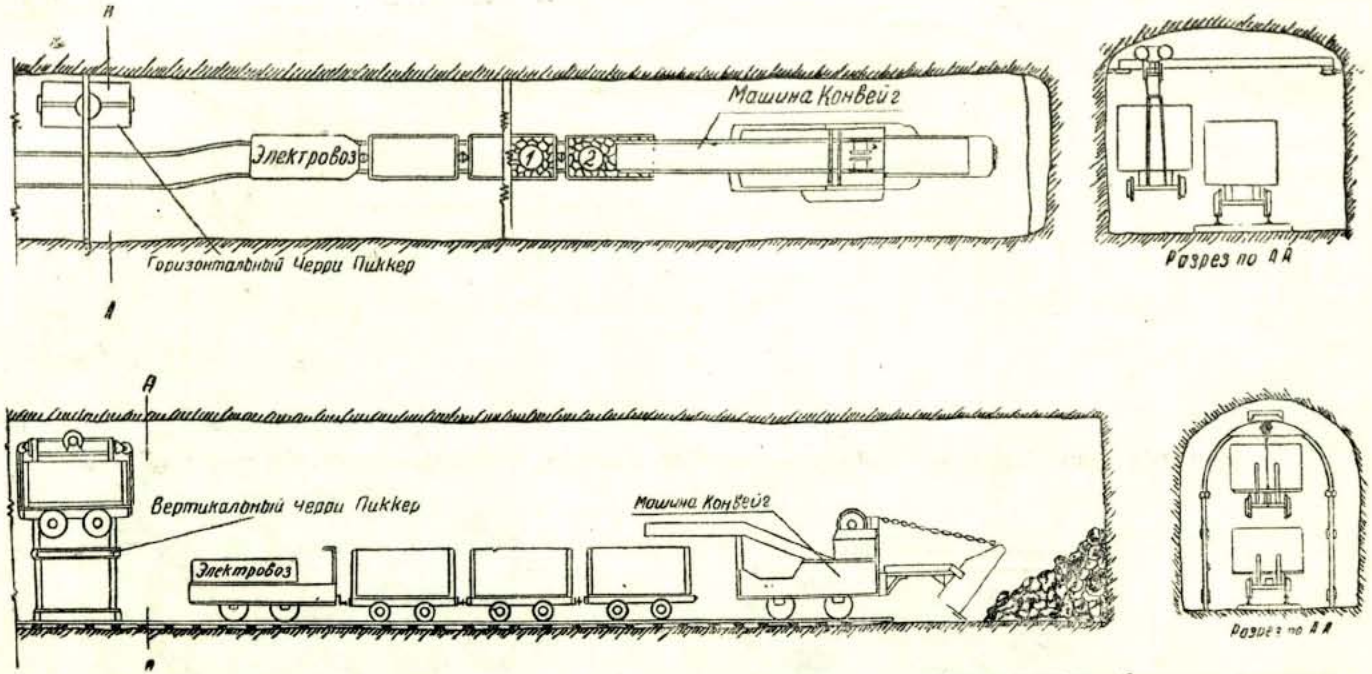


Рис. 524. Вертикальное и горизонтальное перемещение вагонетки в тоннеле приспособлением системы Черри-Пиккер

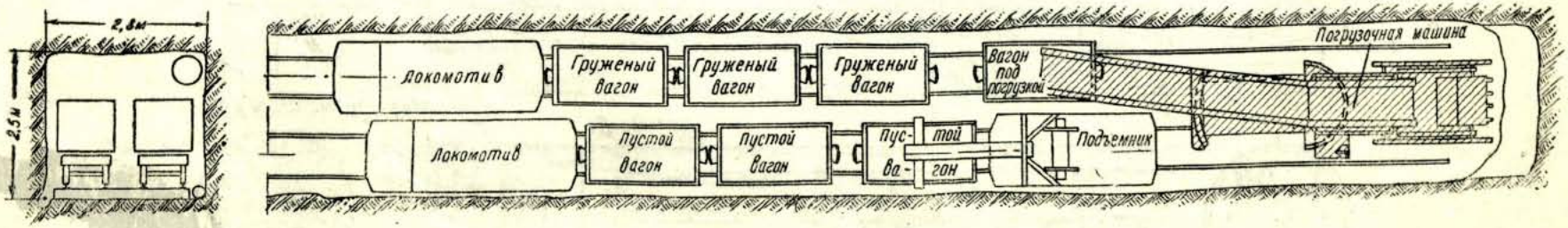


Рис. 525. Применение подъемника для погрузки у забоя

был распространен на все станции глубокого заложения 3-й очереди строительства (рис. 519, 520, 521). Простота и выносливость механизма при минимальном проценте ручной подкидки грунта нижней части профиля обусловили стремление внедрить его и на перегонных щитах. Опыт применения поперечных питателей для погрузки породы в перегонных щитах был проведен на шахте № 7—8 Метростроя (рис. 522). В настоящее время в СССР ведется большая научная и экспериментальная работа по созданию новых типов высокопроизводительных погрузочных машин. На 4-й очереди строительства Московского метрополитена работает с успехом система продольных, спаренных, скребковых грузчиков. В горной промышленности испытаны новые типы грузчиков 0—5 системы инж. Оника и МЛА-1 — тип механической лопаты системы инж. Абакумова и др., давшие хорошие результаты работы в подземных условиях.

* * *

В практике тоннельного строительства используется ряд приспособлений для обеспечения погрузки вагонеток при работе погрузочной машины в забое.

Обычно состав вагонеток при помощи локомотива заводится на порожняковый путь, и далее производится последовательная подача вагонеток под погрузочную машину; груженный породой состав удаляется за пределы тоннеля. Успешно применяется при погрузочных тоннельных работах скользящая стрелка (рис. 523).

В американской практике в тоннелях небольшого сечения применяется аппарат Черри-Пиккер в виде подъемного приспособления, с помощью которого можно поднимать и переставлять порожние вагонетки. На рис. 524 Черри-Пиккер представлен в виде тельфера на поперечном монорельсе. Он может быть смонтирован и непосредственно у корпуса погрузочной машины в виде специального подъемника (рис. 525).

* * *

Широкое распространение имеет и приспособление Грасхопер, представляющее собой металлическую конструкцию подвижного моста длиной до 18 *м* с двумя наклонными бремсбергами. По одному из них поднимаются порожние вагонетки, по другому они спускаются под погрузку к забою. Груженый состав отвозится локомотивом. Грасхопер перемещается по ширококолейному пути и может быть в головной части оснащен системой буров для использования его одновременно как тележки для обуривания забоя (рис. 526).

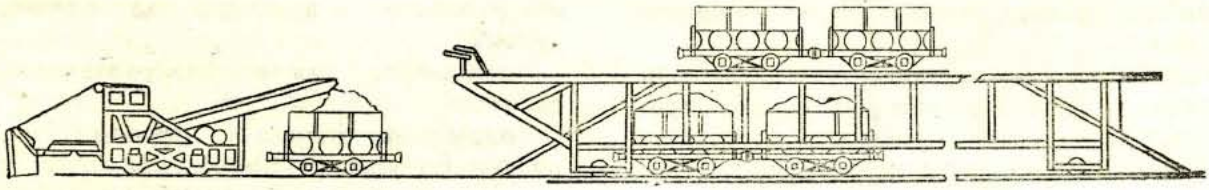


Рис. 526. Погрузочные работы в тоннеле при использовании приспособления системы Грасхопер

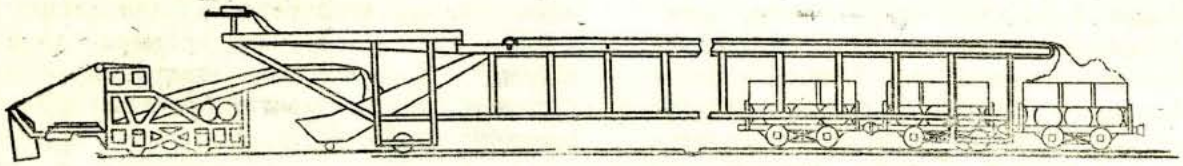


Рис. 527. Транспортер погрузочной системы Диксон

В Америке применяют также транспортер Диксон, смонтированный на специальной подвижной металлической раме длиной до 20 *м*. Ширина рамы позволяет заводить состав порожних вагонеток и последовательно их нагружать. Передняя часть рамы транспортера снабжена ковшом, принимающим породу непосредственно от погрузочной машины. Раму можно оснастить в головной части бурами, используя ее как буровую тележку, которую можно легко откатить от забоя в момент производства взрывных работ (рис. 527).

Решение комплекса работ по механизированной разработке и погрузке породы значительно увеличивает темпы проходки. Тем самым снижается стоимость тоннельных работ. Указанные две операции являются решающими для скоростного строительства.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ВНУТРИТОННЕЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Тоннельный транспорт является одним из важнейших звеньев комплексного процесса проходки.

Высокая производительность труда при стахановских методах, дающая быстрое продвижение забоя вперед, настоятельно требует совершенной перестройки принципов механизации работ и в особенности тоннельного транспорта. Успех тоннельных работ на крупных стройках в значительной степени зависит от мощности механизированного транспорта. Применение мускульной силы человека или лошади в качестве двигателя при подземной откатке встречается в настоящее время только в исключительных случаях, на небольших тоннельно-строительных участках (до 100—150 *м*), а равно при подходах к основным рельсовым путям. На современных тоннельных строительствах основной подземный транспорт полностью механизирован.

К механизированному тоннельному транспорту относятся:

откатка двигателями стационарного типа (*канатная тяга*) — концевая откатка с головным и хвостовым канатами и бесконечная откатка;

транспорт двигателями подвижного типа (*локомотивами*) — электровозная, воздуховозная, тепловозная откатка;

безрельсовый — конвейерный транспорт;

гидравлический транспорт — по лоткам и трубопроводам;

подвесная откатка — тельферная.

В горных тоннелях больших профилей иногда применяют автомобильный транспорт и тракторную тягу.

В основу проектирования тоннельного транспорта принимаются следующие факторы:

а) трасса и профиль тоннеля;

б) протяжение тоннельно-строительных участков;

в) габариты тоннельных выработок;

методы и условия проходки (нормальное давление и проходка под сжатым воздухом);

род энергии для механизированного транспорта;

расчетные скорости проходки и грузопотоки (порода и материалы).

При расчете необходимой мощности внутритоннельного транспорта надлежит составить таблицу грузопотоков для данного рабочего крыла. В виде примера приводим таблицу грузопотоков шахтного рабочего крыла при строительстве Московского метрополитена (табл. 40).

Таблица 40

№ шахты	Грунт в *м*³	Инертные в *м*³	Итого в *м*³	Тюбинговых платформ	Количество людей
	вагоны	вагоны	вагоны		
12	720 / 1440	80 / 160	800 / 1600	240	250

Транспорт разработанной породы от забоя по тоннелю осуществляется обычно в вагонетках, в виде подземных поездов с механическим двигателем или, при непрерывном потоке, с использованием транспортеров.

По характеру применяемых при подземных работах двигателей транспорт породы (откатка вагонеток) осуществляется как двигателями стационарного типа, так и подвижными.

ОТКАТКА ДВИГАТЕЛЯМИ СТАЦИОНАРНОГО ТИПА *

Когда для механизации подземной откатки вагонеток применяется двигатель стационарного типа, последний соединяется с составом вагонеток при помощи каната.

* Акад. А. М. Терпигорев и проф. А. И. Милованов, Рудничный транспорт.

Поезд перемещается по рельсовым путям от места нагрузки в забое до шахтного ствола, к порталу тоннеля или к месту свалки. По роду применяемых канатов различают откатку с головным и хвостовым канатом и бесконечную откатку.

В первом случае перемещение вагонеток производится двумя канатами: один из них прицепляется к головной части поезда, а второй к хвосту поезда. Двигателем стационарного типа служит моторная лебедка, установленная в конце откаточных путей.

Во втором случае пользуются одним канатом замкнутого типа — бесконечным. Канат приводится в движение от лебедки через ведущий шкив. При этом вагонетки прицепляются к канату посредством сцепных устройств. Канатная тяга имела применение на тоннельных работах 2-й очереди строительства Московского метрополитена.

Откатка головным и хвостовым канатом. Как указывалось выше, к головной части поезда прицепляется канат, который навивается на барабан лебедки, расположенной у места приема груженых вагонеток. Другой канат от хвостовой части поезда направляется в обратную сторону и наматывается на барабан лебедки, установленной у места загрузки вагонеток. Обе лебедки, работая попеременно, передвигают груженый поезд вперед к разгрузке и обратно порожняк под нагрузку. В тех случаях, когда установка двух двигателей неудобна, так как требуется двойное обслуживание лебедок, пользуются одной двухбарабанной лебедкой, которая обычно устанавливается у места приемки груженых вагонеток. В этом случае на один барабан лебедки навивается головной канат, а на другой — хвостовой канат. Последний непосредственно от поезда идет через шкив, укрепленный у места погрузки вагонеток (рис. 528, 529).

Движение груженого поезда осуществляется навиванием головного каната, а подача порожнего поезда к месту загрузки — навиванием хвостового каната.

Подземная откатка с головным и хвостовым канатами дает возможность составлять поезда в 20—30 вагонеток.

Канатная тяга может быть осуществлена в тоннеле при расстояниях откатки до 600 *м*. В тоннельной практике скорость откатки допускается от 0,75 до 1,5 *м/сек*. При наличии хороших рельсовых путей при мощном грузопотоке скорость откатки может быть увеличена до 3 *м/сек*.

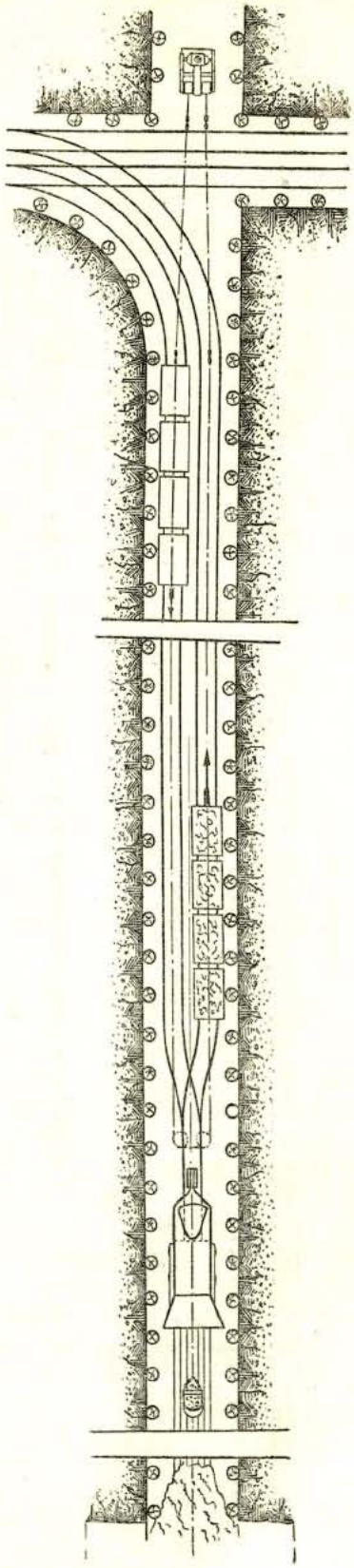


Рис. 528. Откатка с головным и хвостовым канатом (план)

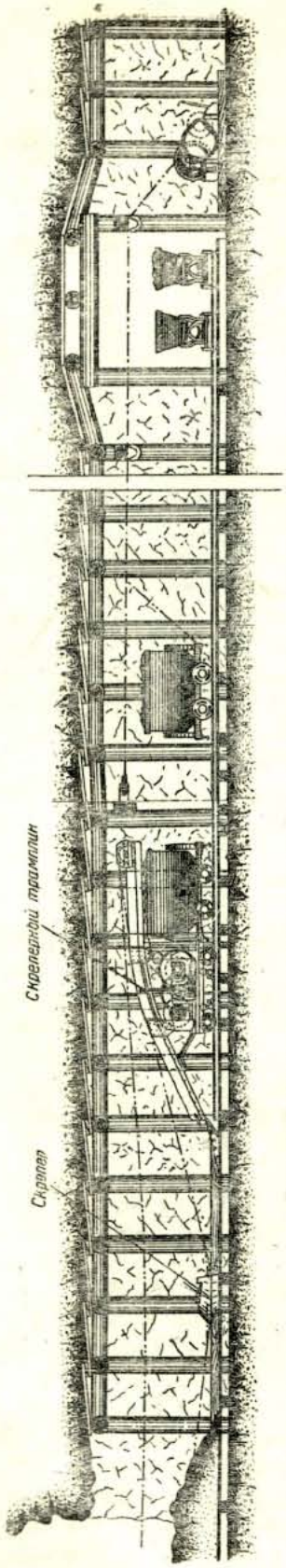


Рис. 529. Откатка с головным и хвостовым канатом (продольный разрез)

Чтобы предохранить канаты от изнашивания, а равно для уменьшения сопротивления от трения, канаты пропускают по роликам, укрепленным между рельсами. Поворот каната на закруглениях пути осуществляется применением роликов или направляющих шкивов соответствующего диаметра.

При выборе стационарного двигателя для канатной откатки производят надлежащий расчет по силе тяги. При канатной откатке сила тяги суммируется из силы натяжения от перемещаемого полезного груза, от сопротивлений в направляющих роликах и от веса каната.

Рассматривая общий случай движения вагонетки по наклонной плоскости, имеем:

$P = W + Q$ — вес полезного груза и кузова вагонетки.

Угол наклона плоскости равен α (рис. 530).

Разложим силу $W + Q$ на две составляющие и рассмотрим их влияние на движение вагонетки.

Сила $(W + Q) \cos \alpha$ прижимает кузов к рельсам и при движении вагонеток создает силы трения на ободе колес по рельсам и в подшипниках.

Величина силы сопротивления $F = f(W + Q) \sin \alpha$.

Сила $(W + Q) \sin \alpha$ преодолевается при движении вагонетки на подъем. В случае откатки под уклон эта сила будет ускорять движение вагонетки.

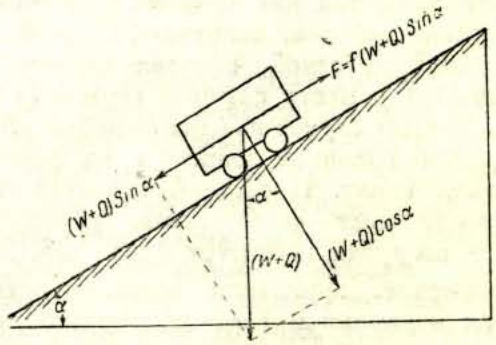


Рис. 530

В общем случае при движении вагонетки на подъем сила тяги равна

$$F_1 = f(W + Q)\cos\alpha + (W + Q)\sin\alpha = (W + Q)(f\cos\alpha + \sin\alpha).$$

При движении под уклон эта сила равна

$$F_2 = (W + Q)(f\cos\alpha - \sin\alpha).$$

При откаточных путях с небольшим уклоном в грузовом направлении $\alpha = 0{,}003—0{,}005$; можно считать, что $\cos \alpha = 1$, и формула будет иметь вид:

$$F_3 = (W+Q)(f-\sin\alpha).$$

При числе вагонеток в поезде, равном k, при коэфициенте, учитывающем сопротивление на закруглениях, $\alpha = 1{,}2—1{,}3$ и при общем коэфициенте трения f имеем:

$$F = \alpha k (W+Q)(f-\sin\alpha).$$

Сопротивление от трения каната по роликам приближенно можно принять пропорциональным длине каната. Тогда для головного каната, при его длине L_1 получим:

$$\omega_1 = mL_1.$$

Для хвостового каната при его длине $= L_2$

$$\omega_2 = mL_2.$$

При $L_1 = L_2 = L$ полная сила тяги, на которую надлежит рассчитывать двигатель, будет:

$$F_к' = F + 2mL;$$

m обычно принимают = от 0,1 до 0,2 *кг*.

Эффективная мощность двигателя выражается:

$$N = \frac{1{,}1 F_k v}{75\eta},$$

где η — коэфициент полезного действия машины, v — скорость откатки в *м/сек*, 1,1— коэфициент на неучтенные сопротивления.

Откатка бесконечным канатом. Бесконечный канат получает движение от находящегося с одной стороны пути ведущего шкива лебедки (рис. 531, 532).

На другом конце пути канат проходит через конечный направляющий шкив и приводится в движение непрерывно в одном и том же направлении. В этом случае груженые вагонетки идут по одному пути, а порожняк возвращается по другому. При бесконечной откатке возможна работа как с нависающим (верхним) канатом, так и при расположении последних под вагонетками.

Двигатель при такой откатке лучше всего располагать возле шахты в особой камере на продолжении откаточных путей во избежание изгибов каната. Чтобы шкив в период работы лебедки передавал движение канату, а вместе с ним вагонеткам, необходимо между

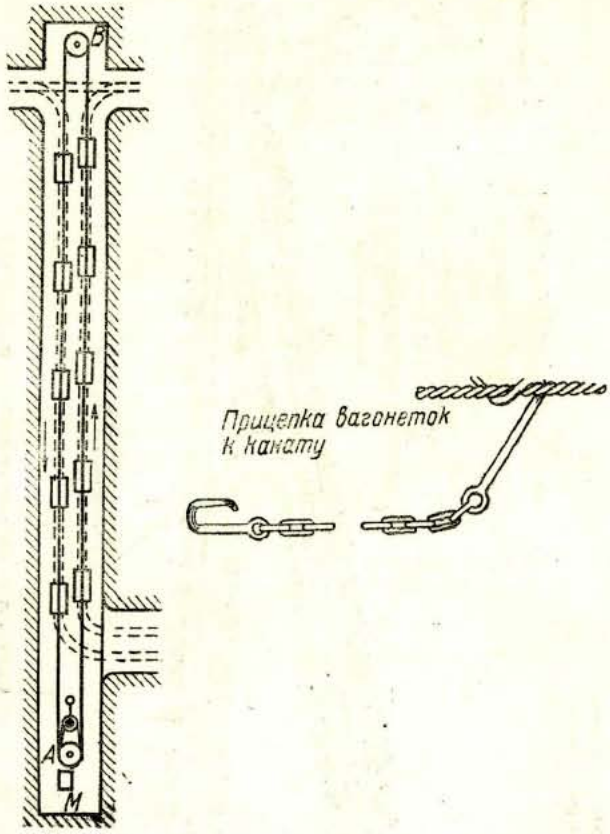


Рис. 531. Схема откатки бесконечным канатом (план)

канатом и шкивом обеспечить достаточное трение, для чего на холостом шкиве монтируются натяжные устройства, которые позволяют подтягивать канат по мере его вытягивания в период эксплоатации. Скорость движения каната при бесконечном канате принимается обычно 0,5—1,5 *м/сек*.

Вагонетки соединяются с канатом специальными прицепными устройствами.

На закруглениях для каната устраиваются направляющие ролики, а при расположении каната поверху — поддерживающие ролики. Значительное распространение получили звездчатые ролики, свободно пропускающие мимо себя зацепляющие аппараты, попадающие между зубьями.

Расчет канатной откатки, определение производительности, силы тяги, диаметра каната и всех элементов ее здесь не приводится. Подробно эти вопросы изложены в труде

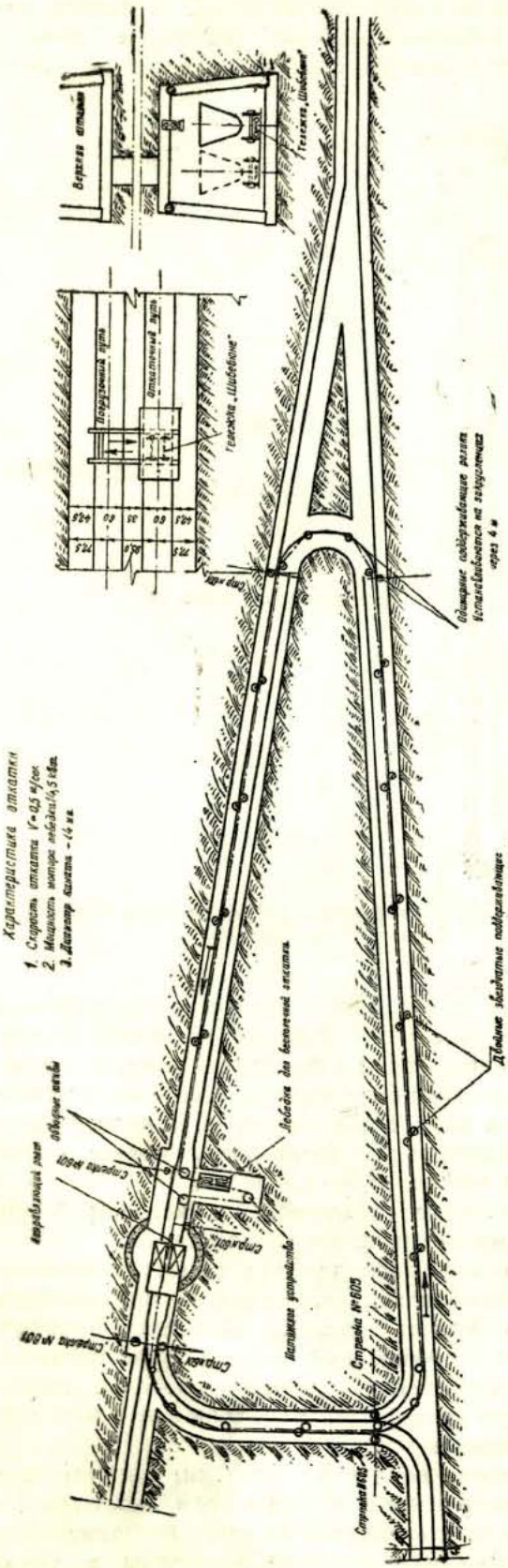


Рис. 532. Схема откатки бесконечным канатом в околоствольной выработке

акад. А. М. Терпигорева и проф. А. И. Милованова «Рудничный транспорт».

*ТРАНСПОРТ ДВИГАТЕЛЯМИ ПОДВИЖНОГО ТИПА**

Для перемещения составов вагонеток по тоннельным выработкам применяются локомотивы, которые, в зависимости от энергии двигателя, подразделяются на электровозы (контактные и аккумуляторные), тепловозы и воздуховозы.

В тоннельной практике при сооружении тоннелей крупных профилей применяется также автомобильная и тракторная тяга.

Перемещение локомотивом состава возможно, если сила трения ведущих колес локомотива о рельсы будет превалировать над силой тяги состава. Величина силы трения находится в зависимости от состояния пути и от веса локомотива. Чем больше вес локомотива, передаваемый на ведущие оси (сцепной вес), тем большего веса состав в состоянии тянуть локомотив. Однако увеличение веса локомотива ведет к необходимости применения более тяжелого типа рельсов и всего пути, что вызывает увеличение затрат на организацию подземной откатки. В некоторых случаях, например на больших подъемах пути, трение между колесами локомотива и рельсами достигается увеличением коэфициента трения — посыпкой сухого песка на головки рельсов.

Вес тоннельных локомотивов составляет от 2 до 15 *т*.

При организации работ по внутритоннельному транспорту предварительно выявляют характеристику локомотива. По заводским данным устанавливают сцепной вес локомотива и определяют развиваемую силу тяги F.

$$F = P_{сц}\, f,$$

где f — коэфициент сцепления (нормально $f = 0{,}20$, а при набрасывании песка на рельсы $f_1 = 0{,}25$).

Учитывая сопротивления при движении поезда в тоннеле, имеем следующее уравнение движения поезда:

$$F - \Sigma\omega = M\frac{dv}{dt} = \frac{P + Q_c}{G} 10^3\ Kj,$$

---

* Акад. А. М. Терпигорев и проф. А. И. Милованов, Рудничный транспорт.

где F — сила тяги в *кг*, M — приведенная масса движущихся частей поезда $\frac{dv}{dt}$ — ускорение движения поезда в *м/сек*^{2}, $\Sigma\omega$ — сумма всех сопротивлений при движении поезда.

$$\Sigma\omega = (\omega + \omega_{кр} + i_{max})(P + Q_c),$$

где: ω — удельное сопротивление движению по прямому горизонтальному пути в *кг/т*. При определении веса состава надо брать сопротивление при трогании с места. Это сопротивление в 1,5 раза > сопротивления при движении, значения которых приведены в табл. 40.

Таблица 40

Тип подшипников вагонеток	Значение коэфициента ω сопротивления движению
Шариковые	0,004—0,008
Роликовые	0,007—0,012
Обыкновенные	0,012—0,022

$\omega_{кр}$ — дополнительное удельное сопротивление на кривых в *кг/т*.

$$\omega_{кр} = \frac{35}{\sqrt{R}},$$

где R — радиус кривой.

Причем:

$\pm i_{max}$ — удельное сопротивление от уклона пути в $^0/_{00}$, выраженных в *кг*, отнесенных на 1 *т* веса поезда; P — вес локомотива в *т*; Q_c — вес состава в *т*; $K = 1{,}06$ — коэфициент влияния инерции вращающихся масс; $G = 9{,}81$ *м/сек*^{2} — ускорение силы тяжести; j — ускорение поезда.

Из уравнения движения поезда можно определить Q_c, т. е. вес состава поезда:

$$Q_c = \frac{F}{\omega + \omega_{кр} + i_{max} + 106j} - P;$$

зная Q_c, определим число вагонеток в составе:

$$n = \frac{Q_c}{Q + q},$$

где Q — полезный вес породы, q — вес кузова вагонетки.

Мощность двигателя

$$N = \frac{Fv}{75\eta}$$

где N — мощность двигателя в *л. с.*, v — скорость 2—3 *м/сек*, η — коэфициент полезного действия 0,80—0,95, F — сила тяги в *кг*.

При выборе типа локомотива необходимо учесть, что мощность его, зависящая от требуемой силы тяги по принятому составу и скорости, обусловливает определенные размеры двигателя, а следовательно, и габариты откаточных выработок.

По условиям техники безопасности, в тех случаях, когда в тоннельные выработки могут проникать горючие газы и работы предполагается проводить при газовом режиме, допускается применение только тех локомотивов, которые не выбрасывают пламени или газов, а равно не дают искрения.

В практике отечественного тоннельного строительства наибольшее распространение получили электровозы и локомотивы с двигателями внутреннего сгорания (мотовозы). Однако широкое развитие тоннельного строительства в СССР настоятельно требует изучения и других видов подвижных двигателей для внутритоннельного транспорта.

ВОЗДУХОВОЗЫ

Воздуховоз, или локомотив, работающий при помощи сжатого воздуха, снабжается тремя-четырьмя стальными баллонами высокого давления, размещенными на основной раме локомотива.

К этой раме присоединяется будка машиниста, где монтируются приборы управления воздуховозом (рис. 533, 534).

Для работы воздуховоза необходимо сооружение компрессорной станции на поверхности, оборудованной четырех- и пятиступенчатыми компрессорами производительностью до 20 *м*^{3}*/мин*, сжимающими воздух до высокого давления в 180—220 *ат*. Мощность воздуховоза колеблется в пределах 8—30 *л. с.* при объеме воздушных резер-

вуаров от 500 до 5 000 *л*. Расход воздуха на 1 *т/км* составляет 5—10 $м^3$.

Для питания воздуховоза от компрессор-

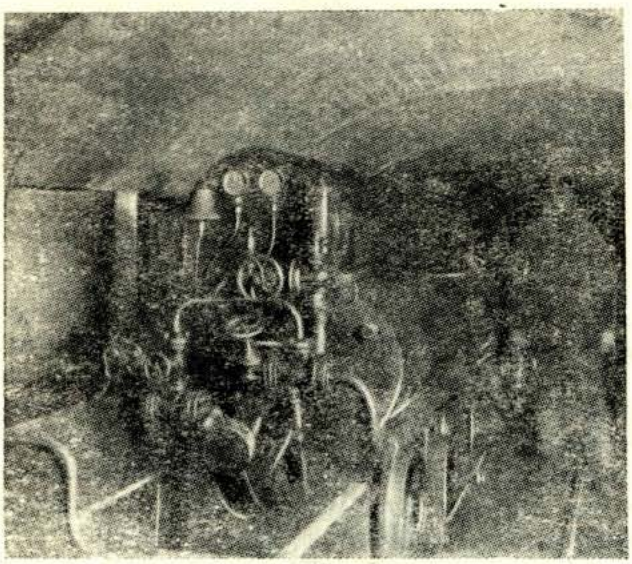


Рис. 533. Воздуховоз в тоннеле

ной станции в тоннеле делают прокладку трубопроводов, снабженных кранами. При помощи промежуточной стальной трубки (наполнителя) производится пополнение запаса сжатого воздуха на локомотиве — зарядка его.

Объем баллонов рассчитывается обычно на забор сжатого воздуха, обеспечивающего пробег в 5—8 *км*.

Чтобы по мере расхода воздуха из баллонов рабочие цилиндры машины получали воздух постоянного давления, в систему управления включают редукционный вентиль. Последний пропускает через себя воздух таким образом, чтобы иметь рабочее давление в 15—20 *ат* (поддерживая вместе с тем давление в баллонах в 180—220 *ат*).

Двигатель воздуховоза состоит из двух рабочих цилиндров с золотниковым распределением сжатого воздуха. В воздуховозах двойного расширения (компаунд) воздух из резервуаров сжатого воздуха *A* через редукционный клапан *B* идет в рабочий резервуар *C* (рис. 535). Из него по трубке *D* воздух направляется к цилиндрам высокого давления *F*. При выходе из рабочего цилиндра воздух имеет давление около 5—7 *ат*. Далее воздух поступает в подогреватель, представляющий собой закрытый цилиндр с пропущенными через него медными трубками. Подогревание воздуха происходит за счет теплоотдачи медных трубок при прохождении через них воздуха в тоннеле. Из подогревателя сжатый воздух идет в цилиндр низкого давления, а из него, после вторичного выполнения полезной работы, происходит выхлоп воздуха наружу через камеру эксгаустера *E* с давлением около 1,5 *ат*.

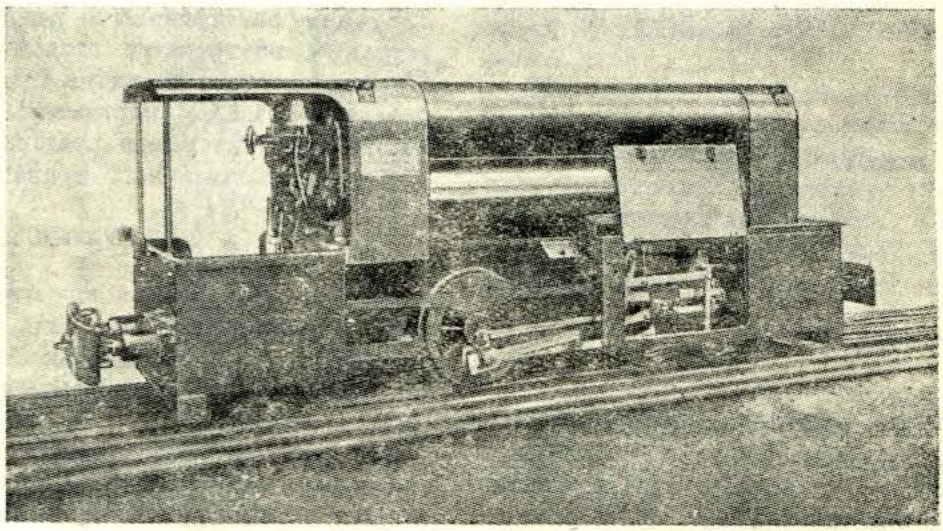


Рис. 534. Воздуховоз

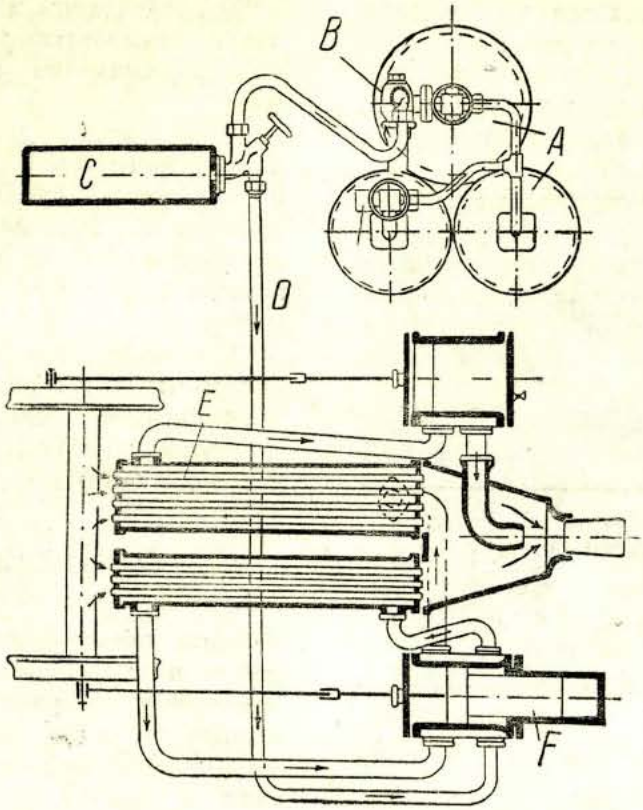


Рис. 535. Схема зарядки воздухсвоза

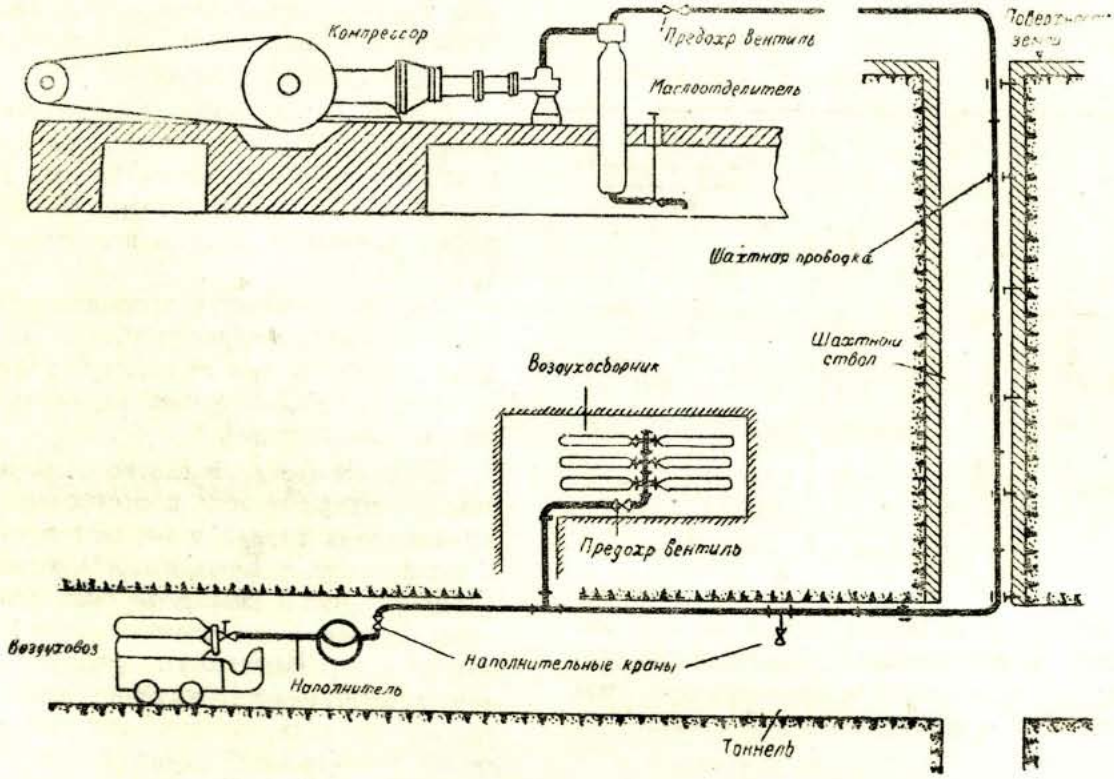


Рис. 536. Общая схема зарядки воздуховоза в тоннеле

Схема рабочего процесса зарядки воздуховоза в тоннеле изображена на рис. 536.

В практике тоннельного строительства применяются следующие три вида воздуховозов:

откаточные—для транспортировки породы и материалов по трассе тоннеля;

сборочные — для транспортировки на притоннельных выработках;

карликовые — для откатки на короткие расстояния в стесненных условиях подземных работ.

Характеристика воздуховозов этих типов дается в табл. 41 и 42[1].

Таблица 41

Тип	Высота локомотива в *мм*	Тяговая сила в *кг*	Мощность в *л. с.*	Вес в *т*
Откаточные	1 075—1 098	450—500	18	6,0—7,5
Сборочные	1 074—1 091	200—250	10	4,5—5,4
Карликовые	1 224—1 230	150—250	6—8	2,2—3,0

Таблица 42

Тип	Баллоны		Свободный пробег в оба конца	
	количество, шт.	емкость в *л*	при 150 *ат*	при 175 *ат*
Обкаточные	3—4	890—1400	3,8—6,0	4,4—7,0
Сборочные	3	650—1090	3,0—5,0	3,5—5,8
Карликовые	4	200—320	1,4—2,0	1,7—2,4

Основные достоинства воздуховозов заключаются в обеспечении безопасности работы внутритоннельного транспорта при проходке тоннелей в опасной газовой среде. При этом воздуховозы в процессе работы пополняют тоннельные разработки свежим воздухом, улучшая тем самым условия вентиляции.

Недостатки воздуховозов заключаются в ограниченности радиуса действия (до 8 *км*) и необходимости частой зарядки двигателя. Эксплоатация многоступенчатой компрессорной станции значительно повышает стоимость воздуховозного транспорта.

Опасность возникновения подземных пожаров и переход строительства на газовый режим при сооружении Апеннинского тоннеля обусловили необходимость замены бензиновозов воздуховозами.

БЕЗОГНЕВЫЕ ЛОКОМОТИВЫ

Для обеспечения условий безопасности работ в пожарном отношении безогневый локомотив не имеет своей топки, а работает парами от воды, нагретой до температуры 150—200° С, находящейся в котле под давлением в 10—15 *ат*. При падении давления в котле нагретая вода выделяет новое количество пара, чем поддерживается работа машины. После охлаждения воды локомотив требует новой зарядки. Таким образом, безогневый локомотив работает аналогично аккумуляторному двигателю.

Котел безогневого локомотива представляет собой цилиндрический резервуар объемом от 1 до 4 $м^3$. Котел обычно заполняется водой на 0,6 своего объема. В нижней части котла проходит труба, выходящая наружу (рис. 537).

Зарядка локомотива производится свежим паром от стационарного котла. На эту операцию требуется при начальной зарядке до получаса, а при повторных зарядках до четверти часа на каждую.

Безусловное достоинство безогневого локомотива заключается в отсутствии газов, загрязняющих воздух в тоннеле в процессе работы двигателя. Безогневый локомотив не нарушает условий пожарной безопасности в тоннеле. Основной недостаток локомотива заключается в ограниченности радиуса его действия, вынуждающей производить частые зарядки. Зарядка обеспечивает работу двигателя на 3—8-часовый период.

Показатели безогневых паровозов завода Маффей даны в табл. 43.

[1] Акад. А. М. Терпигорев и проф. А. И. Милованов, Рудничный транспорт М.

Таблица 43

Показатели	Заводский номер				
	1963	1933	1944	1973	1965
Ширина колеи в *м*	400	600	600	900	1 435
Объем котла в $м^3$	1,45	2,19	4,9	6	3,25
Длина в *мм* . . .	3 320	3 790	4 650	4 200	4 810
Ширина в *мм* . .	1 200	1 630	2 100	2 500	2 220
Высота в *мм* . .	2 000	2 580	2 800	3 000	3 100
Сила тяги:					
при 7 *ат* в *кг* .	750	715	2 820	2 730	2 830
„ 1 *ат* „ „ .	100	100	400	390	260

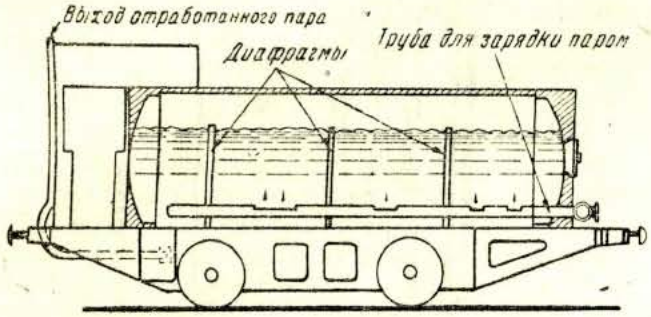


Рис. 537. Схема безогневого паровоза

Тепловозы подразделяются на бензиновозы и дизель-локомотивы (рис. 538, 539).

Двигатель тепловоза устанавливается на раме, в которой укреплены подшипники ска-

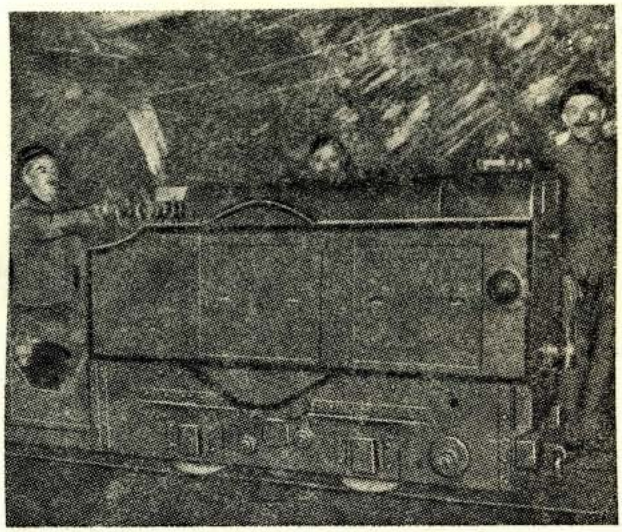


Рис. 538. Тоннельный бензиновоз

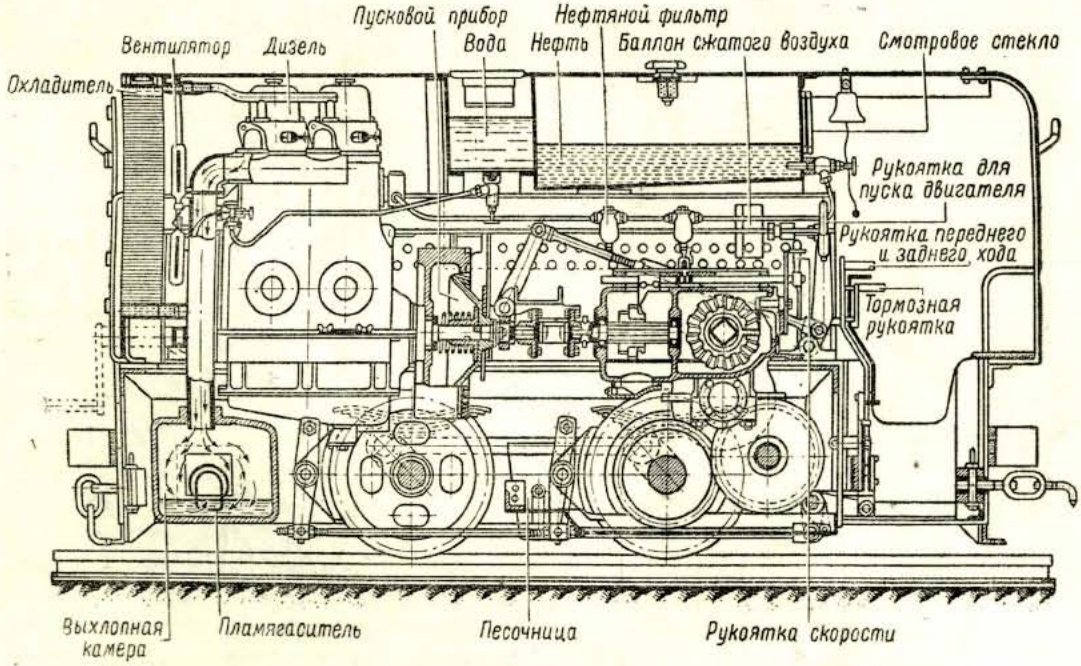


Рис. 539. Схема тоннельного тепловоза

ТЕПЛОВОЗЫ

К тепловозам относят локомотивы, работа которых происходит при помощи установленных на них двигателей внутреннего сгорания. тов. В будке машиниста сосредоточены механизмы управления. Обычно на тепловозах, применяемых при постройке тоннелей, устанавливается четырехтактный двигатель внутреннего сгорания, так как двухтактные дви-

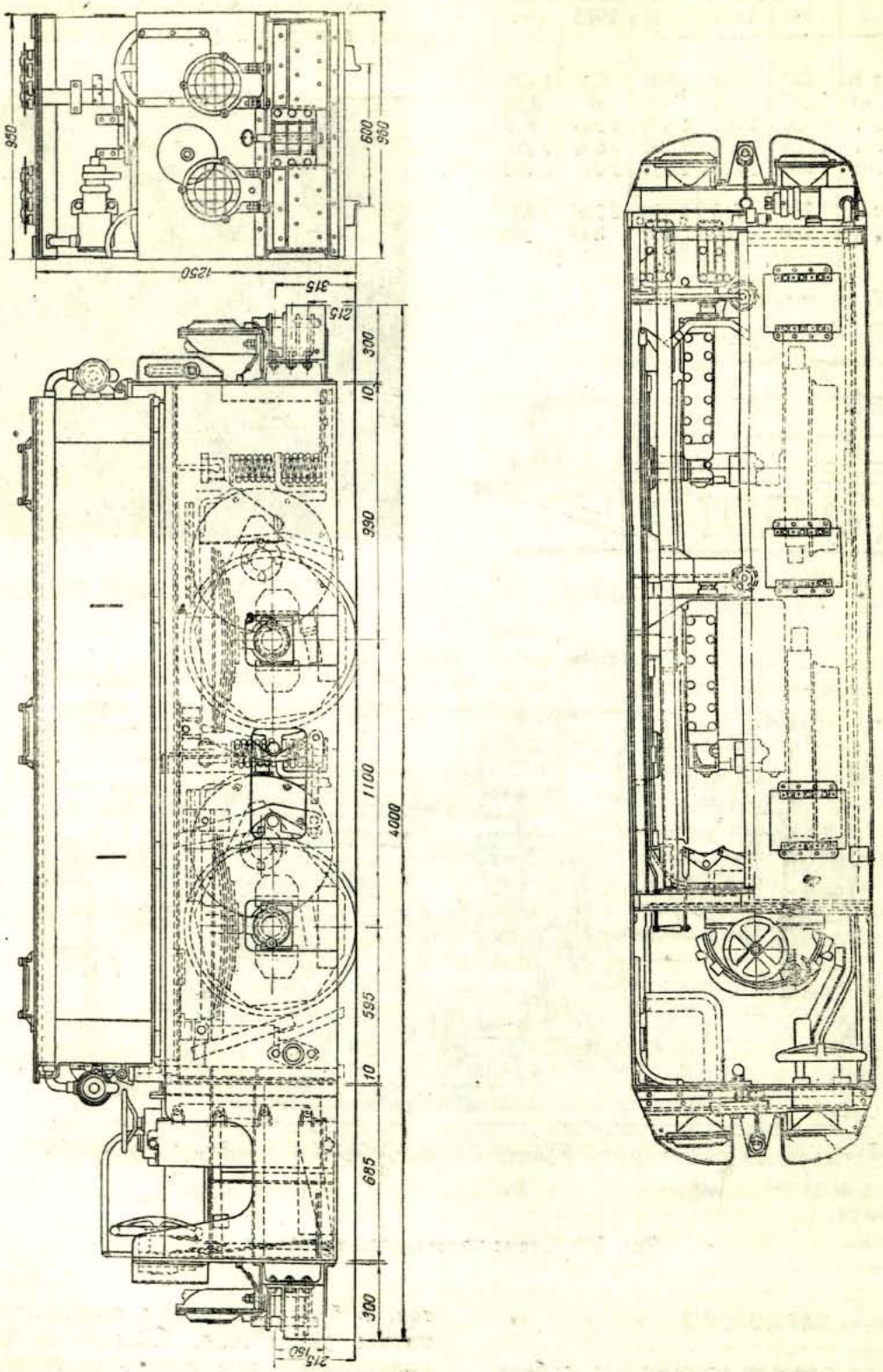


Рис. 540. Схема аккумуляторного электровоза

гатели хотя и имеют меньшие размеры рабочих цилиндров при той же мощности, но требуют особых устройств для продувки цилиндров; обладают они и другими конструктивными дефектами.

Кардинальный недостаток тепловоза заключается в том, что он огнеопасен; поэтому при конструировании тепловоза применяются все меры, чтобы не допустить выбрасывания наружу пламени или газов высокой температуры.

В практике выработаны типы конструкций гасителей пламени, устраиваемых в виде насадок на входной и выходной части трубопровода двигателя; к сожалению, гасители являются лишь паллиативными мероприятиями, полностью не решающими задачи.

Другим недостатком тепловозов является выделение ими вредных газов, значительно осложняющих условия вентиляции тоннельных выработок. Имеются в виду продукты неполного сгорания смеси воздуха с горючим.

При работе тепловоза содержание в воздухе тоннельных выработок окиси углерода требует увеличения притока свежего воздуха, чтобы обезвредить действие CO.

Кинг считает необходимым при устройстве вентиляции в местах работы бензиновозов подавать сверх требуемого количества еще до 30 $м^3$ свежего воздуха в минуту на каждую тонну веса тепловоза.

То обстоятельство, что резерв топлива обычно находится на самом тепловозе, обеспечивает его мобильность и является его несомненным преимуществом.

В заключение следует указать, что тепловозы могут применяться преимущественно при разработке тоннелей больших профилей, где работы обеспечиваются мощной искусственной вентиляцией.

ЭЛЕКТРОВОЗЫ

Локомотивы, работающие с помощью электрической энергии, носят название *электровозов*. Аккумуляторные электровозы получают ток от аккумуляторных батарей, установленных непосредственно на корпусе локомотива. Контактные или троллейные электровозы получают ток через токоприемник и контактный провод, подвешенный над рельсовым путем, при ширине колеи 600—900 *мм*.

Аккумуляторные электровозы. На рамной конструкции электровоза располагается аккумуляторная батарея, питающая постоянным током два мотора, связанные с осями двигателя. В передней части находится отделение для машиниста, где расположены приборы управления (рис. 540, 541).

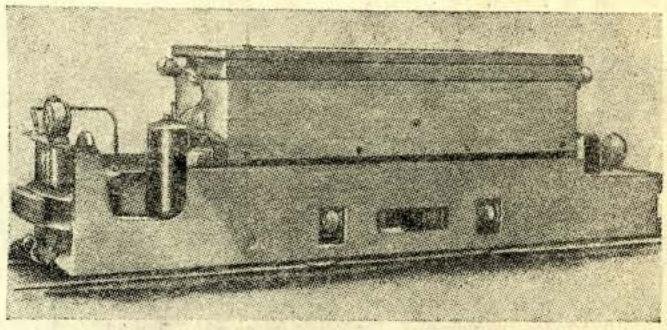


Рис. 541. Аккумуляторный электровоз

Моторы электровоза получают электрический ток напряжением 80—150 V от аккумуляторной батареи, представляющей собой эбонитовый бак с расположенными в нем пластинами положительного и отрицательного электродов.

Для рудничных электровозов, выпускаемых московским заводом Динамо, применяются аккумуляторы со свинцовыми пластинами; электролитом служит раствор серной кислоты. Обычно емкость аккумуляторной батареи рассчитывается таким образом, чтобы, расходуя свой запас энергии, она обслужила электровоз в течение одной рабочей смены. После того как батарея разрядится, производится смена батарей в зарядных камерах, где заранее на специальных зарядных столах сист. Монча подготовляются к работе новые батареи. Затрата времени на операцию зарядки является одним из недостатков электровозов этого типа.

Другим недостатком аккумуляторного электровоза является большой вес локомотива и батарей, что требует мощного пути (рис. 542, 543).

В условиях проходки тоннеля под сжатым воздухом аккумуляторные электровозы не допускаются вследствие выделения газов от батарей. Основное электрическое оборудование электровоза состоит из моторов, аккумуляторной батареи, пускового сопротивления и контроллера.

Главное достоинство аккумуляторного электровоза заключается в возможности работы в тоннельных выработках, опасных по газу.

В Советском Союзе аккумуляторные электровозы выпускаются Подольским машиностроительным заводом и московским заводом Динамо им. Кирова; электровозы выпускаются трех типов. Характеристика их дается в табл. 44.

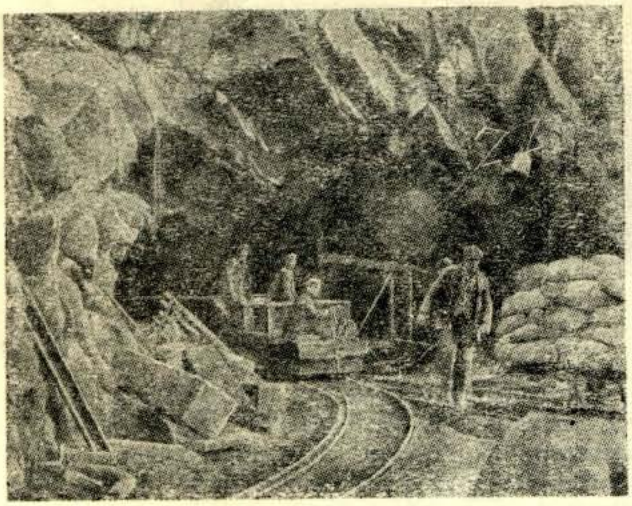


Рис. 542. Электровоз у тоннельного портала

Контактные электровозы. Контактные или троллейные электровозы получают электрический ток по проводу, подвешенному по длине тоннельной выработки, в отличие от аккумуляторных электровозов с источником энергии непосредственно на самом локомотиве. Через токоприемник-пантограф, касающийся контактного провода, ток поступает в моторы электровоза. От моторов ток проходит через колеса локомотива в рельсы и по ним, как по обратному проводу, возвращается на электростанцию. Рельсовый путь в этом случае включен в общую цепь электрического тока, а потому устраиваются специальные соединения из медной проволоки или же производят сварку рельсов.

Контактный электровоз является двигателем, зависящим от проводов, и может обслужить только те тоннели и выработки, где возможно уложить сплошной рельсовый путь и подвесить электропровод. Для возможности подхода электровозов ближе к забою там, где не имеется подвесного провода, применяются комбинированной системы контактно-кабельные электровозы, снабженные кабелем, заменяющим провод. Этот кабель наматывается на специальные барабаны, смонтированные на электровозе, и разматывается при удалении электровоза от подвесного провода. Длина кабеля определяет длину участка, где может работать такой электровоз. На электровозах завода Динамо длина такого кабеля составляет 15 *м*.

Электрическое оборудование контактных электровозов состоит из токоприемника, тяговых моторов, пускового приспособления, световых приборов (рис. 544, 545).

Все это оборудование размещено на основной раме. На раме расположена кабина машиниста, где сосредоточены аппараты управления электровозом.

Особое внимание должно быть уделено надзору за правильной подвеской голого электропровода, обеспечив в необходимых случаях защиту последнего.

Необходимо следить за тем, чтобы провод не касался крепи тоннельных выработок и был подвешен на изоляторах. За исправностью рельсового пути и стыковых соединений также должно быть организовано постоянное тщательное наблюдение. При выпол-

Таблица 44

Характеристика	Тип электровоза		
	1-АР-113	3-АР-113	1—АЛТ—1
Ширина колеи в *мм*	550	750	500
Длина с буферами в *мм*	4 050	4 000	2 570
Ширина в *мм*	976	1 266	966
Высота в *мм*	1 304	1 304	1 094
База электровоза в *мм*	1 100	1 100	810
Сцепной вес в *т*	6	6,5	3,5
Напряжение аккумуляторной батареи V	125	125	88
Мощность двигателя в kW, часовая	15,8	15,8	6,5
Сила тяги в *кг/час*	1 080	1 080	540
Скорость в *км/час*	5,2	5,2	4,25
Емкость аккумуляторных батарей в kWh	21,5	21,5	10

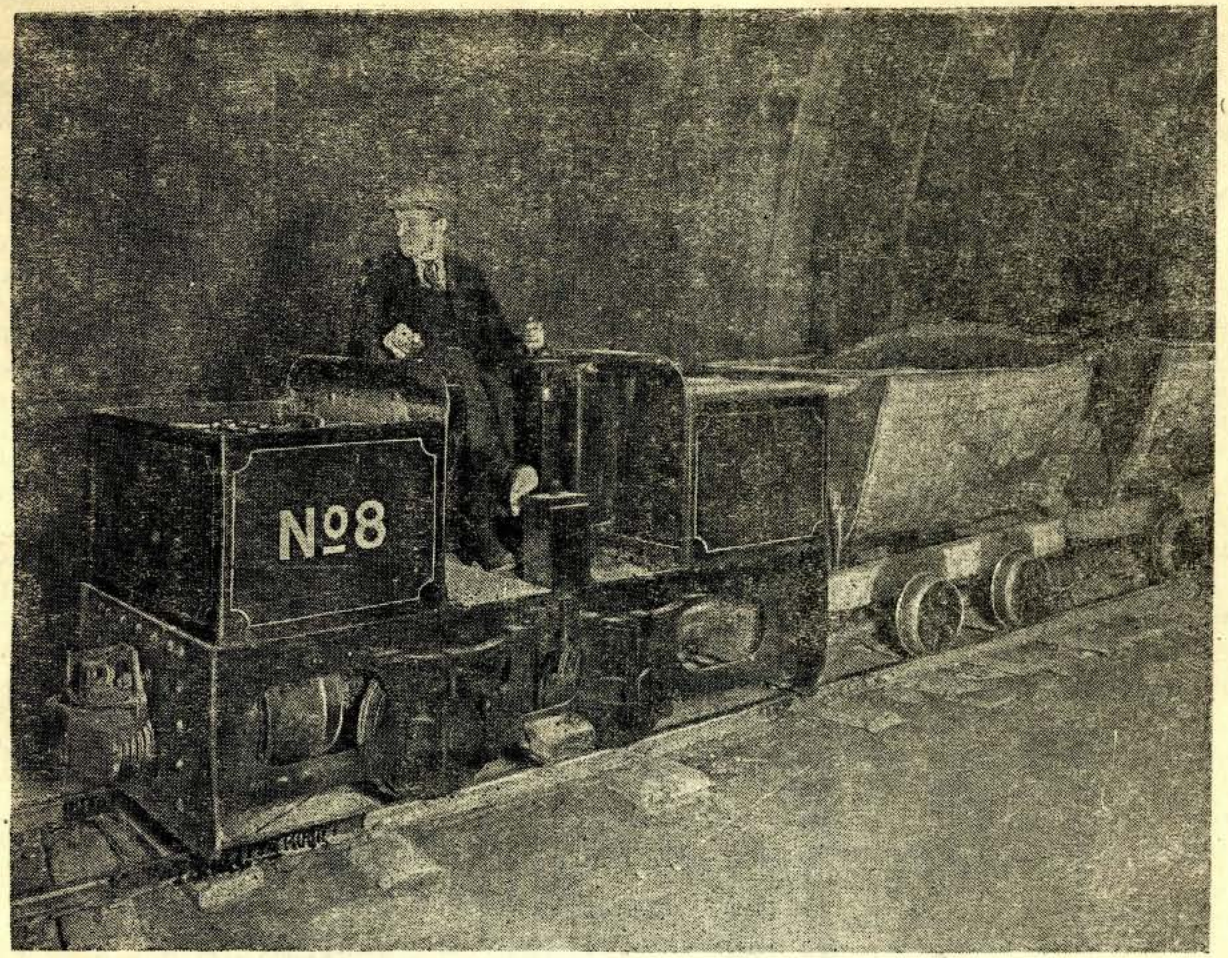


Рис. 543. Работа электровоза в тоннеле

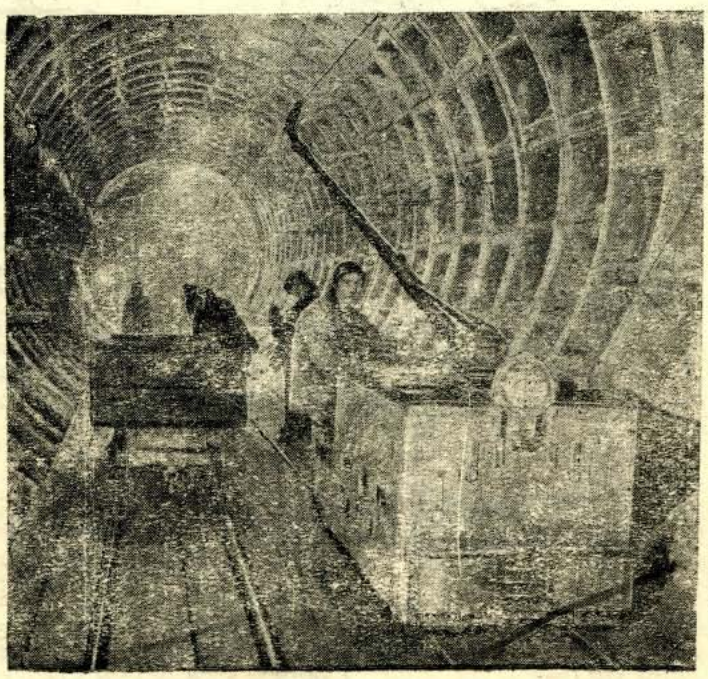


Рис. 544. Подземный контактный электровоз в тоннеле Метростроя

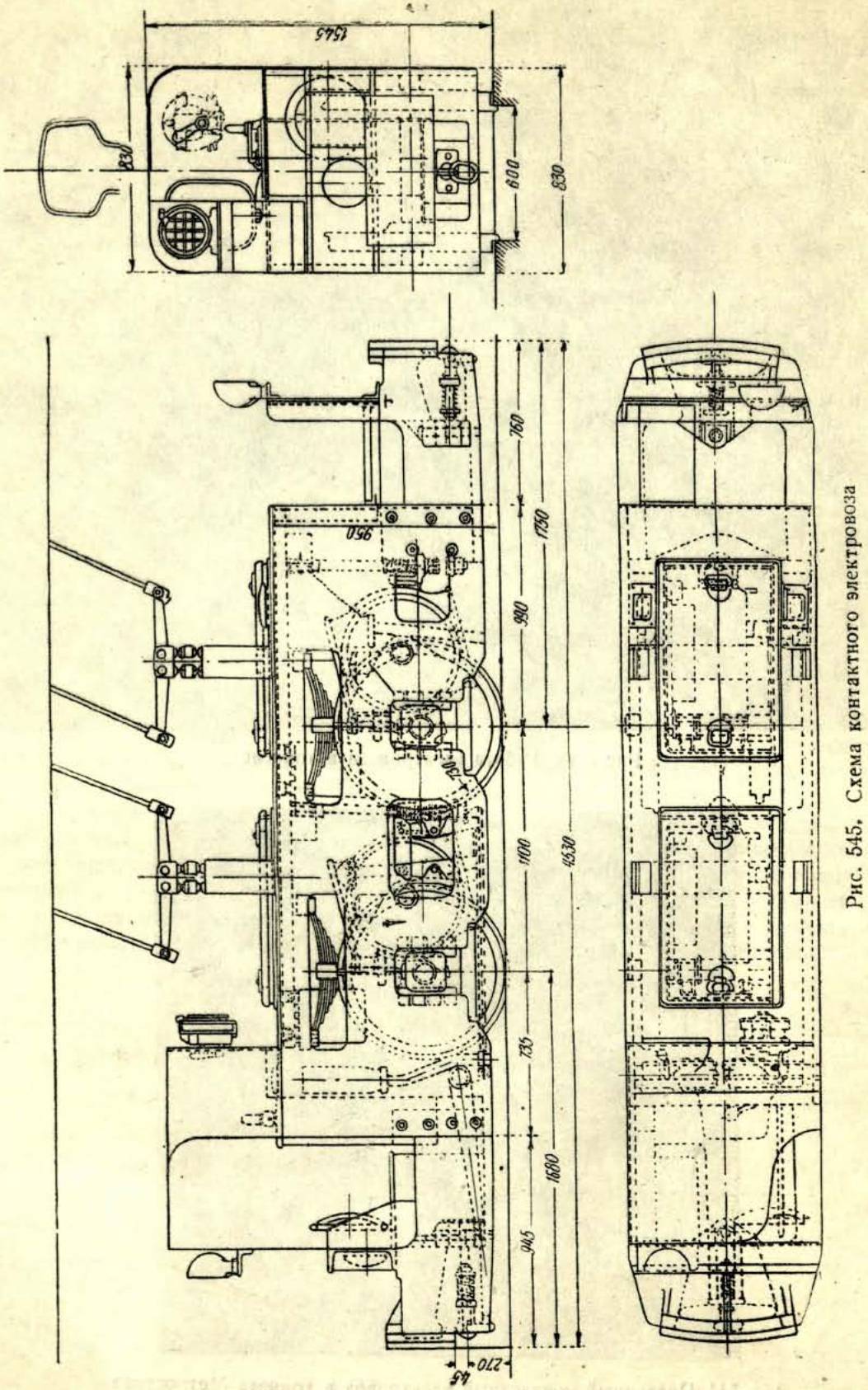


Рис. 545. Схема контактного электровоза

нении всех требований эксплоатации электровоза, по заранее составленному графику движения, электровоз является наиболее технически совершенным и экономичным двигателем при организации транспорта в тоннеле на расстояния более 500 *м*. Стоимость откатки контактными электровозами ниже, чем аккумуляторными.

Основным недостатком контактных электровозов являются искрение у провода на токоприемнике, возможность случайных прикосновений к открытому электропроводу и связанные с этим несчастные случаи.

По правилам безопасности контактные электровозы допускаются к применению только в выработках, безопасных по газу. С большим успехом контактные электровозы применялись на строительстве 3-й очереди строительства Московского метрополитена и применяются при строительстве большого подземного кольца 4-й очереди.

В СССР контактные электровозы выпускает московский завод Динамо им. Кирова. Характеристика их дана в табл. 45.

ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИЗАЦИИ ТОННЕЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Основным видом подземного транспорта на 1-й и 2-й очереди строительства Московского метрополитена была откатка по рельсовым путям. В соответствии с этим, а также ввиду малых расстояний между шахтами механизация транспорта базировалась главным образом на стационарных двигателях (лебедках) небольшой мощности (порядка 10—12 kW) и канатной тяге. На 3-й очереди была широко внедрена электровозная тяга троллейного типа.

Наряду с этим на Метрострое нашли применение и непрерывные ленточные транспортеры. Последние обладают преимуществами перед канатной откаткой: высокой производительностью, дешевой эксплоатацией и простотой обслуживания.

На шахтах Метростроя транспортеры были установлены в передовых штольнях станционных тоннелей, а также на прямых участках готовых тоннелей при проходке последних без передовых штолен в условиях сжатого воздуха.

Элементами механизации подземного транспорта являлись:

При рельсовом транспорте: подвижной состав, рельсовые пути, стрелочные переводы, крестовины и пр., тяговые элементы (лебедки, направляющие устройства, подвижные двигатели).

При безрельсовой конвейерной доставке: 1) тип транспортера, 2) натяжная секция, 3) приводная секция, 4) средняя секция, 5) лента.

Таблица 45

Характеристика	Тип электровоза	
	1-ЭТР-1	3-ЭТР-1
Ширина колеи в *мм*	550—575—600	750—900
Длина электровоза с буферами в *мм*	4 100	4 100
Диаметр колеса в *мм*	650	650
Ширина электровоза в *мм*	960	1 250
Высота (с опущенным токоприемником) в *мм*	1 620	1 620
Жесткая база электровоза в *мм*	1 100	1 100
Наименьшее рабочее положение токоприемника от головки рельс в *мм*	1 900	1 900
Высота до контактного провода в *мм*	2 200	2 200
Напряжение в контактном проводе в V	250	250
Сцепной вес в *т*	5,5	6
Сила тяги длительного режима в *кг*	370	370
Сила тяги в *кг*	1 090	1 090
Скорость при длительном режиме в *м/сек*	3,2	3,2
Скорость в *км/час*	7,62 (2,1 *м/сек*)	7,62 (2,1 *м/сек*)
Мощность часового режима электровоза в kW	22	22
Мощность длительного режима электровоза в kW	11,7	11,7

РЕЛЬСОВЫЙ ТРАНСПОРТ

Подвижной состав. В соответствии с перевозимыми материалами (порода, инертные, бетон, тюбинги и блоки) на строительстве были установлены три основных типа подвижного состава: вагонетки для грунта, вагонетки для бетона (бетоновозки), тележки-платформы для перевозки тюбингов и блоков.

На Метрострое применяются вагонетки типа Горный Коппель емкостью 0,5—0,6 $м^3$ (рис. 546). Полускаты этих вагонеток снабжены коническими роликоподшипниками, закладываемыми по два в ступицу колеса и хорошо воспринимающими как осевую, так и радиальную нагрузку. Установленные на этих полускатах вагонетки имеют весьма малое ходовое сопротивление (порядка 0,006—0,008). Центр тяжести вагонетки размещен так, что опрокидывание кузова с грунтом не требует больших усилий.

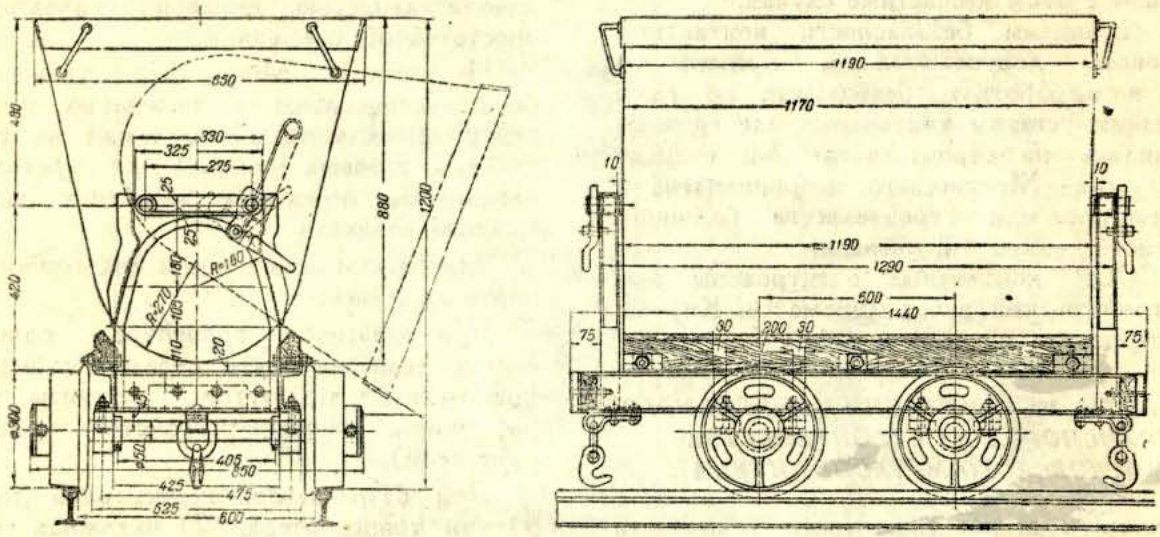


Рис. 546. Опрокидная вагонетка Горный Коппель

Габариты вагонетки следующие: ширина 850 *мм*, длина 1 440 *мм*, высота, считая от головки рельса, 1 200 *мм*.

Для перевозки бетона применялась вагонетка-бетоновозка емкостью 0,25 $м^3$; кузов этой вагонетки имел лобовую стенку, образующую при опрокидывании угол 45° с горизонтом. Кузов покоился на поворотном круге, так что разгрузка его могла производиться в любую сторону.

Габариты бетоновозки следующие: ширина 1 000 *мм*, длина 710 *мм*, высота 925 *мм*.

Чугунные тюбинги и железобетонные блоки перевозились на особых тележках-платформах (рис. 547, 548), снабженных поворотным кругом, который позволяет устанавливать тюбинг или блок в положение, соответствующее захватному устройству рычага эректора.

Габариты тележки следующие: ширина 850 *мм*, длина 1 780 *мм*, высота 340 *мм*.

Вагонетки для грунта и тележки для перевозки тюбингов снабжены сцепками.

Узкоколейные рельсовые пути. Стандартная колея, принятая на подземном транспорте Метростроя, 600 *мм*.

Тип рельсов рудничный, тяжелый, высотой 91 *мм;* вес 1 *пог. м* 14,78 *кг*.

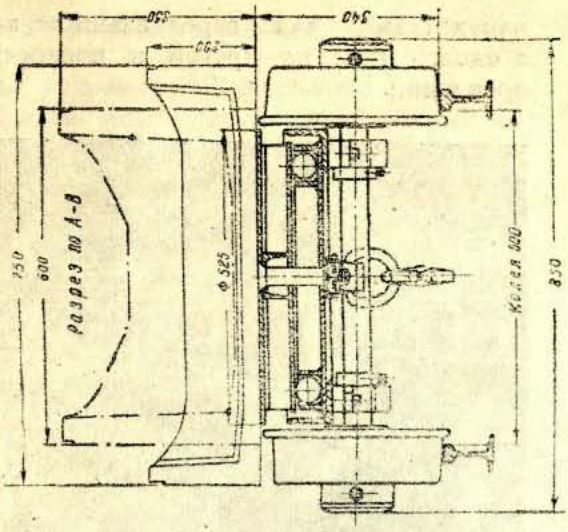
Укладка рельсов производилась на шпалах, расстояние между которыми не превышало 1 *м*. Радиусы кривизны на закруглениях были не менее семикратной жесткой базы вагонетки на механизированных участках пути и не менее десятикратной — на немеханизированных.

Укладка плит и поворотных кругов на пересечениях при работах 2-й и 3-й очереди была заменена стрелочными перевозами.

Принятые для узкоколейных путей стрелочные переводы сведены к двум типам:

одностороннему стрелочному № 601 с маркой крестовины 1/2 (угол 28°4′20″);

симметричному стрелочному № 605 с маркой крестовины 3/5 (угол 33°20′).



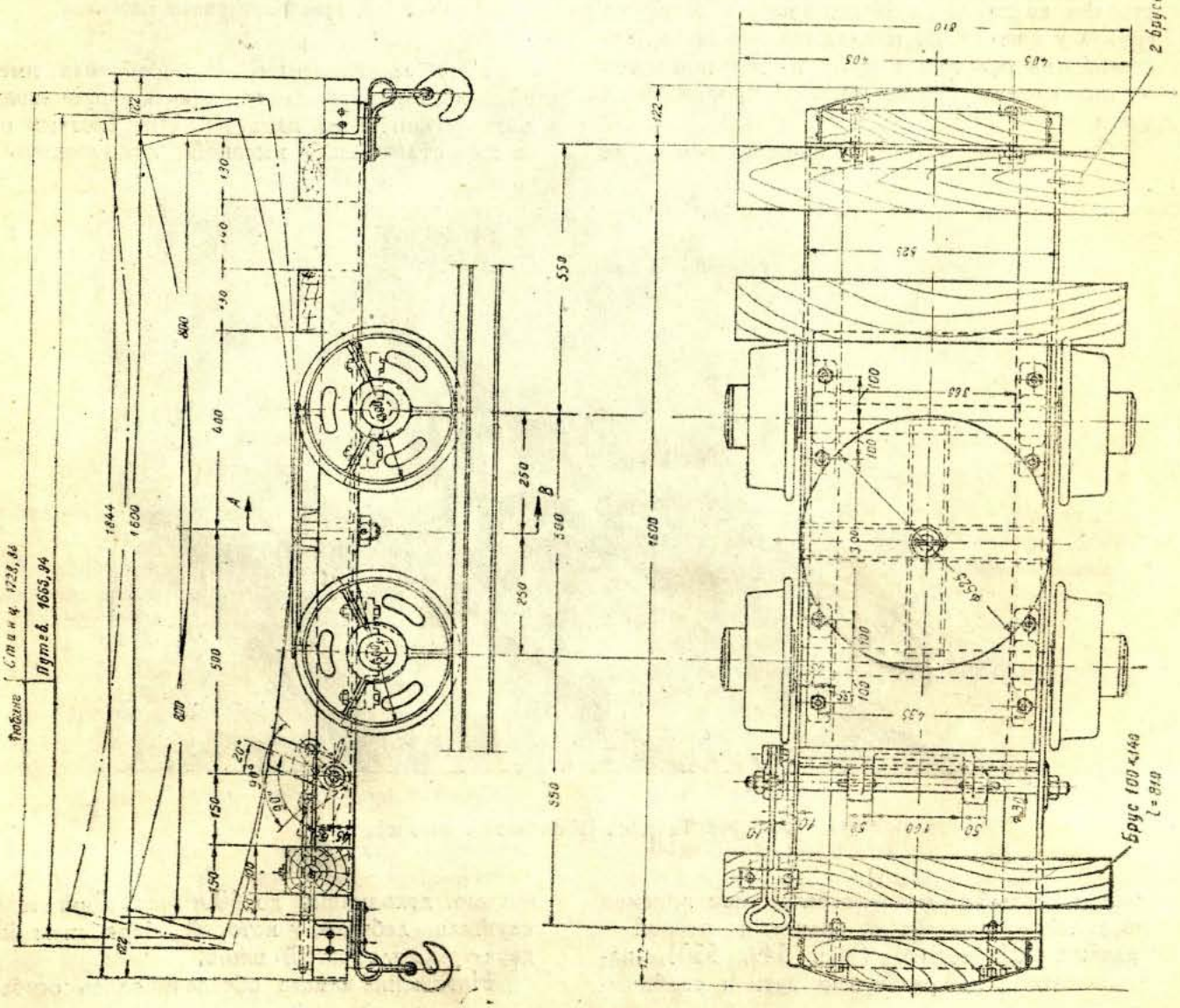


Рис. 547. Тюбинговая платформа

Кроме этого, для попеременной загрузки и выгрузки клетей у стволов с односторонним рудничным двором укладывались перекрестные съезды, монтируемые из четырех стрелок № 601 и одной крестовины.

Крестовины (пересечения) приняты двух типов: один — при пересечении путей под прямым углом (90°), другой — для случая, часто встречающегося на практике, когда одна из осей крестовины является продолжением оси стрелочного перевода; в этом случае крестовина имеет тот же угол, что и стрелочный перевод (т. е. 28°4′20″). Крестовина обоих типов монтировалась на сплошной железной плите толщиной 5 *мм*.

Особо следует упомянуть о передвижных, так называемых скользящих стрелках. Эти стрелки являлись удобными в местах погрузки грунта у щита. Они накладывались непосредственно на рельсовые пути и передвигались по ним систематически по мере продвижения щита.

Скользящие стрелки применялись двух типов: первый из них — стрелка, монтируемая из углового железа на плите, и второй — тележка Шибебюне (рис. 549, 550), накладываемая на рельсовые пути и снабженная катками для передвижения вагонетки с одного пути на другой в поперечном направлении.

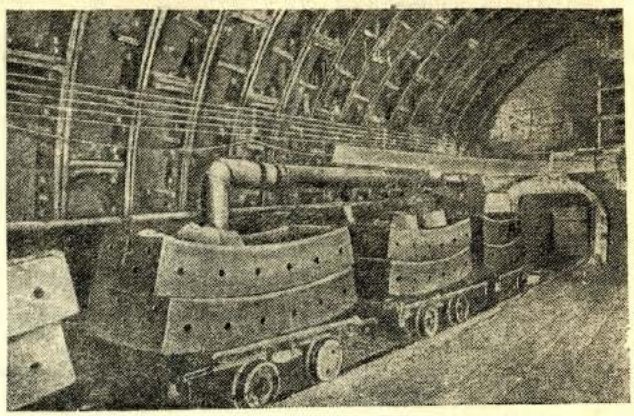


Рис. 548. Транспортировка тюбингов

Тяговые элементы. В выработках, имевших постоянную длину, откатка производилась бесконечным канатом. Эта система откатки отличалась высокой производитель-

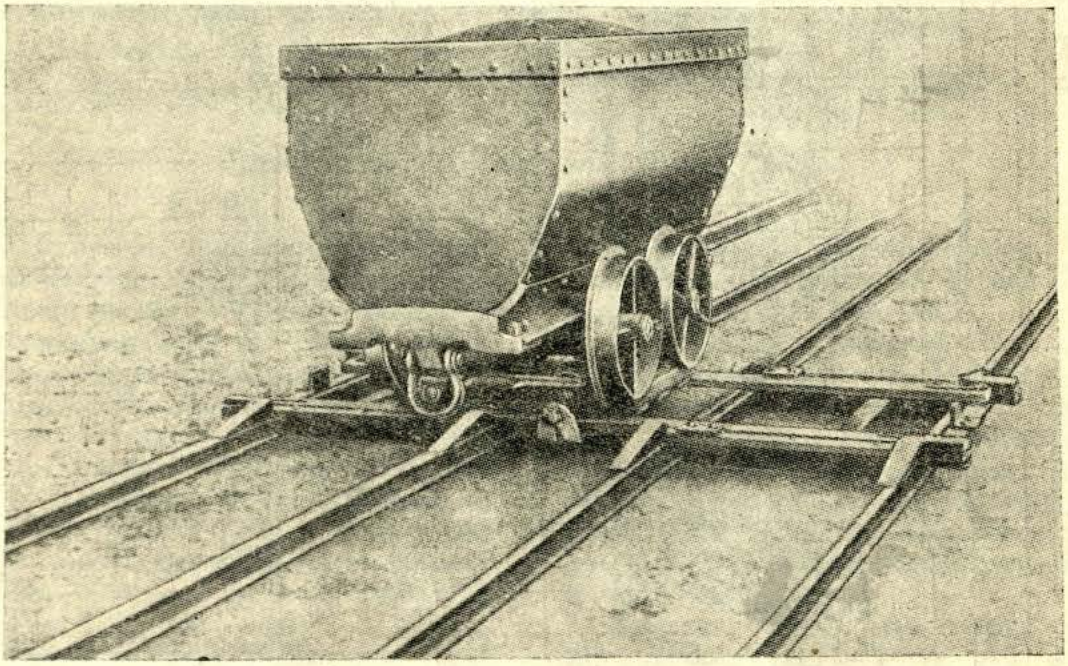


Рис. 549. Тележка Шибебюне с вагонеткой

ностью, доходившей до 60 $м^3$/*час*. Двигателем служила лебедка, у которой барабаном был двух-трехжелобчатый шкив.

Натяжение каната обеспечивалось особым

натяжным устройством (ручным или автоматическим).

Откатка головным и хвостовым канатом осуществлялась либо одной двухбарабанной лебедкой (при длине откатки до 200 *м*), либо двумя однобарабанными лебедками (при длине до 550 *м*).

В первом случае применялись лебедки завода «Свет шахтера», типа РЛ или типа УС-10. В качестве однобарабанной лебедки использовалась лебедка того же завода типа ЛТ-10.

Производительность откатки головным и хвостовым канатом при указанных агрегатах 25—30 $м^3$/*час*.

* * *

На строительстве 3-й и 4-й очередей строительства Московского метрополитена, при расстоянии откатки в тоннеле $>$ 500 *м*, как правило, применяется электровозная тяга троллейного типа.

На 4-й очереди строительства Московского метрополитена основным подвижным сосудом для породы принята вагонетка емкостью 0,75 $м^3$, с глухим кузовом. Процессы загрузки и разгрузки клетей механизированы путем применения цепных компенсаторов, толкателей, самокатных путей и опрокидывателей.

БЕЗРЕЛЬСОВЫЙ ТРАНСПОРТ

Наряду с электровозной и канатной тягой на Метрострое широко применяются ленточные транспортеры, работающие главным образом в передовых штольнях. Конструкция транспортера состоит из натяжной (хвостовой) части, приводной головки и средних секций длиной по 2,5 *м*. Привод с мотором мощностью 10 kW рассчитан на длину транспортера в 150 *м*. Производительность его при ширине ленты 400 *мм* около 40 $м^3$/*час*.

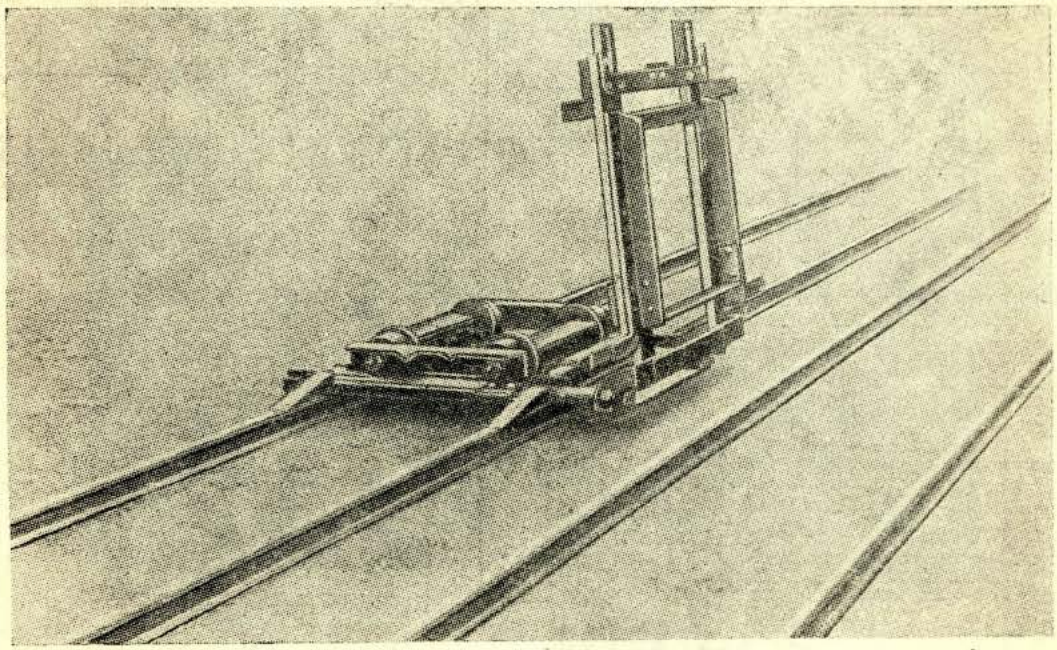


Рис. 550. Тележка Шибебюне

Устанавливались конвейеры главным образом при проходке станционных тоннелей (рис. 551, 552, 553).

Материалом для ленты обычно служила прорезиненная ткань (балата), имеющая пять-шесть прокладок.

На 3-й очереди строительства в широком масштабе применялся транспорт, обслуживаемый контактными электровозами (на перегонных тоннелях), и конвейерный транспорт в виде металлических пластинчатых и скребковых транспортеров (на строительстве станций метрополитена).

* * *

В заключение следует подчеркнуть, что вопрос внутритоннельного транспорта не представляется в настоящее время проблемным. Транспортировка грунта, доставка материалов эффективно решаются как применением электровозной тяги троллейного или аккумуляторного типа, так и широким применением конвейерного транспорта.

Особо следует обратить внимание на возможность внедрения в наши условия гидротранспорта, получающего применение за границей (например, в тоннеле под Монбланом) и у нас в СССР в шахтном строительстве. Порода от забоя в виде пульпы гидравлически направляется до шахтного ствола по лоткам самотеком или же по трубам с помощью землесоса. Затем при использовании сжатого воздуха воздушным элеватором, работающим на принципе эрлифта, пульпа гонится вверх по трубам в бункера на шахтной поверхности. Большая производительность и непрерывность работы гидротранспорта обеспечивают большой технико-производственный и экономический эффект.

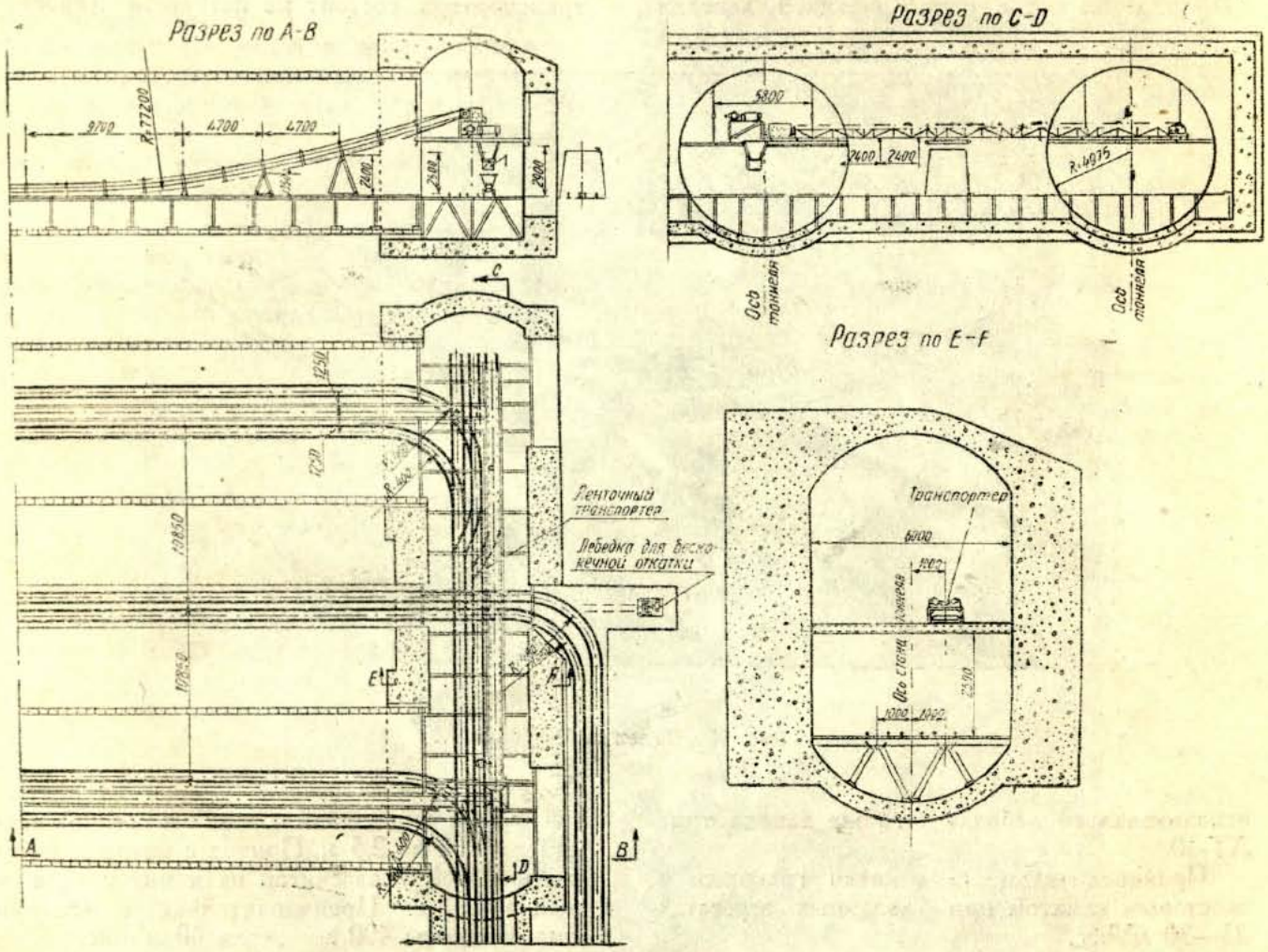


Рис. 551. Конвейерный транспорт в строящемся станционном тоннеле Московского метрополитена

Гидравлическая транспортировка породы была успешно осуществлена при проходке тоннелей Майниполис (США) протяжением до 22 км. Сама разработка забоя в песчанике велась отбойными молотками с применением взрывных работ. Однако при подаче к разрушенной породе в забое воды образовывалась песчаная пульпа, легко удаляемая по трубам на поверхность при помощи насосов (рис. 556 а, б).

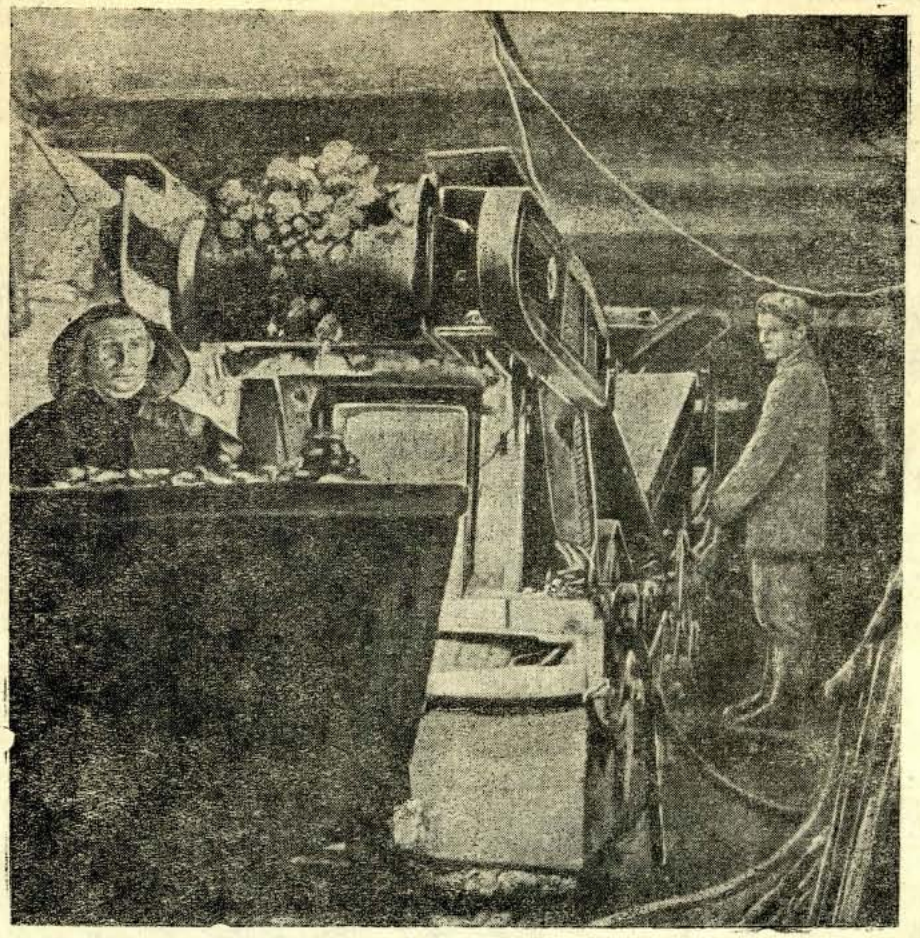


Рис. 552. Конвейерный транспорт в тоннеле Метростроя

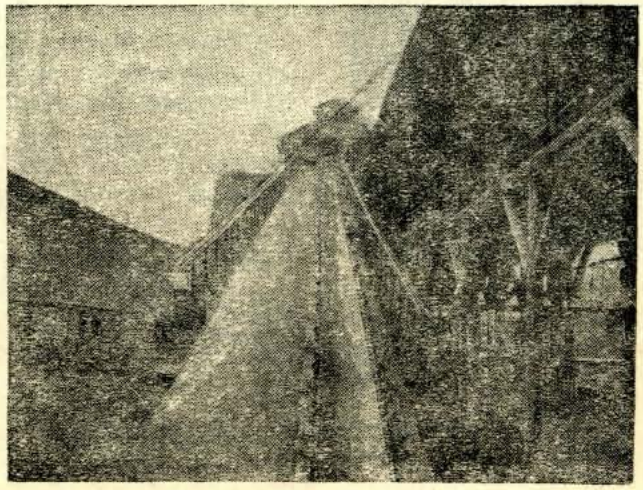


Рис. 553. Конвейер, выдающий породу по наклонному тоннелю

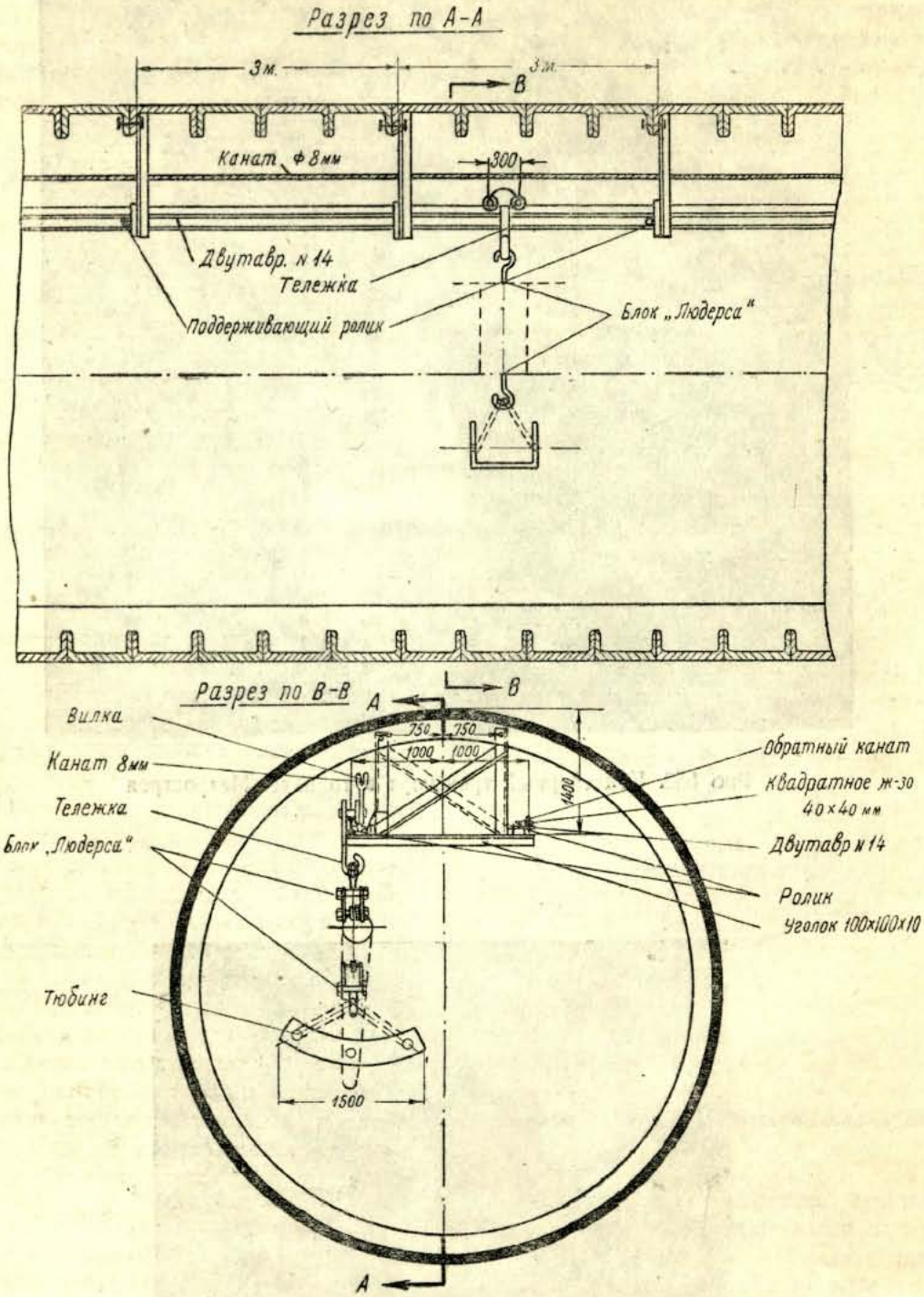


Рис. 554. Монорельсовый транспорт в тоннеле

Из образованного у забоя зумпфа пульпа по трубопроводам центробежным насосом подавалась в бункера на поверхность. Эти насосы имели вместо стальных дисков резино-

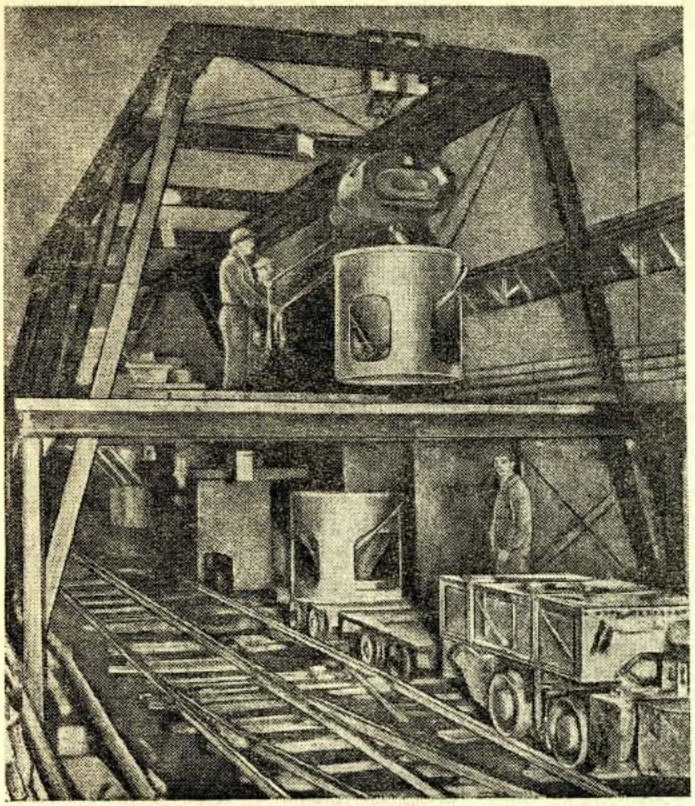


Рис. 555. Монорельсовый транспорт в тоннеле

вые, так как стальные быстро изнашивались (абразивное действие песка). Применялись насосы с электроприводом производительностью 2 $м^3$ в минуту. По тоннелю были уложены пульповоды диаметром 100 *мм* на протяжении около 1 800 *м*. Гидравлический транспорт породы применялся при проходке перегонных тоннелей шахты № 7—8 Покровского радиуса 3-й очереди строительства Московского метрополитена.

Этот вид гидротранспорта оказался в местных условиях целесоответствующим.

Применение системы подвесного монорельсового транспорта в тоннеле см. рис. 554, 555.

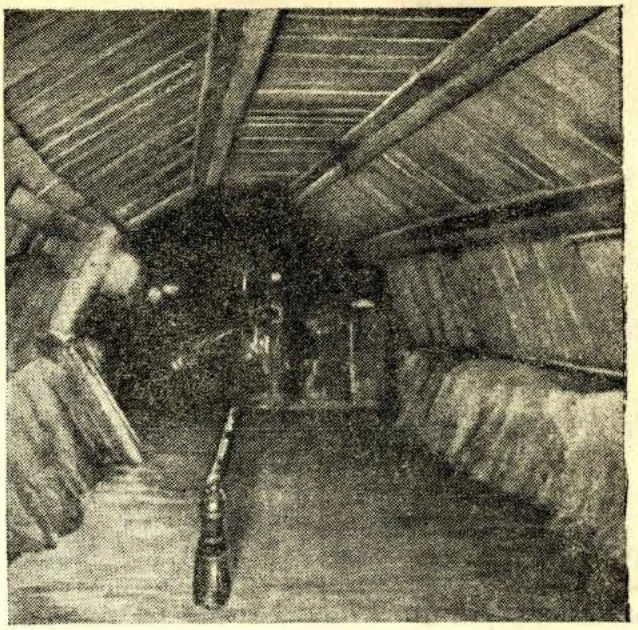


Рис. 556а. Общий вид работ по гидромеханизации в тоннельном забое

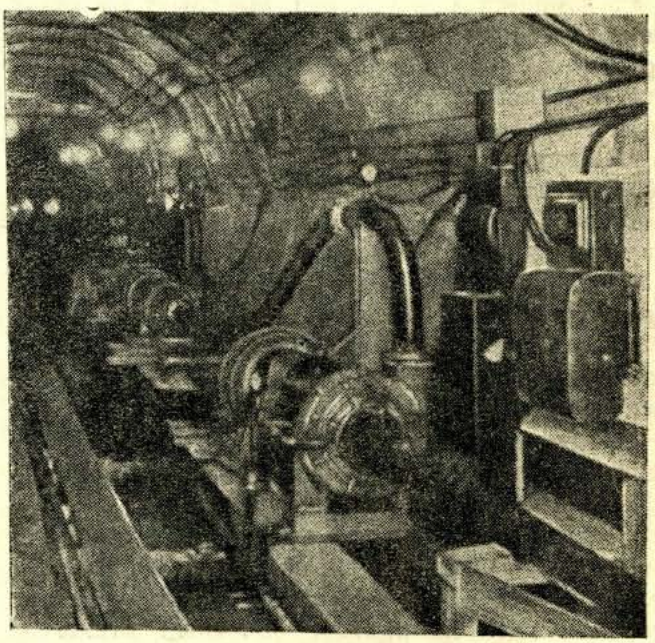


Рис. 556 б. Насосная установка гидравлического транспорта породы в тоннеле

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИЗАЦИИ ТОННЕЛЬНЫХ БЕТОННЫХ РАБОТ

СИСТЕМА ПОДВИЖНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФОРМ

Стремление упростить приемы временных креплений при сооружении бетонных конструкций привело к внедрению подвижных металлических форм. Особенно большие достижения в этой области наблюдаются в советской и американской практике.

Применение подвижных металлических форм в тоннельном строительстве дает наряду с экономическим эффектом выигрыш во времени, а главное — приводит к ускорению сооружения постоянной тоннельной обделки, что в условиях нарастающего горного давления имеет иногда первостепенное значение.

Формы для бетонирования тоннельных обделок составляются из системы металлической опалубки с кружалами, установленными на специальных тележках, сообщающих формам необходимую подвижность. Опалубка состоит из металлических листов толщиной 3 *мм*, а кружала в виде ребер — из сортового железа, при больших пролетах — в виде сегментообразных решетчатых конструкций.

Подвижные формы устраиваются различных конструкций, в зависимости от профиля и длины прокладываемого тоннеля.

Отрыв опалубки от бетона и установка форм достигаются приспособлениями, входящими непосредственно в самую конструкцию форм, в виде домкратов, винтовых стяжек, хомутов и т. п.

Подвижная опалубка (системы Блоу Нокс) нашла большое применение в метрополитеном строительстве при постройке тоннелей как закрытым, так и открытым способом. В первом случае, в зависимости от поперечного сечения тоннеля, формы устраиваются раздельными или полными для бетонирования обделки одним приемом.

Заслуживает внимания производство механизированных бетонных работ по системе Блоу Нокс в тоннелях Свенси и Хувер Дам.

Два тоннеля Свенси имеют диаметр 3,4 *м* в свету при толщине бетонного свода в 25 *см*. Бетонирование производилось четырьмя подвижными формами системы Блоу Нокс, длиной по 3 *м*. Бетон подавался для секций длиной 3 *м* при объеме 20 $м^3$ в один прием.

Перемещение и установка подвижных форм производились при помощи электровоза (по колее в 60 *см*) и продолжались 2 часа. Бетон держался в формах примерно 30 часов.

Опалубка из плит размерами 0,6 × 1 *м* была установлена на согнутых в кружала швеллерах через 0,8 *м*. Опалубка перемещалась джеками как горизонтального, так и вертикального перемещения. Впереди кружал — подъемная платформа, которая при помощи мотора в 5 *л. с.* (через 4 каната) поднимала вагонетку с бетоном на второй ярус. Бетонировка свода производилась пневматически.

Подвижные формы системы Блоу Нокс с успехом были использованы при сооружении бетонной обделки тоннеля на Хувер Дам (США). Для приготовления форм было затрачено до 2 000 *т* металла. Стоимость оборудования, связанного с их изготовлением, составила 325 000 долларов. Общая длина четырех тоннелей 4,7 *км*.

Поперечное сечение, круглой формы, диаметром 17,06 *м*. При толщине бетонной обделки в 0,91 *м* сечение в свету 15,24 *м*.

Процесс бетонирования сечения тоннеля разделялся на три части: 1) нижняя часть по сегменту (74°) образует лоток — 9,5 $м^3$/*пог. м*, 2) стены по углу в 88° — 22,6 $м^3$/*пог. м*, 3) часть свода по углу 110° — 14,4 $м^3$/*пог. м*. Бетонные заводы были расположены у порталов тоннелей.

Первый этап бетонных работ по устройству лотка заключался в образовании двух бетонных лент, являвшихся основанием под путь десятитонного электрического крана с максимальной скоростью движения 90 *м/мин*. Каждая бетонная лента располагалась в расстоянии 4,8 *м* от оси тоннеля.

По бетонным лентам укладывались брусья 15 × 30 *см*, к которым пришивались рельсы для крана (рис. 557).

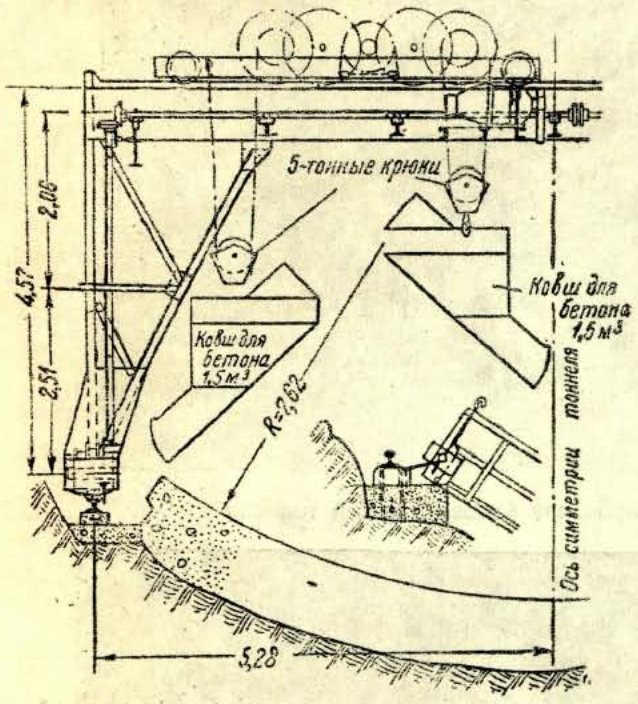


Рис. 557. Подвижная платформа для бетонирования лотка тоннеля

К путям приспособлялись продольные формы лотка (секциями в 3 *м* и высотой в 0,6 *м*). Поперечные формы устанавливались в соответствии с проектным очертанием бетонируемого тоннеля и располагались на взаимном расстоянии 8,1 *м*.

Вогнутая поверхность лотка контролировалась подвижными кружалами на вагонных скатах, работающими по принципу скрепера. После бетонирования лоток покрывался защитным слоем песка в 0,9 *м*. Затем производилась набивка по специальным формам бетона для боковых частей обделки (рис. 558, 559). Предварительно по лотку укладывались две бетонные ленты шириной в 5,48 *м* на расстоянии 3,5 *м* от центра для помещения на них рельсов и образования колеи в 7 *м*. Длина форм 24,4 *м*, высота 15,2 *м*. Общий вес конструкции 350 *т*.

Опалубка форм для боковых стен состояла из стальных плит толщиной в 6 *мм*. Для использования форм на кривой они разделялись на пять секций: три по 6,1 *м* и две по 3,02 *м*. Получаемые между ними зазоры регулировались деревянными приспособлениями. Поверху стальная конструкция подвижных форм была оборудована портальным краном мощностью 5 *т* (со скоростью 90 *м/мин*).

Бетон поднимали ковшами емкостью по 1,5 $м^3$ к специальным шарнирным желобам, направляемым к верху форм для стен тоннеля. Формы были оборудованы специальными винтовыми домкратами для регулировки установки, снятия форм и распределения давления сырого бетона. Для сопряжения будущего свода с боковыми стенами устраивался специальный замок шириной 25 *см* и толщиной 5 *см*. Продолжительность бетонирования обеих боковых частей тоннеля по длине форм — 24,4 часа. Форма поддерживала бетон 10 часов.

Полная продолжительность цикла — установки, бетонирования и снятия форм — 50 часов. Верхний участок тоннельной обделки и части свода бетонировались пневматическим путем. Подвижные формы для свода представляли собой конструкцию, смонтированную на платформе и перемещающуюся по тем же ходовым рельсам, что и формы для стен тоннеля (рис. 560, 561).

На платформе поддерживали домкратами кружальную стальную опалубку свода, цемент-пушку и специальный ковш емкостью 1,5 $м^3$, тележку для трубопроводов.

Имелись два «воздушных» цилиндра для подачи необходимого объема сжатого воздуха при выгрузке определенной порции бетона. Бетон через трубу диаметром 15 *см* подавался к формам.

Бетонная обделка покрывалась пневматическим способом слоем асфальта.

Объем бетонных работ:

лоток	59 000 $м^3$
боковые части	109 000 „
свод	53 000 „
Итого . .	221 000 $м^3$

За 24 часа укладывалось 1 560 $м^3$ бетона (максимально 2 500 $м^3$).

* * *

Большой интерес представляют телескопические формы системы Блоу Нокс для открытого способа работ.

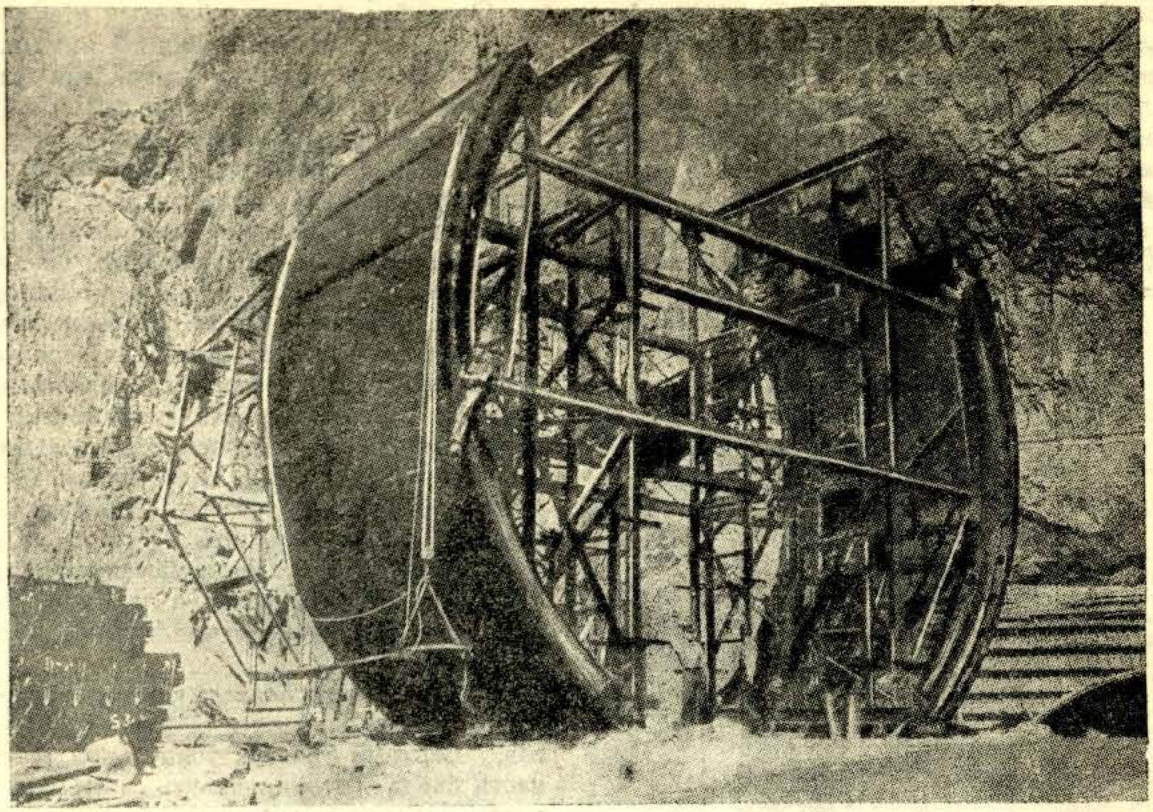


Рис. 558. Подвижная опалубка для бетонирования боковых частей тоннеля

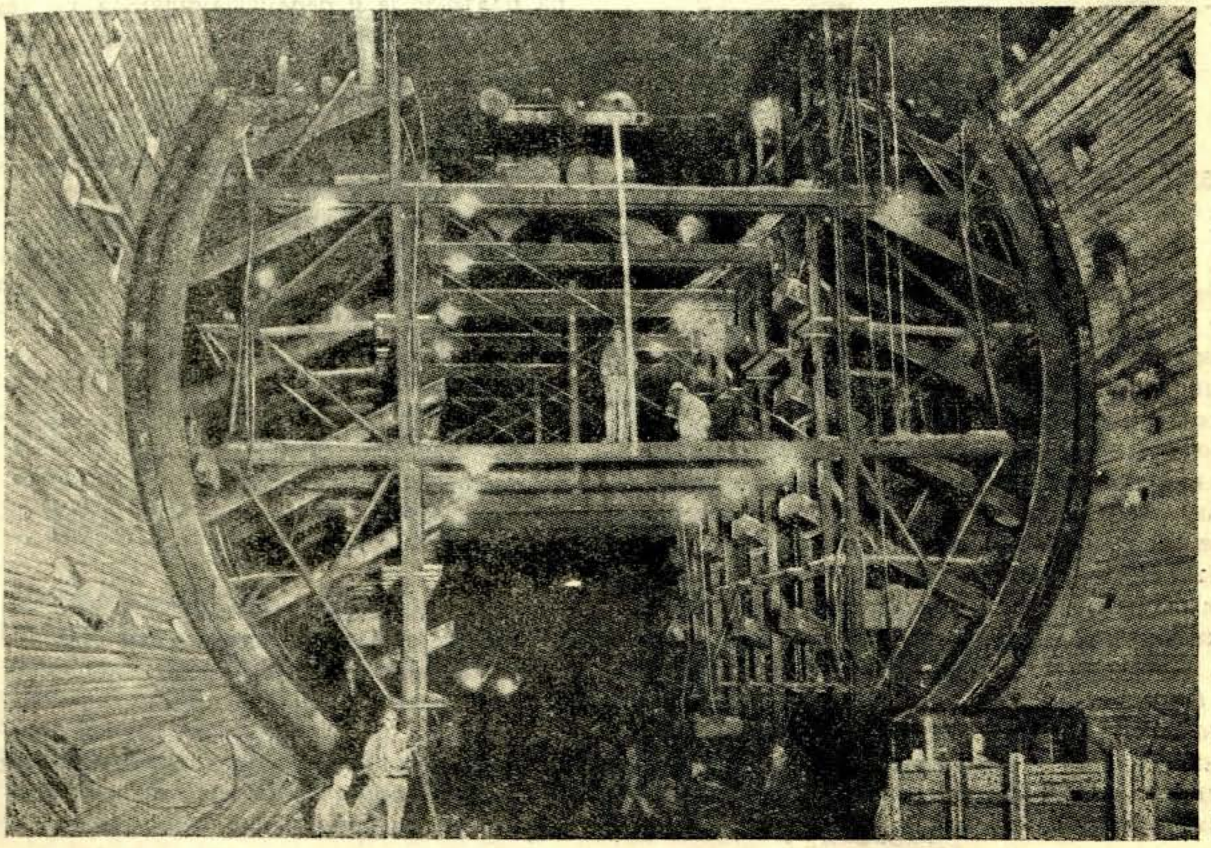


Рис. 559. Подвижная опалубка для бетонирования боковых частей тоннеля

Для сооружения тоннеля диаметром 10 *м* телескопические формы применялись следующим образом.

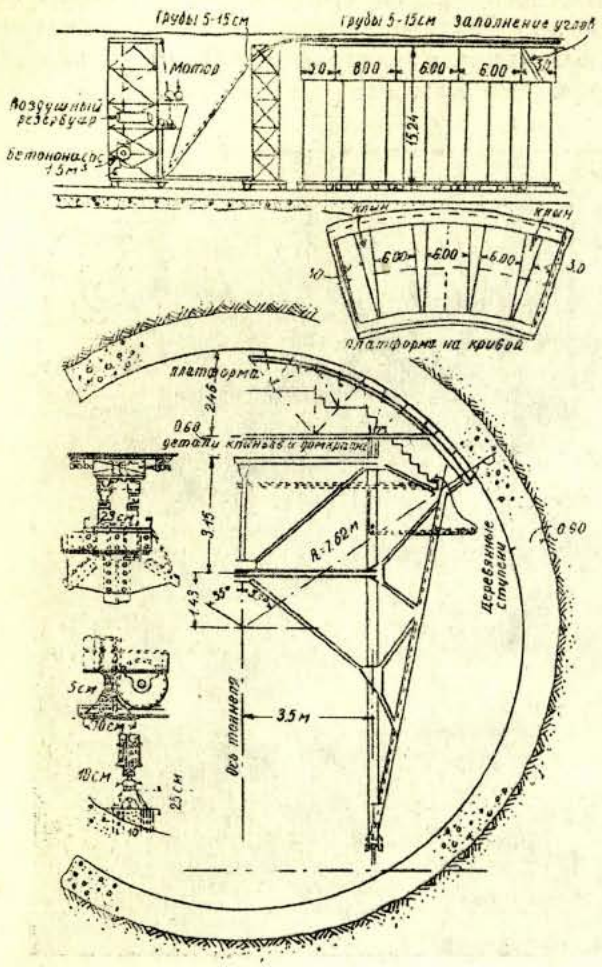


Рис. 560. Подвижная опалубка для бетонирования свода тоннеля

Впереди находилась перемещаемая по рельсам внутренняя металлическая опалубка с кружальными фермами длиной 10 *м*. Рядом была расположена такая же опалубка для вязки арматуры железобетонной обделки тоннеля. Сзади находилась внешняя подвижная опалубка, под которой производилось бетонирование тоннельной обделки. Вместе с внешней подвижной опалубкой по рельсам перемещалась портальная рама, на которой расположен бетонный завод требуемой производительности (рис. 562).

Указанная телескопическая система с непрерывным циклом работ позволяет достигнуть 10 *м* в сутки готового тоннеля.

В наших условиях развернутого тоннельного строительства широкое применение подвижных форм имеет решающее значение, как создающее темпы и эффективность производства бетонных работ.

* * *

Подвижная опалубка, принятая для сооружения железобетонной оболочки в тоннелях Московского метрополитена, представляет собой конструкцию подвижных металлических кружал для бетонирования железобетонной конструкции толщиной 20 *см* при внутреннем диаметре тоннеля 5,1 *м* и состоит из двух совершенно самостоятельных частей: тележки и кожуха (рис. 563, 564).

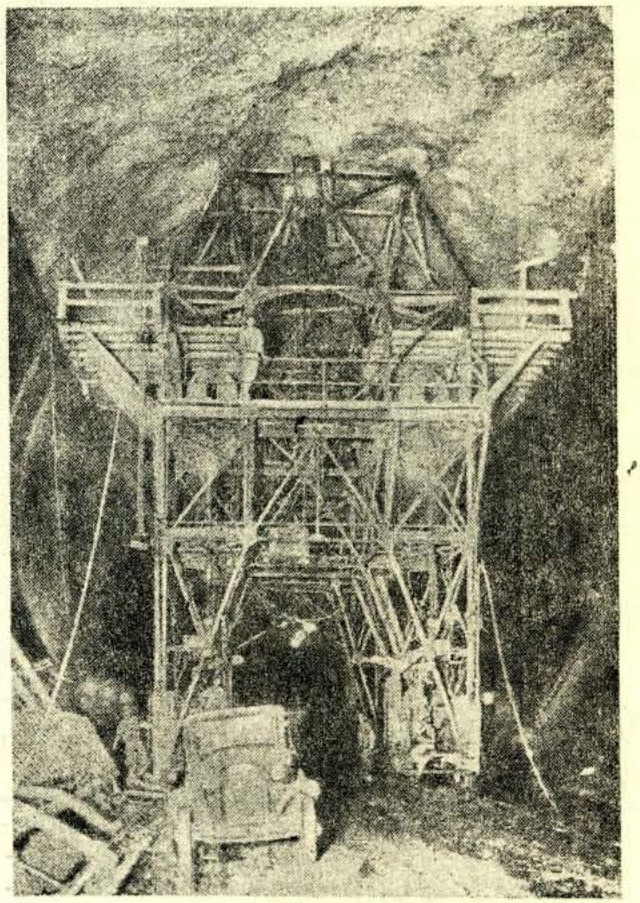


Рис. 561. Подвижная опалубка для бетонирования свода тоннеля

Тележка представляет собою жесткую прямоугольного сечения раму, собранную из швеллеров № 14 и 16. Для увеличения жесткости тележки во всех направлениях рама связана подкосами и связями в горизонталь-

ной плоскости. Тележка передвигается вдоль тоннеля по рельсам, расположенным на взаимном расстоянии 2 240 *мм*. Расстояние между осями стоек вдоль тоннеля 3 600 *мм*. Верхний ригель рамы дан на расстоянии 1,8 *м* от замка сводчатой части рубашки и представляет собою несущую балку рабочей площадки, с которой и производится укладка бетона. Одновременно верхний ригель является опорой для вертикального домкрата, поддерживающего кожух опалубки.

Средний ригель, так же как и верхний, состоящий из двух швеллеров № 16, является распорным элементом, воспринимающим реакцию горизонтальных домкратов, распирающих кожух.

Рабочая площадка (досчатый настил) служит для размещения бетононасосов (при нагнетании бетона механизированным способом) или для приема бетона при ручном способе укладки. В центре площадки оставлено отверстие, служащее для вертикального подъема бетона, подвозимого в бетоновозках к тележке по двум узкоколейным путям, уложенным на всем протяжении тоннеля и проходящим между стойками тележки.

Кожух представляет собою систему, состоящую из пяти параллельно расположенных, согнутых по требуемому очертанию балок из швеллеров. Расстояние между балками вдоль тоннеля составляет 900 *мм*. К каркасу приварено листовое железо толщиной 3 *мм*, составляющее собственно опалубку для бетонирования.

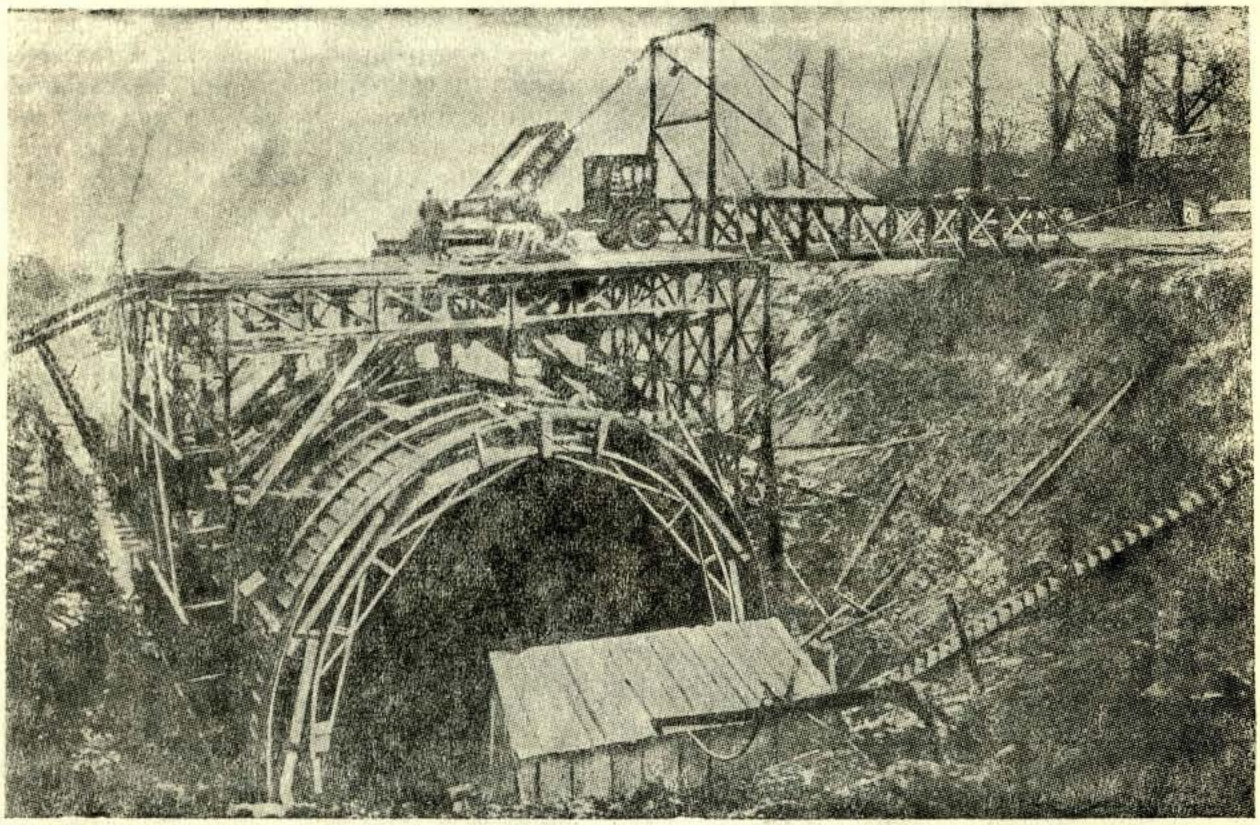
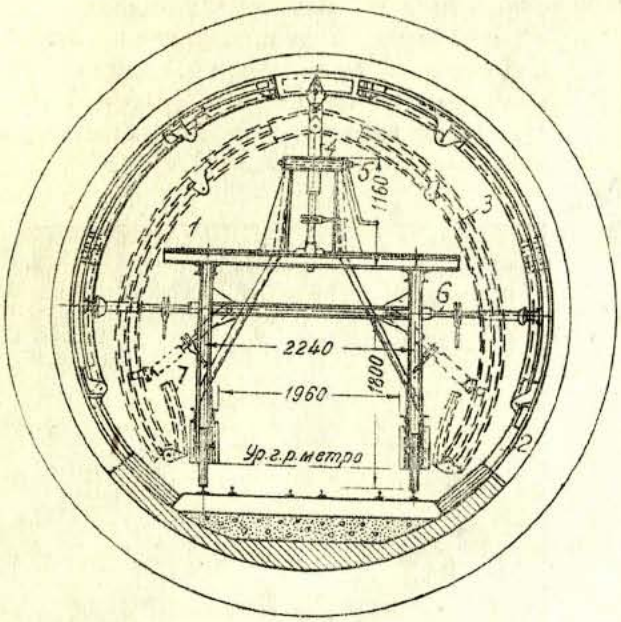


Рис. 562. Подвижная опалубка для тоннеля сводчатого профиля в открытом котловане

Две крайние балки каркаса согнуты из швеллеров № 22 и являются основными несущими арками. Статическая схема этих балок — трехшарнирная арка с одним центральным и двумя нижними шарнирами. Помимо указанных трех шарниров, арка имеет еще два шарнира, расположенных в местах наибольшего приближения габарита подвижного состава к рубашке и служит для возможного перелома опалубки (изменения очертания) в наиболее узких местах габарита. Следует заметить, что в целях обеспечения неизменяемости системы (изменяемой при пяти шарнирах) указанные два шарни-

ра, помимо скоб, имеют винтовые стяжки, закрепляющие опалубку в нужном положении и сохраняющие жесткость и невозможность поворота в месте шарнира.

Крайние дуги, расположенные на взаимном расстоянии в 3 600 *мм*, соединены между собой двумя балками из I № 22, расположенными параллельно оси тоннеля, в плоскости арок, на расстоянии 500 *мм* от центрального шарнира. Балки эти служат опорой трем промежуточным аркам, имеющим шарниры на одних осях с крайними арками. Эти арки согнуты из швеллера № 14. Такая конструкция кожуха оставляет совершенно свободным весь замок сводчатой части. Укладка бетона в него является наиболее трудоемкой.



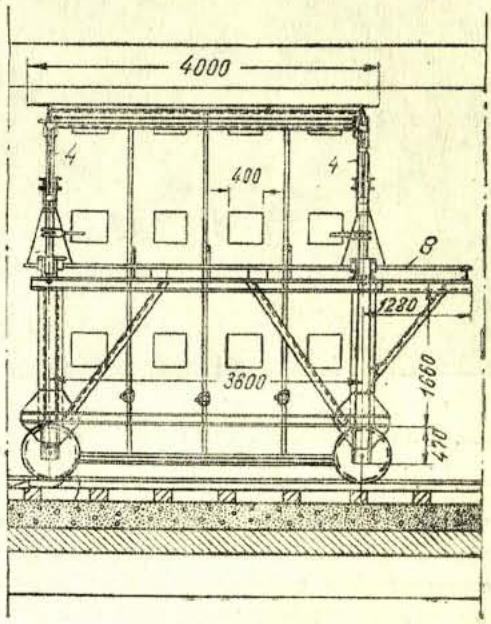


Рис. 563. Подвижная опалубка для бетонирования железобетонной рубашки тоннелей Московского метрополитена:

1 — тележка; *2* — кожух в установленном виде; *3* — кожух в сложенном виде (показан пунктиром); *4* — вертикальный домкрат; *5* — горизонтальный винт домкрата; *6* — горизонтальный домкрат; *7* — откидной щиток (фартук); *8* — площадка для установки лебедки

В целях осуществления укладки бетона вручную в кожухе устроены двадцать четыре окна размерами 400 × 400 *мм*, через которые бетон укладывается за кожух. По миновании надобности окна плотно прикрываются.

Длина опалубки, соответствующая длине одновременно бетонируемой части рубашки, $l = 4$ *м*. Расстояние между опорными домкратами и крайними арками кожуха 3 600 *мм*.

Эта система подвижных кружал служит для укладки бетона рубашки на $^3/_4$ периметра. Нижняя часть рубашки служит опорой для шпал и рельсов, по коим опалубка передвигается, и поэтому должна быть изготовлена заранее. Кроме того, заранее должна быть проделана работа по оклейке гидроизоляции и укладке арматуры рубашки.

Впереди тележки для бетонирования продвигаются две связанные между собой тележки, служащие для оклейки изоляции и укладки арматуры. Обе тележки по своей конструкции однотипны и представляют собою легкие катучие подмости, составленные из швеллеров длиной по 4 *м*, соответствующие длине тележки для бетонирования.

Каждая тележка поддерживает по три дуги, согнутые по концентричной обделке тоннеля окружности, с приболченными к дуге легкими винтовыми домкратами.

Оклейка обделки изоляцией производится обычным способом. Назначение домкратов — прижимать продольные планки, поддерживающие изоляцию и препятствующие провисанию последней.

За тележкой для оклейки изоляции следует тележка для укладки арматуры конструкции железобетонной рубашки. Домкраты соединены между собой трубами (диаметром 50 *мм*), служащими для поддержания арматуры при вязке последней. Кроме того, на дугах расположены домкраты, поддержи-

вающие изоляцию во время вязки арматуры, во избежание провисания изоляции.

По окончании вязки арматуры, когда жесткость связанной кольцом арматуры достаточна для восприятия собственного веса и обеспечивает изоляцию от провисания,

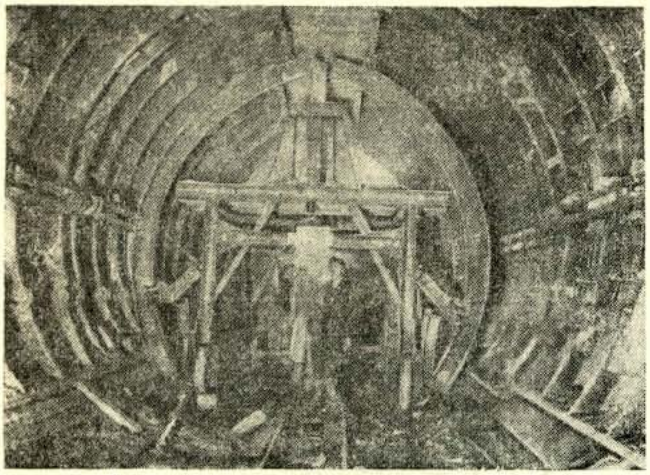


Рис. 564. Вид подвижной опалубки в тоннеле Московского метрополитена

все домкраты подвинчиваются, и тележка передвигается на участок тоннеля, предварительно оклеенный с первой тележки, и становится под укладку арматуры.

На армированный участок устанавливается тележка для бетонирования рубашки.

Процесс бетонирования рубашки происходит следующим образом. Тележка подводит к месту укладки бетона кожух в сложенном виде. Кожух на тележке поддерживается при помощи шести домкратов (двух вертикальных и четырех горизонтальных). Установка кожуха в требуемое положение достигается подвинчиванием вертикальных домкратов, поднимающих кожух, и горизонтальных домкратов, распирающих последний. Отклонение опалубки в стороны достигается работой горизонтального винта, передвигающего головку вертикального домкрата, шарнирно опирающегося на тележку. Ход винта обеспечивает отклонение головки домкрата по 200 *мм* в обе стороны. Отклонения в вертикальной плоскости достигаются соответствующим выдвижением вертикального домкрата. Указанный механизм (как это ясно из вышеизложенного) позволяет перемещать верхние, центральные шарниры в любое положение, в требуемых пределах. Окончательная установка кожуха в проектное положение достигается соответственным выдвижением горизонтальных домкратов. По окончании установки кожуха откидываются нижние щитки, и в этом положении опалубка поддерживается десятью бутылочными винтовыми домкратами, упирающимися в торцы шпал.

Бетон подвозится к тележке в бетоновозах. Через окаймляющие замок свода балки перекидывается поперечная балочка с блоком, поддерживающим трос, опущенный через отверстие в рабочей площадке. Тросом с крюками подхватывается бетоновозка; подъем ее осуществляется ручной лебедкой, размещенной на консоли рабочей площадки. Поднятая вагонетка опрокидывается на рабочей площадке (рис. 565).

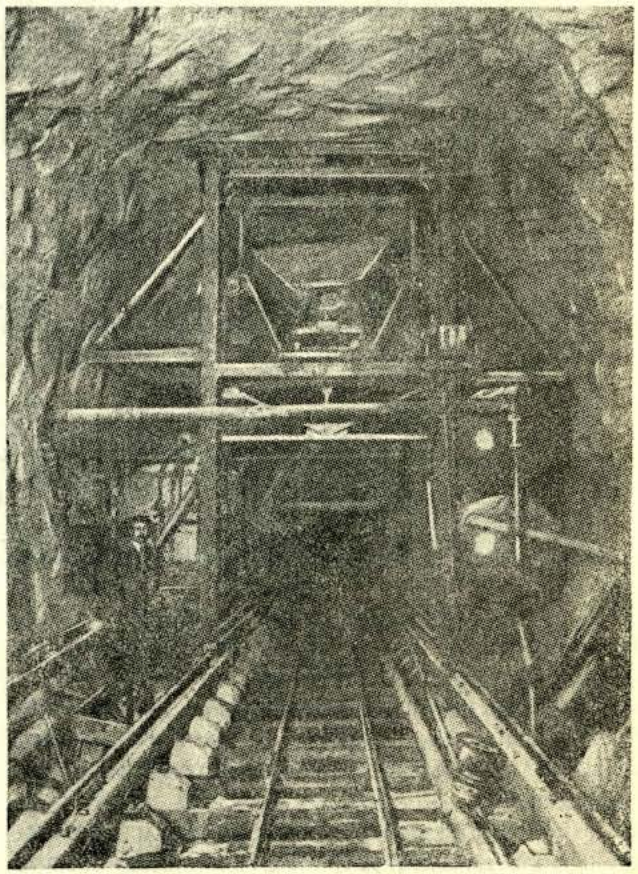


Рис. 565. Подъемник для подачи бетона на верхний горизонт тоннеля

В нижнюю часть опалубки бетон подается по подвесным желобам через нижние окна кожуха. Участки рубашки между горизонтальным диаметром и замковой частью заполняются непосредственно при забрасывании бетона в окна, а в некоторых случаях

для ускорения и облегчения работы бетон подается вручную в лотки, подвешенные к окнам.

Замковая часть заполняется с торца, небольшими по длине опалубки участками, с постепенной укладкой обтесанных по кри-

домкраты, в течение 3 дней, после чего кожух удаляется. Удаление кожуха производится той же тележкой. Для этого тележка устанавливается под кожухом, верхний домкрат подвинчивается под ось центрального шарнира и боковые домкраты присоединяются

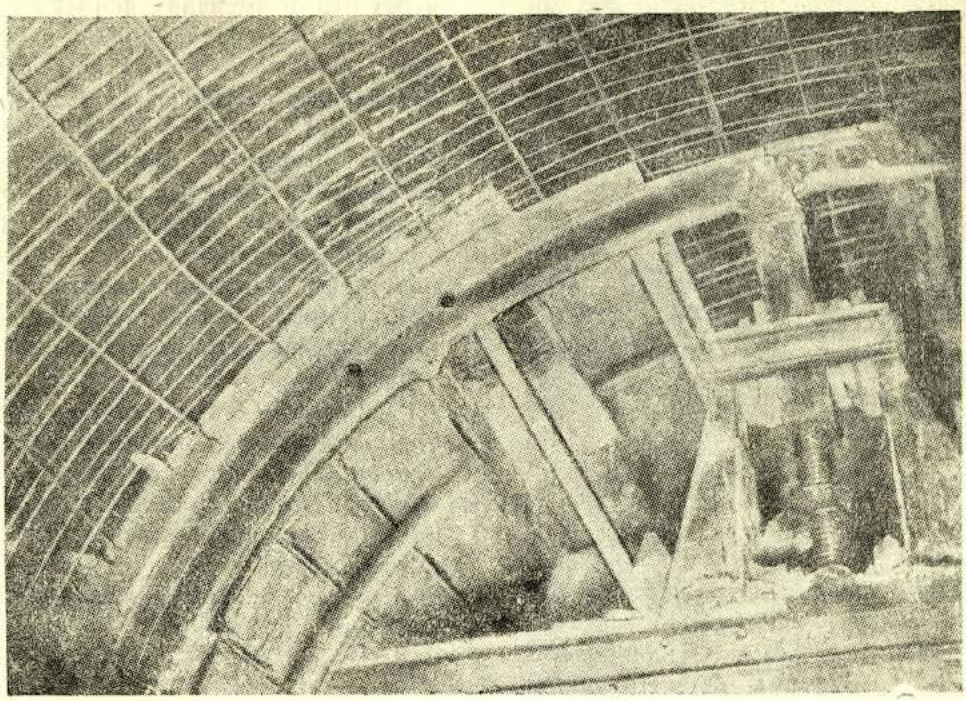


Рис. 566. Опалубка сводчатой части тоннеля

вой досок, опирающихся на уголки, приваренные к продольным, обрамляющим замковую часть балкам (рис. 566). Этим способом достигается увеличение фронта работ (одновременная укладка бетона в нескольких местах) и тем самым ускорение наиболее трудоемкой части работ.

Бетонирование одной секции опалубки длиной 4 *м* может быть произведено в течение пяти часов. Уплотняется бетон вибраторами, прикрепленными к каркасу кожуха.

По окончании процесса бетонирования тележка и кожух разъединяются, домкраты подвинчиваются (разъединение боковых домкратов производится удалением шарнира, присоединяющего домкрат к кожуху; верхний домкрат свободно соединен с осью центрального шарнира) и тележка удаляется. Процесс твердения бетона продолжается при поддержании рубашки кожухом, который опирается только на нижние бутылочные

к кожуху. В этом положении подхваченный домкратами тележки кожух освобождается от нижних опорных домкратов, нижний щиток поднимается, постепенным свинчиванием вертикальных и горизонтальных домкратов кожух складывается в такое положение, что тележка со сложенным кожухом проходит свободно под другими установленными впереди кожухами и перевозит сложенный кожух на новый участок.

Таким образом тележка обслуживает пять кожухов длиной $l = 4$ *м*, что при укладке бетона и его твердении в течение 3 дней обеспечивает ежедневное выполнение до 7 *пог. м* рубашки.

При необходимости большей выдержки бетона количество кожухов в одном комплекте (тележка и кожухи) соответственно увеличивается.

Следует отметить большой шаг вперед в этой части по сравнению со стационарной деревянной опалубкой, требующей огром-

ной затраты лесоматериалов и рабочей силы, что сильно замедляет темпы работ. Леса загромождают тоннель, затрудняя транспортировку породы и строительных материалов, и опасны в пожарном отношении.

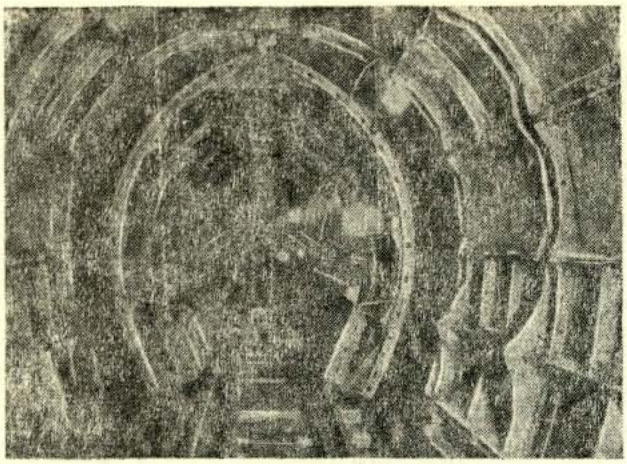


Рис. 567. Съемка подвижной опалубки в тоннеле

Описанная выше подвижная металлическая тележка свободна от указанных недостатков. Проделав положенную часть работы, она может быть разобрана, выдана на поверхность и после требуемого ремонта снова использована. При изменении внутреннего очертания бетонируемой конструкции рубашки подлежат замене только кожухи. Тележка может быть приспособлена и к изменившимся габаритам (рис. 567).

* * *

При сооружении Бостонского подводного тоннеля диаметром 9,4 *м* и протяжением 1 490 *м* в широком масштабе была проведена механизация бетонных работ по устройству железобетонной конструкции кольца внутри стальной обделки тюба, а равно перекрытия проезжей части и подвесного потолка.

Толщина железобетонной обделки 45 *см*. Механизация бетонных работ была проведена широким применением металлических подвижных форм конвейеров для транспортировки бетона (рис. 568), бетоноукладчиков, контейнеров, электрических бетоновозок, вибраторов.

Когда щит продвинулся на 580 *м* и шлюзовая диафрагма была перемещена вперед, в освобожденной от сжатого воздуха зоне тоннеля были развернуты бетонные работы. Бетон в контейнерах подавался к шахте и через бункеры поступал непосредственно в бетоновозки емкостью по $^1/_3$ $м^3$. Составлялись поезда из шести вагонов при аккумуляторном электровозе. Бетонирование большого профиля Бостонского тоннеля производилось при шести фазах:

I фаза — бетонирование нижней части лотка без применения форм;

II фаза — бетонирование боковых частей (ниже проезжей части) при подвижных формах длиной секции в 24 *м* (рис. 569 а);

III и IV фазы — бетонирование боковых частей профиля при подвижных формах; преодоление высоты подачи бетона осуществлялось двумя конвейерами; один из них, с параболическим поясом, имел шарнир, позволявший направить поток бетона в требуемый бункер, откуда кабельными электробетоновозками материал подавался к месту укладки (рис. 569 б).

V фаза — бетонирование замковой части; производилось с пневматикой, применением бетоноукладчиков, подававших бетон *выстрелами (порциями)*; бетон направлялся сначала по сети горизонтальных труб, переходящих в восходящие трубы к ключу свода; производство работ выстрелами было оборудовано световой и звуковой сигнализацией (рис. 569 в);

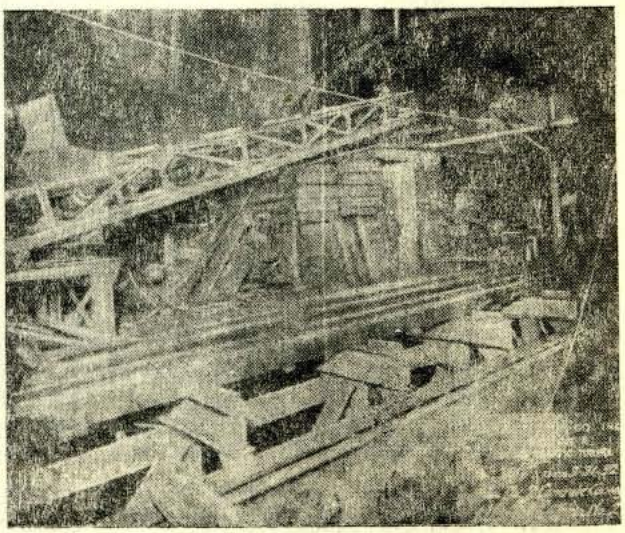


Рис. 568. Подача бетона конвейерами

VI фаза — бетонирование подвесной плиты потолка тоннеля; производилось с применением конвейеров (рис. 568 и 569 г).

В месяц укладывалось в тоннеле в среднем 5 500 $м^3$ бетона.

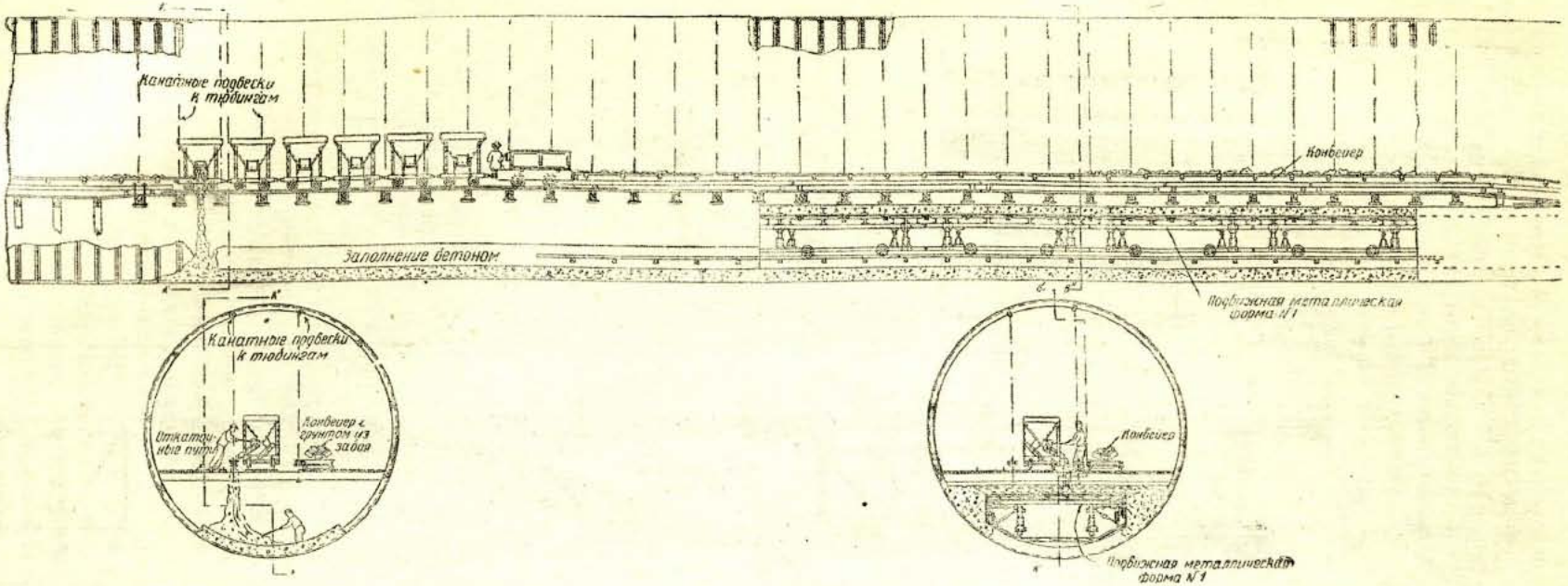


Рис. 569 а. Бостонский тоннель (фазы бетонирования нижней части тоннеля)

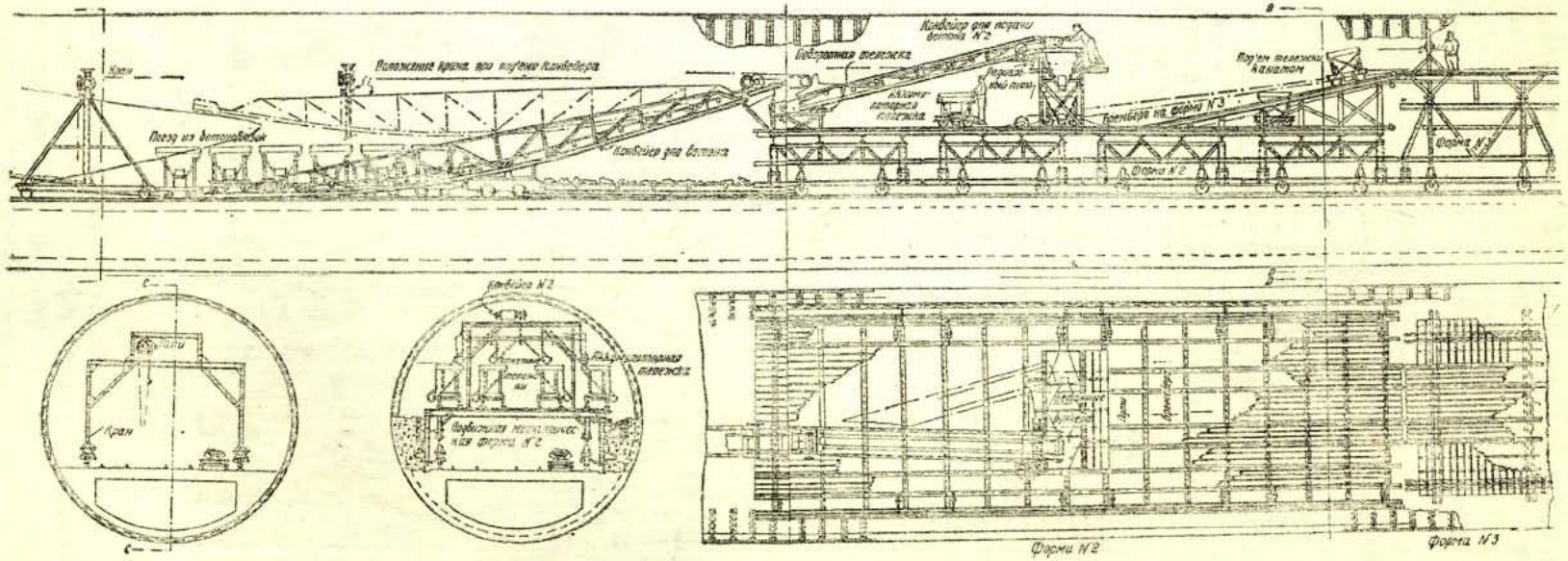


Рис. 569 б. Бостонский тоннель (фазы бетонирования боковых частей тоннеля)

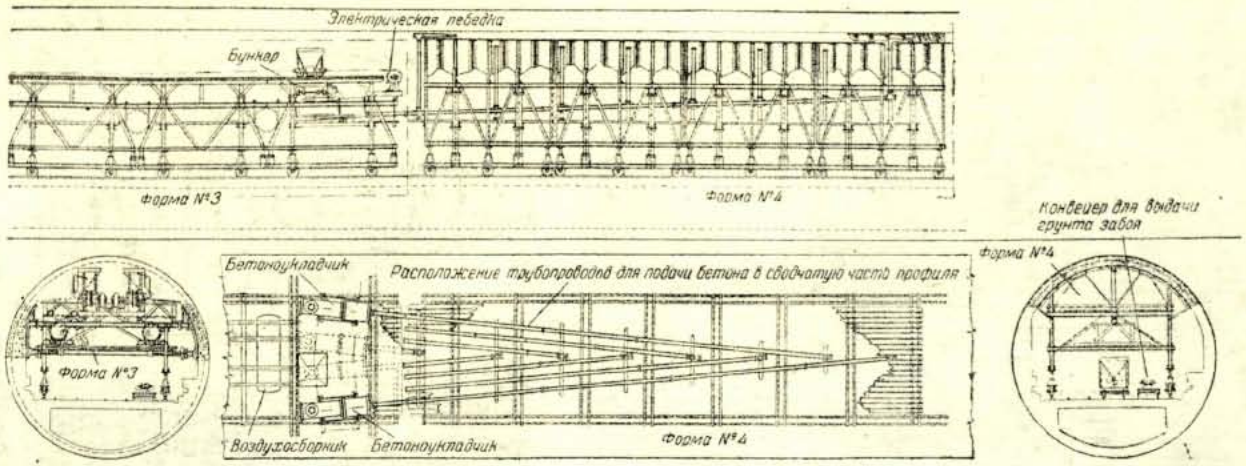


Рис. 569 в. Бостонский тоннель (фазы бетонирования сводчатой части тоннеля)

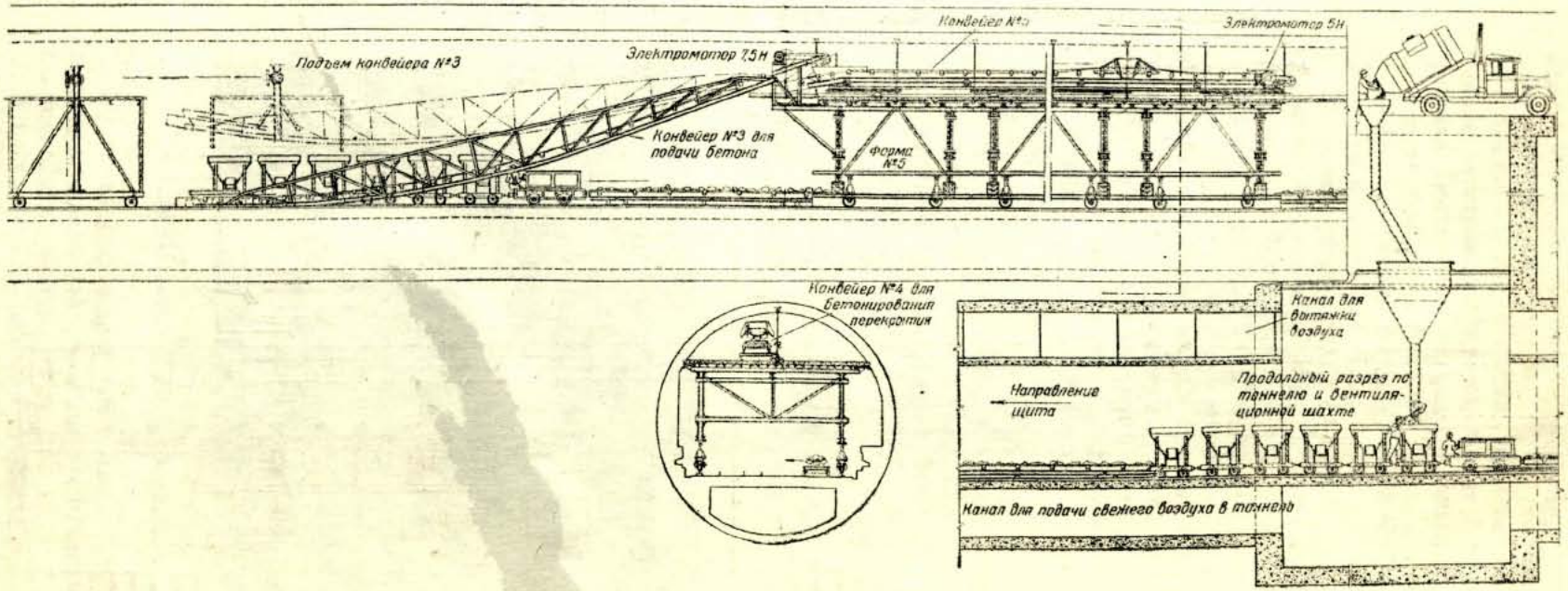


Рис. 569 г. Бостонский тоннель (фазы бетонирования подвесного перекрытия тоннеля)

При сооружении в 1941 г. метрополитена в Чикаго для несущих конструкций тоннелей и станций преимущественно применялся бетон. При этом в широком масштабе была осуществлена механизация бетонных и железобетонных работ в подземных условиях.

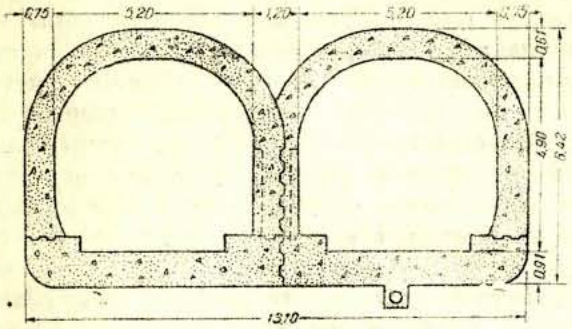


Рис. 570. Метрополитен Чикаго (бетонная обделка тоннеля)

Перегонные тоннели — спаренного вида, типа «бинокль» — имели сечение в свету до 5,2 *м*, сооружались горным способом, раскрытием на полный профиль, с временным креплением легкими штампованными стальными тюбингами, с последующим заполнением их армированным бетоном, образующим несущую обделку тоннеля (рис. 570).

При глубине заложения до 15 *м* от поверхности тоннели залегали в голубой глине с включением водоносных песков и суглинков, потребовавших применения при проходке сжатого воздуха давлением от 0,8 до 1,2 *ат*.

Укладка бетона в обделку была механизирована широким применением бетононасосов. Работы в забоях были организованы так, что бетон в лоток подавался ежедневно (рис. 571). В течение 2,5 часа бетонировался отрезок лотка длиной 10,5 *м*. Ежедневно в нескольких забоях укладывалось до 20 *пог. м* стен и свода обделки.

Подача бетона к месту укладки производилась преимущественно бетононасосами системы Рекс. Последние устанавливались на поверхности и подавали бетон через наклонные под углом 35° буровые скважины и далее по трубопроводам непосредственно к формам обделки. Производительность насосов составляла от 20 до 35 $м^3$/*час*. Трубопровод диаметром до 200 *мм* достигал длины в 400 *м*, имея на отдельных участках до шести изгибов в 90°. Несмотря на наличие противодавления в тоннеле, оборудование работало безотказно.

На ряде участков бетононасосы производительностью в 24 $м^3$/*час* были установлены непосредственно в тоннеле. При этом бетон в загрузочную воронку бетононасоса подавался по буровой скважине через специальный воздушный шлюз (рис. 572). На работах функционировала звуковая и световая сигнализация и была обеспечена телефонная связь. Особое внимание обращалось на систематическую продувку трубопроводов воздухом и на промывку водой для очищения их от бетона после прекращения бетонных работ. Ежедневно на участках горного способа работ в обделку укладывалось до 250 $м^3$ бетона.

На участке проходки щитовым способом бетон для заполнения тюбинговой обделки подавался также бетононасосами одновременно с горными работами.

Бетонирование лотка производилось на расстоянии 150 *м* от хвоста щита. Конструкция подвижной металлической опалубки лотка обеспечивала пропуск вагонеток с породой и материалами для производства щитовых работ.

В расстоянии 75 *м* от лотка бетонировались стены и далее свод. Металлическая опалубка свода имела длину 30 *м*.

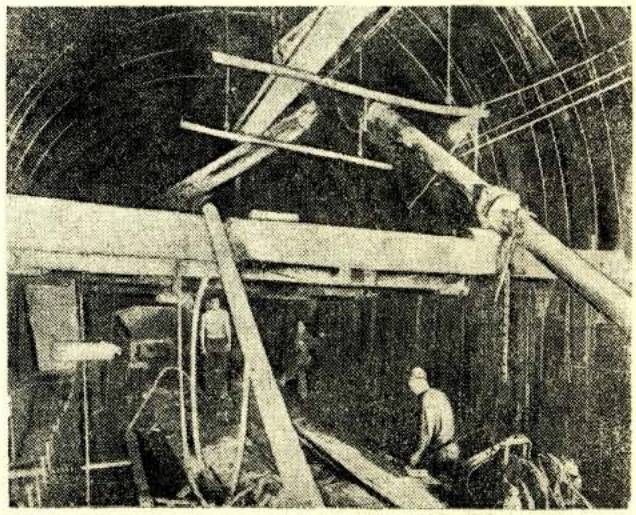


Рис. 571. Укладка бетона в лоток тоннеля

Особое внимание уделяли подбору гранулометрического состава бетона и тщательности вибрации и первибрации, обеспечивших высокую плотность бетона. Лабораторные испытания бетона через 28 дней показали временное сопротивление $R_{28} = 265$ $кг/см^2$.

Благодаря широкому применению механизации бетонных работ устройство бетонной обделки не отставало от горных работ, удачная организация которых обеспечила скорость ежесуточного продвижения забоя на полный профиль тоннеля в 9,3 *м*.

Следует отметить, что в советской и американской практике для производства подземных бетонных работ, особенно для тоннелей большого протяжения, создаются бетонные установки непосредственно в тоннеле, что дает определенный технико-производственный эффект. На рис. 573 показан общий вид бетонной установки в тоннеле Сан-Джесинто.

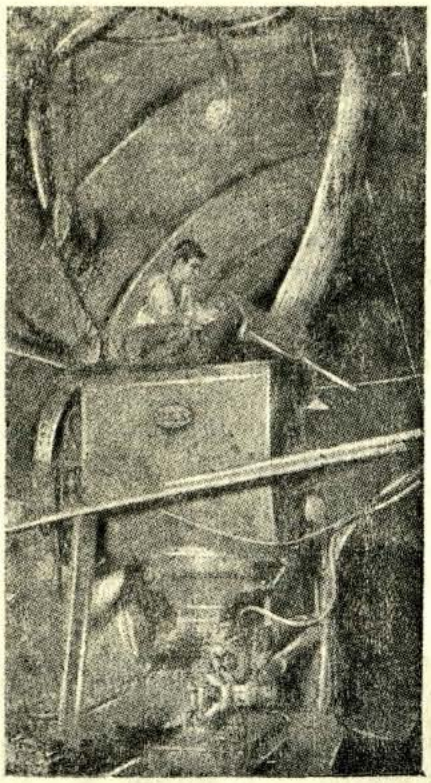


Рис. 572. Подача бетона через скважину загрузочную воронку бетононасоса

Схема организации бетонирования тоннеля крупного профиля при горном способе работ показана на рис. 574.

СИСТЕМА ВИБРАТОРОВ И ПЕРВИБРАТОРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОННЫХ РАБОТ

Строители, идя по пути повышения качества бетонных и железобетонных работ, уделяют большое внимание вопросам вибраций и первибраций.

Усовершенствованные приемы механизации бетонных работ (бетононасосы типа Рекс, Джони и Коймана, подвижные металлические формы, а также специальный гранулометрический подбор состава бетона) все же не вполне обеспечивают высокое качество бетонных сооружений. Одним из недостатков является процесс укладки и трамбования бетона на месте. Это особенно чувствуется при бетонировании тоннельных обделок, когда узость и теснота подземных выработок, а также специфические условия тоннельных работ не дают возможности вести надлежащее трамбование бетонных или железобетонных элементов. В результате бетон получается пористый, недостаточной плотности, что недопустимо для тоннельных сооружений, подчас подвергающихся вредному воздействию агрессивных грунтовых вод.

В практике уже давно установлено, что, подвергая массу бетона повторным сотрясениям, удается достигнуть повышенного уплотнения ее.

Большие эксперименты в этой области проводились советскими (Б. Г. Скрамтаев, В. В. Михайлов), французскими (Фрейсинэ, Беранже), английскими (Фебер, Гайлд) и американскими инженерами.

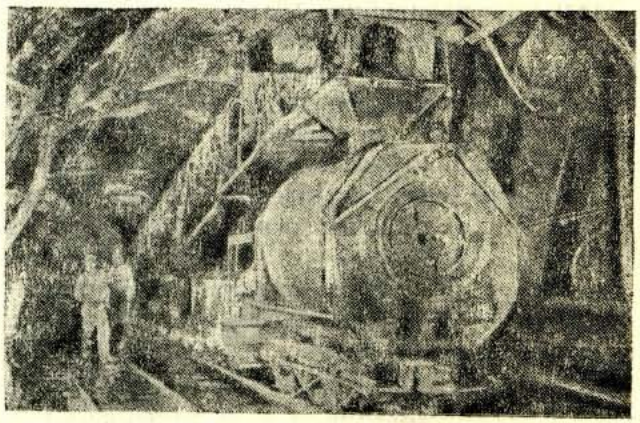


Рис. 573. Подземная бетонная установка (тоннель Сен-Джесинто)

В результате пришли к системе вибраторов или первибраторов, работающих на электрической энергии или пневматически под сжатым воздухом.

Обычный бетон, уложенный под вибрационным действием, значительно превосходит по качеству бетон трамбованный, приобретает новую структуру наряду со следующими преимуществами.

1. Под влиянием вибрации заполняется значительный объем пустот между отдельными частицами инертных составляющих, благодаря чему достигается *исключительная плотность бетона.*

2. Применением вибрации достигается качественная однородность бетонируемого массива.

3. Применением вибрации достигается повышенное сопротивление бетона, что позволяет уменьшить сечение элементов бетонных или железобетонных конструкций.

4. Уложенный жесткий бетон под действием вибрации становится пластичным.

5. При вибрации на поверхности бетона образуется гладкий тонкий слой цементного раствора, который по своим качествам превосходит торкрет.

6. При помощи вибрации укладка бетона для тоннельных обделок может производиться в таких тесных участках, при густо уложенной арматуре, где обычное трамбование бетона невозможно.

7. Практика подтверждает, что при вибрационном бетоне допустимо более раннее раскружаливание, чем при обычном трамбованном бетоне. В условиях нарастающего горного давления на тоннельные обделки это имеет иногда решающее значение.

8. При дальнейшем развитии вибрационных методов имеются практические предпосылки для получения водонепроницаемого бетона, что особенно важно для тоннельных сооружений.

Вибрация бетона производится следующими тремя приемами: а) сотрясением опалубки, б) сотрясением поверхности уложенной бетонной массы и в) сотрясением бетона по всей толщине уложенного слоя.

В первом и во втором случае употребляются обычные *вибраторы*, или *виброплаты*, вес и размеры которых устанавливаются в соответствии с элементами конструкций. Конструкция опалубки, разумеется, должна быть запроектирована с расчетом воздействия вибраций. Применяются и так называемые всплывающие вибраторы, которые по весу своего объема легче бетонной массы. В процессе вибрационного действия и по мере укладки бетона сам аппарат всплывает на поверхность. Имеются и аппараты, поднимаемые вверх при помощи противовесов на канате, по мере проявления их вибрационного действия на уложенный слой. Частота колебания вибратора доходит до 4 000—4 800 в минуту, причем зона их распространения порядка 6 *м*.

Для пневматических вибраторов требуется давление воздуха 5 *ат* при расходе его около 30 *м*³/*час*.

Вибраторы производят непосредственно положительное эффективное действие на качество бетонных элементов незначительной толщины.

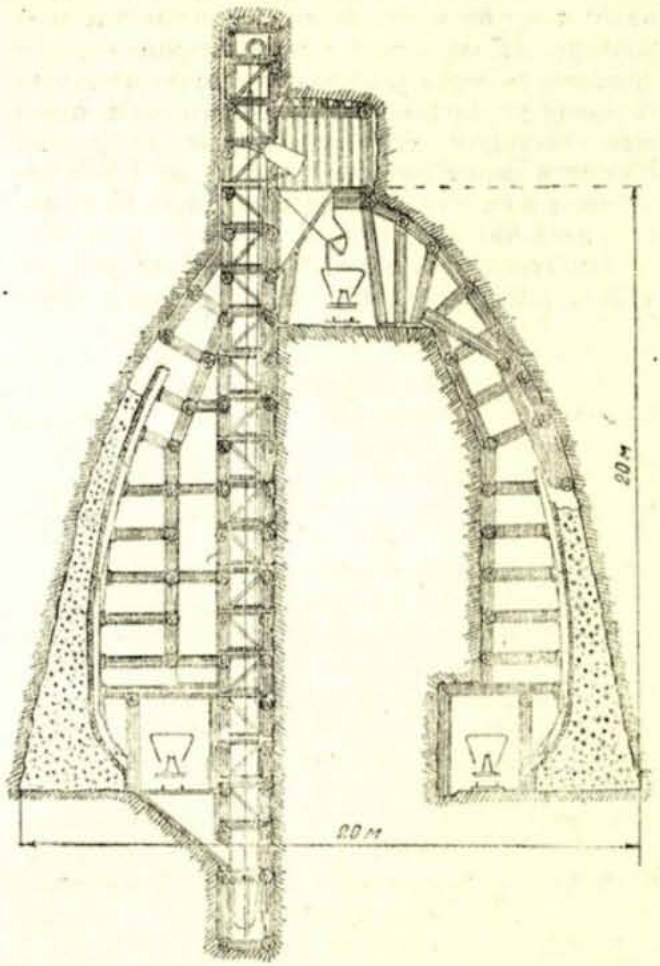


Рис. 574. Схема бетонирования обделки крупного тоннельного профиля при горном способе работ

При различных размерах бетонных массивов действие вибраций распространяется главным образом на поверхности, не проникая внутрь ядра сечения. Всплывающие вибраторы приводят иногда к расслаиванию мощных слоев бетона.

Наиболее основательным методом уплотнения бетона является *первибрация*, получившая сейчас распространение при сооружении бетонных блоков значительных размеров. При первибрации удается сообщить сотрясения частицам ядра бетонного тела.

Наиболее эффективным является игольчатый тип первибратора, состоящий из металлической трубы диаметром 45 *мм* и длиной 0,8 *м*, которая подвергается сотрясениям от помещенной у рукоятки специальной турбинки. Последняя под действием сжатого воздуха совершает до 4 500 *об/мин*. Колебания возрастают по мере удаления к острию первибратора. Игольчатым первибратором удается проникнуть через густую сеть арматуры на всю толщину укладываемого бетонного слоя, сообщая частицам его необходимые вибрации. Имеются первибраторы, дающие до 1 800 колебаний в минуту. Расход воздуха до 15 $м^3$/*час* при давлении его около 7 *ат*.

Практика применения первибраторов показала, что при аккуратном и умелом обращении первибрационный аппарат в состоянии работать без ремонта до 2 000 часов.

При создании бетонных блоков или железобетонных тюбингов для тоннельной обделки в условиях щитовой проходки вибрационный метод дает блестящие результаты. Набивая чугунные фермы даже ультражестким бетоном, получаем под действием первибраторов пластичный бетон высокой плотности, однородности и повышенного сопротивления. Это сводит к минимуму процент блоков, получающих трещины от неравномерного нажима гидравлических домкратов щита в процессе его продвижения. В равной степени это относится к бетонным обделкам тоннелей, сооружаемым горным способом.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

ВОДООТЛИВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

Успешность тоннельных выработок находится в прямой зависимости от эффективности работы водоотлива. Забой с обильным притоком подземных вод резко снижает как производительность труда, так и качество кладки постоянной обделки тоннеля.

Прежде чем начать работы, необходимо выяснить ожидаемую величину дебита подземных вод и технически решить вопрос борьбы с ними и способ их удаления.

При проходке тоннеля с портала на подъем вопрос решается за счет спуска воды по лотку естественным путем — самотеком. В тех случаях, когда разработка тоннеля ведется под уклон (при мокром забое), необходимо прибегнуть к устройству примерно через каждые 50 *м* промежуточных зумпфов — *приямков* (местные перекачки) глубиной до 0,4 *м*, к которым вода из забоя поступает по лоткам, устроенным с обратным уклоном, и удаляется насосами. Размеры сечений лотков и приямков устанавливаются в каждом отдельном случае в зависимости от притока вод. Когда тоннельные работы ведутся из шахт, например в условиях метростроения, для борьбы с водой в коренных устойчивых породах прибегают к устройству механизированного водоотлива при помощи специальных насосов; эти последние смонтированы в насосной камере, помещенной у шахтного ствола. Вода из забоев тоннелей и околоствольных выработок попадает в зумпф шахты, предварительно собираясь в резервуарах — «помойницах» — для отстанвания грязи.

В зависимости от местных условий и дебита вод устанавливаются электрические или пневматические насосы. Выбор типа конструкции и определение мощности насоса представляют предмет расчета и проектирования водоотлива. При проходке слабых, неустойчивых пород в условиях метростроения, во избежание выноса грунта и осадок, задача решается применением методов сжатого воздуха, замораживания, силикатизации и т. д. В этом случае работа водоотлива сводится к минимуму, так как насос включается в работу только периодически на местную откачку при ничтожном притоке. При строительстве тоннелей Московского метрополитена в условиях коренных пород карбонного комплекса борьба при помощи механизированного водоотлива велась с притоками от 100 до 1 200 $м^3/час$. На одной из шахт 4-й очереди строительства подземного кольца Московского метрополитена ведется борьба с притоком подземных вод до 2 500 $м^3/час$.

В практике строительства Московского метрополитена, в условиях коренных пород, по системе лотков в штольневых выработках вода собиралась в зумпфы шахт и водосборники, откуда удалялась насосами. Количество и производительность насосов устанавливались в зависимости от притока. Центральная водоотливная установка рассчитывалась на максимальные притоки; при этом суммарная производительность насосных агрегатов составляла 200—300% расчетной, обеспечивая тем самым постоянный резерв.

При проходке под большими водоемами и под реками, в частности при подводном тоннелировании пор р. Москвой и под водоотводным каналом, имелся постоянный аварийный резерв трех групп агрегированных насосов.

В тоннельной практике получили наибольшее распространение центробежные насосы. Конструкция последних обладает большой компактностью и представляется удобной для обслуживания при эксплоатации.

Центробежные насосы различных напоров и производительности изготовляются рядом советских заводов — им. Калинина, «Борец», Горловским и другими.

Схема работы центробежного насоса следующая: лопасти рабочего колеса спиралеобразного корпуса приводятся в движение

электромотором через присоединенную всасывающую трубу, на глубину всасывания до 6,5 *м*, увлекают воду и при вращении, под влиянием центробежной силы, выбрасывают ее в нагнетательную трубу (рис. 575). Мощность насоса определяется по формуле:

$$N = \frac{QH\gamma}{75\eta},$$

где H — полный манометрический напор в *м*, γ — удельный вес жидкости, η — коэфициент полезного действия насоса, Q — производительность насоса в $м^3/сек$.

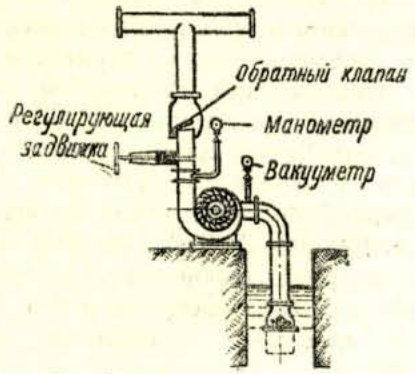


Рис. 575. Схема насосной установки

Между величинами манометрического напора насоса H, его производительностью Q, мощностью N и числом оборотов рабочего насоса k существует следующая зависимость:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{H_1}} = \frac{\sqrt[3]{N}}{\sqrt[3]{N_1}} = \frac{k}{k_1}.$$

Для получения максимального коэфициента полезного действия насоса необходимо в каждом отдельном случае опытным путем установить целесообразную взаимозависимость между напором и его производительностью; при этом следует учесть, что повышением напора центробежного насоса соответственно снижается его производительность.

Водоотлив оборудуется двумя или тремя нагнетательными трубопроводами, скольцованными таким образом, чтобы насос мог нагнетать воду в любой «став» (трубопровод) (рис. 576). Внутренний диаметр d нагнетательных труб определяется по формуле:

$$d = 1{,}13\sqrt{\frac{Q}{v}},$$

где Q — количество воды в $м^3/сек$, v — скорость движения воды по трубам (1,0—2,5 *м/сек*). Например, при $Q = 200$ $м^3/час$ $d = 200$ *мм*.

Центральные водоотливные установки на строительстве 2-й и 3-й очереди Московского метрополитена оборудовались следующими типами насосов:

1. Центробежные насосы завода им. Калинина: $Q = 250 — 300$ $м^3/час$; k — 2 900 *об/мин*; H — 80 *м*; $N = 75$ kW; (рис. 577).

2. Центробежные насосы завода «Борец»: $Q = 150—200$ $м^3/час$; $k = 1\,450$ *об/мин*; $H = 80$ *м*; $N = 55$ kW.

3. Центробежные насосы завода им. Калинина: $Q = 100$ $м^3/час$; $k = 1\,450$ *об/мин*; $H = 60$ *м*; $N = 29$ kW. На 4-й очереди строительства Московского метрополитена применяются центробежные насосы марки 8НДВ производительностью $Q = 720$ $м^3/час$, при высоте напора $H = 68$ *м*.

Принцип распределения насосных агрегатов по производительности находится в прямой зависимости от фактического притока подземных вод, поступающих в тоннельные выработки. При этом один агрегат должен быть в работе, другой — в резерве, а третий — запасный на поверхности (рис. 578, 579).

Для непосредственной откачки воды из забоя проходки устраиваются местные водоотливные установки — перекачки, имеющие назначением перекачивать воду из забоя в центральные водосборники. При проходке тоннелей под уклон монтируются перекачечные установки как передвижного типа, так и стационарного.

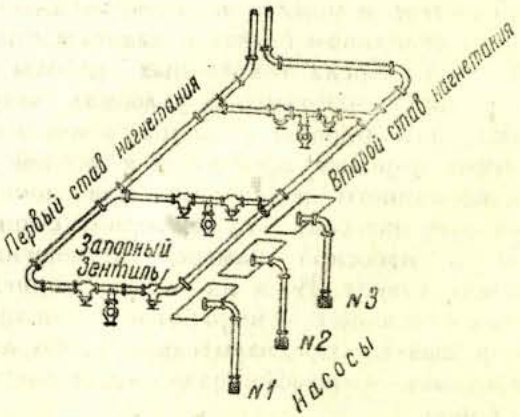


Рис. 576. Схема расположения напорных и всасывающих трубопроводов

В первом случае насосная установка монтируется на подвижной платформе, перемещающейся вслед за продвижением забоя. Во

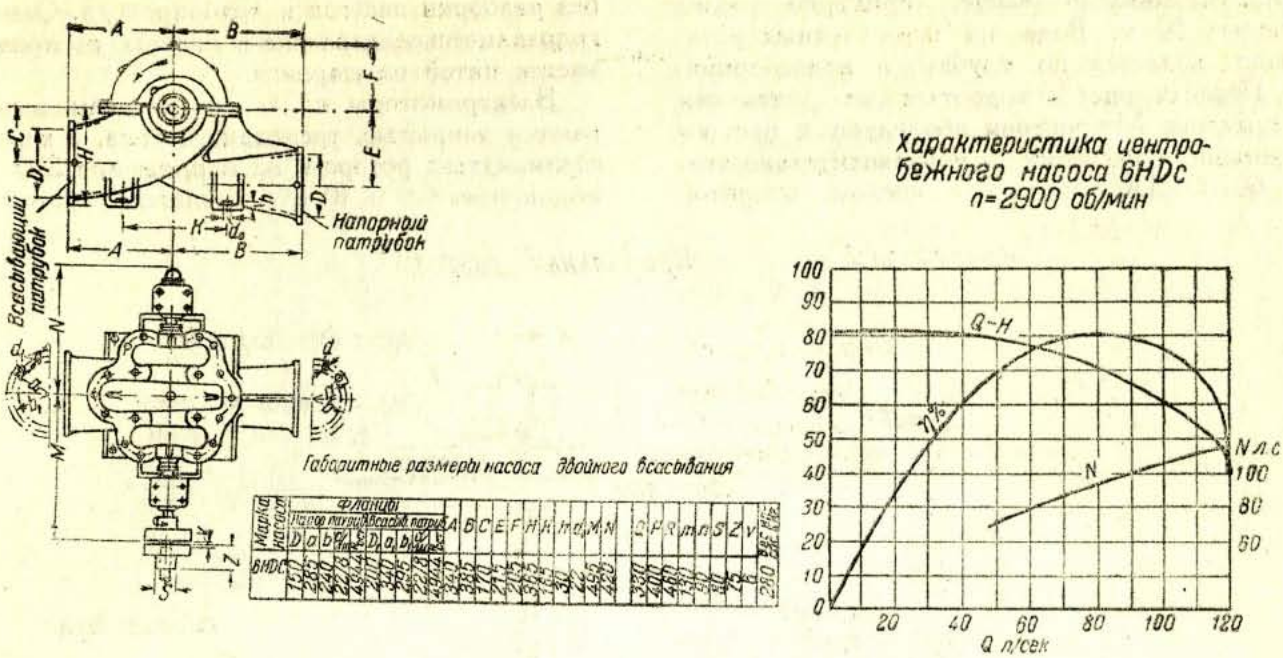


Рис. 577. Центробежный насос типа 6 HDC (завода им. Калинина) и его характеристика

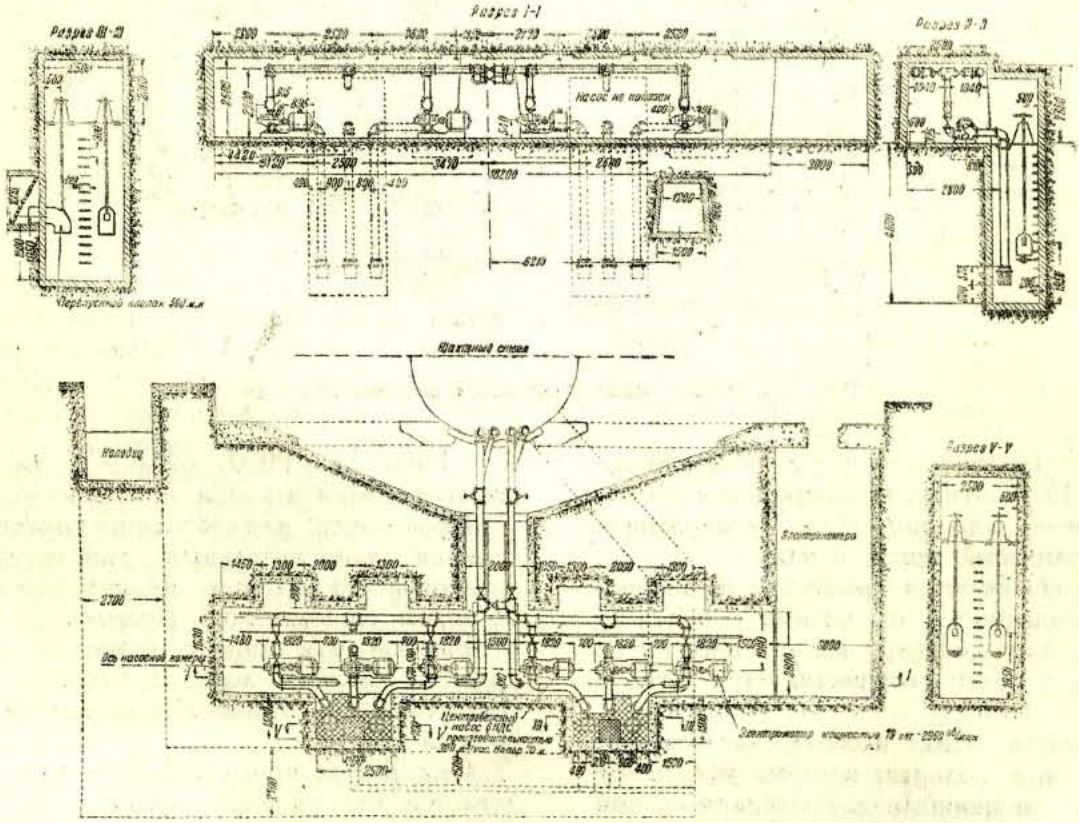


Рис. 578. Насосная станция на шахтах Метростроя на приток 700—1 000 м³/час

втором перекачечные установки устраиваются, как указывалось выше, примерно через каждые 50 *м*. Вода из перекачечных установок подается по трубам в водосборник.

Перекачечные водоотливные установки в практике Метростроя оборудуются центробежными насосами производительностью в 60 и 130 *м*³/*час*, с числом оборотов Смена колец и выемка колеса производятся без разборки насосов и трубопровода. Осевое гидравлическое давление в насосах воспринимается пятой на шариках.

Электромоторы к данным насосам выбираются закрытые, трехфазного тока, с короткозамкнутым ротором на напряжение 220 V, мощностью 6,8 и 10 kW, с числом оборотов

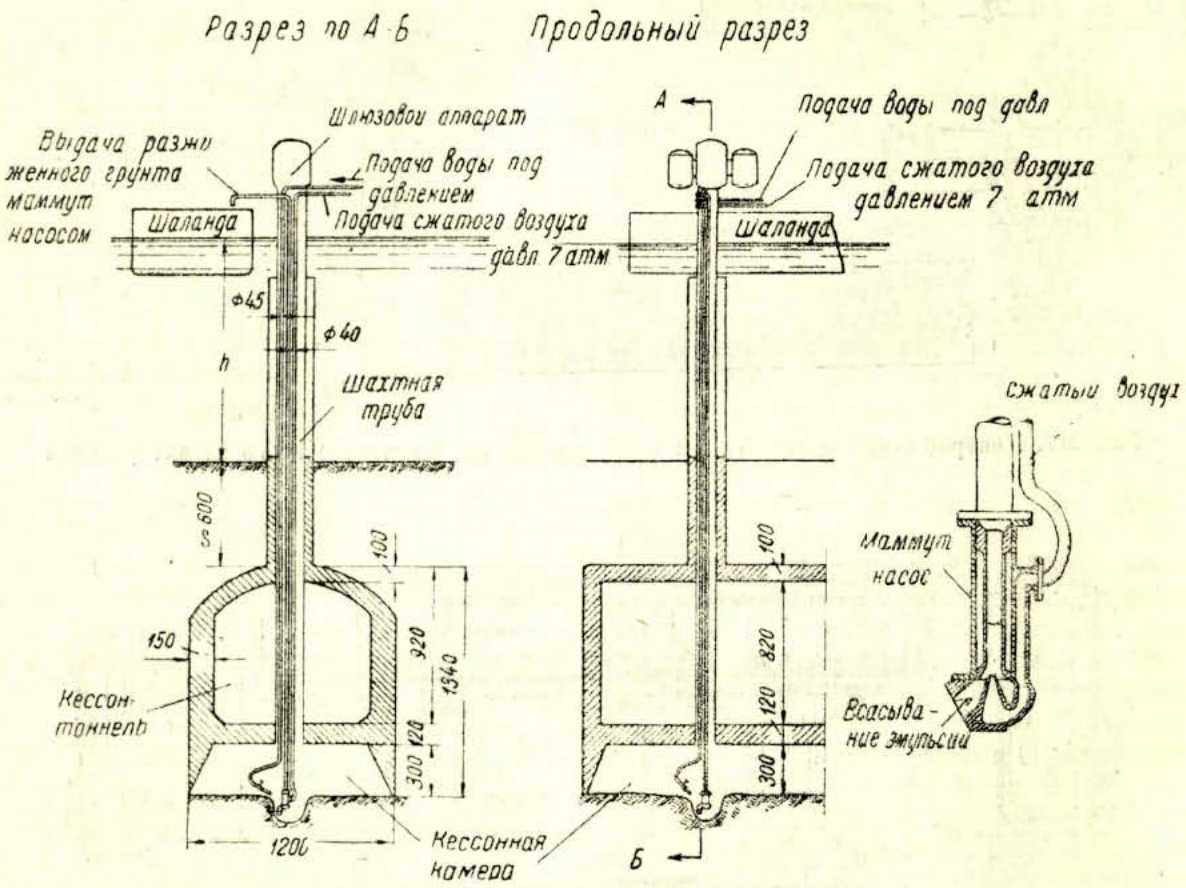


Рис. 579. Работа маммут-насоса в кессоне-тоннеле

$k = 1000$ и 1500 в минуту, с высотой напора 20 и 15 *м*. Эти канализационные насосы предназначены для жидкостей, содержащих большое количество грязи и ила.

Насосы снабжаются крышками на шарнирах, закрепленных откидными болтами, вследствие чего осмотр колес насосов и уплотняющих колец осуществляется легко и быстро.

Особенность этих насосов заключается в уплотняющих кольцах, которые устраняют засорение и закупоривание. Благодаря особой конструкции колец их можно передвигать и, по мере износа, так регулировать, чтобы установленный зазор был возможно малым.

$k = 1500$ и 1000 *об*/*мин*; эти моторы изготовляются заводом «Электросила».

Кроме того, для небольших притоков воды имеется дополнительный тип перекачечных установок из насосов производительностью 36 *м*³/*час* системы инж. Бромлея.

Насосы эти имеют открытое рабочее колесо. Рабочие лопасти с одной стороны открыты и при открытой крышке имеют свободный доступ.

Они имеют приспособление для очистки лопастей без разборки насосов, путем передвижения имеющейся на насосе ручки. При передвижении ручки рабочие лопасти передвигаются через соответствующие прорези ь

рабочем диске в сторону крышки; грязь, скопившаяся на лопасти, соскабливается диском и попадает вниз корпуса насоса. Для удаления грязи внизу корпуса имеется специальный люк.

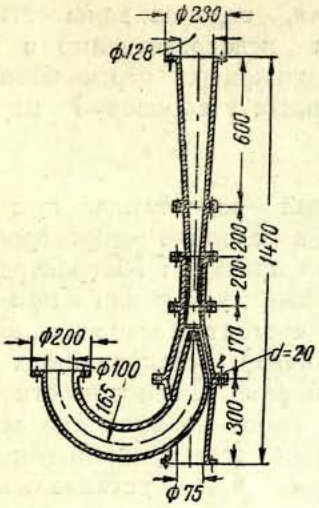


Рис. 580 а. Схема гидроэлеватора

Корпус насоса и рабочее колесо его чугунные, уплотнение бронзовое. Напорные патрубки расположены по касательной в сторону от насоса, всасывающие — с торца. Осевое давление разгружается наличием отверстий в колесах и упорным шариковым подшипником.

Указанные насосы устанавливаются во второстепенных забоях. Моторы к ним применяются мощностью 4,5 kW, с числом оборотов $k = 1500$ *об/мин*.

Когда проходка ведется под уклон с обильным притоком вод, то в некоторых случаях может оказаться технически целесообразным пробить специальную дренажную штольню с восстанием. Сечение последней может и не входить в полезное сечение тоннельной выработки, но выгода от осушения забоя при работе в сухих условиях оправдывает расходы по пробивке дренажной штольни.

Проходка тоннелей слепым забоем под уклон (при наличии сильного притока вод) на основе практики Метростроя представляется явно нерациональной, так как работы в забое сильно осложняются и замедляются. Во избежание указанных трудностей необходимо предварительно, до продвижения тоннельного забоя под уклон, пройти передовые штольни, которые должны дать определенный дренажный эффект.

Особо следует отметить существующую систему удаления шахтной загрязненной воды при помощи эрлифтов или маммут-насосов. Этим способом можно с успехом осуществить также выдачу песчаных грунтов из рабочей камеры кессона, пользуясь принципом рефулирования грунтов. Сущность этой системы заключается в следующем.

В воду, подлежащую откачке, погружаются два спаренных трубопровода, соединенных в нижней части отрезком трубы длиной в 2 *м*. Через одну из труб подается под давлением сжатый воздух, поступающий в указанный отрезок трубы (*смесительную камеру*), откуда он устремляется в нижнюю часть второй водоотливной трубы, где образуется смесь (воздуха и воды) меньшего удельного веса. Последняя, поднимаясь вверх по трубе, выливается на поверхность.

Таким образом, используется закон, что жидкости с разным удельным весом в сообщающихся сосудах устанавливаются на разных горизонтах, находящихся в соотношении, обратно пропорциональном весам этих жидкостей.

Несмотря на значительный расход сжатого воздуха и низкий коэфициент полезного действия эрлифта ($\eta = 0{,}40$), последний находит свое применение в шахтной практике при больших притоках воды (до 1 000 $м^3/час$) и при значительной загрязненности подземных вод.

Эрлифт отличается крайней несложностью своей конструкции и простотой обслуживания в период эксплоатации при большой производительности.

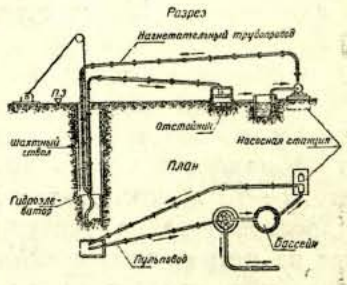


Рис. 580 б. Схема шахтного водоотлива с помощью гидроэлеватора

Расчет эрлифта сводится главным образом к выявлению потребного количества сжатого воздуха P на 1 $м^3$ откачиваемой воды, которое определяют по формуле Андерсена:

$$W = n \frac{h}{23 \lg \frac{H + 10}{10}},$$

где W — количество сжатого воздуха в $м^3$, H — величина заглубления смесительной камеры в $м$, h — величина подъема воды в $м$, n — коэфициент, зависящий от величины подъема воды, где

$$n = 2{,}17 + 0{,}0164\,h.$$

В последнее время принцип маммут-насоса в советской, американской и английской тоннельной практике получил большое распространение для выдачи пульпы из кессонной камеры (рис. 579).

В практике шахтного строительства для удаления из забоя ствола загрязненной песком и илом воды — пульпы — применяют гидроэлеваторы (рис. 580 а).

Конструкция гидроэлеватора состоит из основной трубы, идущей по стволу шахты до зумпфа, сопряженной со специальной трубой с насадкой, через которую под давлением подается вода.

Последняя, введенная в нижнюю часть основной трубы, при расширении струи образует зону пониженного давления, вследствие чего вода и пульпа из забоя шахты увлекаются по основной трубе гидроэлеватора наверх.

В американской практике широко применяется гидроэлеватор системы Хенди. Отдельные конструкции отличаются главным образом в конфигурации и в схеме относительного расположения насадки и входного отверстия основной трубы гидроэлеватора.

К основным недостаткам гидроэлеваторов, поднимающих загрязненную воду из зумпфа шахты с глубины до 120 $м$, относят весьма низкий коэфициент полезного действия (0,1—0,2) и большой расход воды. Однако простота конструкции гидроэлеватора привлекает шахтостроителей в тех случаях, когда потребная производительность водоотлива не превышает 50—60 $м^3/час$. Водоотлив при помощи гидроэлеватора с успехом применен в Донбассе на стволе шахты «Холодная балка». При глубине ствола в 75 $м$ и при дебите загрязненных песком вод в 18 $м^3/час$ водоотлив удалось обеспечить, применив только гидроэлеватор (рис. 580 б).

При проходке тоннелей под сжатым воздухом удаление неотжатой воды нижней части профиля производится сифонированием через шлюзовую перегородку из зоны сжатого воздуха в зону нормального давления за счет избыточного напора сжатого воздуха. Вода стационарными перекачечными насосами, установленными у шлюзовой перегородки, подается в водосборник и далее по дренажу в центральный водоотлив шахты. Когда величина давления сжатого воздуха достаточна для преодоления разности высот по уклону тоннеля, вода из зоны сжатого воздуха подается непосредственно в водосборник, без стационарных перекачечных насосов, размещенных у шлюзовой перегородки.

* * *

Организация водоотлива при проходке стволов шахт в условиях метростроения можно уяснить из практики Метростроя.

Водоотливные установки при проходке стволов шахт состоят обычно из двух насосов (Сумского завода), установленных на общей металлической раме. В зависимости от способа производства работ по проходке стволов эти рамы с двумя агрегированными насосами подвешиваются или устанавливаются на полке.

1. При проходке ствола обычным способом рама с двумя агрегатами подвешивается тросом на барабан лебедки, установленной на поверхности около ствола. По мере углубления забоя рама опускается; при этом для обеспечения всасывания насосом необходимо, чтобы разность отметок между всасывающим штуцером и забоем не превышала 4 $м$.

2. При проходке ствола опускным колодцем рама с двумя агрегатами закрепляется на балках, заделанных в стенках опускного колодца на высоте 1,7 $м$ от ножа.

3. При проходке стволов опускным кессоном рама с насосами устанавливается на перекрытии кессонной камеры.

Водоотливные установки оборудуют двумя центробежными насосами (один — рабочий, другой — резервный) Сумского завода производительностью 90 и 180 $м^3/час$, высотой напора 30 и 40 $м$, с моторами мощностью 40 и 29 kW, с числом оборотов $k = 1\,500$ $об/мин$.

Производительность каждой водоотливной установки принимается в расчет в зависимости от притока воды в забое при проходке данного ствола шахты.

При проходке шахтных стволов на 4-й очереди строительства Московского метрополитена пришлось вести борьбу с притоками вод до 1 400 $м^3/час$, что потребовало установки мощного водоотлива. Специальные вопросы водоотлива см. труд акад. Л. Д. Шевякова «Рудничный водоотлив».

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ВЕНТИЛЯЦИЯ ТОННЕЛЕЙ

ВЕНТИЛЯЦИЯ ТОННЕЛЕЙ В ПЕРИОД ЭКСПЛОАТАЦИИ

В период эксплоатации тоннелей вентиляция может быть естественная или искусственная. Основываясь на естественной вентиляции, следует принимать во внимание ток воздуха в тоннеле, зависящий от температуры в нем и от разности высот обоих порталов тоннеля. Однако при эксплоатации длинных тоннелей приходится базироваться главным образом на искусственной вентиляции, которая бывает всасывающей или нагнетательной системы.

Вентиляция тоннелей в период эксплоатации становится необходимой, когда имеется угроза разрушения кладки тоннеля от газов, выделяемых при паровой тяге, от сырости в тоннеле или высокой температуры, влияющей на людей, на верхнее строение пути, на материал обделки тоннеля.

При эксплоатации тоннелей естественная вентиляция устанавливается в связи с разницей температур внутри и вне тоннеля. Помимо тока воздуха, который устанавливается от разности отметок порталов, в значительной степени способствует вентиляции ток воздуха при движении поезда, который работает в тоннеле, как поршень. Устройство дополнительных шахт способствует естественной вентиляции (рис. 581). Однако естественная вентиляция оправдывает себя только при наличии тоннелей небольшой протяженности. При тоннелях большой длины прибегают к искусственной вентиляции. При всасывании воздуха через портал, или через шахты, или путем нагнетания воздуха от одного портала к другому по системе Саккардо (тоннели Готардский, Тауренский — рис. 582) могут быть применены завесы, закрывающие портал тоннеля через известные периоды времени. В некоторых случаях применяют нагнетание воздуха с одного портала и вытягивание с другого (Лечберг, Симплон).

Следует указать, что из тысячи тоннелей лишь около тридцати оборудованы искусственной вентиляцией, остальные имеют естественную вентиляцию.

Эффективность естественной вентиляции зависит обычно от пересеченности местности, длины тоннеля и трассировки его в плане. Надо отметить, что кривые нарушают условия естественной вентиляции. Последняя зависит еще от разности отметок порталов тоннелей, от уклонов и от барометрических колебаний. При естественной вентиляции односкатные тоннели находятся в более благоприятных условиях, чем двускатные. Эффективность естественной вентиляции зависит от розы ветров и от положения в плане самого тоннеля. Значительное влияние на условия вентиляции оказывают и скорости движения проходящих поездов. При наличии двускатного профиля рекомендуется устройство посредине тоннеля вентиляционной шахты для удаления вредных газов, скопляющихся в повышенной части тоннеля.

Следует отметить системы искусственной вентиляции: а) вентиляция по системе Саккардо, б) вентиляция по принципу Симплонского тоннеля при устройстве параллельной вентиляционной галлереи, в) вентиляция с закрытием порталов специальными шторами и г) вентиляция с устройством средней вертикальной шахты, которая засасывает испорченный воздух, причем потоки свежего воздуха проникают через порталы тоннеля.

Обычно вентиляционная галлерея, направленная параллельно оси тоннеля, устраивается площадью поперечного сечения до 10 $м^2$, причем через 150 *м* делаются квершлаги. Скорость движения воздуха по галлерее доходит до 10 *м/сек*. При закрытии порталов в тоннеле шторами процесс вентиляции происходит следующим образом. Как только по-

езд входит в тоннель, закрываются шторы противоположного портала и производится нагнетание свежего воздуха навстречу поезду. При подходе поезда к середине тоннеля про-

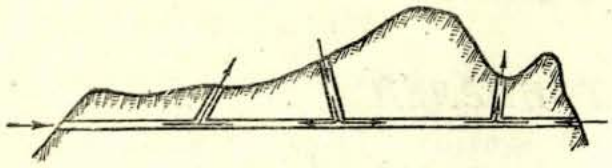


Рис. 581. Схема вентиляции горного тоннеля с использованием шахт

изводится высасывание воздуха первой половины тоннеля, пройденной поездом, и нагнетание свежего воздуха в не пройденную еще поездом другую половину тоннеля. При этом получается двойная система вентиляции, обеспечивающая удаление испорченного и нагнетание свежего воздуха. Эта система применяется на японских железных дорогах и является наиболее дорогой в эксплоатации.

Симплонский тоннель вентилируется следующим образом. Каждый из порталов однопутных тоннелей закрывается шторами в порталах, которые убираются в момент пропуска поезда через тоннель. Если эти занавесы не могут быть во-время убраны, поезда их просто прорывают без особых осложнений. В один из порталов нагнетается свежий воздух до 90 $м^3/сек$, у другого портала он вытягивается. Эта система показала удовлетворительные результаты при эксплоатации Лечбергского тоннеля.

По системе Саккардо порталы тоннеля открыты, при этом производится нагнетание воздуха с одного портала в другой. Воздух с помощью центробежных вентиляторов нагнетается по специальному каналу по кольцевому пространству, образующему сопло (рис. 583 и 584). Из последнего воздух нагнетается в тоннель, и одновременно втягивается воздух, идущий из ближайшего портала, и устремляется со скоростью 3 $м/сек$ к удален-

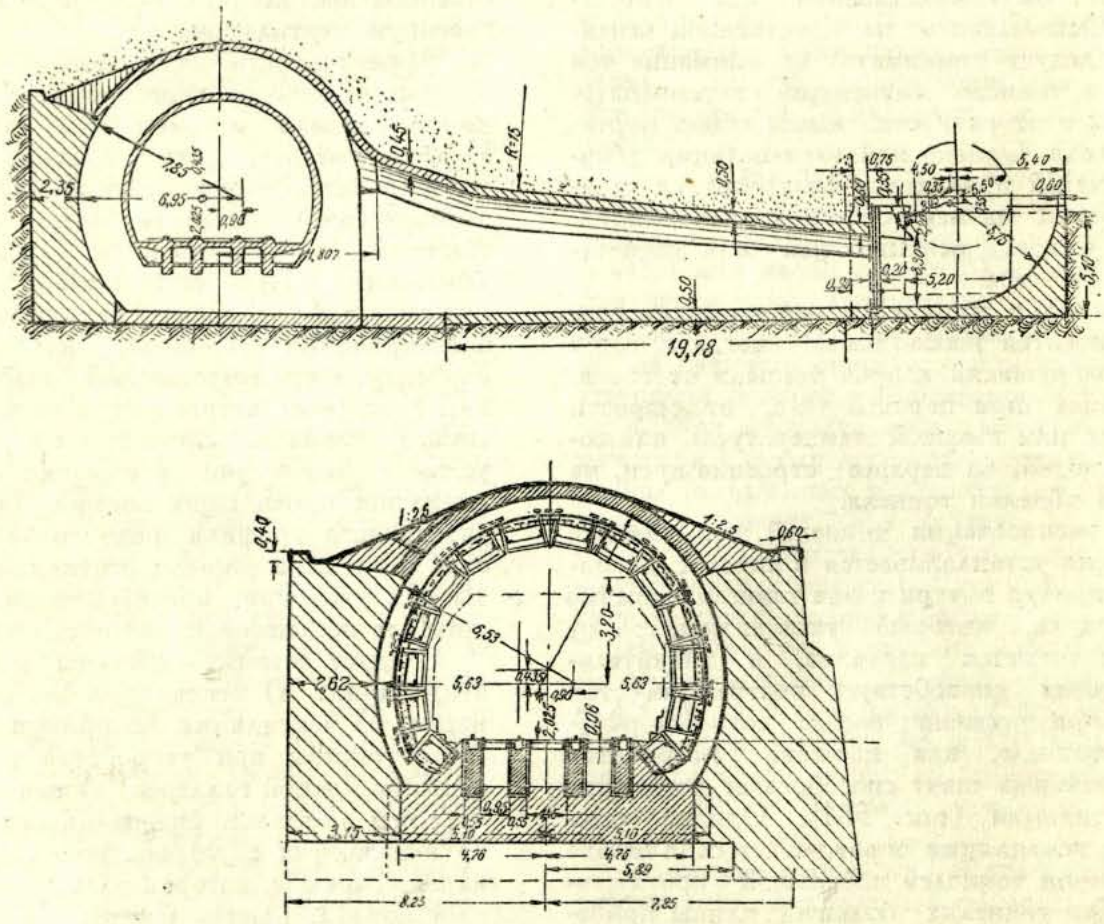


Рис. 582. Вентиляционный канал и камера Тауренского железнодорожного тоннеля

ному порталу вентилируемого тоннеля. Система Саккардо работает и на принципе вытяжной системы, при этом тоннель легко освобождается от дымовых газов. Следует отметить, что система Саккардо считается лучшей из систем искусственной тоннельной вентиляции при движении с паровой тягой.

При эксплоатации городских подземных железных дорог и метрополитенов также приходится прибегать к искусственной вентиляции тоннелей устройством ряда вентиляционных шахт.

* * *

При эксплоатации ряда тоннелей для автомобильного движения свежий воздух подается понизу по каналу, который ограничен сегментом, образуемым проезжей частью, а испорченный воздух удаляется по верхнему каналу через отверстия, размещенные через 3 *м* в потолке, ограждающем верхний сегмент тоннеля (рис. 585 и 586).

С каждой стороны портала подводных тоннелей для автомобильного движения

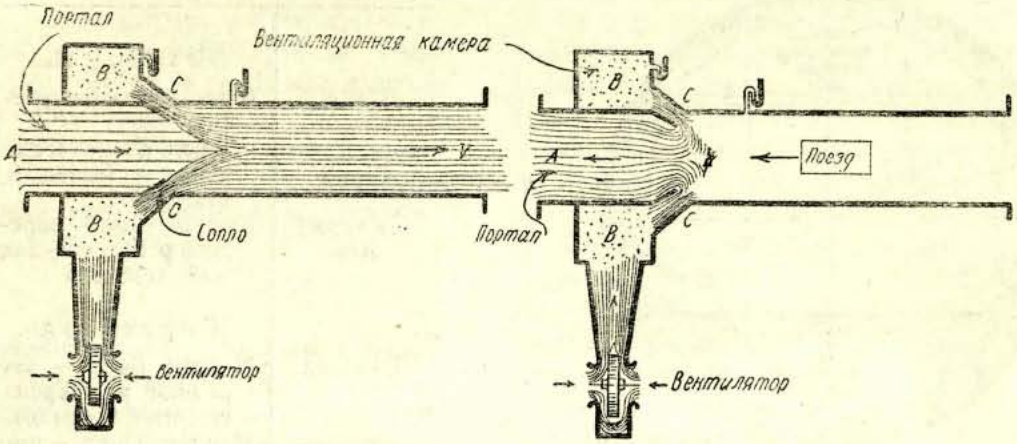


Рис. 583. Схема нагнетательной системы Саккардо

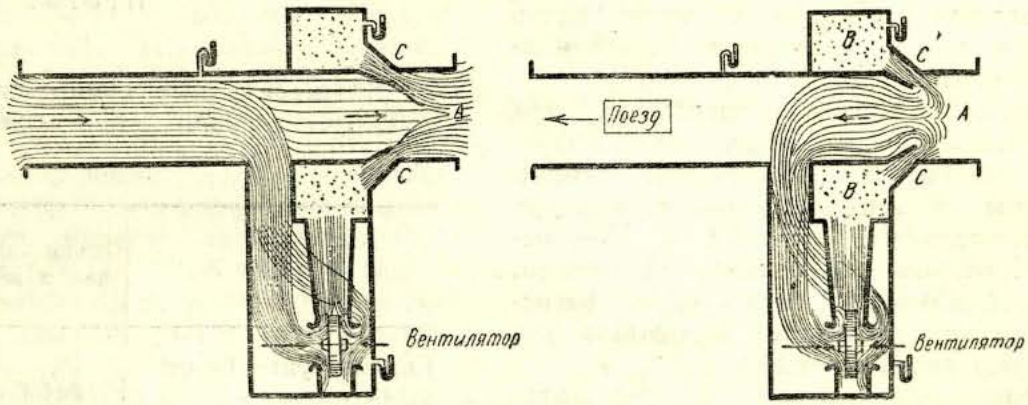


Рис. 584. Схема вытяжной вентиляции системы Саккардо

устанавливаются шахты высотой до 50 *м*, где размещаются вентиляционные установки (рис. 587). Последними оборудованы подводные тоннели под рр. Гудсон (рис. 588), Ист-Ривер, Шельдой и Мерси (между Ливерпулем и Биркенхэдом).

Тоннель под р. Мерси, диаметром 13,4 *м* и длиной 3 470 *м*, имеет шесть вентиляционных станций, по три на каждом берегу. Станции оборудованы как большими вентиляторами производительностью по 18 000 $м^3$/*мин* при диаметре в 8,53 *м*, так и малыми вентиляторами производительностью в 2 570 $м^3$/*мин*. От вентиляторов через железобетонные ко-

роба под проезжую часть нагнетается свежий воздух, устремляющийся в тоннель через отверстия, расположенные на расстоянии 0,46 *м* по желобам вдоль тротуаров. Испор-

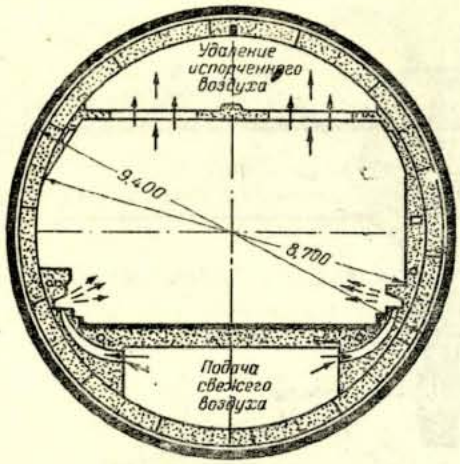


Рис. 585. Схема вентиляции тоннеля для автомобильного движения

ченный воздух вытягивается через шесть отверстий в сводах тоннелей через вентиляционные шахты.

Мощность установок определена при 100-процентном резерве. Обмен воздуха каждые 1,5 минуты. Вентиляционные станции оборудованы 30 вентиляторами, из которых 18 — нагнетательного действия и 12 — вытяжного. Учитывая 100-процентный резерв, в работе находится 9 вентиляторов, нагнетающих свежий воздух, и 6 вытяжных для удаления испорченного воздуха.

Производительность при работе 6 вентиляционных станций 70 000 $м^3/мин$.

Распределение агрегатов по станциям приводится в табл. 46.

Работа вентиляторов регулируется автоматически в соответствии с процентным содержанием вредных примесей в воздухе и густотой автомобильного движения в тоннеле. Как только содержание углекислоты в воздухе тоннеля превышает установленный предел в 0,02%, автоматически подаются сигналы и включаются в работу дополнительные вентиляторы или увеличивается скорость действующих.

В Ливерпульской центральной контрольной станции один дежурный следит по щиту и приборам за чистотой воздуха и всеми автоматическими приспособлениями тоннеля.

Таблица 46

Вентиляционная станция	Тоннельный участок	Число вентиляторов	
		вытяжных	нагнетательных
	Ливерпуль		
Нью-Ки	Тоннельное ответвление	2	2
Норд-Джонстрит	Джордж-Док — Олд-Маркет (главный тоннель)	2	4
Джордж-Док	Джордж-Док — середина р. Мерси (главный тоннель)	2	2
	Биркенхэд		
Вудсайд	Морнес Бренч — середина р. Мерси (главный тоннель)	2	4
Сидней-стрит	Морнес Бренч — портал Честер-стрит	2	4
Тейлор-стрит	Тоннельное ответвление	2	2
	Итого . .	12	18

Вентиляционные здания станции характеризуются данными, приведенными в табл. 47.

Таблица 47

Станция	Объем здания в $м^3$	Возвышение шахты над мостовой в *м*
Сидней-стрит — Биркенхэд	30 500	37,2
Вутсайд — Биркенхэд . .	24 800	64
Тейлор-стрит — Биркенхэд	9 300	31
Нью-Ки — Ливерпуль . .	9 000	28,3
Норд-Джонстрит — Ливерпуль	31 700	52
Джордж-Док — Ливерпуль	44 500	61

В этих зданиях имеются подстанции, помещения для обслуживающего тоннель технического персонала, склады и мастерские для ремонта автомобилей, гараж для машин, очищающих тоннели, и станции скорой технической помощи для машин, потерпевших аварию в самом тоннеле.

В вентиляционных зданиях, расположенных в оживленных частях города, для уменьшения вибрации при работе вентиляторов проложены специальные антивибрационные и

звукоизолирующие материалы. С этой же целью корпуса этих зданий не имеют окон.

Разрешая вопрос вентиляции для столь грандиозного тоннеля, строители считали необходимым провести ряд экспериментальных работ для установления наиболее целесообразной системы вентиляции. Был выделен опытный участок протяжением 300 *м*. При испытаниях в опытном тоннеле, огражденном кирпичными перемычками, жгли солому и сено. Скорости распространения и движения дыма записывались, и устанавливалась безопасность системы вентиляции при возникновении пожара в тоннеле.

* * *

При сооружении первых глубоких линий Андерграунда (Лондон) полагались исключительно на поршневое действие поездов в тюбах, и поэтому никаких специальных мероприятий по вентиляции не предпринимали. Однако уже в начале эксплоатации выявилось, что указанного недостаточно. Выделяемая теплота от трения при работе движущихся поездов и от скопления густых потоков пассажиров загрязнение воздуха металлической и балластной пылью сделали пребывание людей в подобной атмосфере невыносимым. Это привело к необходимости закладки вентиляционных шахт и к устройству искусственной вентиляции тоннелей. В результате на тоннелях лондонского Андерграунда чистый и сухой озонированный воздух, который по результатам исследований содержит меньший процент углекислоты, чем внешний воздух.

Не вдаваясь в детали эволюции примененных систем вентиляции на линиях Андерграунда, необходимо остановиться на наиболее совершенной системе, примененной при постройке одной из последних линий Андерграунда: Финсбери-парк — Кокфостер.

Здесь весьма удачно для вентиляции использованы рабочие шахты щитовой проходки при сооружении тоннелей. Шахты расположены примерно посредине между станциями на расстоянии 750 *м*, в зависимости от местных условий, и имеют диаметр поперечного сечения 3,06 *м*. Шахты соединены подходными галлереями сечением 3 *м* с основными перегонными тоннелями. Сверху шахты имеют вентиляционное здание размерами в плане $12{,}2 \times 11$ *м*, где размещены два центробежных вентилятора мощностью в 2 000 $м^3$/*мин*. Один из вентиляторов непрерывного действия, а другой пускается в случае необходимости (при значительном повышении температуры воздуха в тоннеле). Вентиляторы делают 480 *об/мин*. Мощность каждого из моторов, приводящих в движение вентилятор, 30 *л. с.* Скорость движения воздуха — 5,6 *м/сек*.

Между тоннелями станций пройдены вентиляционные шахты $D = 1{,}5$ *м*, через которые нагнетается воздух для вентиляции станции. Воздух подводят под платформы станций; через каналы и отверстия на уровне 2,28 *м* от отметки платформы он распространяется по тоннелю станции.

Станция, кроме того, оборудуется местной системой вытяжной вентиляции для освежения обслуживающих помещений и машинной камеры эскалаторов, где работают вентиляторы с моторами по 5 *л. с.*

При осмотре автором вентиляционного здания станции Вуд Грин вентиляторы не работали. Но часто движущиеся поезда в тюбах при малых зазорах между вагоном и внутренней поверхностью тюба создают такое сильное разрежение, что временами в искусственном побуждении прямой необходимости не вызывается.

В настоящее время в тоннелях лондонского Андерграунда установлено до 85 вентиляторов производительностью от 5 000 до 100 000 куб. футов в минуту, общей производительностью до 4 000 000 куб. футов в минуту. При расчете вентиляции учитывалось повышение температуры в тоннеле от наличия пассажиров, тепло электрической энергии (движение поездов, торможение, освещение, работа эскалаторных и насосных установок,

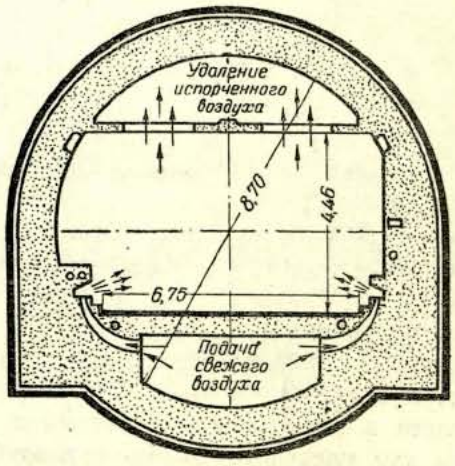


Рис. 586. Схема вентиляции тоннеля для автомобильного движения

сигнализационных устройств и др.). Кроме того, в 1938 г. были проведены специальные экспериментальные работы и исследован вопрос аккумуляции тепла в мощном пласте лондонской глины, в котором заложены тоннельные сооружения Андерграунда. Для выявления характера и глубины проникания тепловой волны в грунтовый глинистый массив, окружающий тоннели новой линии — Илфорд — лондонского Андерграунда, за обделку тоннелей на глубину 1,5—3,0 м были заложены особые термометры сопротивления. При этом проводились наблюдения и исследования вентиляционного режима в разное время года, причем учитывались изменения тепловыделений в тоннелях при продолжительном периоде эксплоатации Андерграунда. В результате исследования были внесены существенные коррективы в общую систему вентиляционного режима тоннелей и станции. В 1940 г. система вентиляции опять претерпела изменения в связи с использованием Андерграунда как массового бомбо- и газоубежища для жителей Лондона в период воздушных атак.

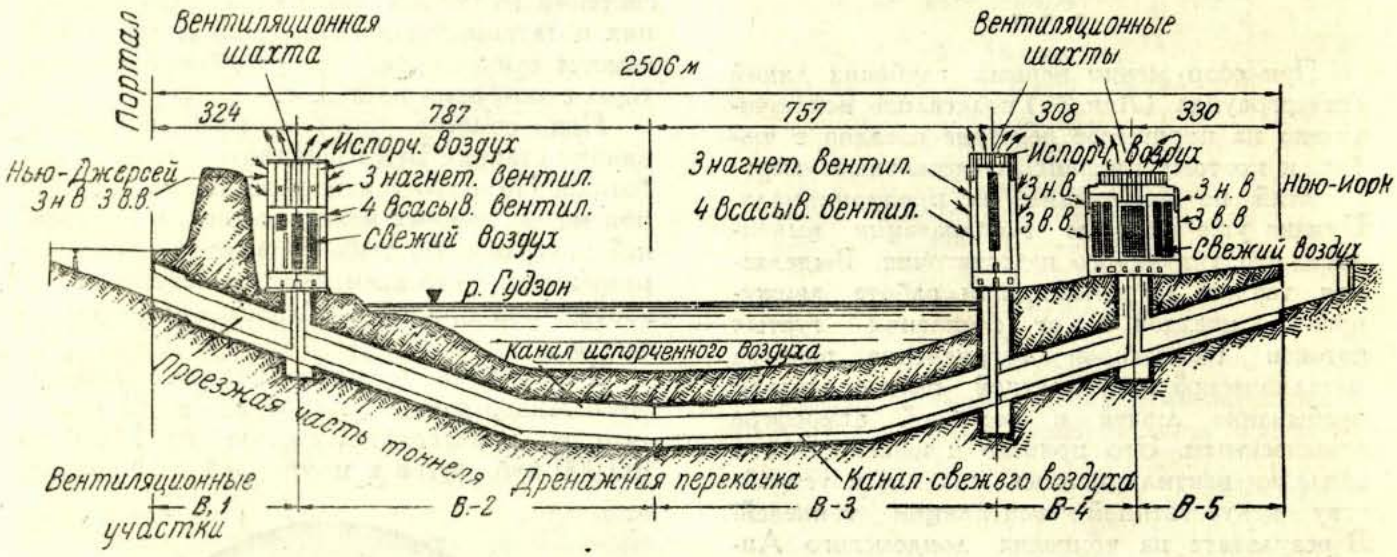


Рис. 587. Схема вентиляции подводного тоннеля для автомобильного движения

ВЕНТИЛЯЦИЯ ТОННЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В ПЕРИОД ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ

В процессе производства тоннельных работ выявляется необходимость в вентиляции или проветривании места работ эффективным удалением вредных газов, образующихся от присутствия людей, механизмов и от продуктов взрывных работ.

При проходке тоннельных выработок на протяжении до 200 м иногда представляется возможным обойтись естественной вентиляцией.

В целях обеспечения наилучшей естественной вентиляции желательно форсировать сбойку штольневых выработок, а также проходку вентиляционных шурфов или буровых скважин. При наличии штольни, которая имеет один выход к порталу, а другой непосредственно у шахты, восстанавливается естественный ток воздуха, со скоростью, которая определяется по формуле:

$$V = \sqrt{2g\alpha \frac{H(t-t_0)}{1+\alpha t_0}},$$

где H — разница веса воздушного столба, t — температура в тоннеле, t_0 — температура воздуха у портала, α — коэфициент расширения воздуха, g — ускорение силы тяжести.

По мере удаления лба забоя выявляется настоятельная необходимость в применении искусственной вентиляции. Вентиляция может быть осуществлена как подачей воздуха по трубопроводам, так и по вентиляционным штольням, проложенным параллельно сооружаемому тоннелю. Вентиляционные штольни применялись при прокладке Симплонского, Моффетского и других тоннелей.

При сооружении Симплонского тоннеля свежий воздух подавался по штольневой гал-

лерее сечением 8,5 $м^2$. Эта штольня была пробита параллельно и на расстоянии 17 *м* от оси главного тоннеля. Через каждые 200 *м* вентиляционная галлерея соединялась по-

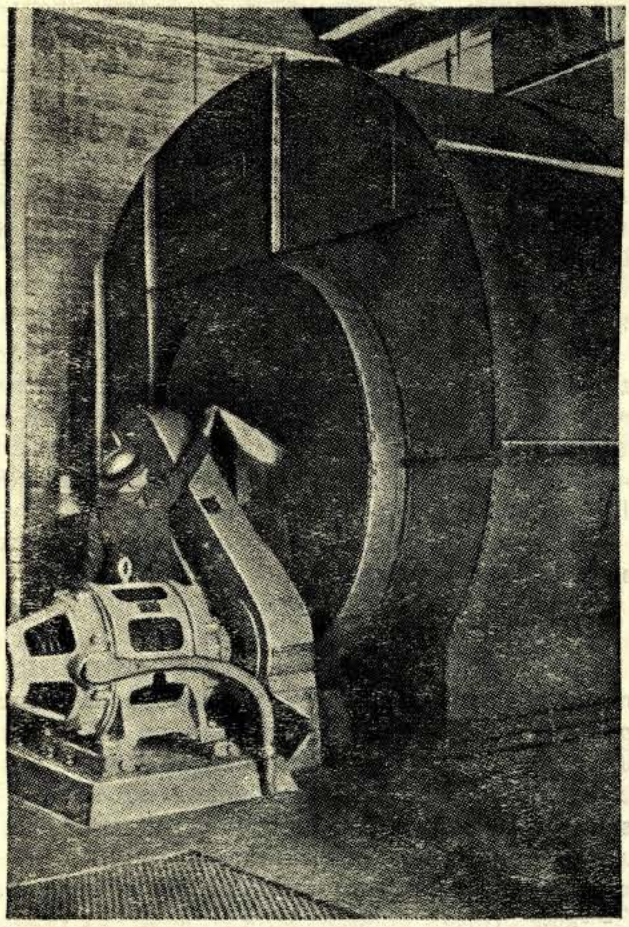


Рис. 588. Вентилятор системы Стюрвейнт для подводного тоннеля, предназначенного под автомобильное движение под р. Гудсон (вентилятор производительностью 6 400 $м^3/мин$)

перечными квершлагами под углом 60° непосредственно с основным штольневым ходом. Устройством ряда перемычек, установленных в квершлагах, удавалось свежий воздух подавать по вентиляционной галлерее непосредственно к забою основных выработок.

При производстве тоннельных работ, для обеспечения свежего воздуха в выработках, рекомендуется по возможности отказываться от применения бензиновозов, паровозов, которые отравляют воздух и затрудняют условия забоя.

Применение пневматического оборудования тоннелей в значительной степени способствует проветриванию самого забоя.

При проходке тоннелей в условиях холодного климата иногда воздух, прежде чем подавать его непосредственно к забою, приходится подогревать. Наоборот, в глубоко заложенных тоннелях при наличии высокой температуры окружающих пород помимо вентиляции применяют для охлаждения воздуха специальные мероприятия, например пульверизаторы, которые разбрызгивают холодную воду по забою (рис. 589). Эта вода подается по изолированным трубопроводам.

При высоких температурах в тоннеле приходится охлаждать воздух. Так, при проходке Симплонского тоннеля воздух, направляемый в забой, пропускался предварительно через холодильную установку. При этом воздух направлялся в забой с температурой до 5° С. В Симплонском тоннеле температура породы достигла 55° С, и при помощи указанных мер удавалось снижать температуру в забое до 25° С. Следует указать, что нормальное производство тоннельных работ должно протекать при температуре воздуха в забое, не превышающей 25—27° С.

В практике установились следующие методы проветривания тоннельных забоев:

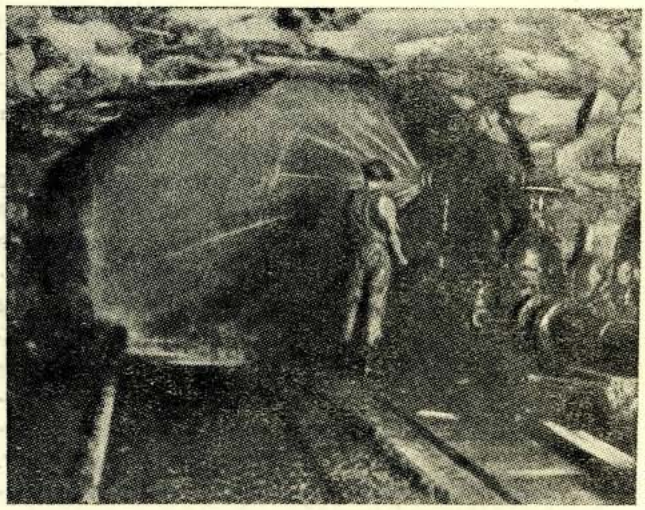


Рис. 589. Освежение воздуха в забое Симплонского тоннеля разбрызгиванием холодной воды

1) метод нагнетания в призабойный участок свежего воздуха по вентиляционным трубопроводам;

2) метод отсасывания из призабойного участка испорченного воздуха по вентиляционным трубопроводам;

3) комбинированный метод нагнетания свежего воздуха в забой с одновременным

или последующим отсасыванием испорченного воздуха.

Эффективность применения того или иного метода очищения тоннельных выработок от вредных газов в каждом отдельном случае определяется технико-экономическими расче-

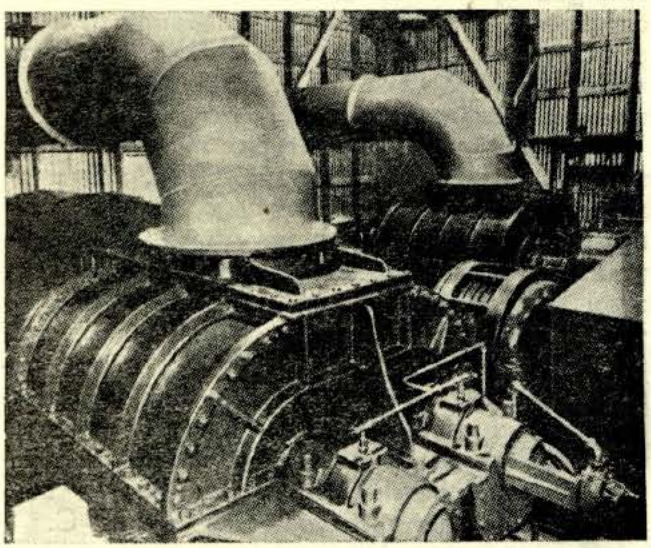


Рис. 590. Вентиляционные установки

тами. Необходимо установить достаточное для вентиляции тоннельных выработок количество воздуха, а равно определить целесообразствующие размеры вентиляционных труб, тип и мощность вентиляторов.

В тоннельной практике преимущественно применяются приведенные выше два метода искусственной вентиляции — нагнетательная система и всасывающая. В первом случае свежий воздух подводится по трубопроводам непосредственно к забою; при этом испорченный воздух выталкивается наружу под действием нагнетательной системы. При всасывающей системе испорченный воздух при помощи вентиляторов вытягивается наружу. При этом создается ток свежего воздуха, устремляющегося в разрежаемое пространство тоннельных выработок.

Расчет вентиляции должен вестись, принимая во внимание размеры поперечного сечения тоннельных выработок, по числу людей в забое, по степени испорченности воздуха (от температуры, от химического разложения горных пород, от выделения газов и горячих источников в забое), по количеству ядовитых газов, по максимальному одновременному расходу взрывчатого вещества и по роду энергии, применяемой при самих работах.

Помимо собственно горно-тоннельных работ по разработке забоя, при расчете вентиляции необходимо также учесть условия бетонных, изоляционных, торкретных и других работ, которые в значительной степени отравляют воздух подземных разработок, обогащая его углекислотой. Процесс выделения углекислоты происходит в течение длительного периода при дыхании людей и периодически в течение определенного периода взрыва.

Предельное содержание газов в воздухе тоннельных выработок составляет: 0,0016% окиси углерода, 0,0007% сернистого газа и 0,00066% окислов азота.

Содержание углекислоты в воздухе тоннеля не должно превышать 0,2%.

Проветривание тоннельных выработок должно строго удовлетворять требованиям техники безопасности в отношении чистоты и норм подаваемого в тоннель воздуха. В частности, имеется в виду обеспечение не менее 1,5 $м^3/мин$ на каждого подземного рабочего.

Расчет потребного количества воздуха выражается формулой [1]:

$$Q = 1{,}5\sqrt[3]{\frac{Q_1 q^2}{\alpha \cdot C}},$$

где Q_1 — количество воздуха, необходимое для разжижения газов от взрывных работ до 0,02% CO, q — количество подаваемого воздуха для однократного обмена в объеме всей вентилируемой выработки в течение определенно принятого промежутка времени, α — коэфициент аэродинамического сопротивления, C — допустимая концентрация ядовитых газов.

Расчет мощности вентиляционных устройств в период производства тоннельных работ может быть произведен по формуле:

$$N = \frac{Q.H}{75\,\eta},$$

где Q — расход воздуха, η — коэфициент полезного действия, H — величина максимальной депрессии в *мм* водяного столба.

$$H = 6{,}5\ \alpha\ .p\frac{L \cdot Q_1^2}{d^5},$$

где α — коэфициент аэродинамического сопротивления трубопровода — 0,0003—0,0005, ρ — коэфициент потерь на всю длину трубопровода, L — длина трубопровода, d — диа-

[1] В. Н. Воронин и Л. Д. Воронина, Проветривание металлических рудников после взрывных работ (Инструкция, составленная под научным руководством акад. А.А. Скочинского), 1943.

метр трубопровода, Q_1 — количество воздуха у тоннельного забоя.

Скорость движения воздуха в тоннельных выработках не должна превышать 6 *м* в секунду.

Там, где можно ожидать поступления в выработки подземных газов, необходимо производить специальный лабораторный анализ проб воздуха.

В частности, если обнаружено выделение гремучего газа, требуется установление специального газового режима, причем пробы воздуха должны браться через каждые три часа.

Для наиболее интенсивной вентиляции тоннельных выработок применяется проходка шахт, приводящих к одно- и многошахтной системе вентиляции. При одношахтной системе осуществляется подача и вытяжка воздуха при наличии специальной воздушной диафрагмы.

При наличии ряда шахт возможно одни шахты специализировать для подачи свежего воздуха, другие — для вытяжки. Размеры поперечных сечений шахт должны быть рассчитаны в соответствии с допускаемыми скоростями движения воздуха до 6 *м/сек*.

В тоннельной практике проветривания тоннелей применяется комбинированная система вытяжки испорченного воздуха и нагнетания свежего воздуха. Имеется в виду применение непосредственно после взрыва вытяжки испорченного воздуха, а в остальное время подача свежего воздуха в забой. При этом работа вентилятора происходит реверсивным действием (рис. 590).

В практике считают, что процесс вентиляции должен быть рассчитан таким образом, чтобы в течение 10—15 минут после производства взрыва все вредные продукты взрывчатых веществ были удалены из забоя. При этом процентное содержание ядовитых газов в воздухе забойного пространства не должно превышать норм, установленных по условиям техники безопасности.

При сооружении Симплонского тоннеля искусственная вентиляция была рассчитана на наличие в разработках до 1 000 рабочих с лампами и на взрывные работы динамитом. При шестикратном обмене воздуха по расчету требовалась подача до 50 $м^3$ свежего воздуха в секунду; однако практически оказалось достаточным нагнетательной вентиляционной системы, вырабатывающей до 35 $м^3$ свежего воздуха в секунду.

* * *

При сооружении метрополитенов приходится учитывать специфичность строительства городских тоннелей. Для примера приведем данные вентиляции выработок, основываясь на опыте постройки тоннелей Московского метрополитена.

При проходке штолен по трассе, а равно при сооружении основных тоннелей щитовым или горным способом проветривание забоя в период проходки осуществляется при помощи двух-трех вентиляторов типа Сирокко, размещенных в помещении у надшахтного здания. Расположение вентиляторов на поверх-

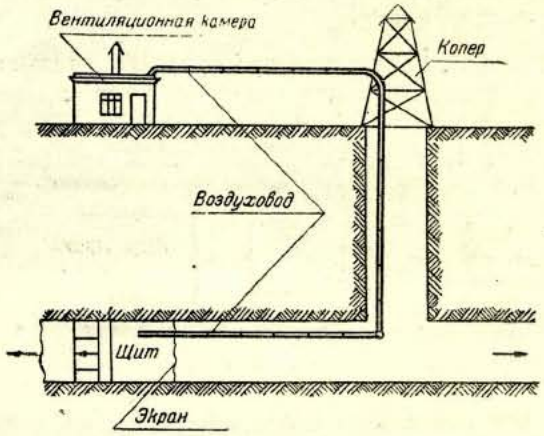


Рис. 591. Вентиляция при глухих щитовых забоях

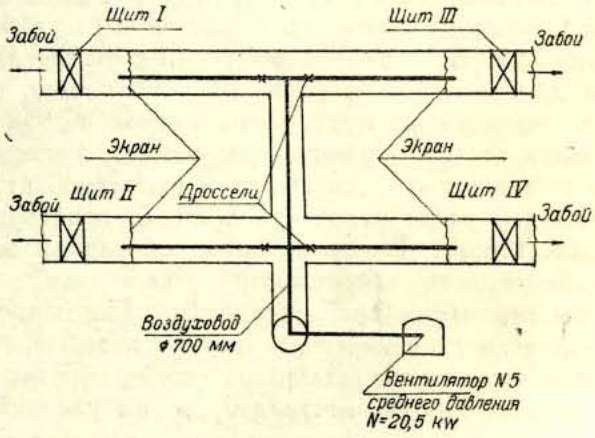


Рис. 592. Вентиляция при глухих щитовых забоях

ности упрощает обслуживание агрегатов. Воздушные трубопроводы ведутся от вентиляционной установки по стволу, подходным штольням и по основной трассе непосредственно к забою (рис. 591, 592).

Вблизи последнего подвешен брезентовый занавес — *парус*, предназначенный задерживать продукты взрыва — вредные газы, не давая им распространяться по тоннелю непосредственно после выпала. При проходке штолен и тоннелей по трассе подземного кольца 4-й очереди строительства Московского метрополитена в скальных породах взрывными работами, в целях эффективного проветривания забоя после паления, применялось

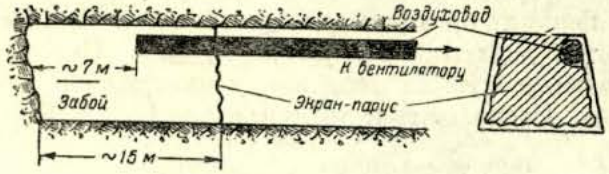


Рис. 593. Вентиляция при проходке штольни

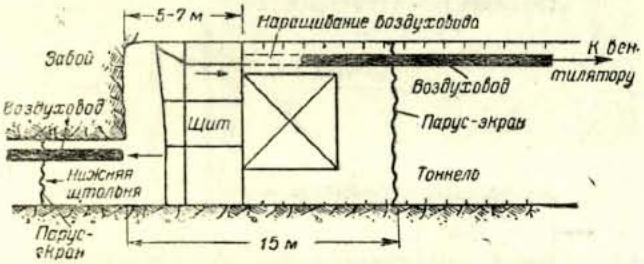


Рис. 594. Вентиляция при проходке щитом с передовой штольней

специальное устройство в виде водяного экрана. В зависимости от размеров и очертания выработок к элементам крепления в забое подвешивается трубчатый экран с отверстиями для распыления воды, образуя завесу, не допускающую распространения газов. Концентрируя газы в ограниченном объеме, возможно интенсивным отсасыванием вытяжной вентиляцией резко сократить время на проветривание забоя. Такая система обусловливает необходимость обеспечения реверсивной работы вентиляционной установки. Нормально производится нагнетание воздуха в забой, но после взрыва специальными шиберами переключают работу вентиляторов на удаление газов из забоя путем вытяжной вентиляции (рис. 593, 594).

Монтаж воздухопроводов произведен с таким расчетом, чтобы в случае остановки одного из вентиляторов другие могли путем переключения работать нормально в общую вентиляционную сеть.

При наличии сбитых передовых штолен по трассе проветривание забоя осуществляется совместной работой вентиляционных установок смежных шахт.

При наличии *«глухого» забоя* вентиляция тоннеля в скальных породах, требующих применения взрывных работ, становится более сложной по мере удаления забоя на расстояние более 300—500 *м* от ствола шахты. В этом случае, как показала практика проходки тоннелей 3-й очереди строительства Замоскворецкого и Покровского радиусов Московского метрополитена, необходимо по трассе дополнительно заложить ряд вентиляционных буровых скважин диаметром до 500 *мм* через каждые 200—250 *м*, в зависимости от местных условий. Наличие этих скважин способствует эффективному разрешению вопроса вентиляции при проходке тоннелей «глухим» забоем.

При подсчете потребного количества воздуха для обеспечения вентиляцией нормальных условий производства подземных работ учитывают:

1) максимальный расход взрывчатых веществ за один выпал;

2) максимальное число людей, работающих в тоннеле одновременно (от подходной штольни до забоя).

Ниже приводим пример расчета вентиляции при производстве тоннельных работ в условиях метростроения, базируясь на следующих данных:

а) расход аммонита за один выпал при проходке тоннеля щитом — 8 *кг*;

б) 1 *кг* аммонита № 2 после взрыва выделяет 900 *л* газа, содержащего 29,29% углекислоты и 0,21% двуокиси азота;

в) время на проветривание забоя после выпала — 15 минут;

г) максимальное число людей, одновременно находящихся в тоннеле, — 30 человек;

д) количество воздуха на одного подземного рабочего — 90 $м^3$/*час*.

А. Потребное количество подаваемого воздуха по людям.

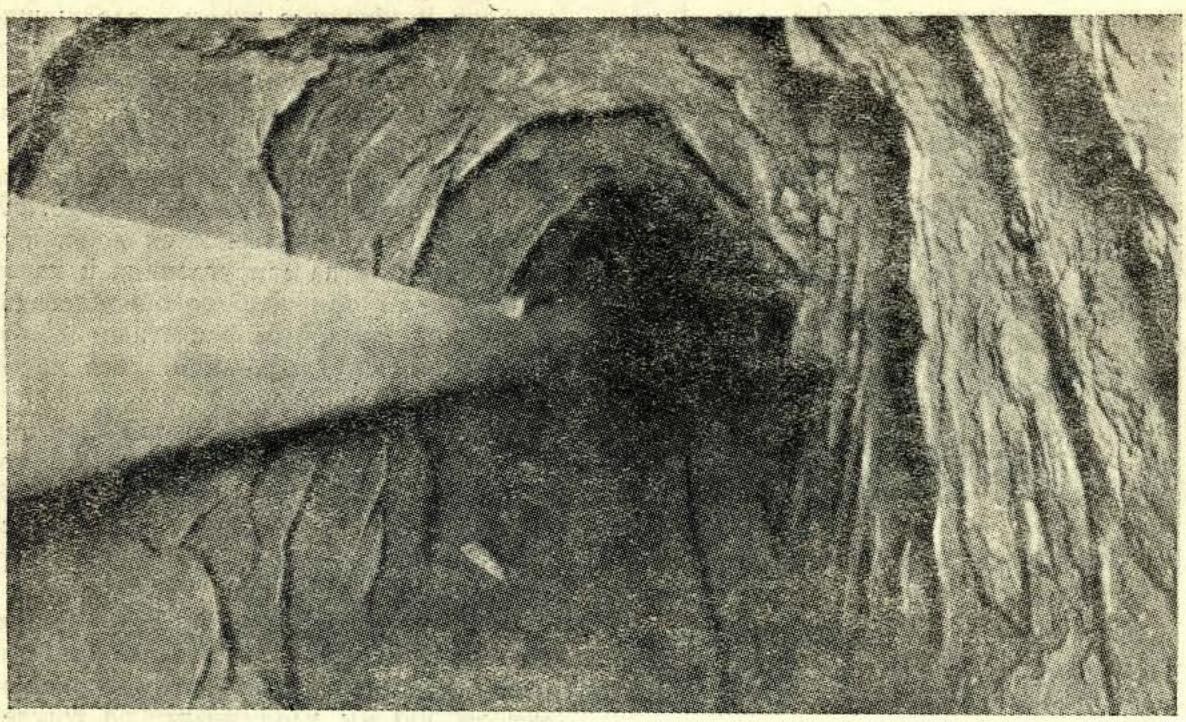
Количество воздуха вычисляется по формуле:

$$Q_1 = 90 \cdot 30 = 2700 \ м^3/час.$$

Б. Потребное количество подаваемого воздуха по углекислоте.

1 *кг* аммонита после взрыва выделяет газы с 30-процентным содержанием углекислоты в количестве $900 \cdot 0{,}3 = 270$ *л* CO_2.

Предполагается, что после проветривания забоя в течение 15 минут содержание угле-



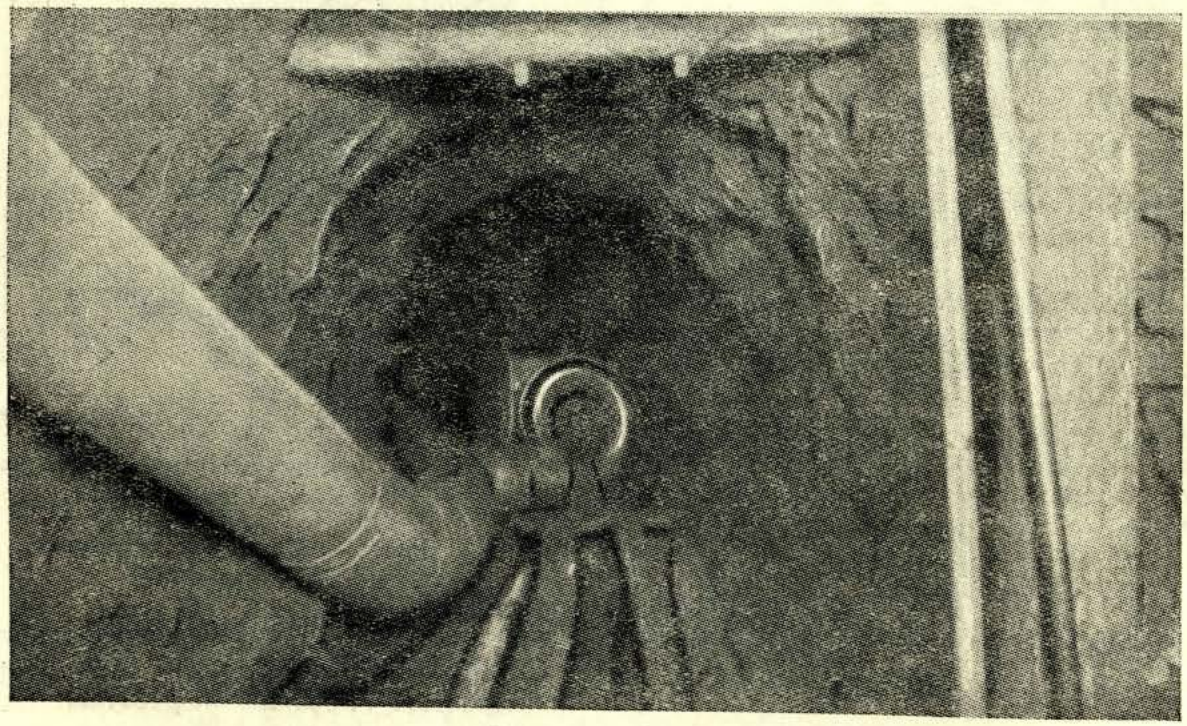


Рис. 595 и 596. Воздухопроводы в подземных выработках

кислоты в воздухе у забоя составит 3,5 *л* на 1 $м^3$ воздуха. Содержание углекислоты в подаваемом воздухе принимается 0,6 *л* на 1 $м^3$ воздуха.

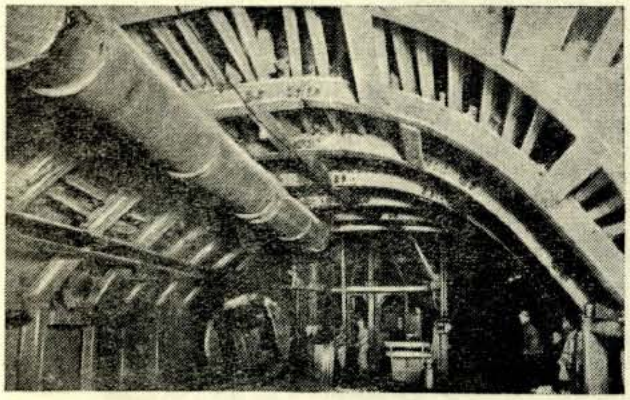


Рис. 597. Воздухопровод при проходке тоннеля

Для разбавления углекислоты в воздухе до принятой нормы после взрыва 8 *кг* аммонита необходимо в течение 15 минут подать:

$$\frac{270 \cdot 8}{3{,}5 \cdot 0{,}6} = 744 \text{ } м^3 \text{ воздуха},$$

что составляет $Q = 2\,976$ $м^3/час$.

В. Потребное количество подаваемого воздуха по двуокиси азота.

Количество двуокиси азота составляет:

$$900 \cdot 0{,}0021 = 1{,}9 \text{ } л.$$

Принимая, что 1 *л* двуокиси азота эквивалентен по вредности 10 *л* углерода, имеем: $1{,}9 \cdot 10 = 19$ *л*.

По правилам техники безопасности допускается содержание окиси углерода в воздухе не более 0,02% к моменту допуска рабочих в забой.

Таким образом, потребное количество воздуха для разжижения двуокиси азота на 8 *кг* аммонита в течение 15 минут составит

$$\frac{19 \cdot 100 \cdot 8}{0{,}02 \cdot 1\,000} = 760 \text{ } м^3.$$

Потребный расход воздуха в час составит:

$$Q_з = 3\,040 \text{ } м^3/час.$$

В данном примере для расчета вентиляционной установки принимается количество воздуха, полученное по двуокиси азота, как максимальное.

При расчете вентиляционной сети, величины депрессии, производительности вентиляторов необходимо учесть следующие данные: неплотности в соединениях трубопроводов обусловливают необходимость при расчете учитывать потери воздуха, подаваемого в забой, в размере 10 — 15% на каждые 100 *м* воздухопровода, в зависимости от конструкции последнего (рис. 595, 596, 597).

Кроме того, учитываются дополнительные сопротивления на закруглениях и на шиберах. Практически при подборе оборудования считаются с суммарным расчетным сопротивлением всей вентиляционной сети по тоннелю в целом.

В условиях метростроения при проходке двух параллельных штолен по оси тоннелей возможно применение следующей комбинированной схемы вентиляции глухих забоев.

При одновременном ведении взрывных работ в двух забоях на поверхности у ствола шахты устанавливаются два вентилятора и по стволу ведется два «става» вентиляционных труб, соединенных с трубопроводами диаметром 500 *мм*, уложенными по трассе до забоя (рис. 598, 599). Вентиляторы системы Сирокко № 5 среднего давления, производительностью 11 000 $м^3/час$ работают на всасывание.

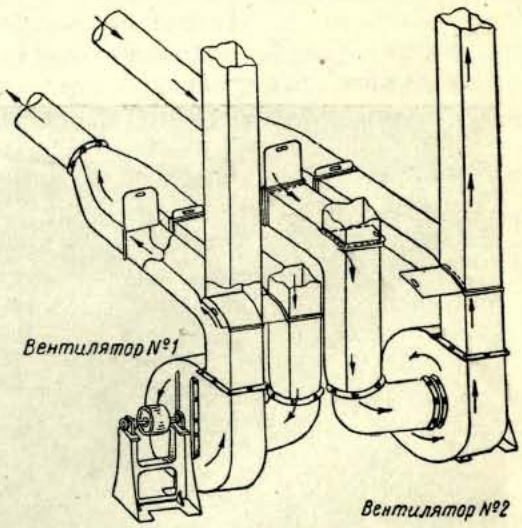


Рис. 598. Схема вентиляционной установки

В расстоянии до 30 *м* от лба каждого из забоев устанавливается по одному осевому вентилятору ЦАГИ № 5 производительно-

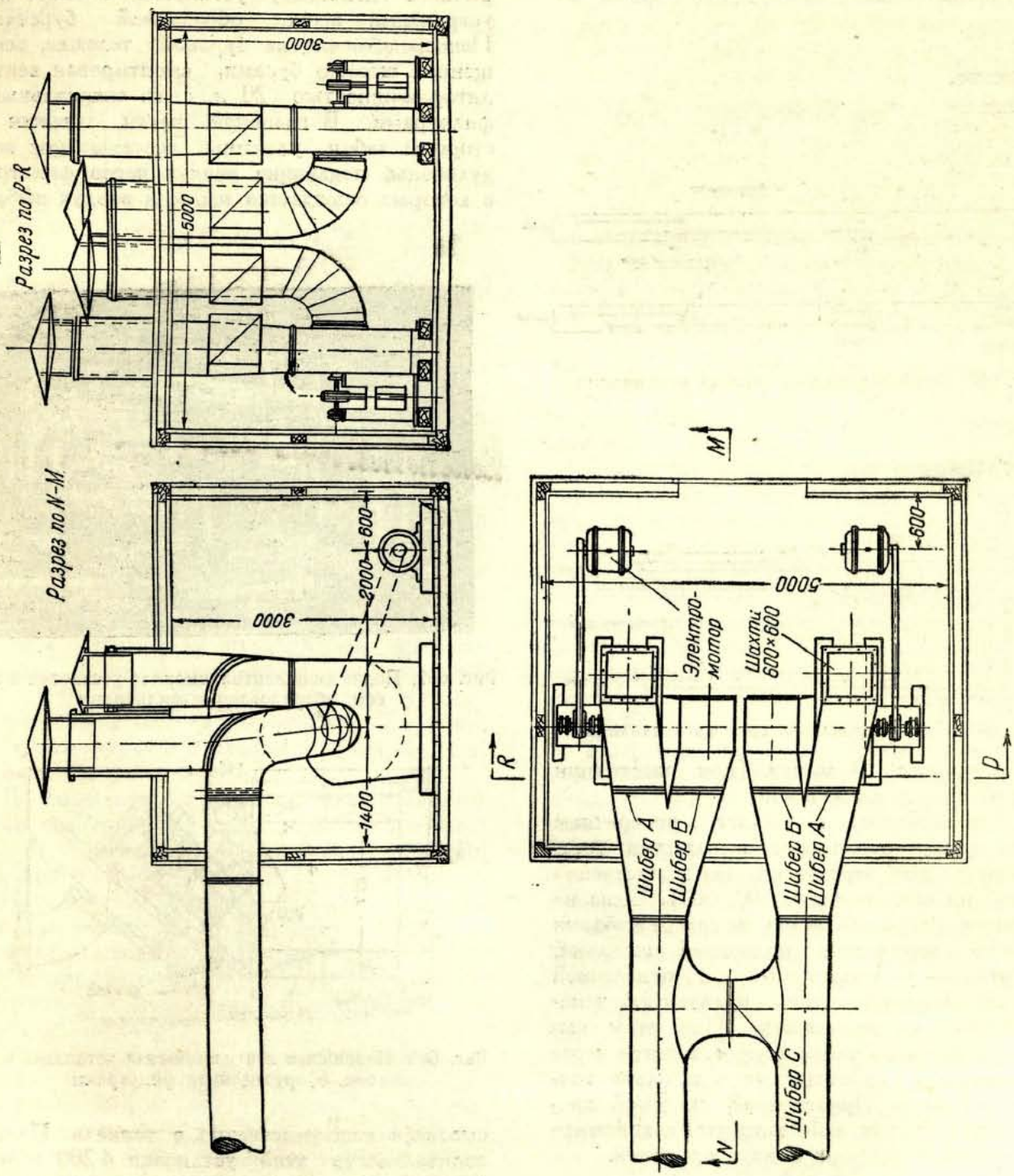


Рис. 599. Схема вентиляционной установки

стью 5 000 $м^3$, работающему на нагнетание. По мере продвижения забоя производится перенос вентилятора и наращивание труб десятиметровыми секциями; при такой системе проветривание забоя после взрыва ве-

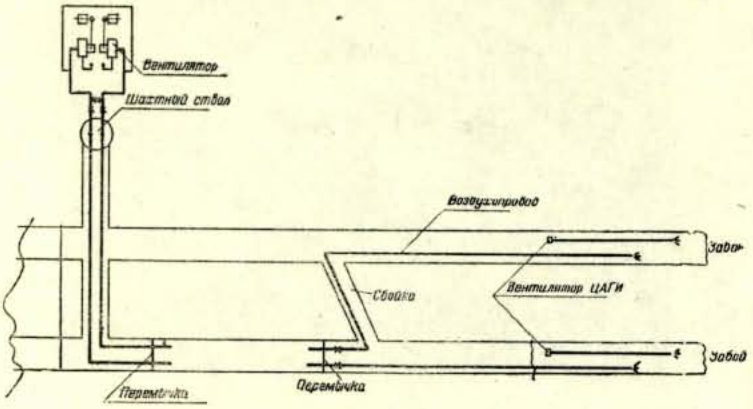


Рис. 600. Комбинированная система вентиляции

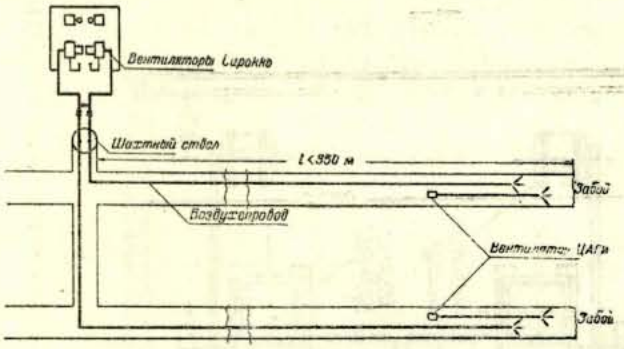


Рис. 601. Комбинированная система вентиляции

дется в течение 10 минут (при расстоянии забоя от ствола до 350 *м*).

В дальнейшем, используя поперечные сбойки между основными штольнями, устанавливают две перемычки непосредственно в одной из штолен (рис. 600, 601). Одна из перемычек устанавливается по трассе штольни в месте сопряжения подходной штольни, а другая — у сопряжения с поперечной сбойкой. Воздухопроводы подводятся непосредственно к перемычкам. При этом вытяжка воздуха из забоя осуществляется через образованную перемычками в штольне воздушную камеру. Приведенной системой проветривания глухих забоев удается сэкономить значительный погонаж воздухопроводов.

* * *

В последнее время в США, при строительстве тоннелей метрополитена в Нью-Йорке (под Шестой авеню), а равно при сооружении тоннеля Делойэр, при проходке в сухих скальных породах была применена специальная подвижная вентиляционная (вторичного действия) установка в забое для устранения пыли, образуемой бурением. Непосредственно на буровой тележке, оснащенной шестью бурами, смонтирован вентилятор мощностью 20 *л. с.* со специальными фильтрами. В головной части тележки со стороны забоя уложены всасывающие воздуховоды, подающие воздух через фильтры, в которых осаждается пыль, и воздух выбра-

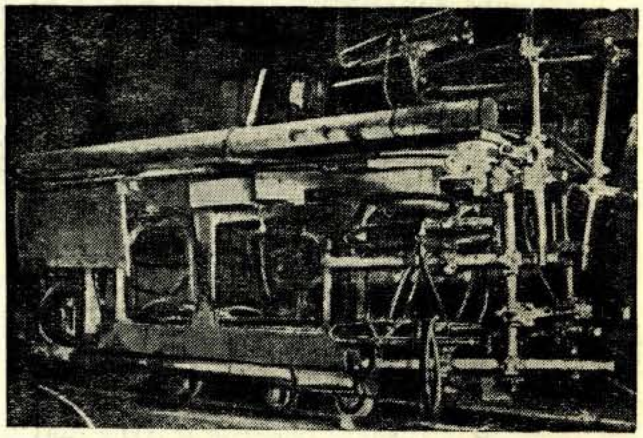


Рис. 602. Подвижная вентиляционная установка в забое, оборудованная фильтрами

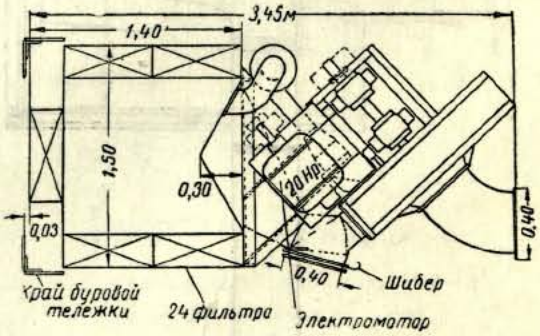


Рис. 603. Подвижная вентиляционная установка в забое, оборудованная фильтрами

сывается непосредственно в тоннель. Производительность этой установки 4 200 $м^3$/*час*, причем работа ее значительно снижает мощность основной вентиляционной системы (рис. 602, 603).

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

СООРУЖЕНИЕ ПОДВОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ

ОБЩИЕ ДАННЫЕ

При усиленном развитии автомобильного движения в крупных городах густонаселенные части города, разделенные между собой речным протоком, соединяют постройкой подводного тоннеля (рис. 604). В этом случае удается разрешить задачу непрерывности автомобильного движения (рис. 605) при сохранении непрерывности судоходного движения по реке. При разрешении вопроса автомобильного транспорта между двумя берегами реки заблаговременно выясняют целесообразность постройки в местных условиях моста или подводного тоннеля. Когда высота габарита над уровнем воды доходит до 30 *м* (и даже до 60 *м*), длина подходов к мосту оказывается весьма значительной (рис. 606). Это обстоятельство сильно стесняет прибрежные части города и осложняет его архитектурную планировку в местах подходов к мосту.

В оборонном отношении мост является уязвимым сооружением, в то время как тоннель не только не имеет этого недостатка, но еще, кроме того, может служить убежищем.

При проектировании подводного тоннеля для автомобильного движения в плане и профиле необходимо считаться с архитектурной планировкой береговых участков в месте расположения рамп (портальных участков) и выходов тоннелей.

Уклоны тоннеля должны быть увязаны непосредственно с глубиной заложения тоннелей под руслом реки. При этом учитывается максимальная глубина в фарватере реки и возможные в будущем дноуглубительные работы, определяющие максимальную осадку судов.

Необходимо обеспечить надлежащую кровлю над шелыгой свода, в особенности при щитовых работах под сжатым воздухом, во избежание прорыва воздуха и затопления тоннеля. Только в виде исключения прибегают к устройству искусственной кровли над шелыгой свода в виде глиняных «пластырей» и тюфяков. С другой стороны, заглубление шелыги свода может привести к очень значительным уклонам к тоннелю и осложнить в дальнейшем нормальные условия эксплоатации его.

Принятые в практике максимальные уклоны для американских подводных автомобильных тоннелей составляют от 3,3 до 5% (3,3% для Бостонского тоннеля, 3,8% для Холланд-тоннеля, 5% для Детройтского тоннеля).

Максимальные уклоны, принятые на европейских подводных автомобильных тоннелях, составляют: 3,3% для тоннеля под р. Мерси в Ливерпуле, до 3,5% для Шельдского тоннеля в Антверпене (см. табл. 48, стр. 640).

Проектирование тоннеля в плане и профиле должно быть увязано с уличным движением и в особенности с выездами из тоннеля и с въездами в него. В этом случае перед рампами устраивают площадки и островки, обеспечивающие правильность и непрерывность движения через тоннель.

Ширина проезжей части тоннеля должна определяться расчетом его пропускной способности. При определении пропускной способности необходимо учитывать безопасное следование автомобилей с определенной скоростью в течение одного часа через данное поперечное сечение. При установлении поперечного сечения подводного автомобильного тоннеля следует считаться как с шириной проезжей части и высотой тоннеля, определяемых максимальными габаритами автомашин, так и с размерами вентиляционных каналов и служебных тротуаров (рис. 607). Форма поперечного сечения подводного тоннеля назначается в зависимости от

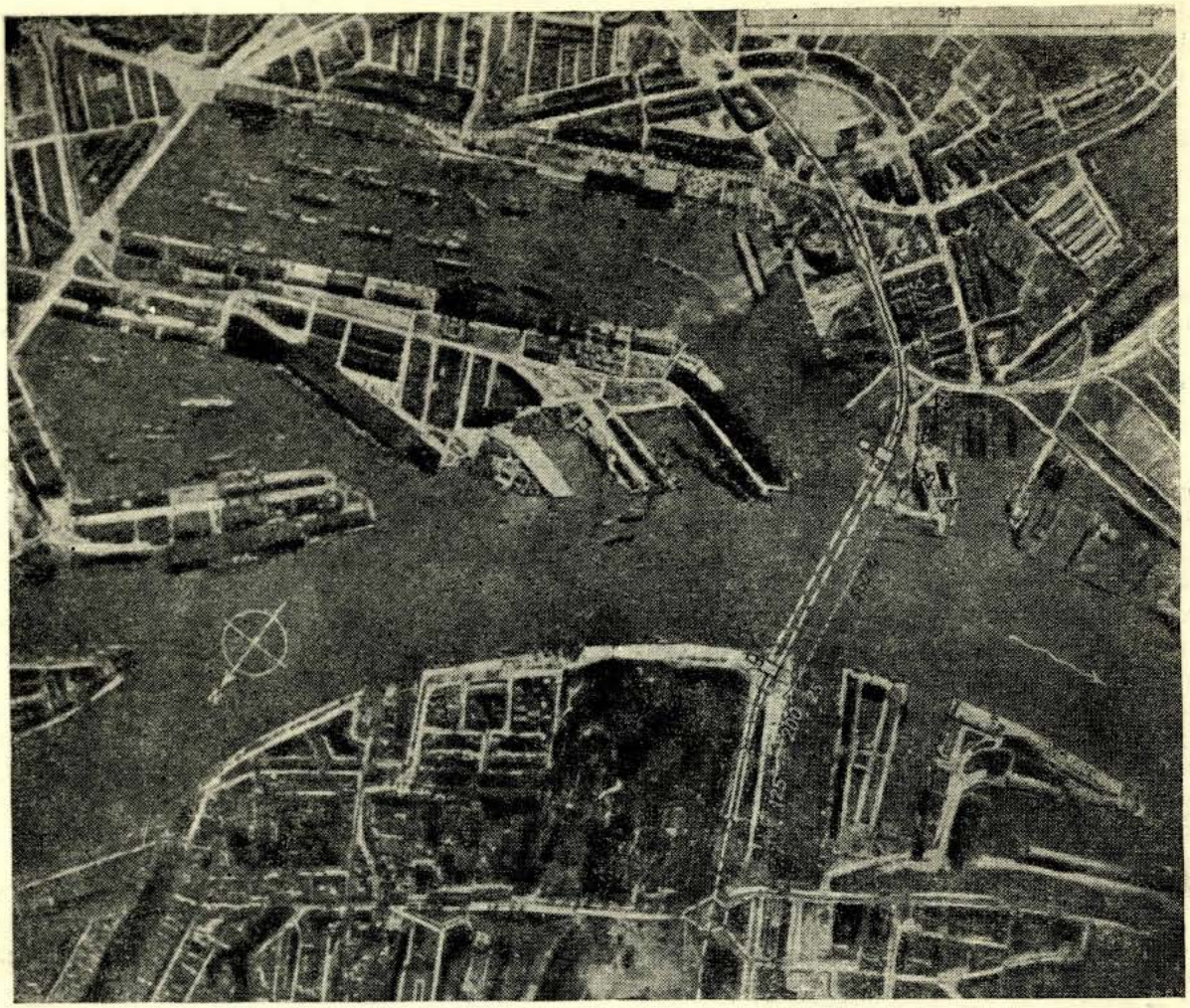


Рис. 604. Общий план подводного тоннеля под. р. Масс в Роттердаме

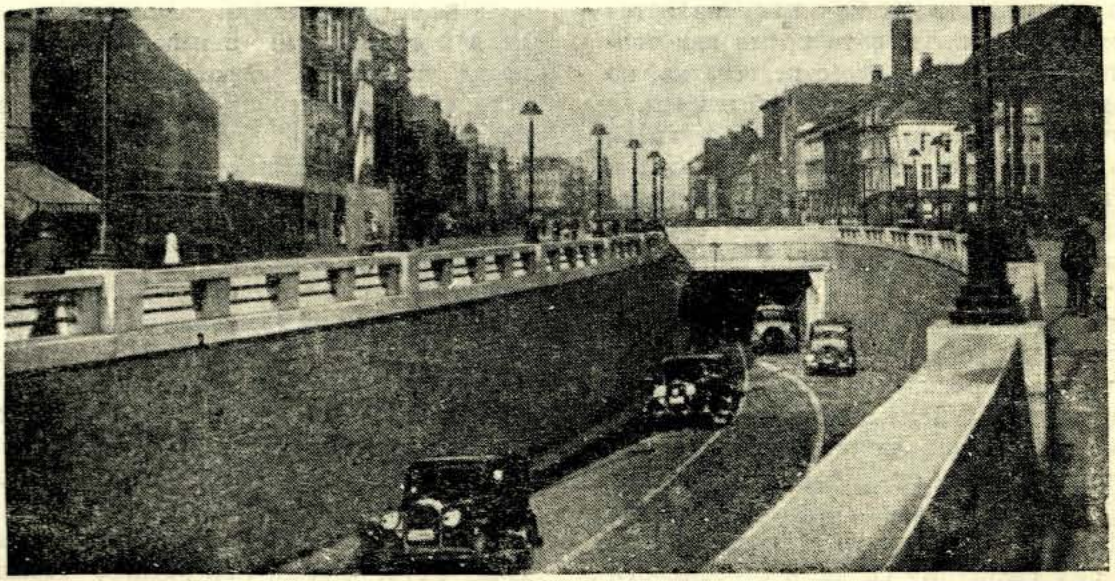


Рис. 605. Рампа подводного тоннеля под р. Шельдой в Антверпене

намеченных методов производства работ. При щитовом методе проходки наиболее рациональным является круглое сечение тоннеля; при открытом способе работ и методе опускных кессонов или заводных секций применяется прямоугольное или эллиптическое сечение.

ние спасательный экран. Последний представляет собой ограждение металлической конструкции, располагаемой в калоттной части профиля тоннеля. Этот экран перемещается вслед за щитом на расстоянии 25—30 м, в зависимости от местных условий. Подобное

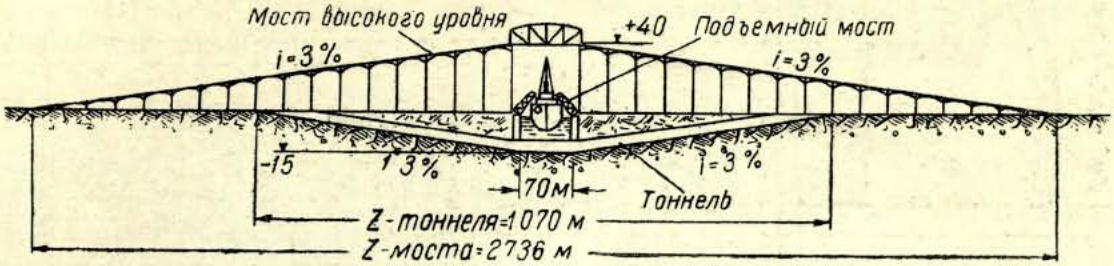


Рис. 606. Схема пересечения водного протока мостом и подводным тоннелем

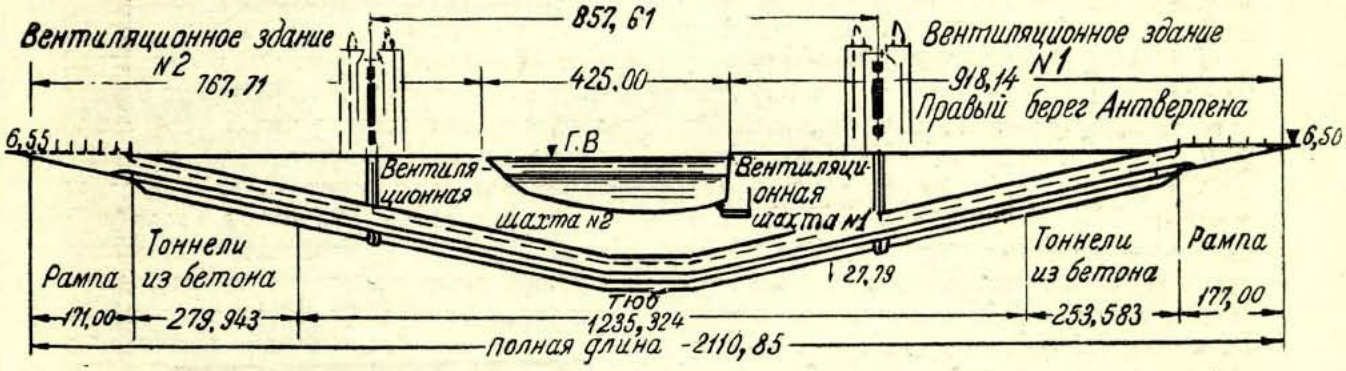


Рис. 607. Продольный профиль подводного тоннеля под р. Гудсон с вентиляционными устройствами

Проектирование подводных тоннелей для железнодорожного движения должно вестись в строгом соответствии с техническими условиями МПС на проектирование и сооружение железнодорожных магистралей.

При производстве щитовых работ в неустойчивых породах обращается особое внимание на мероприятия по безопасности ведения самих работ. В случае ведения работ без применения сжатого воздуха на определенном расстоянии за щитом обязательно устраивается перемычка с открытыми дверями, через которые производится подача материалов и выдача породы. В случае прорыва вод, угрожающего затопить тоннельные работы, двери этой перемычки немедленно закрываются. Перемычка в этом случае ограждает аварийную зону от участка готового тоннеля.

В практике сооружения подводных тоннелей получил исключительное распространение

расположение экрана создает в случае затопления тоннеля гидравлический затвор, при котором калоттная часть профиля за экраном предохранена от затопления. В конструкции спасательного экрана имеются двери, которые всегда открыты для пропуска по спасательным мосткам людей, устремляющихся в случае катастрофы к аварийному шлюзу (рис. 608).

Конструкция как экрана, так и двери должна обеспечить полную герметичность. Плотное прилегание дверей достигается соответствующим прижимом резиновых прокладок. Шлюзовая диафрагма, отделяющая зону нормального давления от зоны повышенного давления, должна обязательно предусматривать, помимо материальных и людских шлюзов, аварийный шлюз, всегда открытый со стороны сжатого воздуха. Этот шлюз должен быть рассчитан на возможность приема пол-

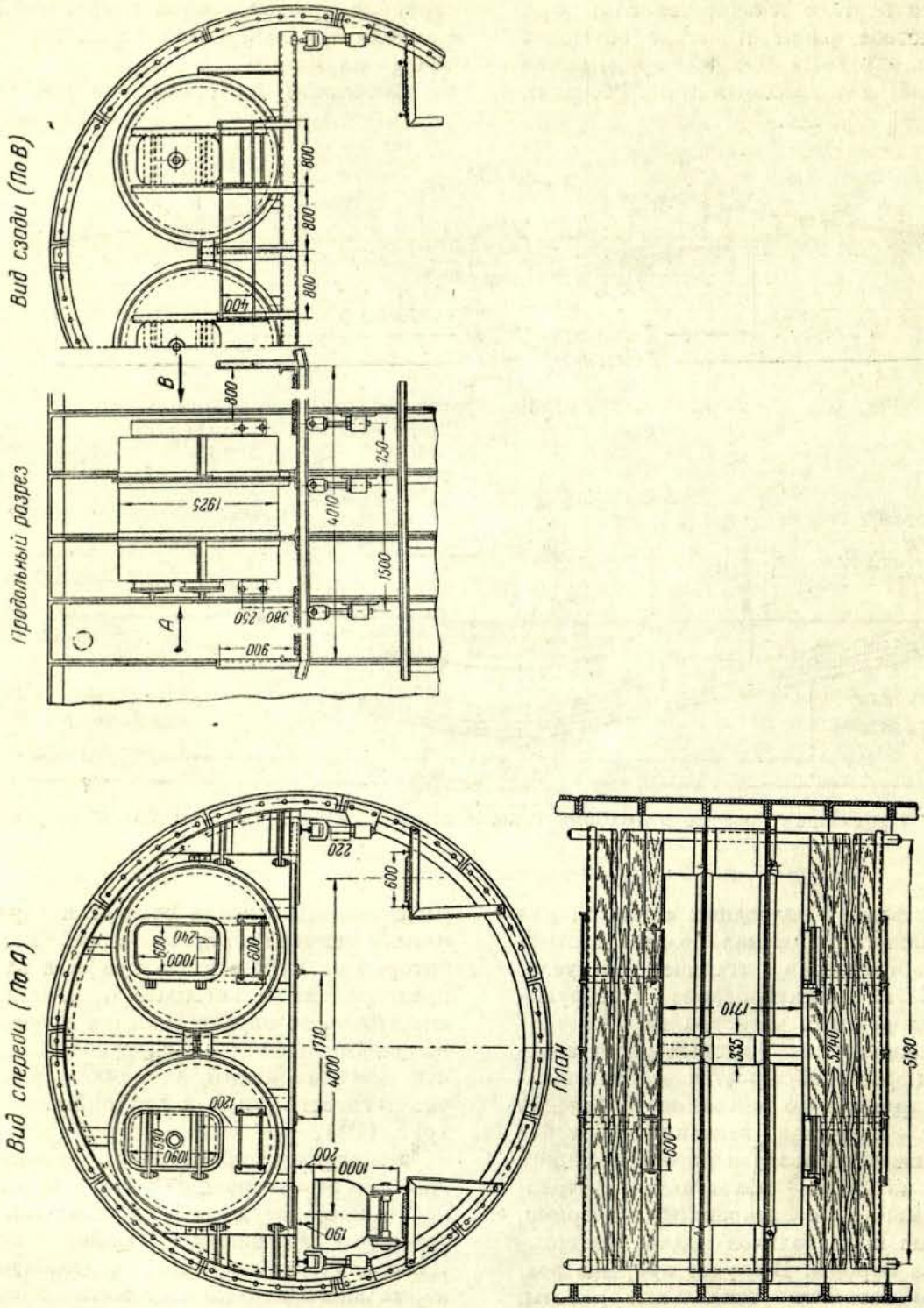


Рис. 608. Спасательный экран (конструкция)

ностью всех рабочих, находящихся под сжатым воздухом, в случае аварии (рис. 609).

Сооружение подводных тоннелей является наиболее сложной отраслью инженерного дела. В этом отношении важен богатейший опыт подводного тоннелирования за границей, в особенности американский опыт прокладки тоннелей под рр. Гудсон, Ист-Ривер, Детройт и др. Заграничная практика строительства

Приводим примеры сооружения наиболее выдающихся мировых подводных тоннелей по четырем установившимся основным способам производства работ, а именно:

а) щитовым способом,
б) открытым способом,
в) опусканием кессонов-тоннелей,
г) при помощи заводных секций.

Задача заключается в том, чтобы, изучив

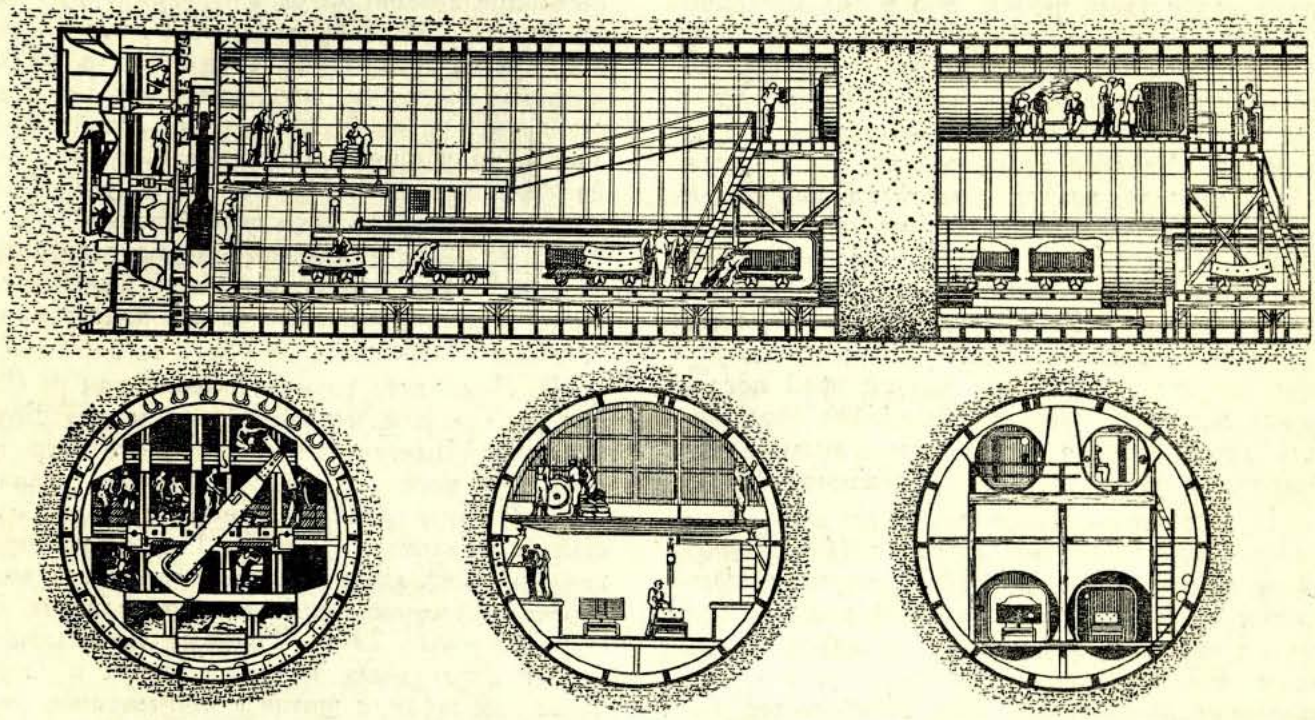


Рис. 609. Общая схема производства щитовых работ под сжатым воздухом при проходке подводного тоннеля

подводных тоннелей (в Америке и Европе) пестриг целым рядом аварий и катастроф, связанных с прорывом из реки в тоннель воды и грунта. Затопление тоннелей стоило жизни людей и громадных средств по ликвидации аварий для возможности дальнейшего ведения работ (напр., тоннели под рр. Эльбой, Темзой, Гудсон, Ист-Ривер и др.).

Иностранный опыт ряда строек подводных тоннелей является весьма ценным потому, что строитель, приступая к подобным работам, имеет возможность избежать допущенных в практике ошибок. В этом отношении важно отметить, что в Советском Союзе, где вопросу техники безопасности производства работ придается исключительно важное значение, проходка подводных тоннелей, в частности тоннели под р. Москвой, произведена безаварийно, на высоком техническом уровне.

геотехнические условия, тип и назначение тоннеля, режим реки, правильно выбрать один из приведенных выше способов работ по сооружению подводного тоннеля.

СООРУЖЕНИЕ ПОДВОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ ЩИТОВЫМ СПОСОБОМ

А. *Первый подводный тоннель под р. Гудсон.* Прокладка этого подводного тоннеля была начата с применением сжатого воздуха в 1879 г. Разработка тоннеля двухпутного профиля производилась при предварительном закреплении его чугунными сегментами и с последующим устройством внутренней бетонной обделки.

Шлюзовые аппараты были установлены непосредственно в шахте. По мере удаления от берега давление на крепь значительно

возрастало. Чугунные сегменты ломались, воздух прорывался наружу, и, несмотря на интенсивную работу компрессорной станции, давление заметно снижалось.

В дальнейшем продвижение забоя было значительно затруднено, причем чугунная крепь претерпевала большие деформации. Было решено отказаться от проходки двухпутного профиля и перейти на прокладку двух однопутных тюбов. Это в значительной степени облегчило задачу, так как при проходке тюбов меньшего сечения ощущалось несравненно меньшее давление породы. Однако дело не обошлось без строительной катастрофы. Недалеко от шлюза внутри тоннеля крепь лопнула, воздух прорвался наружу, и вода с грунтом хлынула в тоннель. Произошел обвал, погибло около 25 человек, которые оказались в «мешке» — им был отрезан путь к выходу. Работы удалось возобновить лишь после заделки места прорыва сверху при помощи кессона. За катастрофой последовал пожар в тоннеле. Окончание сооружения этого тоннеля стало возможным лишь благодаря применению кессонированного щита.

Б. *Гудсонский подводный тоннель Пенсильванской железной дороги в Нью-Йорке.* Этот тоннель, длиной 1 834 *м*, соединяет Манхэттен с Нью-Джерси железнодорожным путем. Тоннель состоит из двух тюбов диаметром 6,9 *м*, уложенных параллельно, на взаимном расстоянии 11 *м*. Наибольшее заглубление тоннеля от поверхности воды 29,1 *м*. Сооружение тоннеля велось из двух шахт, расположенных на обоих берегах, на взаимном расстоянии 1 965 *м*. Тоннель залегает на большом своем протяжении (1 600 *пог. м*) исключительно в гудсонском иле, а остальная часть представляет собой массив скальных и песчаных пород.

Проходка тоннелей велась щитами под сжатым воздухом, причем бетонные перемычки были оборудованы тремя шлюзами и устанавливались по мере проходки расстояния в 300 *м*. Впереди щита велась передовая штольневая заходка, по подошве которой укладывались три рельса на взаимном расстоянии 1,2 *м*, затапливаемые в бетонную подушку, служившую основанием для продвижения щита через профиль, разработанный в скальной породе. Вслед за проходкой щита следовало нагнетание за обделку цементного раствора для заполнения пустот. Проходка и крепление лба забоя в слабых грунтах производились с применением шандорных креплений. Во избежание деформации тюбингов нагнетание за обделку осуществлялось немедленно вслед за проходкой.

Особый технический интерес представляет предложенный на этом строительстве метод укрепления основания подводного тоннеля, заложенного в иле. Учитывая вредное влияние вибрации на тоннельную обделку при движении поездов в период эксплоатации, было предложено заложить мощную балку жесткости в виде фундаментной железобетонной плиты. Последняя должна была обеспечить надлежащую жесткость тоннелю, недостающую чугунной конструкции тюба. Имелась в виду проходка в основании штольни на протяжении 15 *м*. После устройства в штольне соответствующей бетонной подготовки в 20 *см* укладывалась круглая арматура в 50 *мм*, и затем штольня заполнялась бетоном и сопрягалась с общей конструкцией чугунного тюба.

В. *Подводное тоннелирование под р. Ист-Ривер.* Тоннели метрополитена между Бруклином и Манхэттеном, под р. Ист-Ривер, пересекают пески с выклиниванием глины, с включением гравия, а равно некоторые илистые и скальные участки. Гидростатическое давление, считая от высокого горизонта воды в реке до головки рельсов метрополитена, составляет около 29 *м*. Тоннели расположены в двух раздельных чугунных тюбах и сооружены при помощи щитов с применением сжатого воздуха. Насыщенные водой пески пересекались главным образом со стороны Бруклина. Под серединой р. Ист-Ривер щит входил на небольшом участке в крепкую породу гнейса, врезаясь затем вновь в пески. В дальнейшем береговой участок пройден в скале и сланцах Манхэттена.

Уже в начале щитовой проходки в песках щиты на береговом участке, проходя под эллингом, срезали кусты свай. Подрезание свай сильно тормозило основные работы, которые были связаны с значительными утечками воздуха и ослаблением защитной кровли тоннеля. Прорывы в некоторых местах были настолько значительны (рис. 610, 611), что имел место случай, когда под давлением воздуха подхватило рабочего, старавшегося ликвидировать утечку. Стремительным потоком сжатого воздуха рабочий был глубоко забит в грунт, и лишь с большим трудом удалось его извлечь. В период проходки щитом непосредственно под руслом реки с весьма незначительной кровлей имел место другой

случай — один из рабочих был вырван наружу в реку, где и всплыл на поверхность.

При проходке под сжатым воздухом в мелких песках, даже с включениями глины, сжатый воздух в значительной степени осушал пересекаемые водоносные грунты и со-

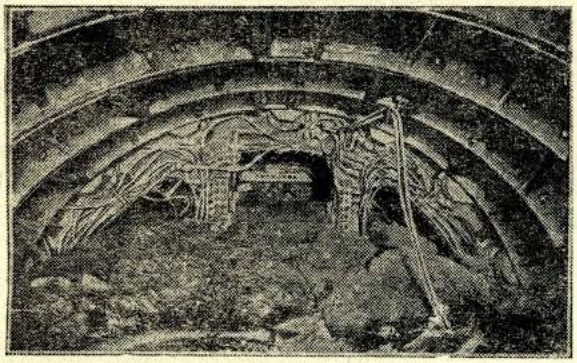


Рис. 610. Аварийный прорыв грунта в тоннель

здавал относительно благоприятные условия производства работ. Наиболее сложными были условия щитовых работ при пересечении щитом комбинированных грунтов, когда в верхней части профиля был мягкий грунт, требовавший деревянного крепления лба забоя, а в нижней залегала скала, требовавшая взрывных работ.

Особое внимание при работе под сжатым воздухом уделяется и противопожарным мероприятиям. Необходимо стремиться к тому, чтобы оборудование и установки в зоне сжатого воздуха были огнебезопасными. В процессе производства работ должны быть приняты все необходимые меры, устраняющие возможность возникновения пожара в тоннеле. Огонь, возникший в зоне сжатого воздуха, может быть ликвидирован путем затопления тоннеля. Под р. Ист-Ривер в процессе работ под сжатым воздухом при давлении 1,8 *ат* возник подземный пожар, происшедший оттого, что рабочий поставил зажженную свечу на один из элементов крепления кровли. Были приняты все меры для ликвидации этого пожара, вплоть до накачивания насосами воды извне. Опасность от пожара приняла еще более угрожающие размеры в связи с наличием в тоннеле склада динамита, предназначенного для взрывных работ. Ожидался взрыв огромной силы. Однако с большим риском этот динамит удалось убрать.

При проходке в иле представилось весьма затруднительным выдержать проектный профиль, так как тоннельная обделка проявила тенденцию «дышать» в окружающем массиве. В связи с этим пришлось прибегнуть к реконструкции тоннельной обделки с увеличением профиля на 30 *см*. Учитывая слабое основание грунта, было произведено его укрепление искусственным свайным основанием.

Г. *Подводный тоннель Холланд под р. Гудсон*. Из всех гудсонских тоннелей, строившихся в аналогичных геологических условиях, особый интерес представляет Холланд-тоннель.

Холланд-тоннель состоит из двух параллельных тюбов, сооруженных при помощи щитов с применением сжатого воздуха. Каждый из щитов имел внешний диаметр 9,2 *м* при длине 6 *м*.

Тремя горизонтальными и пятью вертикальными перегородками, из коих последние были расположены по высоте в разных плоскостях, щит был разделен на 13 рабочих ячеек, с которых производилась атака забоя.

Впереди щит был оснащен аванбеком, а в хвосте размещено тридцать гидравлических домкратов, развивавших общее усилие для продвижения щита в 6 000 *т*. Монтаж четырнадцати сегментов, составляющих тоннельную обделку, производился при помощи

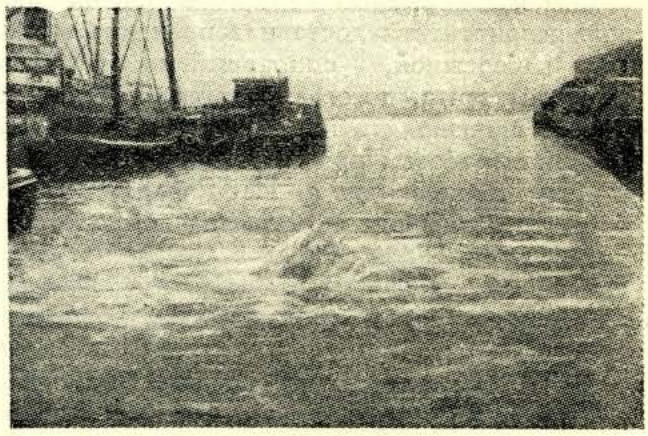


Рис. 611. Вид поверхности воды на р. Гудсон при прорыве сжатого воздуха из тоннеля

эректора с гидравлическим приводом. Сбалчивание этих сегментов велось болтовым эректором крестообразного типа, дающим возможность делать первичное сбалчивание болтов одновременно в четырех местах дан-

ного кольца. Полный вес щита со всем оборудованием и размещенным на нем эректором составлял 400 *т*.

Щит пересекал преимущественно илистый грунт, известный под названием *гудсонского ила*, требующий при проходке применения сжатого воздуха.

В диафрагме, отделяющей зону сжатого воздуха от нормального давления, был предусмотрен, помимо обычных людских и материальных шлюзов, дополнительный спасательный шлюз, всегда открытый со стороны сжатого воздуха и соединенный спасательными мостками с забоем.

Оба щита были собраны на одном берегу в кессоне. Опираясь на специальные металлические конструкции, размещенные в шахте, щиты были продвинуты вперед.

Учитывая относительно мелкое заложение тоннеля по трассе берегового участка, проходившего непосредственно под домами, принимались особые меры против вырывания наружу сжатого воздуха. Эти мероприятия заключались в закладке глины и устройстве системы временных деревянных шандор и переборок в пределах контура тоннеля. Вслед за продвижением щита в хвостовой его части производилось нагнетание раствора во избежание осадки улицы и зданий на поверхности. Однако, несмотря на принятые меры, все же не удалось полностью избавиться от осадок и деформаций в домах. Особенно большие неприятности доставила проходка щитом под набережной, опиравшейся на сваи. Впереди щита, до его продвижения, приходилось производить подрезку этих свай аналогично работам при проходке берегового участка тоннеля под р. Ист-Ривер. Эта работа, требовавшая исключительной осторожности, прошла без особых осложнений. Дальнейшее продвижение щита в подводной части при пересечении илистого грунта производилось с закрытой грудью, *слепым методом*, выжиманием ила через определенные отверстия в соответствии с направлением трассы. В условиях мягкого ила приходилось бороться со стремлением тоннельной обделки подниматься вверх в хвосте щита, в то время как сам щит, в силу своего значительного веса, опускался вниз. При этом тоннельная обделка оказывалась выше проектной отметки, а сам щит ниже проектной отметки тоннеля. Соответствующим регулированием направления щита удалось провести прокладку тоннеля по требуемому профилю.

Чтобы воспрепятствовать стремлению тоннельной обделки подниматься вверх, грунт, поступавший из забоя, оставался непосредственно в тоннеле для увеличения его веса. Лобовая диафрагма щита и калоттной части имела ряд дверей с гидравлическими запорами, которые открывались, и грунт по определенному направлению через специальные лотки укладывался в нижнюю часть тоннельной обделки. Уборка этого грунта производилась на всем протяжении при помощи экскаватора. Это обстоятельство значительно снизило стоимость земляных работ. Вышеуказанные отверстия в лобовой диафрагме щита допускали выжимать «вслепую» до 30% общего объема прокладываемого тюба. Подобным методом прокладывались и другие тоннели под р. Гудсон.

Особый интерес представляет момент производства работ «слепым» методом, который применим, однако, в связи с осадками только для подводных тоннелей. Система закрытой груди, дозировка грунта, секторные затворы могут быть в известных условиях использованы при проектировании и проходке тоннелей в слабых породах.

Система оставления в нижней части профиля породы в период щитовой проходки при последующей уборке ее экскаватором дает значительный производственный эффект в смысле быстрейшего продвижения щита вперед, с одной стороны, и удешевления стоимости погрузки и транспортировки значительного объема породы, с другой.

Д. *Подводный тоннель Истсвью (США).* Этот тоннель, длиной 1,7 *км*, пройден на глубине 28 *м* от дна реки без применения щита, горным способом под сжатым воздухом. После продвижения забоя на расстояние около 90 *м* от береговой шахты он врезался в водоносную песчаную и галечную толщу. Лоб забоя был тщательно закреплен, и дальнейшие работы временно приостановлены.

В готовой части тоннеля замуровали две бетонные диафрагмы с металлическими дверями, образовав отделения для шлюзования людей и материалов. Тоннельные работы производились при максимальном воздушном давлении в 1,7 *ат*, при временном деревянном креплении.

Е. *Тоннель под р. Пэсик-Ривер (США).* В 1933 г. вблизи строящегося моста Пэсик-Ривер в Америке был пройден подводный тоннель для кабелей диаметром 2,5 *м*. Тоннель проходился в условиях водоносных

песков и суглинков на сбойку с двух береговых шахт.

Каждая шахта была оборудована людскими и материальными шлюзами, устроенными в устье шахты на 3 *м* больше наивысшего горизонта воды в реке.

Людской шлюз был рассчитан на одновременный пропуск одиннадцати человек, работавших в тоннеле, и оборудован электрическими печами, работавшими при вышлюзовывании в холодное время.

Проходка тоннеля велась при временной обделке из чугунных сегментов и воздушном давлении около 1,65 *ат*. Сегменты устанавливались сверху вниз и, не замыкая полного кольца, продвигались вперед. При этом образовывали из чугунных сегментов тип аванбека. Никакой расчеканки стыков сегментов не производилось. Сзади продвигали металлическую форму длиной 4,5 *м* для укладки внутренней бетонной оболочки. Плотность бетона достигалась применением электрического вибратора. Скорость проходки под сжатым воздухом при четырехсменной работе по 6 часов достигала 4 *м* в сутки готового тоннеля.

Ж. Подводный тоннель Линкольн (Мидтаун) под р. Гудсон. Параллельно с тоннелем Холланд под рекой Гудсон осуществлено сооружение двух параллельных подводных тюбов (Линкольн) для автодвижения. Диаметр каждого тюба 9,4 *м*, что позволяет устроить и проезжую часть для автомобильного движения шириной в 6 *м*. Кроме того, в сечении размещаются каналы для подачи свежего воздуха под мостовой и каналы вытяжки испорченного воздуха в верхней части профиля.

Первый тоннель был начат строительством в 1934 г. (рис. 612), второй тоннель окончен в 1940 г.

Подводный тоннель Линкольн имеет длину 2,72 *км*. Из этого протяжения 1 800 *пог. м* тоннеля пройдены непосредственно под руслом реки, с помощью щита при обделке чугунными тюбингами, а 380 *пог. м* пройдены щитом при обделке новым типом стальных тюбингов. Остальные 540 *пог. м* пройдены открытым способом.

Подходные части тоннеля и рампы построены открытым способом в скальных породах. Щитовая проходка подводной части тоннеля проводилась преимущественно в илистых грунтах и на коротких участках в скальных породах. Исключительные строительные затруднения вызывала проходка щитом в условиях смешанных пород, где по поперечному сечению тоннеля скальные породы перемежались с илистым грунтом. Приходилось одновременно с производством взрывных работ проявлять особое искусство по укреплению лба забоя илистой части профиля. Щит через скальную породу проводился по бетонному лотку с втопленными в него рельсами.

Конструкция обделки подводного тоннеля состояла из чугунных тюбингов при ширине кольца в 75 *см*. Каждое кольцо из четырнадцати сегментов. Особое внимание было обращено на качество стали для болтов. Общий вес чугуна тоннельной обделки 93 200 *т*.

Стальная обделка применялась в местах пересечения тоннельных конструкций, сопряжений с вентиляционными шахтами и в контактных зонах, где обделка испытывает особенно большие напряжения. Общий вес стальной обделки 6 040 *т*. На кривых участках применялись конической формы тюбинги. Стальные сегменты впервые применялись при значительной ширине в 1,5 *м* и длиной 2,82 *м*. Такие размеры сегментов дали возможность форсировать щитовую проходку и уменьшить количество стыков и болтовых соединений. Водонепроницаемость стальных сегментов достигалась сваркой их.

При сооружении тоннеля Линкольн под р. Гудсон были достигнуты исключительные скорости щитовой проходки. Средняя скорость проходки была равна 315 *м* в месяц готового тоннеля (25 рабочих дней), в то время как максимальная скорость проходки тоннеля Холланд составляла всего лишь 170 *м* в месяц; суточная скорость проходки при постройке тоннеля Линкольн достигала 13,5 *м*.

Следует отметить, что скорость проходки тоннеля под р. Гудсон в 1906 г. составляла в илистом грунте 22 *м*, но там диаметр тоннеля был лишь 5,6 *м*. Достигнутые на тоннеле Линкольн скорости проходки объясняются высокоэффективными методами организации производства самих работ. В связи с наличием илистого грунта возможно было итти «слепым» методом щитовых работ. Благодаря податливости илистого грунта впуском определенной части его через переднюю грудь щита оказалось возможным под мощным нажимом щитовых домкратов продвигаться на одно кольцо.

Таким образом, успех в продвижении лимитировался не разработкой породы, а

монтажем тоннельной обделки. Организация непрерывной подачи тюбингов к эректору щита и применение механического сбалчивателя позволили развить исключительные скорости монтажа тюбинговых колец. Выдача породы производилась в нижнюю часть профиля (рис. 613) ленточными транспортерами, подвешенными к монорельсу в ячейках щита.

Уборка породы велась после ухода щита на значительное расстояние с помощью тоннельного экскаватора. Тоннельные работы велись под сжатым воздухом. Поступление илистого грунта в забой щита дозировалось через два отверстия размерами 70 × 70 *см*. Отверстия закрывались гидравлически действующими затворами. За щитом была устроена подвижная тележка, оборудованная рядом рабочих платформ, которые выдвигались одновременно вслед за щитом. Илистая порода, поступавшая через окна на транспортеры, разрезалась проволокой на куски и сваливалась по уклону в нижнюю часть профиля. В тоннель, как указывалось выше, грунт через грудь щита допускался в размере 25—30% от теоретического объема профиля.

Укладываемый в нижней части профиля грунт играл роль балласта при проходке, так как в илистом грунте тоннельная обделка проявляла усиленную тенденцию подниматься кверху. Только благодаря загрузке балластом удавалось удержать сооруженную тоннельную обделку в проектном положении (рис. 614). Металлические сегменты обделки подвозились на тележках и брались захватом тельфера, имевшим перемещение по монорельсу. Особым захватом эректора тюбинг снимался с тельфера. Для исключения перебоев в подаче тюбингов к забою щита сразу подавался рабочий поезд из платформ, по два тюбинга на каждой. Этим обеспечивалось необходимое количество тюбингов на одно укладываемое кольцо тоннельной обделки на одну подвижку щита.

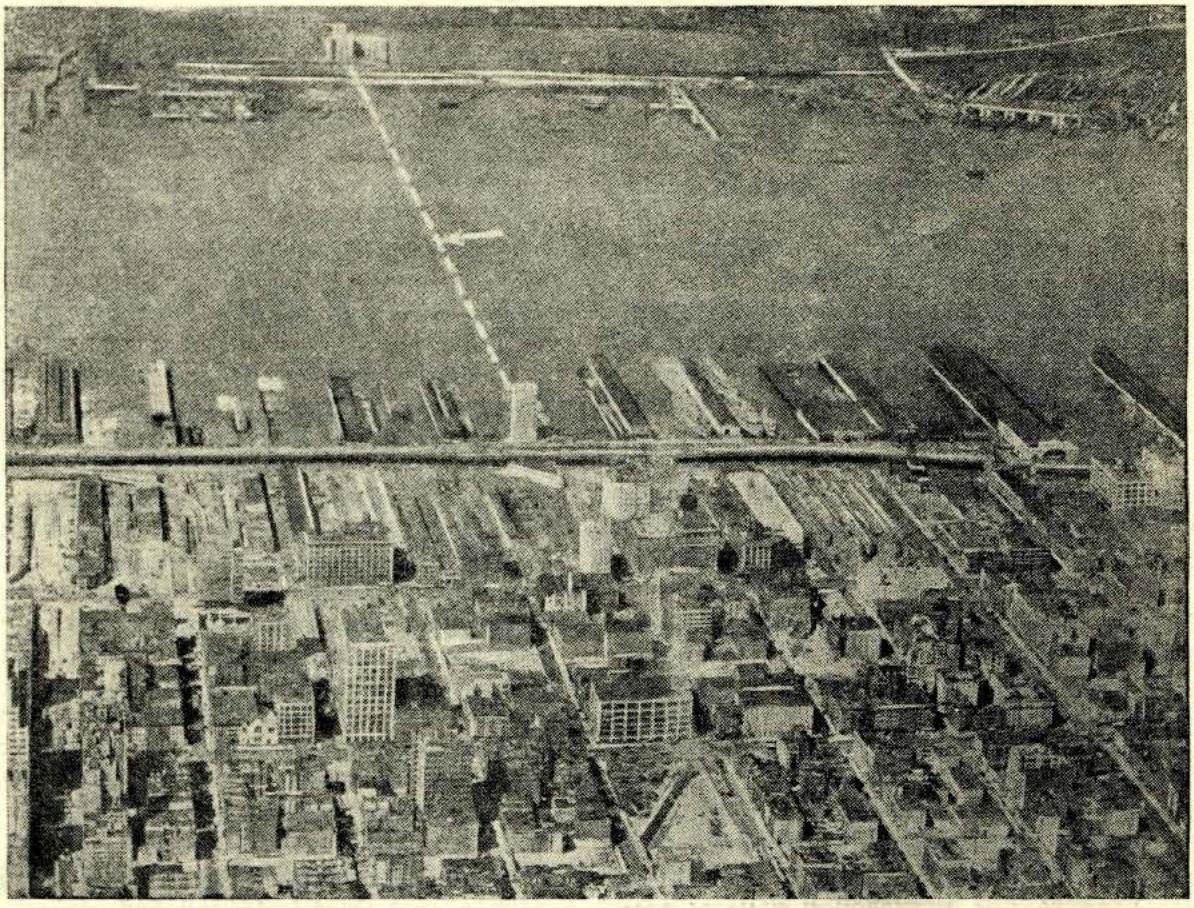


Рис. 612. Линкольнский тоннель под р. Гудсон (Нью-Йорк)

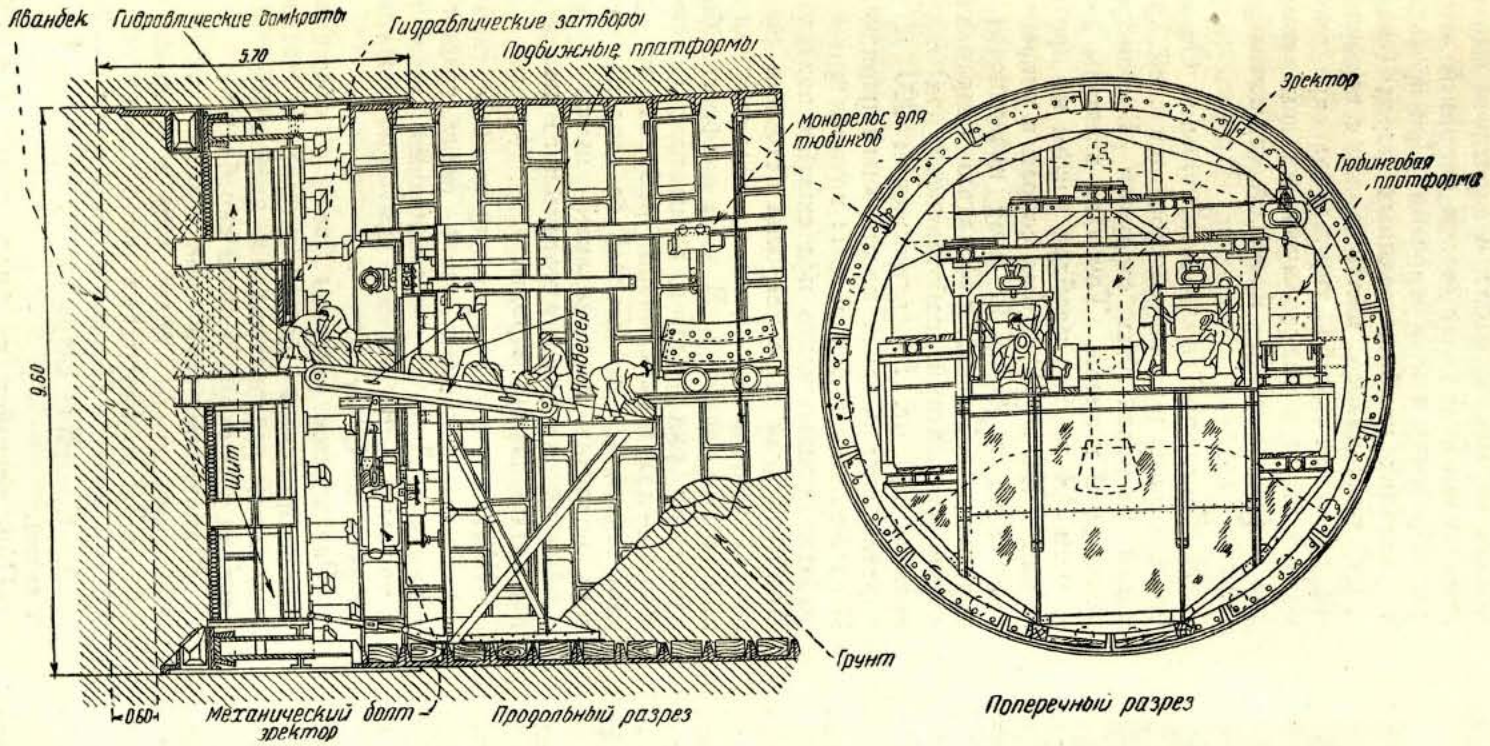


Рис. 613. Линкольнский тоннель под р. Гудсон (организация работ в щитовом забое)

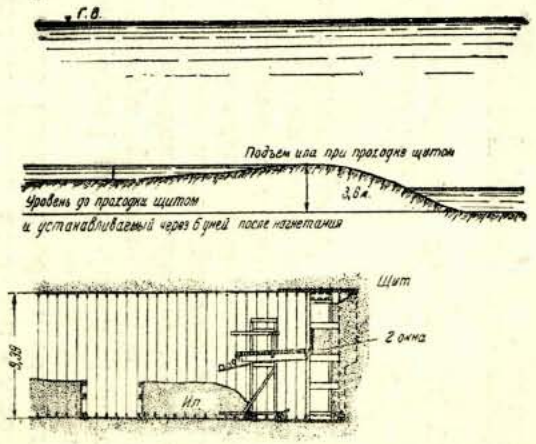


Рис. 614. Линкольнский тоннель под р. Гудсон (положение дна реки над тоннелем до и после проходки щитом в иле)

Особенно большой технико-производственный эффект дал болтовой эректор. При помощи его удавалось затягивать болты тюбингов одновременно в четырех местах. Этот болтовой эректор гидропневматического дей-

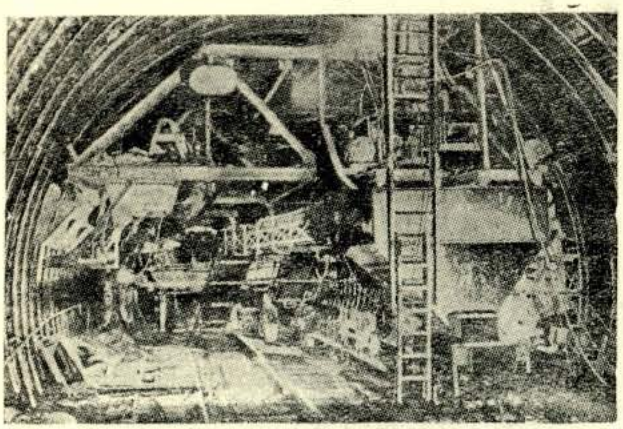


Рис. 615. Оборудование конвейерного транспорта пород в щитовой зоне тоннеля

ствия развивал крутящий момент для завинчивания болтов до 1670 *кг/см*.

Указанные решающие элементы организации работ — пуск через грудь щита породы, укладка ее в нижней части профиля, уборка породы экскаватором, подача тюбингов к эректору и механический сбалчиватель — обеспечили успех проходки рассматриваемого тоннеля.

Подготовка к продвижению щита продолжалась около полутора часов; на укладку и сбалчивание нижней части кольца до горизонтального диаметра — 45 минут, на укладку и закрепление верхней части кольца—20 минут. Процесс продвижения щита — от 10 до 15 минут.

Всего в щитовой зоне работало 35 подземных рабочих.

Особенно большие затруднения были вызваны стремлением щита клевать, а обделки—подниматься кверху в условиях илистого грунта. Нужно было проявить особое искусство в вождении щита по заданному направлению, регулируя ход щита группами щитовых домкратов, впуском и дозировкой породы через окна лба забоя. Как указывалось, изъятие породы из нижней части профиля производилось применением одноковшевого экскаватора на гусеничном ходу. Работы по изъятию породы непосредственно из «ящиков» отдельных тюбингов между ребрами производились при помощи пневматических лопат и с применением гидравлического метода уборки грязевой пульпы. Проходка тоннеля в скальных породах осуществлялась с применением взрывных работ, с передовой штольней, по которой укладывался бетонный лоток с втопленными в него рельсами. При проходке в условиях комбинированных пород (скала и ил) приходилось вести наряду с взрывными работами особо тщательное крепление колонковыми и гидравлическими домкратами лба забоя по части профиля, включающей илистый грунт.

3. *Бостонский подводный тоннель.* Одним из модернизованных приемов щитовой проходки тоннелей был сооружен Бостонский подводный тоннель. Тоннель, внешним диаметром 9,4 *м*, был пройден щитом на протяжении 1490 *м*. Щит был собран в открытой выемке на глубине 15 *м* от поверхности и продвигался вперед тридцатью гидравлическими домкратами, работавшими под давлением в 400 *ат*. На протяжении 300 *м* от портала щит работал нормальным порядком. В дальнейшем в водоносных грунтах щитовые работы производились под сжатым воздухом. Для этой цели была устроена бетонная диафрагма, ограждающая зону нормального давления от повышенного. В этой диафрагме был замурован ряд шлюзов, а именно: людской шлюз — для шлюзирования рабочих; аварийный шлюз, всегда отрытый со стороны сжатого воздуха; материальный шлюз и два особых шлюза для автоматического конвейерного шлюзования породы.

Щит пересекал преимущественно глинистые грунты с включением песка, гравия и валунов. Для уравновешивания давления в тоннеле потребовалось давление сжатого воздуха до 1,7 *ат*.

Разработка породы велась обычными пневматическими инструментами. В частности, глины разрабатывались пневматическими лопатами и специальными скребками.

В указанных грунтовых условиях скорость проходки щитом колебалась в пределах от 2,6 до 7,2 *м*. Рекордная скорость достигала 9,6 *м* в сутки. Период работы щитом — 295 дней. Средняя скорость проходки — 4,5 *м* в сутки.

При крупном профиле тоннеля и столь значительной скорости проходки проблема тоннельного транспорта (в частности, удаления породы из тоннеля) имела исключительное значение. Во избежание завалов породы

требовалось найти такое решение, при котором транспортировка породы не являлась бы тормозом в комплексе щитового тоннелирования. Эта задача была эффективно разрешена применением непрерывной конвейерной системы транспортировки породы.

Диафрагма, ограждающая зону сжатого воздуха от нормального давления, имеющая ряд шлюзовых аппаратов, не являлась в этом случае помехой для непрерывного движения породы из забоя на поверхность.

Схема конвейерной системы транспортировки породы от щита, примененная на

Внутри автоматического шлюза диаметром 1,5 *м*, расположенного под углом 17° к горизонту, помещался ленточный конвейер шириной 80 *см* и длиной 10 *м*, который приводился в действие двухскоростным мотором. В то время как в одном из бункеров

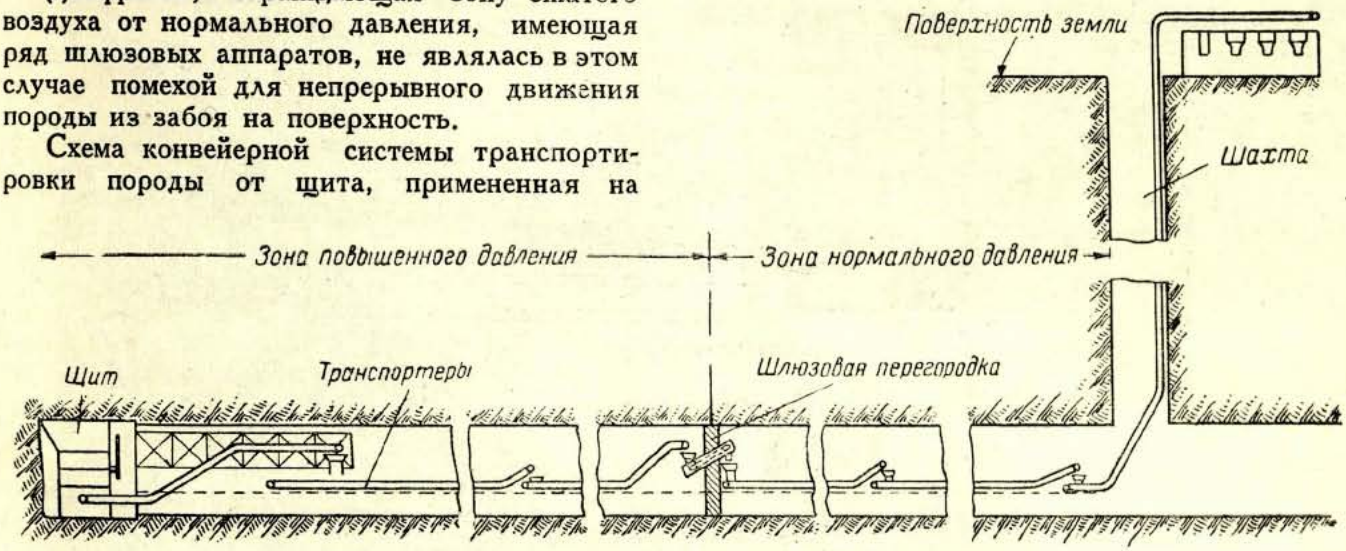


Рис. 616. Бостонский подводный тоннель (схема непрерывного конвейерного транспорта от забоя щита до поверхности)

Бостонском тоннеле, заключалась в следующем. Порода из забоя подавалась непосредственно на вдвинутые в ячейки щита нижнего яруса два скребковых транспортера шириной 75 *см*, укрепленных на движущейся вместе со щитом конструкции, содержащей ряд передвижных металлических бункеров (рис. 615). Порода, подаваемая на скребковый транспортер со скоростью 8 *м/мин*, устремлялась в бункера, откуда попадала в ряд последовательно размещенных транспортеров (длина секции каждого 360 *м*). Первая секция забойного конвейера, примыкавшая к бункеру, по мере продвижения щита постоянно удлинялась, и, когда она достигала определенной длины в 360 *м*, устанавливался новый промежуточный транспортер, входящий в общую конвейерную систему, движущуюся со скоростью 45 *м/мин* (рис. 616 и 617). При этом процесс непрерывного движения породы не нарушался. Во избежание частого наращивания транспортера, расположенного у бункеров, этот транспортер обычно заходил на другой по длине около 18 *м*. Порода, перемещаясь к шлюзовой диафрагме, разгружалась в бункера, снабженные автоматически действующими затворами (рис. 618, 619).

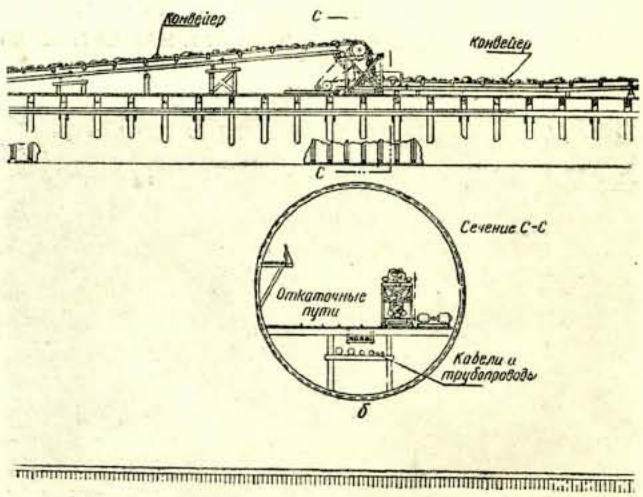


Рис. 617. Конвейерный транспорт в тоннеле

производилась загрузка конвейера, в другом шла его разгрузка. При загрузке грунтом лента двигалась со скоростью 4,5 *м/мин*; при разгрузке со скоростью 7 *м/мин* процесс шлюзования породы длился 2,5 минуты. В период загрузки действовал затвор, отделяющий зону сжатого воздуха от нормального. В этот момент лента конвейера внутри

шлюза двигалась со скоростью 4,5 *м/мин*. Когда порода распространялась по всей длине этого конвейера, заслонка автоматически закрывалась, отверстие бункера открывалось в 80° к бункерам емкостью 300 $м^3$, расположенным на поверхности (рис. 620, 621). Производительность конвейерной установки достигала 60 *т/час*.

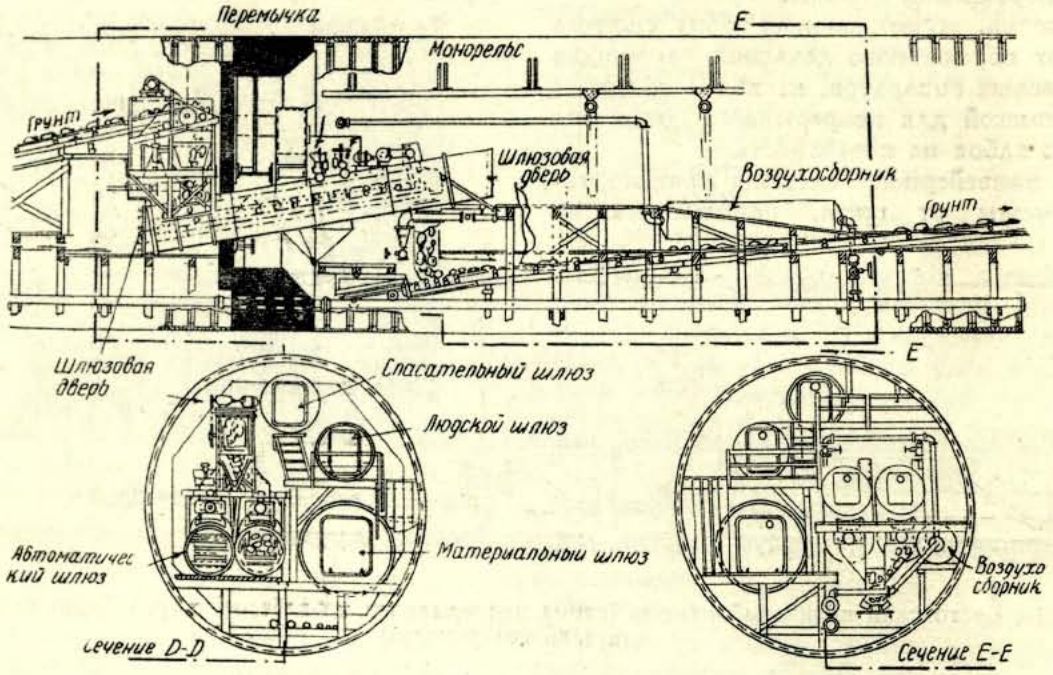


Рис. 618. Непрерывное автоматическое шлюзование породы через специальную диафрагму

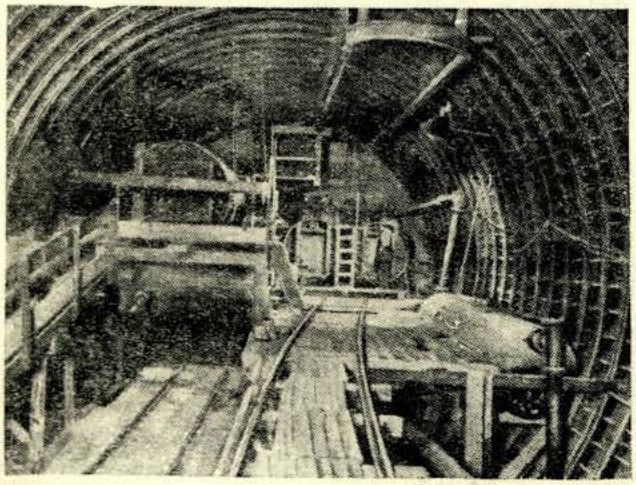


Рис. 619. Вид шлюзовой диафрагмы

со стороны нормального давления, и порода поступала на ряд транспортеров, которые двигались со скоростью 45 *м/мин*. Дальше через скребковый конвейер со скоростью 24 *м/мин* порода поднималась под углом

Наращивание забойных конвейеров секциями в 8 *м* протекало в течение 15 минут. Десять наращенных секций заменялись одним элементом длиной 80 *м*. Каждый конвейер был снабжен индивидуальным мотором. Обслуживали конвейерную систему шесть человек в смену.

Подача тюбингов и других материалов к забою производилась аккумуляторными электровозами; установка их на место велась при помощи гидравлического эректора. Тюбинги снимались с платформ и по монорельсу, укрепленному на подвижной тележке, подавались непосредственно к эректору. Сначала укладывались три нижних стальных сегмента весом по 500 *кг*, а затем поочередно укладывались боковые сегменты. Первичное сбалчивание производилось пневматическими ключами, а вторичное — вручную «ключами» с длинными рычагами (болты 19 *мм* в количестве четырехсот штук на кольцо).

Установка кольца длилась 30 минут. В единичных случаях монтаж кольца продолжался всего 23 минуты. Монтаж обделки

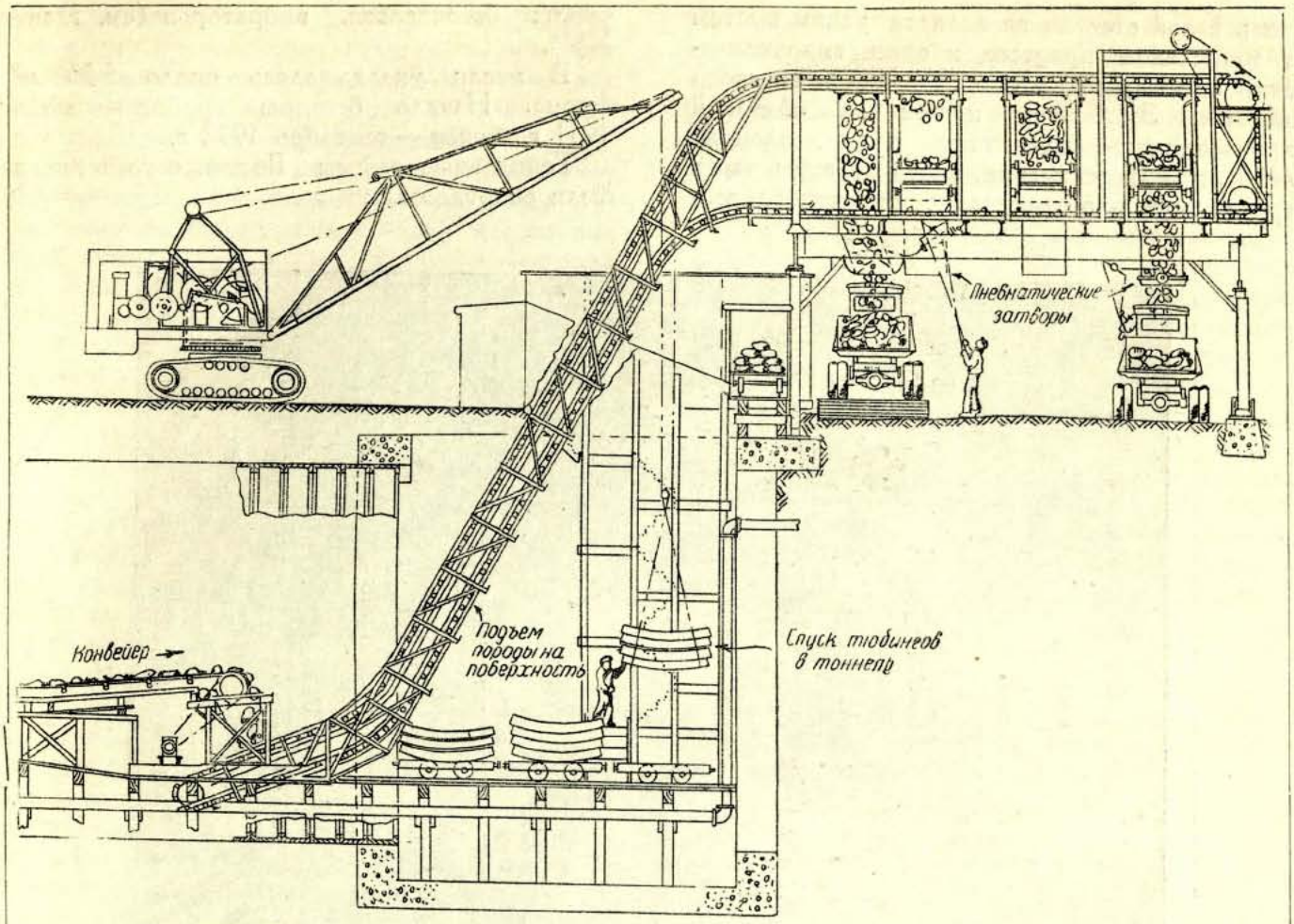


Рис. 620. Организация подъема породы на поверхность и подача тюбингов в тоннель

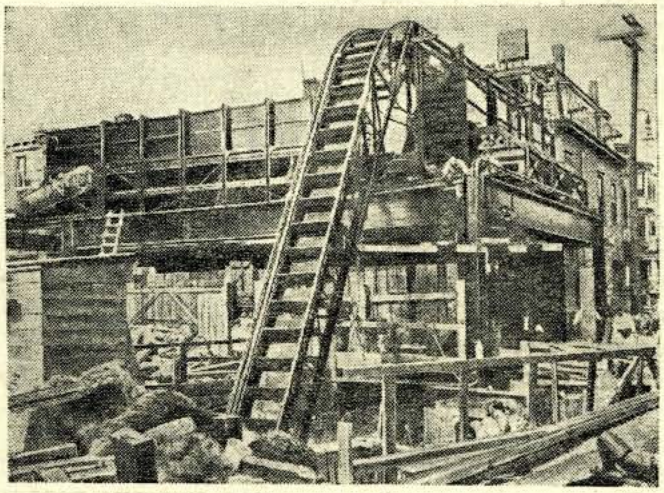


Рис. 621. Организация подъема породы на поверхность в бункера

ни в какой степени не являлся узким местом в тоннельном процессе, и один гидравлический эректор полностью справлялся со своей задачей. Заполнение пустот за обделкой производилось вдуванием под давлением 4—5 *ат* мелкого гравия, вслед за этим через три кольца шло нагнетание цементного раствора. Объем нагнетания — от 2 до 2,7 $м^3$ на кольцо.

Тоннельная обделка Бостонского тоннеля была запроектирована и выполнена комбинированной, из внешней стальной сварной конструкции (рис. 622) и внутренней железобетонной оболочки. Стальное кольцо из двенадцати сварных сегментов весило 6,1 *т*. Каждый сегмент был усилен рядом отрезков железнодорожных рельсов длиной 71 *см* для восприятия и распределения давления от нажима гидравлических домкратов щита.

Одной из крупных работ на Бостонском тоннеле являлось устройство внутренней железобетонной обделки толщиной в 45 *см*. Бетонные работы проводились с применением подвижных форм, конвейеров для транспортировки бетона, бетоноукладчиков, электрических бетоновозок, вибраторов (см. главу XV).

В месяц укладывалось около 5 500 $м^3$ бетона. Начало бетонных работ — июль 1931 г., конец — сентябрь 1932 г.

Тоннельные работы Бостонского тоннеля были оборудованы:

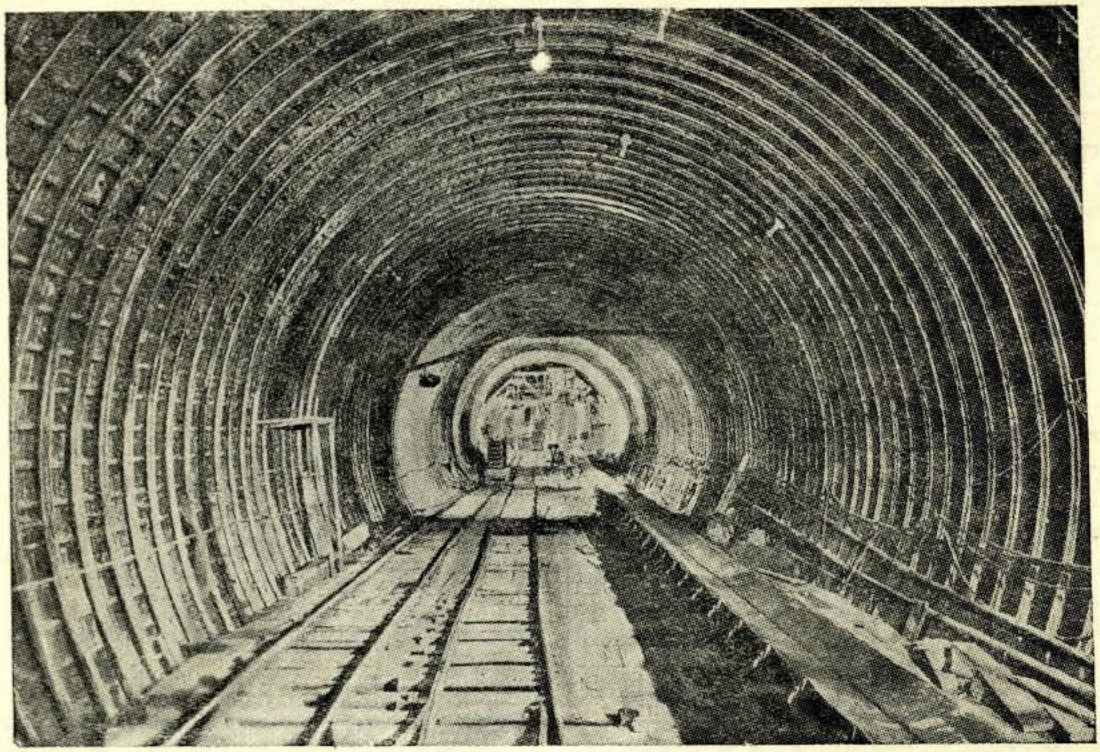


Рис. 622. Бостонский тоннель (общий вид стальной обделки тоннеля и конвейера в период щитовых работ)

тремя компрессорами по 95 $м^3/мин$ при давлении 2 *ат*,

двумя компрессорами по 37 $м^3/мин$ при давлении 2 *ат*,

одним гидравлическим грузовым аккумулятором на 43 *ат* и

двумя насосами на 400 *ат*.

Работы производились круглосуточно: при сжатом воздухе шестичасовая смена (выше 1,5 *ат*), при нормальном давлении восьмичасовая смена. При давлении ниже 1,5 *ат* рабочие первые три часа находились под сжатым воздухом, а остальные три часа под нормальным давлением.

Всего было занято 499 человек, из них непосредственно в тоннеле около 80, включая 6 человек, обслуживавших конвейерную систему.

Применение конвейерного транспорта (по типу Бостонского тоннеля) в условиях механизированных щитов является наиболее эффективным из всех существующих пока видов подземного транспорта породы.

Особый эффект может дать применение непрерывной конвейерной системы транспортировки при сооружении станций метрополитена. Некоторой помехой является неувязка у шахтного ствола между непрерывным конвейерным транспортом и прерывным клетьевым подъемом. Задача может быть решена разными путями, а именно: устройством скипов; применением вертикальных элеваторов (норий); использованием наклонного эскалаторного хода; пробивкой специального наклонного хода (штольни) для пропуска скребкового транспортера.

Эффективно применение бостонских приемов транспортировки породы и автоматического шлюзования в условиях проходки тоннелей под сжатым воздухом.

И. *Подводные тоннели метрополитена под р. Сеной в Париже.* К щитовой проходке французы обратились при подводном пересечении р. Сены, когда в пределах города были запрещены работы по опусканию тоннелей-кессонов с поверхности реки, как стесняющие судоходное движение. Строители применяли двухпутный эллиптический щит замкнутого контура размерами поперечного сечения 7,7×5,86 *м*, двухпутный круглый щит диаметром 7,78 *м* и два круглых однопутных щита диаметром 5,24 *м*. Обделки тоннелей были из чугунных сегментов.

При подводном тоннелировании под р. Сеной (линия № 8 метрополитена) щиту в подходах к реке пришлось проходить под защитой свода. Предварительно у больших зданий, при помощи временного крепления, устроили каменный свод толщиной 50 *см*, опирая его на известняк. Впереди щита вели направляющую штольню и укладывали бетонную подушку с рельсами для щита, когда он в нижней части пересекал твердые породы. Работы производились под сжатым воздухом при бетонной диафрагме толщиной в 3 *м*, с тремя замурованными металлическими шлюзами. Из них один, нижний — материальный, а другой — людской. Верхний шлюз — спасательный, на случай аварии в тоннеле.

Отклонения от проектного направления при продвижении щита не превышали по горизонтали 8 *см*, а по вертикали — 7 *см*.

Вращение щита вокруг его оси обычно локализовалось односторонней загрузкой балласта. Сплющивание эллиптической обделки происходило в пределах 7 *см*. Устройством системы затяжек удалось в дальнейшем ликвидировать сплющивание щита более чем на 3 *см*.

Затем производилось нагнетание за обделку цементного раствора. Опыт проходки щитом под р. Сеной доказал, что применение быстро схватывающегося цемента чревато большими неприятностями, поскольку цемент, выжимаясь по оболочке щита, закрепляет его положение в породе. Для дальнейшего продвижения щита требовалось такое усилие, которое не всегда могут дать гидравлические домкраты. (Если последние и преодолевают это значительное сопротивление, то за счет нарушения и вовлечения в работу окружающего грунта.) Поэтому французы рекомендуют применение известкового раствора, как более медленно схватывающегося.

Средняя скорость проходки эллиптического щита размерами 7,7×5,86 *м* под р. Сеной, под сжатым воздухом, была порядка 0,75 *м* в сутки готового тоннеля.

Оборудование компрессорных и силовых установок при пересечении щитом р. Сены имело следующую характеристику:

4 компрессора — 2,5 *ат*	250 *л. с.*
1 компрессор — 7,0 „	100 *л. с.*

К. *Подводный тоннель под р. Мерси в Англии.* Для оживленного автомобильного движения между английскими портовыми городами Ливерпулем и Биркенхэдом оказалось необходимым создать тоннель под р. Мерси.

Главный тоннель круглого сечения имеет внешний диаметр 14,03 *м*, внутренний диаметр 13,4 *м* и заключает в себе проезжую часть, расположенную на 0,46 *м* ниже горизонтального диаметра (рис. 623). Ширина проезда, 10,97 *м* обеспечивает пропуск четырех потоков автомобилей, в том числе два средних для движения большой скорости.

Под проезжей частью железобетонной конструкции устроены стенки, ограждающие пространство, предусмотренное для транспорта будущего, при ожидаемом развитии движения [1].

[1] Есть основание предполагать, что это пространство имеет назначение обширного газоубежища на случай вражеской воздушной атаки.

По краям имеются два тротуара для охраны шириной по 1,22 *м*. Тоннели ответвлений имеют диаметр 8,38 *м* и заключают в себе проезжую часть шириной в 5,79 *м* и два тротуара для охраны.

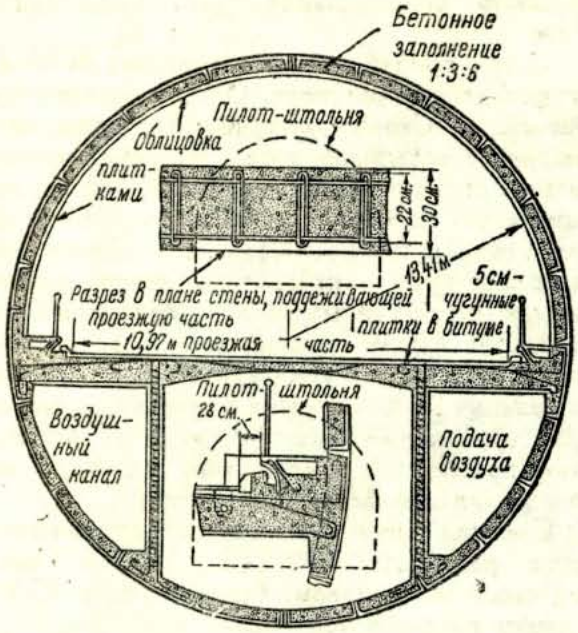


Рис. 623. Подводный тоннель под р. Мерси (поперечное сечение)

Площадь поперечного сечения главного тоннеля составляет 156 $м^2$, а длина его — 3 470 *м*. В местах подходов тоннеля, например к улице Дейл в Ливерпуле, поперечное сечение имеет подковообразную форму.

От Ливерпульского квартала дорога имеет уклон 1 : 30 и заглубляется от горизонта воды в реке на 45,7 *м*. Толщина кровли породы над шелыгой свода тоннеля составляет около 18 *м*. Под рекой тоннель имеет уклон 1 : 300 на протяжении 509 *м*, затем уклоном 1 : 30 выходит в Биркенхэд.

По результатам произведенного бурения тоннель в основном должен был пересекать скальные грунты, красный песчаник, имея над шелыгой свода около 9—10,5 *м* этой породы, которые по дну реки были затянуты слоем гравия, глины и ила общей мощностью в 1,5 — 3 *м*.

Данные гидрогеологического прогноза указывали на трещиноватость залегающих пород, вследствие чего пришлось вести борьбу с интенсивным притоком воды путем тампонажа.

Учитывая огромные размеры профиля тоннеля в подводной части, недостаточность данных вертикального бурения и возможность встречи слабых выветренных пород в калоттной части сечения, было решено до раскрытия тоннеля провести горизонтальную проходку рекогносцировочного порядка.

Для этой цели на обоих берегах реки в марте 1926 г. было заложено по шахте диаметром 6,46 *м* с расстоянием между ними в плане 1 586 *м*. До пересечения скалистых грунтов ствол шахты закреплялся чугунными тюбингами. Из каждой шахты, пройденной на глубину 60 *м*, были засечены две разведывательные пилот-штольни верхнего и нижнего горизонта, подковообразного сечения 4,57 × 3,66 *м*. От шахты штольни пробивались на два рабочих крыла: к подводной и портальной частям на каждом берегу.

Впереди продвигался забой нижней штольни и из него задавались передовые и веерообразные бурки по сечению раскрываемого профиля главного тоннеля. Вслед пробивалась пилот-штольня верхнего горизонта. Штольня проходилась в красном песчанике без особых осложнений. Для уменьшения притока воды велись работы по тампонажу нагнетанием цементного раствора в трещиноватые породы. Было установлено, что для местного подводного тоннелирования, при проектном положении подошвы тоннеля в 52 *м* ниже уровня моря, сжатый воздух не применим для борьбы с гидростатическим давлением. С притоком воды, которая, насмотря на тампонаж, поступала в разработки в количестве 16 300 *л* в минуту, справлялись при помощи водоотлива. При проходке верхней штольни был установлен участок выветренной скалы, перекрывавший шелыгу свода слоем лишь около 1 *м*. Дальнейшие работы на этом участке производились с исключительной осторожностью и применением специальных технических мер. Разведывательные штольни на всем протяжении этого участка проходились круглым сечением диаметром 3,56 *м* при обделке из чугунных сегментов.

Исследовательские буровые работы из штолен по диаметру в 14,03 *м* производились 76 *мм* комплектами ударного и алмазного бурения. Передовые бурки задавались через каждые 30 *м* продвижения забоя штольни. Веерообразное бурение из нижней штольни вверх предупреждало возможность прорыва и затопления при продвижении верхней штольни. В указанном выше участке эродированных пород буровые скважины располагались через 3—3,5 *м* при общей длине их 1 500 *м*.

Общее протяжение разведывательных шпуров, пройденных из пилот-штолен, выразилось в 17 700 *м*.

тами. Шпуры бурились на глубину 1,22 *м*, и в каждый из них закладывался заряд взрывчатого вещества весом в 1,2 *кг*. Сред-

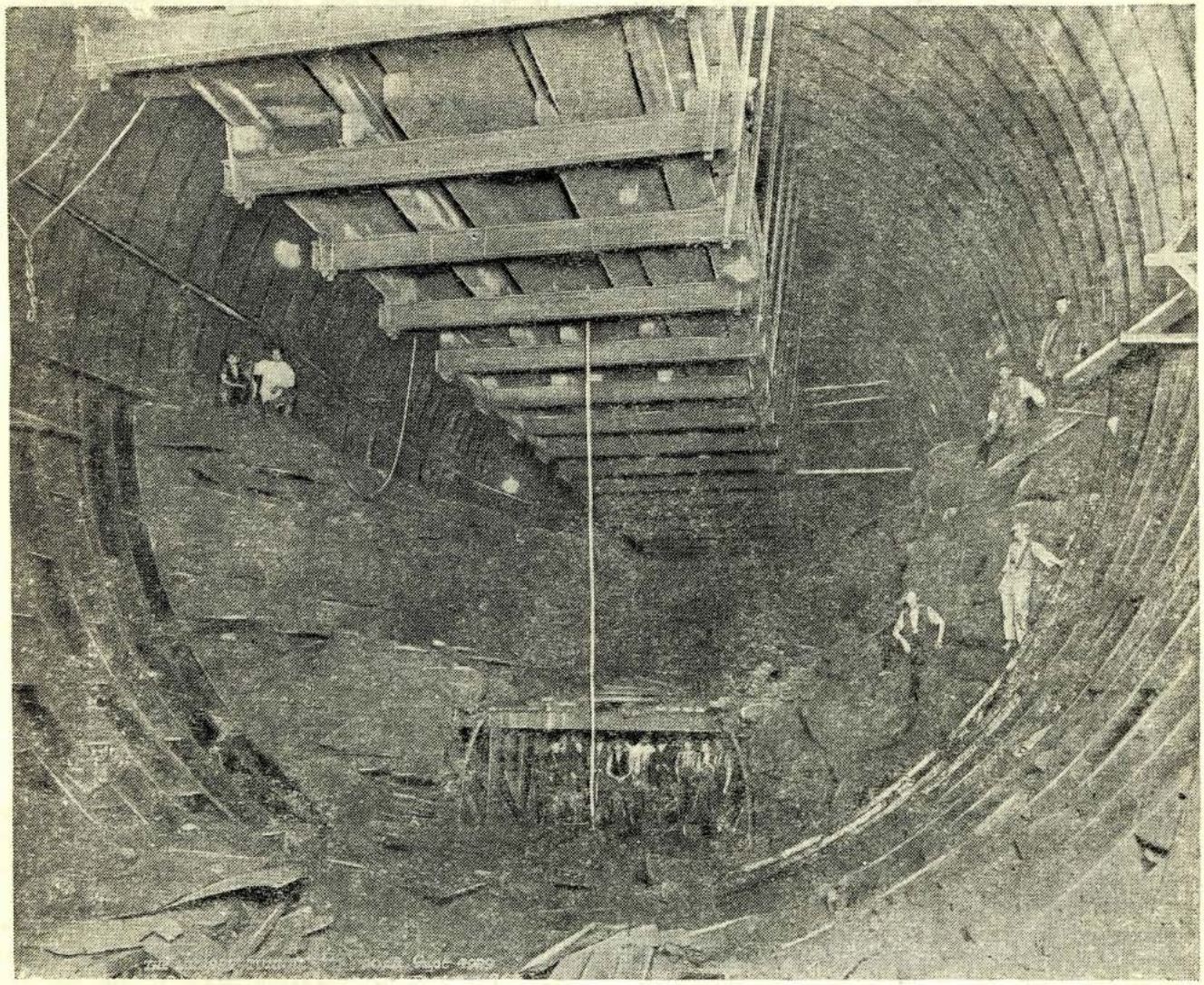


Рис. 624. Подводный тоннель под р. Мерси (разработка штроссного профиля)

В апреле 1928 г. произошла сбойка направляющих штолен примерно под серединой русла реки. Расхождения между центрами штолен составляли 13 *мм* по горизонтали, 16 *мм* по вертикали и 22 *м* по пикетажу тоннеля.

Подводный тоннель сооружался одновременно в нескольких местах, причем сначала разрабатывался полностью верхний калоттный профиль. Число калотт на рабочем крыле при максимальном развитии достигало семи. Атака производилась взрывными рабо-

ний расход взрывчатых веществ на 1 $м^3$ породы составлял около 0,7 *кг*. Большие куски породы, загромождавшие забой после взрыва, для удобства транспортировки разбивались пневматическими инструментами. Откатка породы велась по пилот-штольням электропоездами.

Для осушения тоннельных разработок были пробиты дренажные штольни сечением 2,13 *м* с 2‰ уклоном от середины реки к шахтам. Последние были пройдены на 58 *м* ниже горизонта в р. Мерси и на 6 *м*

ниже самой низкой отметки подошвы тоннельных выработок. При такой системе вода из дренажных штолен поступала в зумпф шахты, откуда удалялась насосами. Каждая шахта была оборудована шестью глубинными насосами производительностью на 3 800 *л/мин*.

нии приступали к удалению полного штроссного профиля ниже горизонтального диаметра (рис. 624). Раскрытие профиля велось не больше чем на три кольца, без применения системы штребелей. Подача сегментов и необходимых материалов, а равно откатка породы

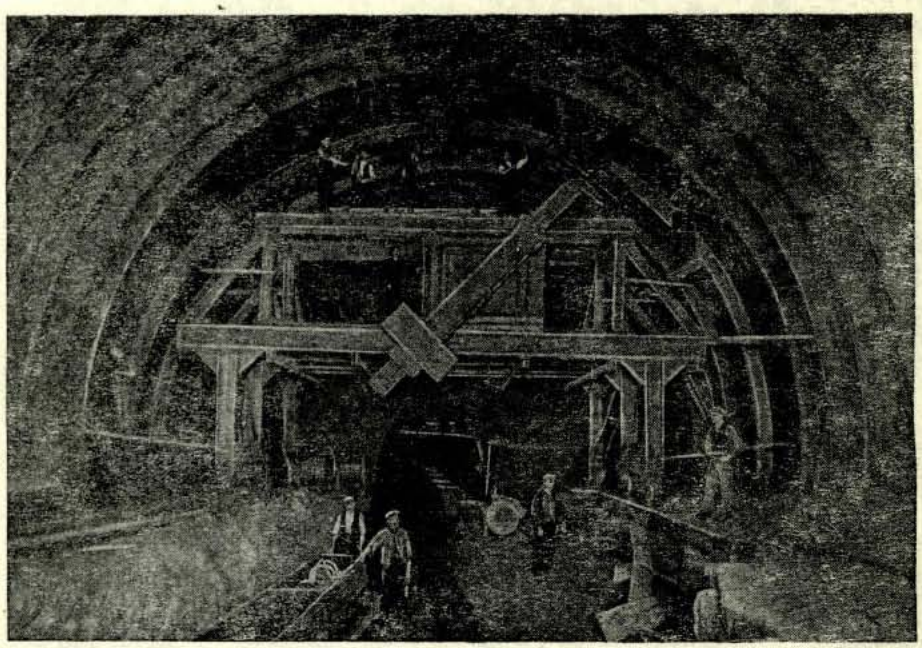


Рис. 625. Подводный тоннель под р. Мерси (сооружение калоттной части тоннеля эректором)

Дебит вод из разработок доходил, как указывалось выше, до 16 300 *л/мин*.

Немедленно после раскрытия верхней части профиля производился монтаж полукольца обделки из чугунных сегментов при помощи эректора (рис. 625). Сам эректор с телескопической стрелой, приводившейся в движение пневматически, был смонтирован на подвижной платформе с реверсивным ходом, направляемой по рельсам, уложенным вдоль оси тоннеля. С этой же платформы производилось бурение, инъекция и ряд других операций.

Сегменты доставлялись по путям верхней штольни. За чугунную обделку производилась сухая забутка породой слоем 20—25 *см* при 50% пустот. Вслед затем велось нагнетание известкового или цементного раствора под давлением около 6 *ат*.

Это нагнетание производилось, в зависимости от местных условий, повторно кольцами в 2,5—3 *м* при торцовой опалубке. После сооружения верхнего полукольца тоннеля при помощи эректора на значительном протяжении производились по подвесному пути в уровне горизонтального диаметра, в сочетании с расположенными в отдельных местах подъемниками.

Подобное подвесное расположение откаточных путей выявило при данной системе работ большой производственно-технический эффект с преимуществом перед откаткой в нижнем горизонте. При проходке слабого участка выветренной кровли скалы работы велись с большой осторожностью. Взрывные работы были запрещены. Был произведен тампонаж трещиноватых пород, разработка велась пневматическими инструментами с подработкой на одно кольцо при немедленной постановке сегмента.

После внутренней обделки устраивалась железобетонная конструкция проезжей части тоннеля (рис. 627).

Специальная конструкция из фигурных сегментов применялась в местах сопряжения основной тоннельной конструкции с вентиляционными каналами (рис. 626).

Следующие цифры дают представление о масштабе работ по сооружению подводного тоннеля под р. Мерси.

Полная длина проезжей части подводного тоннеля вместе с подходами	4 630 *м*
Расстояние между стенами набережных р. Мерси по трассе подводного тоннеля между Ливерпулем и Биркенхэдом	1 134 *м*
Площадь внутренней поверхности тоннельных обделок	165 000 *м²*
Объем вынутой породы	610 000 *м³*
Расход взрывчатых веществ	1 230 *т*
Длина исследовательских шпуров	18 000 *пог. м*
Вес чугунных сегментов тоннельных обделок	82 000 *т*
Длина расчеканенных свинцом стыков	215 *км*
Расход болтов для обделки	1 000 000 шт.
Объем бетонных работ	115 000 *м³*
Длина шпуров при тампонаже	130 000 *пог.*
Расход цемента при тампонаже трещиноватых пород	3 500 *т*
Количество воды, удаленной за все время работ	28 300 *млн. л*

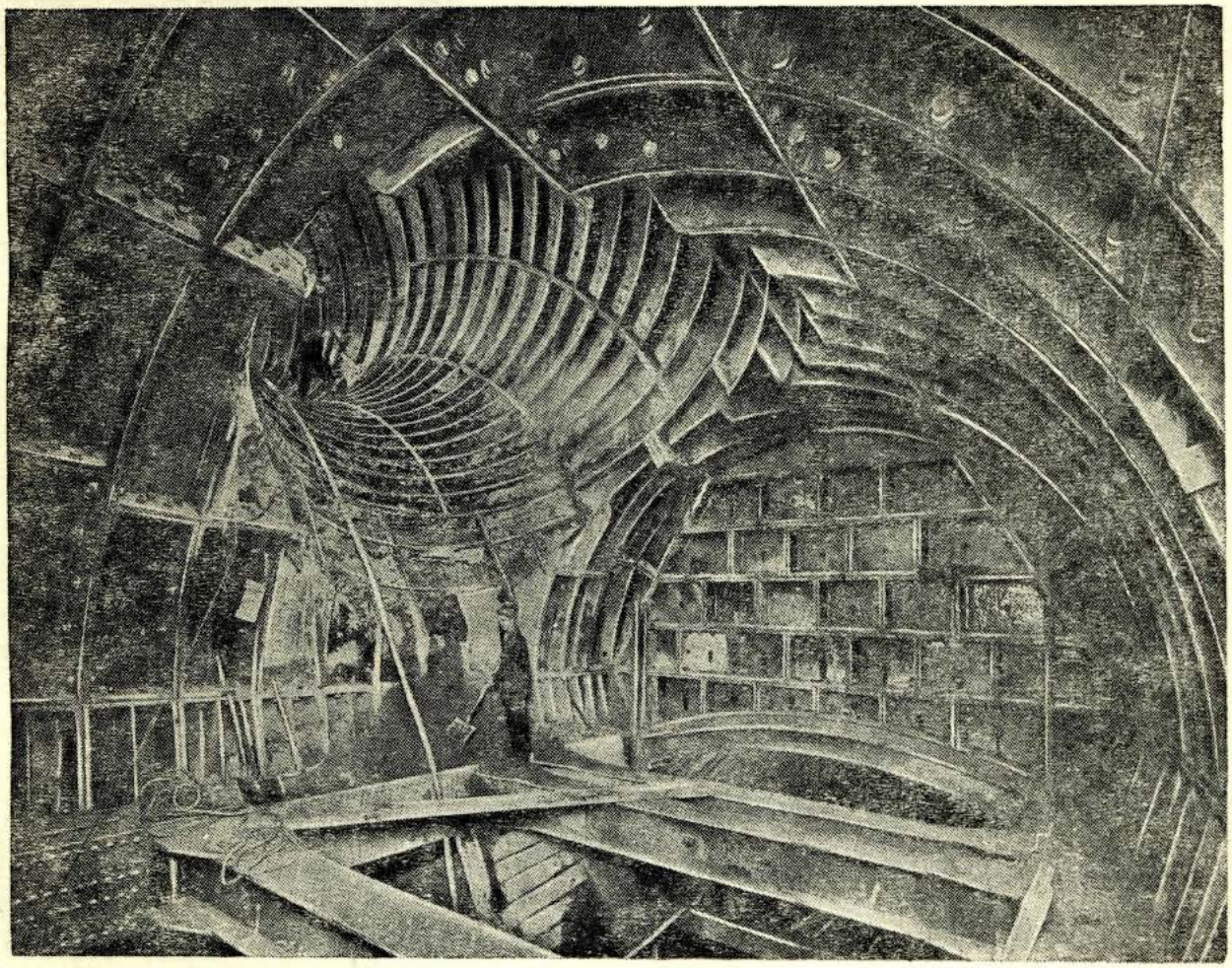


Рис. 626. Подводный тоннель под р. Мерси (сопряжение вентиляционного тоннеля с главным подводным тоннелем)

Общая длина кабелей и проводов для освещения, сигнализации и т. п.	900 *км*
Максимальная производительность и мощность вентиляционных установок с резервом	280 000 *м³/мин* 5 100 *л. с.*
Объем нагнетаемого воздуха в минуту	70 000 *м³*
Число рабочих в период развернутого фронта тоннельных работ	1 700 чел.
Пропускная способность тоннеля при четырех лентах движения (расстояние между автомобилями 3 *м*, скорость 30 *км/час*)	4 150 автомобилей

Оборудование тоннелей содержит ряд интересных автоматических деталей. Тоннели имеют световую и звуковую сигнализацию, освещение, противопожарные устройства, телефоны, автоматический дренаж. От мостовых весов передаются звуковые и световые сигналы в случае проезда автомобиля весом более 5 *т*. Радиовизор лимитирует габарит машины по высоте в 5,2 *м*. Въезжающие через порталы тоннеля машины, пересекая струю воздуха и сеть лучей, приводят в действие специальные приборы, регистрирующие поток автодвижения.

Стоимость сооружения этого подводного тоннеля выразилась в сумме 7 077 800 фунтов стерлингов.

Л. Подводные тоннели под р. Шельдой. Под р. Шельдой в Антверпене (Бельгия) построены два специальных тоннеля — для автомобильного и пешеходного движения.

а) Сооружение автомобильного тоннеля

Общая длина тоннеля с подходными участками	2 110,85 *м*
Общая длина открытой рампы	171 „
Длина тоннельной части	1 768,85 „
Подводная часть тоннеля	395 *м*
Ширина проезжей части тоннеля	6,75 „
Высота тоннеля в свету	4,5 „
Подходные уклоны	35‰

Было произведено разведочное бурение береговых частей и ложа реки. Скважины располагались на расстоянии 20 *м* от оси тоннеля. Всего было заложено 24 скважины, из них 3 через дно реки, 10 скважин на левом берегу и 11 на правом. Глубина заложения скважин колебалась от 27 до 40 *м*. Выявлены были следующие напластования грунтов.

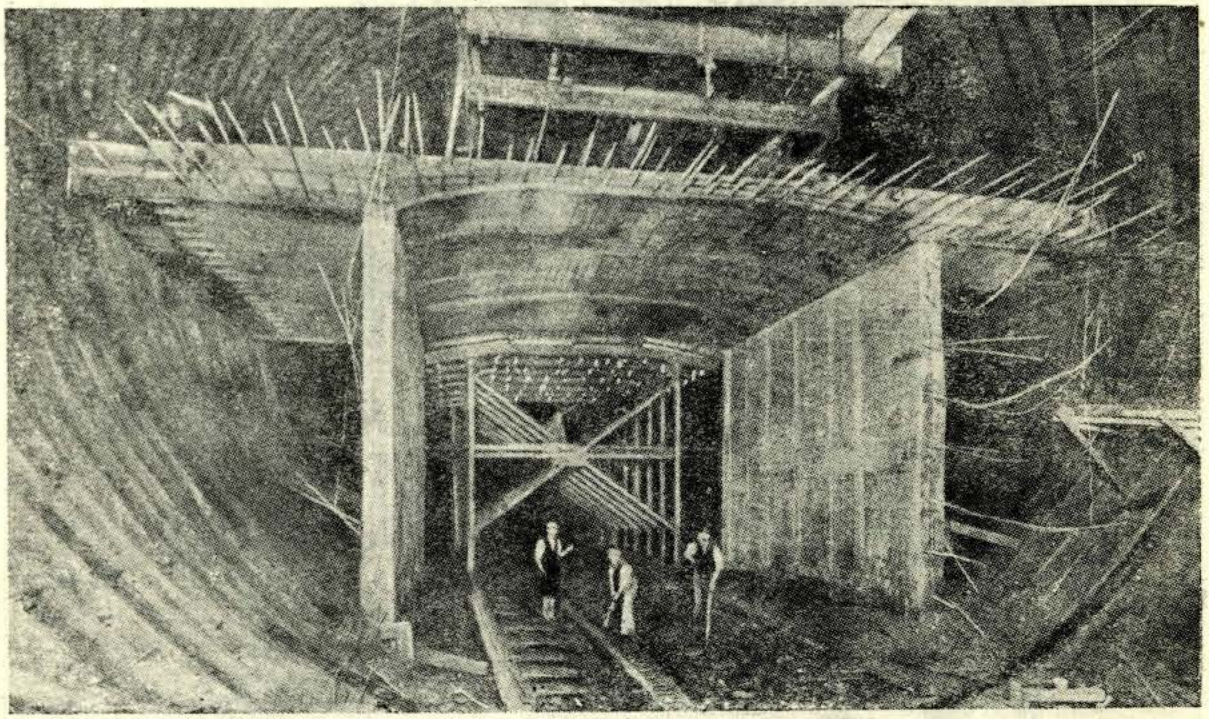


Рис. 127. Подводный тоннель под р. Мерси (устройство железобетонной конструкции проездной части)

1. Под дном реки: дно — илистый песок толщиной до 1 *м*, ниже — водоносные крупнозернистые пески; последние подстилались мощным пластом плотной водонепроницаемой боомской глины с известковыми включениями.

2. Правый берег: под насыпными породами из суглинков, песков с органическими включениями мощностью от 3 до 9 *м* залегали в неправильной последовательности тонкозернистые пески, переплетавшиеся с глинистыми выклиниваниями. Эти песчаные напластования, насыщенные водой, являлись слабыми грун-

гами плывунного характера. Пески подстилались пластами пластичной боомской глины.

3. Левый берег: под насыпным слоем залегал пласт глины, подстилаемый торфяным слоем толщиной до 2 *м;* под торфом залегали тонкозернистые илистые пески, иногда с включением торфяных линз. Пески подстилались мощным пластом боомской глины.

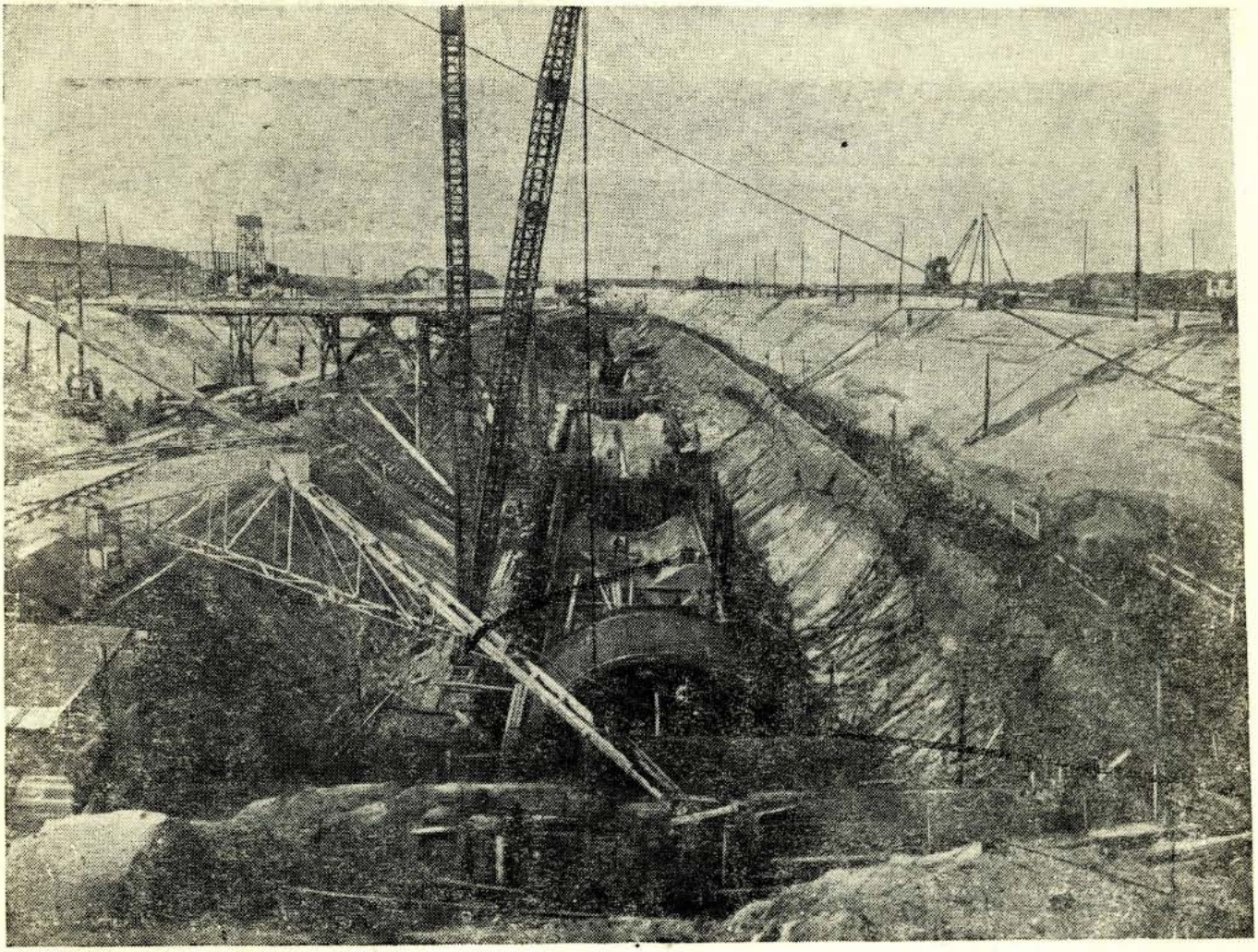


Рис. 628. Подводный тоннель под р. Шельдой в Антверпене (разработка подхода к тоннелю)

Немедленно после составления проекта (1931) приступили к развертыванию строительных работ. Предварительно было начато сооружение подходов к подводной части тоннеля в виде открытой рампы длиной 170 *м* и тоннеля железобетонной конструкции длиной 280 *м* в открытой выемке (рис. 628).

Подводный тоннель пройден щитом (наружный диаметр 9,16 *м*) при обделке из двенадцати нормальных чугунных сегментов и одного замкового. Щит этот, круглого сечения, с открытой грудью, имел стальной корпус из частично склепанных и сваренных листов общей толщиной 70 *мм*. Оборудован он был шестью подвижными платформами и эректором для монтажа сегментов, прикрепленным непосредственно к щиту (рис. 629). Последний в опорном кольце своем был снабжен тридцатью двумя гидравлическими домкратами при давлении воды до 500 *ат*, мощностью каждый до 200 *т*, развивавшими общее усилие для продвижения щита в 6 400 *т*. Щит был смонтирован в открытом котловане, огражденном металлическим шпунтом. Щит продвигался вперед на ход поршня в соответствии с шириной сегмента тоннельной обделки в 75 *см* (рис. 630).

Борьба с гидростатическим давлением воды в процессе щитовой проходки велась при помощи сжатого воздуха. Была установлена шлюзовая диафрагма, в которую замурованы четыре шлюза — два материальных в нижнем ярусе, один людской и один спасательный, расположенный в верхнем ярусе

Для обеспечения плотного соприкасани обделки с породой пустоты заполнялись круп ным песком с последующим нагнетанием це ментного раствора через отверстия в середин тюбинга.

Энергия и сжатый воздух обеспечивалис двойными резервом из различных источнико

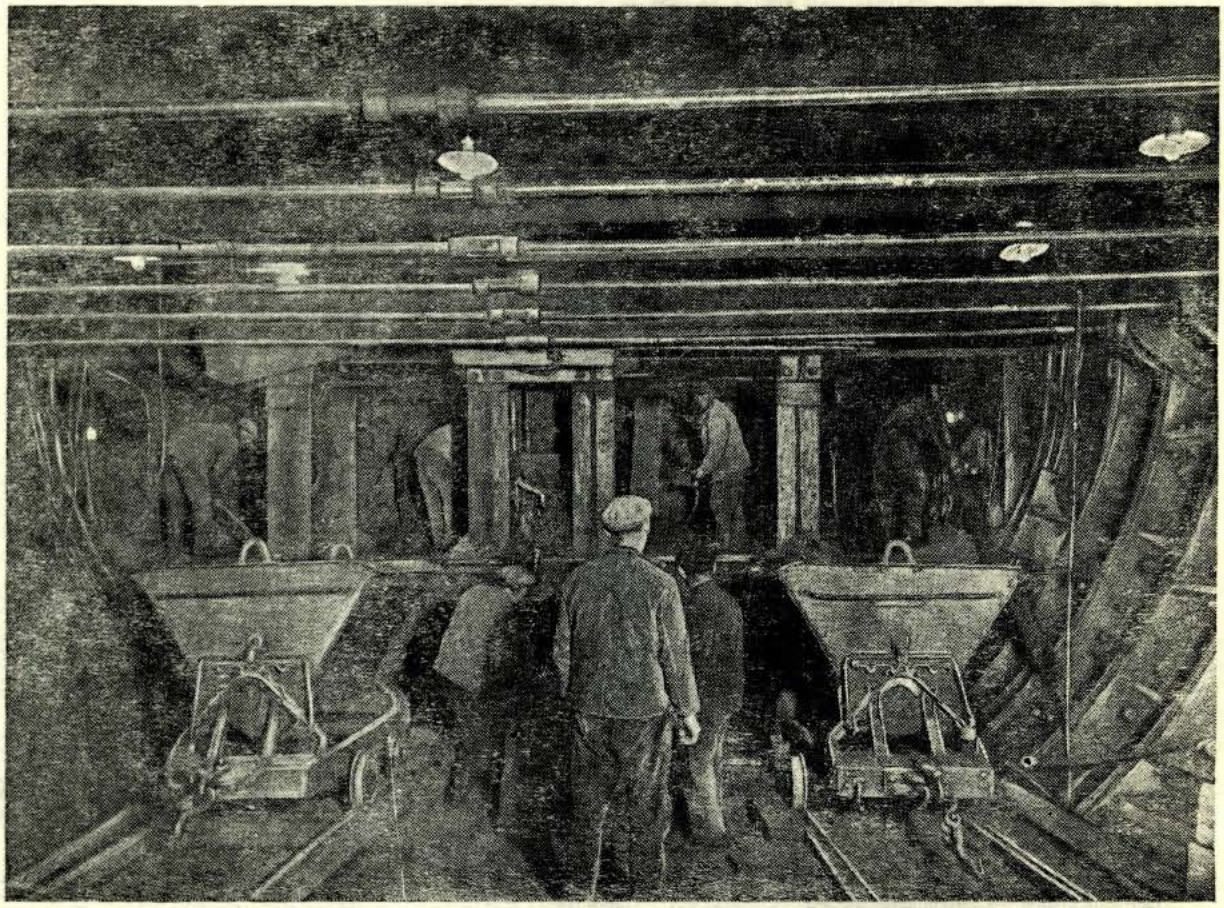


Рис. 629. Подводный тоннель под р. Шельдой (щитовые работы)

сечения. В спасательном шлюзе всегда была открыта дверь со стороны воздушного давления для рабочих (на случай аварии).

Снижение величины воздушного давления, которое должно было уравновесить гидростатическое, достигалось снятием водяного напора, усиленной работой глубинных насосов.

Изоляция стыков чугунных тюбингов производилась пневматической расчеканкой свинца, вводимого в специальные желобки 10×30 *мм*, образуемые фланцами сегментов. Кроме того, все четыре внешние поверхности реборд сегментов покрывались битуминозным слоем.

в целях безопасности ведения щитовых работ

Оборудование, размещенное на поверх ности, было следующее:

компрессоров низкого давления — 4 шт. (3 *ат*) по 450 *л. с.* (общей мощностью в 1 800 *л. с.*);

компрессоров высокого давления — 2 шт. (8 *ат*) по 160 *л. с.* (общей мощностью 320 *л. с.*);

гидравлических насосов — 2 шт. (500 *ат*) с электромоторами по 115 *л. с.* каждый.

Щит, направленный с левого берега, проводился через вентиляционные шахты, зало-

женные по оси тоннеля. Скорость проходки тоннеля щитом колебалась в пределах от 1,5 до 3 *м* в сутки готового тоннеля.

В процессе производства щитовых работ под сжатым воздухом имел место прорыв грунта в забой. Авария, однако, успешно была ликвидирована.

филя. Эти работы проводились в осушенных грунтах при искусственном понижении уровня грунтовых вод.

б) *Сооружение пешеходного тоннеля.* Подводный тоннель под р. Шельдой для пешеходного движения соединяет оба берега через шахты и наклонные тоннели, оборудованные

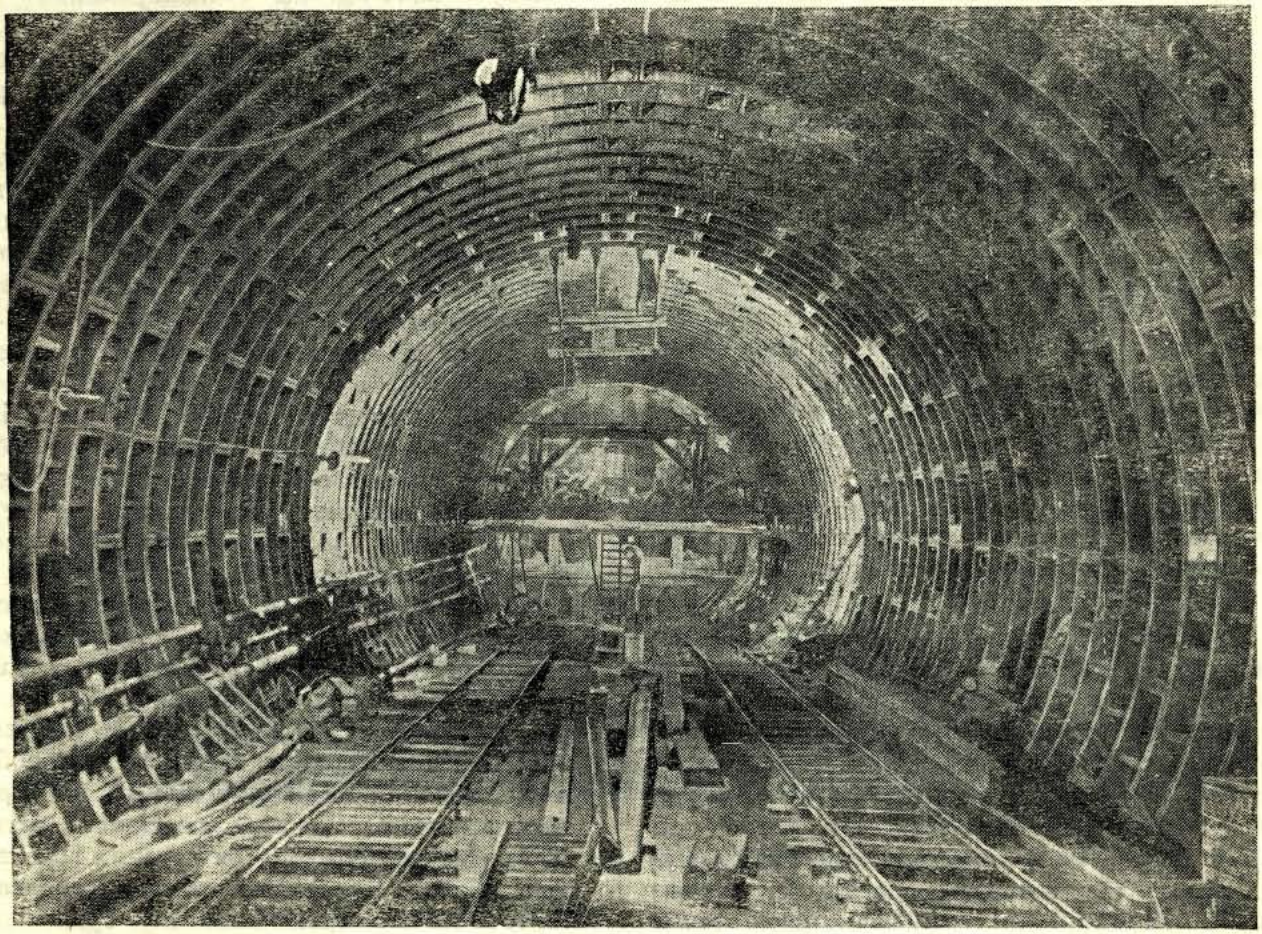


Рис. 630. Подводный тоннель под р. Шельдой (готовая тоннельная обделка из тюбингов)

Навстречу щиту с правого берега велась разработка тоннеля на временном деревянном креплении при обделке чугунными тюбингами. Работы проводились аналогично австрийской системе раскрытия тоннеля на полный профиль на временном деревянном креплении при нижнем направляющем ходе.

Установка сегментов велась при помощи специального приспособления из согнутых в круг двух швеллеров, между которыми двигалась каретка с выдвижными домкратами. При этом имелась возможность брать сегмент и устанавливать его в требуемую точку пролифтами и эскалаторами, и имеет протяжение в 572,28 *м*. Тоннель заложен на глубине 24,37 *м* и проходит полностью в плотной водонепроницаемой боомской глине. Кровля тоннеля в середине представлена в виде глины (6 *м*), илистого песка (8 *м*) и воды (12 *м*). До начала работ по трассе было произведено разведывательное бурение (девять скважин). Данные гидрогеологического прогноза почти полностью подтвердились в процессе проходки.

Тоннель-тюб имеет внешний диаметр в 4,74 *м* и составлен из нормальных чугун-

ных сегментов — одного замкового и двух призамковых, при высоте ребра тюбинга 20 *см*; ширина кольца соответствует ходу поршня щита в 60 *см*.

Щит был смонтирован в шахте левого берега и пущен по направлению к правому берегу. Щит этот, с открытой грудью и двумя горизонтальными выдвижными платформами по диаметру, был снабжен шестнадцатью гидравлическими домкратами, к которым вода подавалась под давлением 350 *ат*.

Сборка чугунных тюбингов обделки велась эректором, помещенным на подвижной платформе, перемещавшейся по временным консолям, прикрепленным к готовой обделке. Разработка забоя велась пневматическим лопатами.

Во избежание пучения глины забоя лоб временно закрывался кирпичной стеной или покрывался слоем раствора. На случай возможных прорывов грунта впереди велось рекогносцировочное бурение, а сзади были установлены две бетонные диафрагмы с металлическими дверями, которые в необходимый момент могли быть использованы для шлюзования. По мере продвижения лба забоя вперед шлюзовая диафрагма перемещалась.

Процесс уборки породы производился независимо от монтажа обделки. Благодаря этому удалось достигнуть большой эффективности проходки. Скорость проходки щитом достигала четырнадцати-шестнадцати колец в сутки. Это составляло 8,4—9,6 *пог. м* готового тоннеля. Проходка велась в глине при нормальном атмосферном давлении и открытых дверях шлюзовой диафрагмы без осложнений. Исключением явилось пересечение песчаного включения, которое принесло воду в выработки. Этот отрезок был пройден под сжатым воздухом. В дальнейшем щит снова врезывался в плотную глину, и работы производились нормальным порядком.

Особое значение придавалось нагнетанию песка и цементного раствора за обделку вслед за ходом щита. Оставление пустот в нарушенной глине приводит к местному нарастающему давлению породы, которое может оказаться и неравномерным, на что тоннельная обделка не рассчитана. Нагнетанием песка и гравия обеспечивалось здесь плотное соприкасание грунта с обделкой и восстанавливался таким образом первоначальный режим земляного массива до пересечения его тоннелем.

Изоляция велась обычным путем — расчеканкой свинца в желобке бортов между соседними чугунными тюбингами.

На каждом берегу подводный тоннель в торце имел выход в шахту, оборудованную лифтами и двухмаршевыми эскалаторами, уложенными в двух наклонных тоннелях.

Комплекс шахт и эскалаторных тоннелей был сооружен с применением замораживания. Совершенные методы тоннелирования (щит, сжатый воздух, замораживание, металлические шпунты, искусственное водопонижение, тюбинги и т. д.) дали возможность построить тоннели под р. Шельдой в два года.

М. *Подводные тоннели под р. Дунаем.* Исключительный технический интерес представляют собой механизированные щиты для сооружения двух водопроводных тоннелей под р. Дунаем в Будапеште, отражающие последние достижения щитовой техники.

Тоннели круглого сечения расположены в 3 *км* друг от друга. Южный тоннель диаметром 3 *м* имеет длину 600 *м*. Северный тоннель диаметром 3,5 *м* имеет длину 566 *м*. Тоннели залегают в мощном слое гравия при частичном выклинивании глинистых пластов. На отдельных участках трассы была установлена гидравлическая связь, при которой вода реки непосредственно соединяется с подземными водами на проектном уровне подошвы тоннеля. Это обстоятельство в значительной степени осложнило производство щитовых работ. Здесь строители впервые применили щит новой системы с закрытой лобовой поверхностью. Впереди щит был снабжен режущим агрегатом по типу секторного затвора, имеющего ряд фрезов для резания грунта впереди щита. Срезанная порода подавалась внутрь щита через люк по транспортеру в поезда подземной откатки. В период удаления породы из забоя одновременно производился эректором монтаж тоннельной обделки из железобетонных блоков.

Энергия для работы отдельных деталей щита была предусмотрена гидравлическая. На последней работали эректор, щитовые домкраты, а равно режущий секторный затвор впереди щита.

Н. *Щитовые работы на тоннеле под р. Эльбой.* Тоннель под р. Эльбой в г. Гамбурге является крупнейшим подводным тоннелем Германии. Он соединяет часть г. С.-Паули с портовой частью Гамбурга — Штейнвердером — и предназначен для автомобильного, гужевого и пешеходного движения. Тоннель состоит из двух тюбов внешним

диаметром 6 *м*, расположенных параллельно на расстоянии 8 *м* между осями. В торцовых частях у берегов тоннель входит в вертикальные шахты диаметром в свету 22 *м*. Каждый из тюбов подводного тоннеля при сечении в свету 4,7 × 4,5 *м* имеет ширину проезжей

устроив внутреннюю бетонную обделку с укладкой добавочной нагрузки металла около 2 *т* на 1 *пог. м*, удалось достигнуть удельного веса тоннеля в 1,01.

Тоннель под р. Эльбой на протяжении около 30% общей длины со стороны С.-Паули

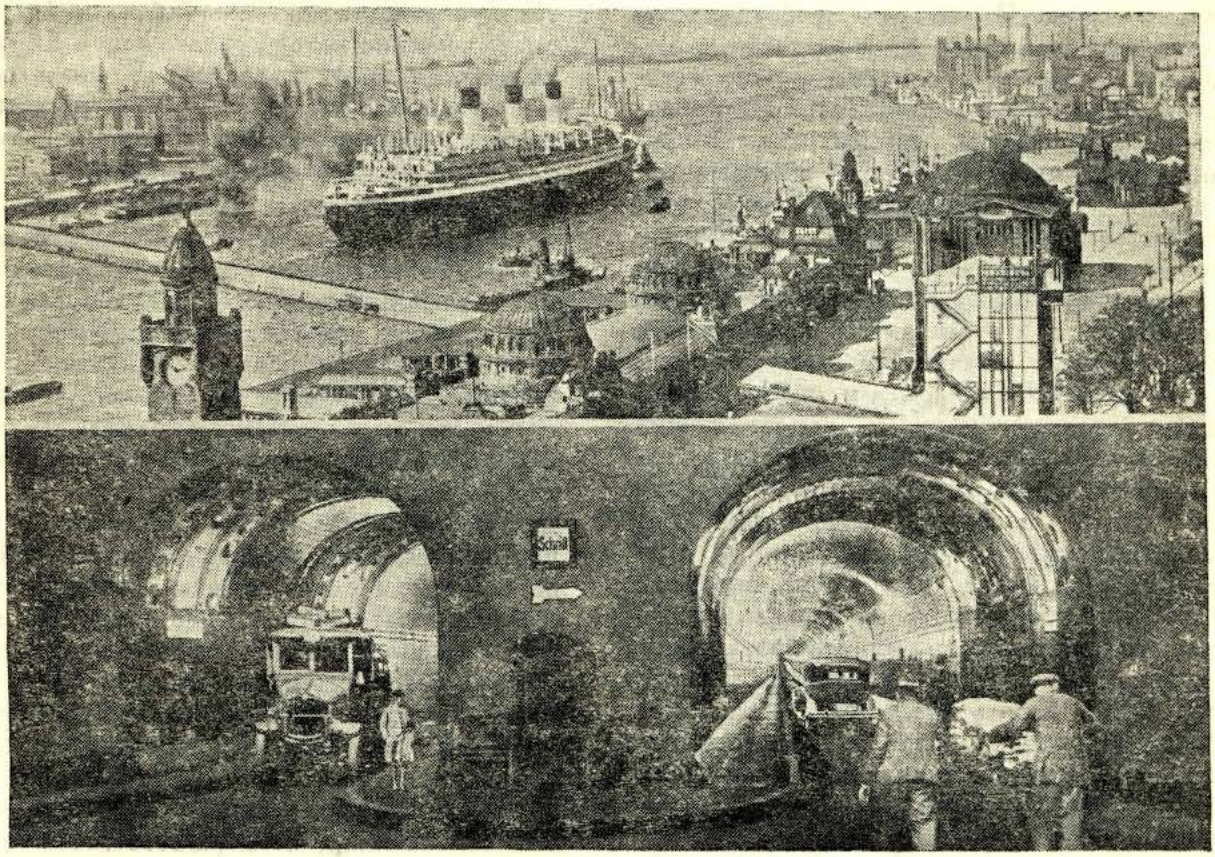


Рис. 631. Подводный тоннель под р. Эльбой (в Гамбурге)

части 1,82 *м* и два тротуара по 1,25 *м* (рис. 631). Длина тоннеля, считая между осями шахт, равна 448,5 *м*. Тоннель состоит из двух подходов к шахтам по 150 *м* с подъемом в 0,04, соединенных разделительной площадкой в 108,5 *м*. В портальных частях заложение тоннеля соответствует глубине шахт в 23,5 *м*. В середине русла реки кровля грунта над шелыгой свода составляет 6 *м* при глубине воды около 10 *м*. Глубина заложения подошвы тоннеля, считая от максимального горизонта воды в Эльбе, равна 22 *м*.

Обычная конструкция тюбов не обеспечила бы этот подводный тоннель от всплытия вверх, так как вес 1 *пог. м* тоннеля был на 30 *т* легче веса вытесненной воды. Лишь

залегает в плотных водонепроницаемых глинах, которые в некоторых случаях требовали применения взрывных работ. Остальные 70% тоннеля залегают в грунтах аллювиальных и делювиальных отложений. Последние состоят из водонасыщенных мелко- и крупнозернистых песков с включением гравия и камня. Эти образования находятся во взвешенном состоянии, и на них, примерно на промежутке получаса, сказывается влияние прилива и отлива в р. Эльбе. Контакт выклинивания плотной глины и песчаных образований покрыт суглинистыми пластами, распространяющимися на значительное расстояние под дном реки.

Фронт работ по проходке тюбов был открыт из одной шахты Штейнвердер, откуда

пускались щиты в направлении к С.-Паули. Проходка шахты С.-Паули в плотной глине не представляла особенных затруднений, в то время как сооружение шахты Штейнвердер диаметром 22 *м* в водонасыщенных грунтах при глубине проходки в 28 *м* было сопряжено с большими строительными затруднениями. Проходка шахты Штейнвердер требовала применения кессонирования и оборудования поверхности силовыми и компрессорными установками для сжатого воздуха. При этом представилась возможность концентрации оборудования шахтных и тоннельных щитовых работ на одной площадке шахты. Через люки в потолке кессона были опущены два смонтированных на поверхности щита весом по 120 *т* каждый. Высота потолка кессона была предусмотрена для возможности продвижения щитов на первом участке под сжатым воздухом. Для продвижения щита в шахте были устроены бетонные упорные направляющие приспособления. После продвижения лба забоя первого щита на расстоянии 100 *м* от ствола шахты спускался второй щит для параллельного тюба. Щит внутренним диаметром 6,032 *м* (на 32 *мм* больше внешнего диаметра обделки) состоял из металлического корпуса, разделенного двумя диафрагмами и двумя горизонтальными площадками. Всего в щите было девять ячеек при выдвижном аванбеке. Оболочка щита имела толщину 52 *мм*. Для продвижения вперед щит был снабжен шестнадцатью гидравлическими домкратами (каждый развивал усилие в 125 *т*), общей мощностью в 2000 *т*. Эректор для установки тоннельной обделки был прикреплен непосредственно к диафрагме корпуса щита.

Особенностью подводного тоннеля под р. Эльбой явилась металлическая обделка тоннеля. Обычно применяемые чугунные обделки слабо сопротивляются растягивающим и скалывающим усилиям и претерпевают деформации от неравномерного давления породы и нажима домкратов щита. Поэтому здесь была применена обделка из стальных сегментов из несимметричного профиля двутавровых балок 25 *см*.

Для обеспечения надежности соединения в отдельных сегментах впервые применялась клепка вместо распространенного в практике сбалчивания сегментов.

Технические данные примененной под р. Эльбой стальной обделки см. в главе V.

На защиту обделки от коррозии было обращено особое внимание. Был принят метод защиты внутренней и внешней поверхности стальных сегментов цементным раствором и бетоном. На площадке вне тоннеля внешняя поверхность стальных двутавров между полками сегментов тщательно покрывалась слоем цементного раствора. После повторного нагнетания за обделку через отверстия в сегментах и устройства внутренней бетонной рубашки металлические кольца оказывались полностью защищенными от коррозии. Водонепроницаемость тоннеля была достигнута расчеканкою свинца между фланцами сегментов в желобках глубиной 30 *мм* и шириной 4 *мм*.

Клепка отдельных элементов между собой хотя и осложняла и удорожала работы, но все же, по настоянию города, была выполнена, как обеспечивающая изоляцию тоннеля в большей степени, чем сбалчивание. Теснота работ в забое щита исключала возможность непосредственной клепки вслед за установкой эректором металлического кольца. На первых 20 *м* от забоя щита шла предварительная сборка сегментов сбалчиванием, а лишь дальше следовала клепка. Нагревание заклепок в условиях работы под сжатым воздухом потребовало особого подхода. Были построены оригинальные печи с воздухопроводами и дымоуловителями, соединенными с наружным воздухом. Клепка производилась пневматическими инструментами, работавшими под давлением в 9 *ат*. Максимальное давление сжатого воздуха при работе щитом доходило до 2,8 *ат*. Лоб забоя крепился системой металлических шандор, поддерживавшихся специальными забойными гидравлическими домкратами. При продвижении вперед каждой шандорной доски в отдельности производилась выборка грунта на 50 *см*. В результате весь лоб забоя продвигался на это расстояние.

При утечке воздуха между шандорами производилась забивка глиной.

После разработки забоя щит продвигался на 50 *см* хода поршня домкрата, и в хвосте щита монтировалась обделка из стальных сегментов, с внешней стороны защищенных по стенке двутавров цементным раствором. Вслед за этим через отверстия в сегментах между внутренней поверхностью хвостовой части оболочки щита и кольцами тюбов под давлением производилось нагнетание цементного раствора с добавкой жирной извести. Последняя добавка применялась в целях замедления схватывания во избежание взаимного сцепления оболочки щита и обделки. При этом нагнетании образовался защитный

слой в 5 *см*, полностью покрывавший полки двутавров. После продвижения вперед производилось повторное нагнетание пуццоланового цементного раствора, имевшего назначением заполнить пустоты, образовавшиеся вокруг обделки, за счет толщины оболочки щита 52 *мм*. Отверстия в каждом сегменте закрывались винтовой пробкой.

При проходке восточного тюба вследствие значительной утечки воздуха на протяжении всего участка пришлось поставить две шлюзовые диафрагмы, в то время как для западного тюба на протяжении 400 *м* оказалась достаточной одна диафрагма. Шлюзовая диафрагма представляла собою двухметровую бетонную стенку, оборудованную одним людским шлюзом в верхней и одним материальным шлюзом в нижней части профиля.

Регулирование сжатого воздуха при разнице давления воды в шелыге свода и у подошвы тоннеля на 0,62 *ат* было вначале весьма затруднено. Вопрос осложнялся наличием сильно водопроницаемых грунтов и действием приливов и отливов воды в р. Эльбе. Во время проходки были случаи массовых прорывов воздуха, и на расстоянии 80 *м* от шахты Штейнвердер произошла катастрофа. Прорывом сжатого воздуха было вырвано крепление забоя и поднят столб воды в реке на 6—8 *м* вверх. Давление воздуха в тоннеле резко упало, и вода из Эльбы ворвалась в тоннель, увлекши за собой около 650 $м^3$ грунта (рис. 632). Образовавшаяся промоина была засыпана сверху. В месте прорыва наложили глиняный пластырь; после этого вода была вытеснена из тоннеля повышением давления сжатого воздуха. Давление обычно держалось по горизонту ниже шелыги свода на две трети величины диаметра щита. В особо опасных местах нижней средней ячейки щита ставилось добавочное деревянное ограждение из брусьев толщиной в 20 *см*, заполненное впереди глиной. Благодаря этому величину давления воздуха удалось удерживать даже несколько выше горизонтального диаметра. Одновременно работало под сжатым воздухом 40 человек.

Средняя скорость проходки щитом составляла 1,5 *м* в сутки готового тоннеля. Максимальная скорость была 3,25 *м* в сутки.

О. *Первые подводные тоннели под р. Москвой.* Впервые в истории советского метростроения с успехом закончена прокладка четырех подводных тоннелей под р. Москвой по трассе Замоскворецкого радиуса 3-й очереди строительства Московского метрополитена.

Сопоставляя богатейший опыт подводного тоннелирования Западной Европы (под рр. Эльбой, Шпрее, Сеной, Темзой, Шельдой и др.) и Америки (под рр. Гудсон, Ист-Ривер, Детройт и др.) и наш молодой советский опыт прокладки подводных тоннелей, следует

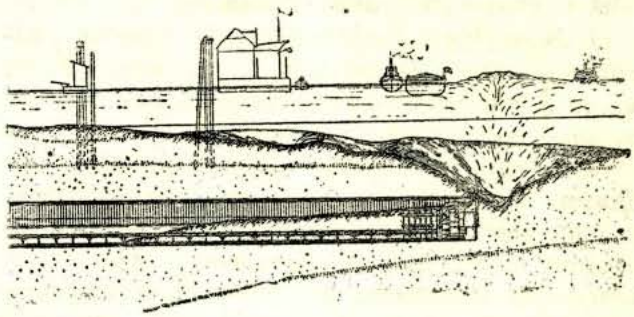


Рис. 632 Подводный тоннель под р. Эльбой (аварийный прорыв грунта и воды в тоннель при производстве щитовых работ)

отметить исключительную смелость, разумный технический риск и умелую организацию работ по технике безопасности, которые были проявлены советскими инженерами в процессе проектирования и производства работ.

Подводные тоннели под р. Москвой залегают по трассе Замоскворецкого радиуса в виде тоннелей круглого сечения, внешним диаметром 6 *м*. Конструкция обделки тоннелей сооружена из чугунных тюбингов. Проходка тоннелей запроектирована и осуществлена щитовым способом.

Основной фронт работ по сооружению перегонных тоннелей был открыт из шахты щитами, закончившими трассу второй очереди, что обусловило ведение щитов при проходке под уклон. Работы вначале велись слепым забоем без наличия передовых штолен. Впоследствии из второй шахты встречным забоем были пробиты штольни в направлении к щитовым забоям.

Одной из сложных задач представляется проходка тоннеля под уклон слепым забоем.

При наличии значительного притока вод, несмотря на мощный водоотлив, при системе промежуточных зумпфов и перекачек работа в залитом водой забое представлялась исключительно осложненной.

Мировая практика подводно-тоннельных работ указывает, что почти все подводные

тоннели преимущественно пройдены с применением сжатого воздуха для преодоления гидростатического напора и возможности ведения работ в сухих условиях. При этом применение сжатого воздуха ограничивается величиной гидростатического напора практически в 40 *м*, так как при большем напоре в условиях сжатого воздуха ведение работ физически невозможно, и приходится изыскивать другие способы подводного тоннелирования.

Применение сжатого воздуха хотя и разрешает задачу с точки зрения технической, но вместе с тем имеет существенный недостаток, который заключается в том, что рабочие, проводящие работы в зоне сжатого воздуха, находятся под особым режимом, значительно отличающимся от условий работы при нормальном атмосферном давлении. Техника безопасности производства работ под сжатым воздухом связана с рядом осложнений. Работы под сжатым воздухом обусловливают заболевания рабочих кессонной болезнью.

Кроме того, зона сжатого воздуха при наличии повышенного процента кислорода увеличивает пожарную опасность.

Практика строительства подводных тоннелей как в Америке, так и в Европе пестрит целым рядом аварий и катастроф, связанных с прорывом из реки в тоннель воды и грунта. Затопление этих тоннелей стоило жизни людей и громадных средств по ликвидации аварий.

Несмотря на то, что процесс проходки тоннелей под р. Москвой протекал в сложных геологических и гидрогеологических условиях, при значительном гидростатическом напоре, наши строители, тщательно изучив геотехнический режим, осуществили прокладку четырех подводных тоннелей диаметром 6 *м* под р. Москвой безаварийно.

Строители не применяли сжатого воздуха, сопутствующего обычно проходке подводных тоннелей. Этим самым удалось облегчить труд подземных рабочих, избавившихся от работы в искусственном режиме повышенного давления. При этом стоимость работ значительно снизилась.

Особое внимание было уделено вопросам техники безопасности производства работ. В настоящее время осуществляется проходка ряда подводных тоннелей под р. Москвой, по трассе большого подземного кольца 4-й очереди строительства Московского метрополитена.

СООРУЖЕНИЕ ПОДВОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

А. *Подводные тоннели под р. Шпрее в Берлине.* Сооружение подводных тоннелей в германской практике ведется преимущественно открытым путем. Эта система была приняты при устройстве подводных тоннелей под р. Шпрее на трассе Берлинского метрополитена.

Первый тоннель под р. Шпрее, пройденный открытым путем, лежит на трассе линий Шпигельмаркет — Александерплац — Шензаузер Тор (у Инзельбрюке) (рис. 633).

Требовалось построить открытым способом подводный тоннель протяжением 125 *м*, сохранив судоходство по реке. Работы были разделены на два участка, причем на период производства работ на одном участке реки второй был свободен для судоходного движения. При глубине воды в 3,7 *м* первый строительный участок, шириной в 22,36 *м*, был огражден глиняными перемычками. Каждая из них состояла из двух деревянных шпунтов, забитых на расстоянии 4 *м* при глиняном заполнении. Внутри было забито два металлических шпунтовых ряда, ограждающих котлован шириной в 12,36 *м* при ширине тоннеля в 9,12 *м*. Таким образом, между гранями стенок и поверхностью шпунта, ограждающего котлован, оставались промежутки по 1,62 *м*, которые предназначались для размещения системы водопонижающей установки.

Применялись глубинные пневматические маммут-насосы, которые опускались в буровые скважины на глубину 24,85 *м* от поверхности воды в р. Шпрее, при заложении подошвы тоннеля на 7,15 *м* под дном реки. Кроме маммут-насосов, работали еще и специальные центробежные насосы. Интенсивной работой системы понижения уровня грунтовых вод удалось полностью осушить котлован и производить строительные работы всухую. Эффект водопонижающей установки был достигнут ввиду наличия метрового прослойка ила, отделяющего верхнюю воду в реке от грунтовых вод мощных берлинских песков. При глубине воды в реке до 3,75 *м* прослоек ила практически оказался достаточным. После выемки грунта из котлована была устроена железобетонная замкнутая рама толщиной в стенах и в перекрытии 1 *м*.

Кроме обычного расчета на грунтовое и гидростатическое давление, конструкция должна была выдержать без повреждений

давление от затонувшего при полной загрузке судна.

Тоннель изолирован от воды и блуждающих токов внешней оклеечной изоляцией из гудронированного картона на горячей клебемассе. Пространство между шпунтовыми ограждениями и внешними гранями рамы тоннеля было заполнено тощим бетоном.

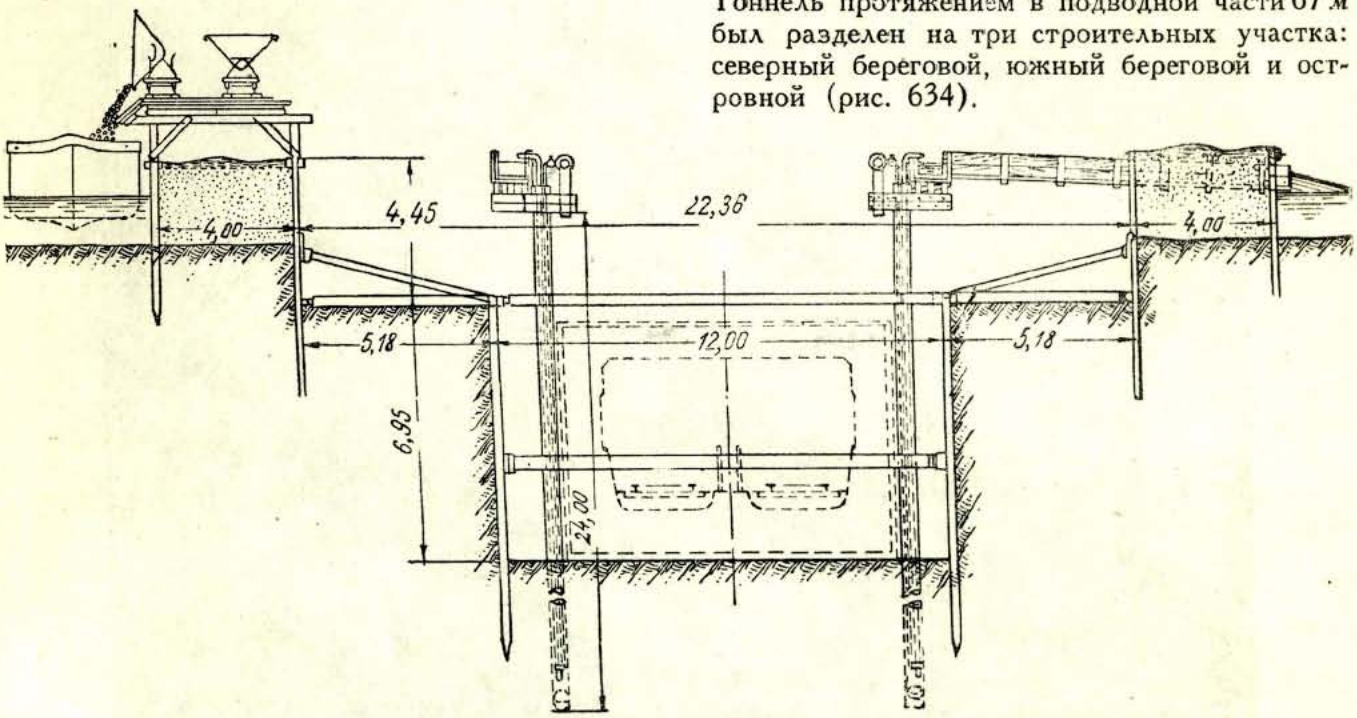


Рис. 633. Подводный тоннель под р. Шпрее у Инзельбрюке (сооружение открытым способом)

Кровля тоннеля была покрыта листовым железом толщиной в 8 *мм* и защитным слоем бетона толщиной в 10 *см*. Сверху был еще для предохранения от возможных механических повреждений насыпной слой щебня в 0,5 *м*. После окончания работ одного строительного участка через готовый тоннель была пропущена вода и приступлено к проведению аналогичных работ на другом участке. Однако внезапный прорыв воды через перемычку заставил строителей вести работы меньшими отсеками; при этом второй участок пришлось строить в две очереди.

Длительность сужения фарватера для судоходного движения — 3,5 месяца.

Продолжительность строительства подводного тоннеля — 3 года.

Как видно из приведенных данных, постройка подводного тоннеля значительное время стесняла судоходство; поэтому, предпринимая открытое подводное тоннелирование, в дальнейшем стремились к сокращению этого периода до минимума.

* * *

При постройке тоннеля под р. Шпрее у Вайдендаммербрюке система производства работ отличалась от работ у Инзельбрюке. Тоннель протяжением в подводной части 67 *м* был разделен на три строительных участка: северный береговой, южный береговой и островной (рис. 634).

Последовательно на каждом участке были устроены обычные глиняные перемычки и забит ларсеновский металлический шпунт, ограждающий котлован шириной 8,4 *м*. В дальнейшем под защитой ограждающих перемычек были срезаны сваи до дна реки и устроен временный предохранительный деревянный настил по уложенным металлическим балкам. Настил был устроен водонепроницаемым благодаря укладке битуминозной изоляции, покрытой листовым железом.

По бокам ларсеновского шпунта с внешней стороны котлована был забит дополнительный деревянный шпунт. Места сопряжения последнего с деревянным настилом были плотно забиты мятой глиной.

После установки системы водопонижения перемычки были убраны. Дальнейшие строительные работы по удалению земляного ядра

и устройству тоннельной конструкции производились под защитой искусственного водонепроницаемого настила на ложе реки при шпунтовом ограждении.

Подошва тоннеля у Вайдендаммербрюке была заложена на глубине 12 *м* от уровня воды в реке. Перекрытие тоннеля, заложенное на глубину 5,6 *м* от горизонта воды в реке, было устроено из клепаных металлических балок высотой 0,65 *м*, уложенных на расстоянии 1,3 *м* с перекрытием пространства между ними бетонными сводиками. Сверху были уложены изоляционный и бетонный слои толщиной 28 *см*. Для защиты от механических повреждений якорями и другими предметами уложили защитный бетонный слой в 0,5 *м* и из щебня в 0,8 *м* до отметки углубленного русла р. Шпрее.

Этот способ имеет преимущество перед применявшимся на Инзельбрюке в части сокращения времени стеснения судоходного движения до 22 месяцев.

* * *

Наиболее эффективный прием подводного тоннелирования проведен при пересечении р. Шпрее линией Гезундбруннен — Нейкельн (у Бауенбрюке).

Тоннель протяжением в подводной части 172 *м* был осуществлен следующими приемами. Предварительно по трассе тоннеля подводным землечерпанием в ложе реки была сделана траншея глубиной 1,5 *м* от дна реки. По обрезу намечаемого котлована шириной 10,3 *м* был забит ларсеновский металлический шпунт. Последний на уровне подошвы траншеи был водолазами срезан под водой автогеном.

Одновременно велись буровые работы для установки искусственного водопонижения. На поверхности собирались решетчатые металлические балочные фермы несущего перекрытия. По нижнему поясу этих балок укладывалась опалубка спаренными секциями по десять штук балок (со специальных деревянных под-

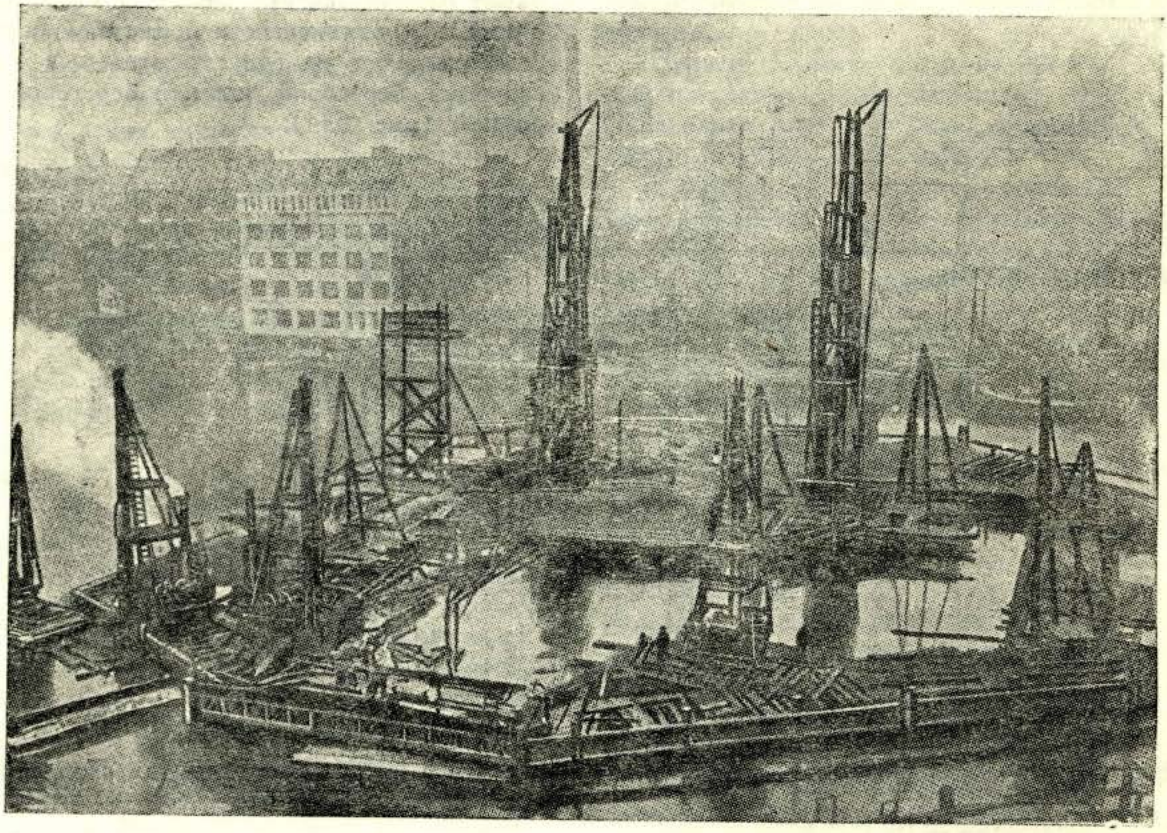


Рис. 634. Подводный тоннель под р. Шпрее у Вайдендаммербрюке (забивка шпунтового ограждения при сооружении тоннеля в середине реки)

мостей, устроенных по длине трассы тоннеля); после этого при помощи загрузки чугунными болванками по брезенту металлическое перекрытие из балок опускалось на подготовленное углубленное ложе реки, непосредственно перекрывая шпунтовое ограждение. Эти работы велись водолазами, которые следили за правильностью укладки пакетов. Узловым моментом явилось достижение водонепроницаемости в местах соприкасания балок перекрытия со шпунтовым рядом. Для этой цели было устроено особое приспособление.

К конструкции перекрытия по линии шпунта был предварительно приклепан жолоб, набитый паклей и обтянутый брезентом. Таким образом, при опускании перекрытия сваи врезывались в образованные мягкие подушки, и получалось плотное водонепроницаемое соединение (рис. 635, 636, 637).

В дальнейшем производилось подводное бетонирование уложенного несущего перекрытия из металлических ферм. Под защитой этого перекрытия и шпунтового ограждения на сбойку с обоих берегов производилась выборка ядра, устройство бетонной обделки с жесткой арматурой. Некоторые затруднения встретились при изоляционных работах перекрытия тоннеля.

* * *

При сооружении тоннеля протяжением 50,5 *м* под каналом Ландвер у Котбюссербрюке строителям было разрешено закрыть движение по каналу на 3,75 месяца; в течение этого времени были проделаны все необходимые работы, требующие прекращения судоходства. Были устроены перемычки и забит ларсеновский шпунт, который обрезался до отметки перекрытия тоннеля.

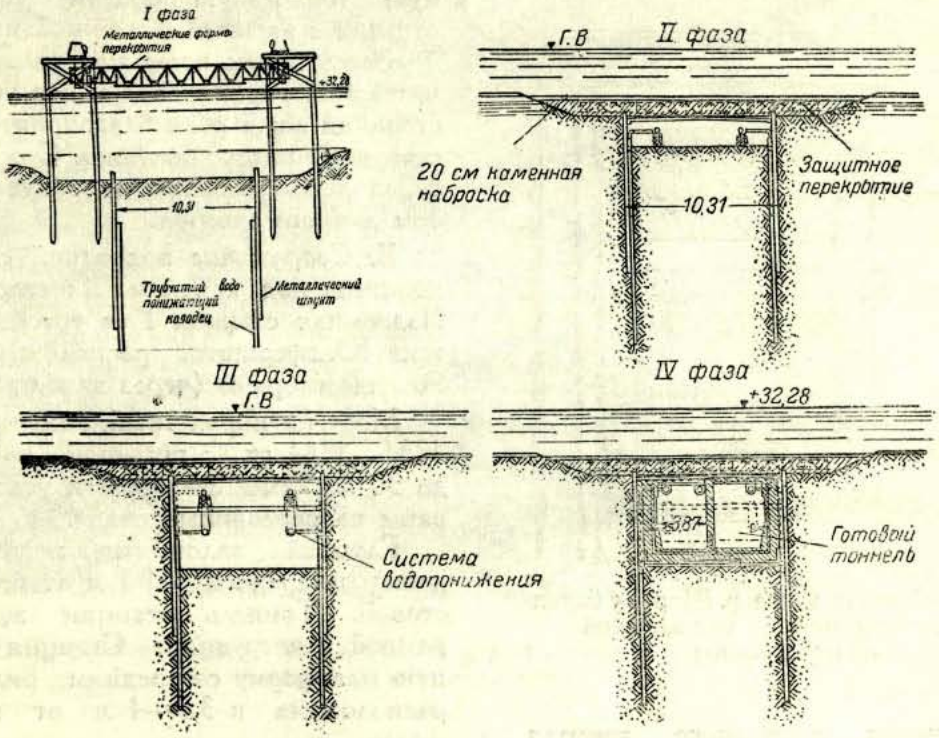


Рис. 635. Подводный тоннель под р. Шпрее у Бауенбрюке (производство работ под защитой несущего перекрытия тоннеля)

Особенностью работ под каналом Ландвер является пропуск воды канала через рабочий котлован системой сифонных трубопроводов. Вода из верхнего бьефа передавалась в нижний пятью трубами диаметром до 0,8 *м* и двумя диаметром до 1,5 *м*, причем в четырехмесячный период производства работ было пропущено до 60 000 000 $м^3$ воды.

В остальном строительные работы велись обычным порядком, причем водопонижающие колодцы включались в работу по мере продвижения забоя земляного ядра.

* * *

Сооружение подводного тоннеля у Халлешес Тор под каналом Ландвер производилось также при металлическом шпунтовом ограждении, при полном закрытии судоходного движения по каналу на время производства строительных работ.

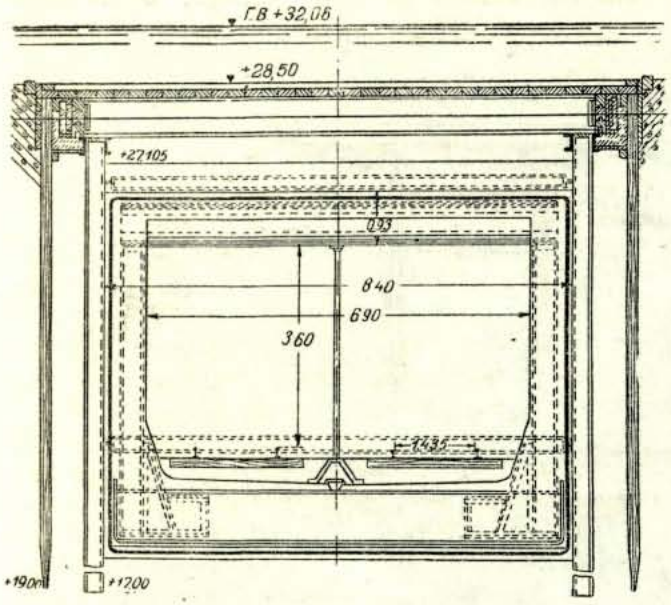


Рис. 636. Подводный тоннель под р. Шпрее у Бауенбрюке (конструкция тоннеля под защитой временного перекрытия)

При сооружении подводного тоннеля у Бэль Аллианс Брюке под Ландвером протяжением 30 *м* в подводной части тоннеля движение судов было стеснено на четыре месяца. Полное сооружение тоннеля продолжалось десять месяцев.

* * *

Сооружение подводного тоннеля у Яновитц Брюке на линии Гезундбруннен — Нейкельн протяжением 88 *м* осуществлено по приему, примененному в Инзельбрюке: при перемычках и шпунтовом ограждении двумя строительными участками.

Тоннель усиленной железобетонной рамной конструкции был изолирован с внешней стороны битумной изоляцией в три слоя.

На случай аварийного проникновения воды в подводный тоннель по обоим береговым участкам были устроены камеры, из которых автоматически опускались металлические аварийные щиты-затворы, ограждающие соседние участки тоннелей от затопления (рис. 638).

Особенность, отличающая устройство подводных тоннелей открытым способом от практикуемого в мировой практике щитового приема подводного тоннелирования, заключается в том, что методом искусственного понижения грунтовых вод и при шпунтовом ограждении удается без применения сжатого воздуха соорудить абсолютно водонепроницаемую тоннельную обделку прямоугольного сечения с внешней оклеечной изоляцией.

Этот прием возможен только при незначительной глубине воды, где условия напластования ложа реки благоприятствуют искусственному водопонижению. Стеснение речного судоходства является отрицательным моментом данного способа.

Б. *Сооружение подводной станции метрополитена под каналом Альстер в Гамбурге.* Подземная станция Гамбургского метрополитена Юнгфернштиг расположена под мостом Розендаммбрюке (через канал озера Альстер).

Мост пятипролетный, каменный, постройки 1834—1844 гг., с шириной проезжей части до 30 *м;* каменные быки и устои моста основаны на деревянных сваях.

Глубина заложения подошвы тоннеля равна в среднем 11,5 *м* от поверхности мостовой. Тоннель станции железобетонной, рамной конструкции. Станция имеет островную платформу со средним рядом колонн и расположена в 3,5—4 *м* от шестиэтажных домов.

Перед строителями город поставил непременным условием обеспечение во время работ непрерывности движения как судов по каналу Альстер, так и трамвая через мост.

Методом работ по сооружению станционного тоннеля Юнгфернштиг был выбран открытый способ шпунтового ограждения, аналогично примененному при постройке подводных тоннелей Берлинского метрополитена под р. Шпрее.

Работы были разделены на два строительных участка, к которым приступили в последовательном порядке. На время производства основных работ в первом участке пролеты моста второго участка были свободны для пропуска судов. Трамвайное и экипажное движение проводилось по оставшейся широкой проезжей части моста; пешеходное движение осуществлялось по обходному временному мостику на деревянных сваях через Малый Альстер.

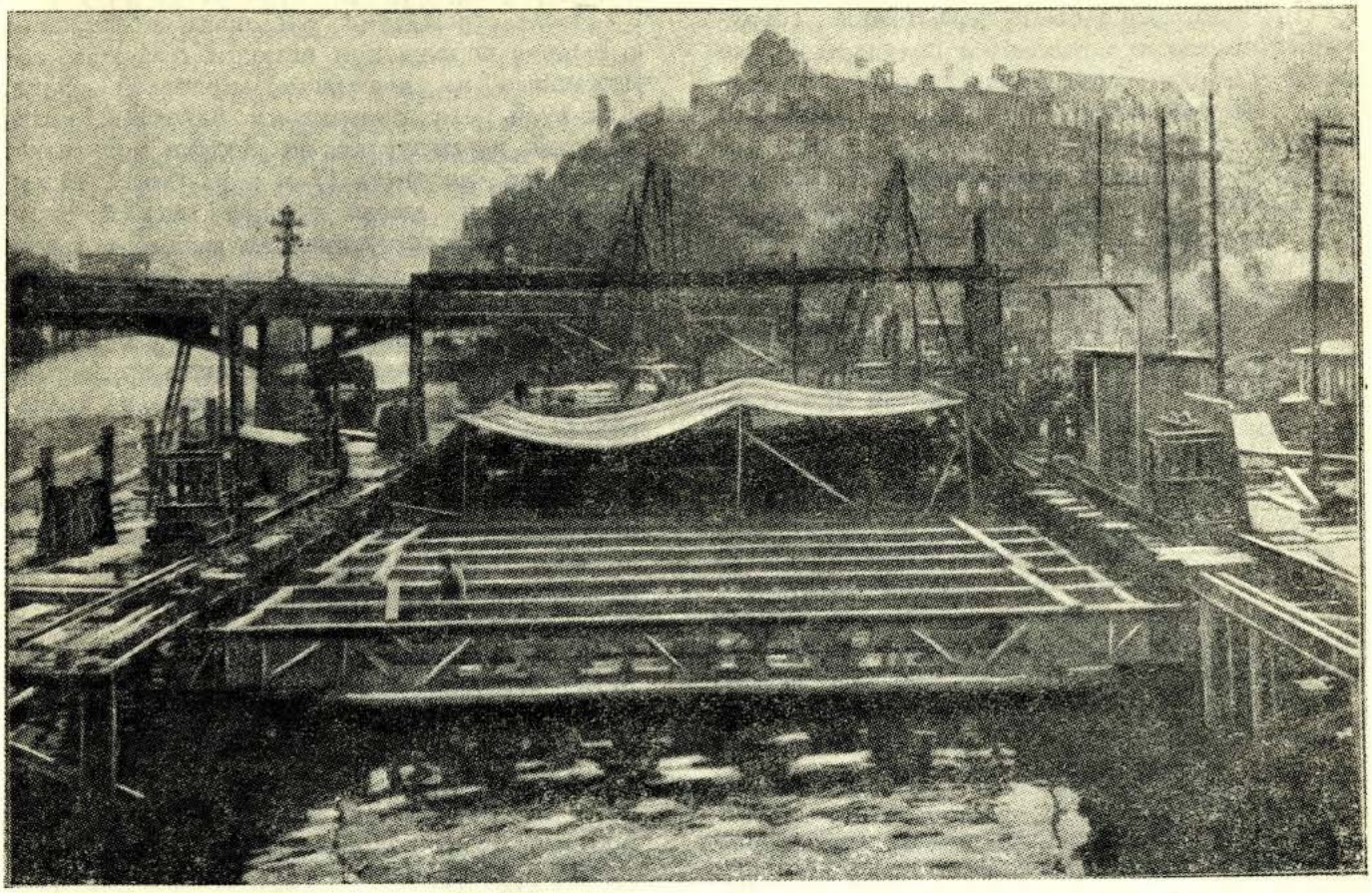


Рис. 637. Подводный тоннель под р. Шпрее у Бауенбрюке (производство работ под защитой временного перекрытия тоннеля)

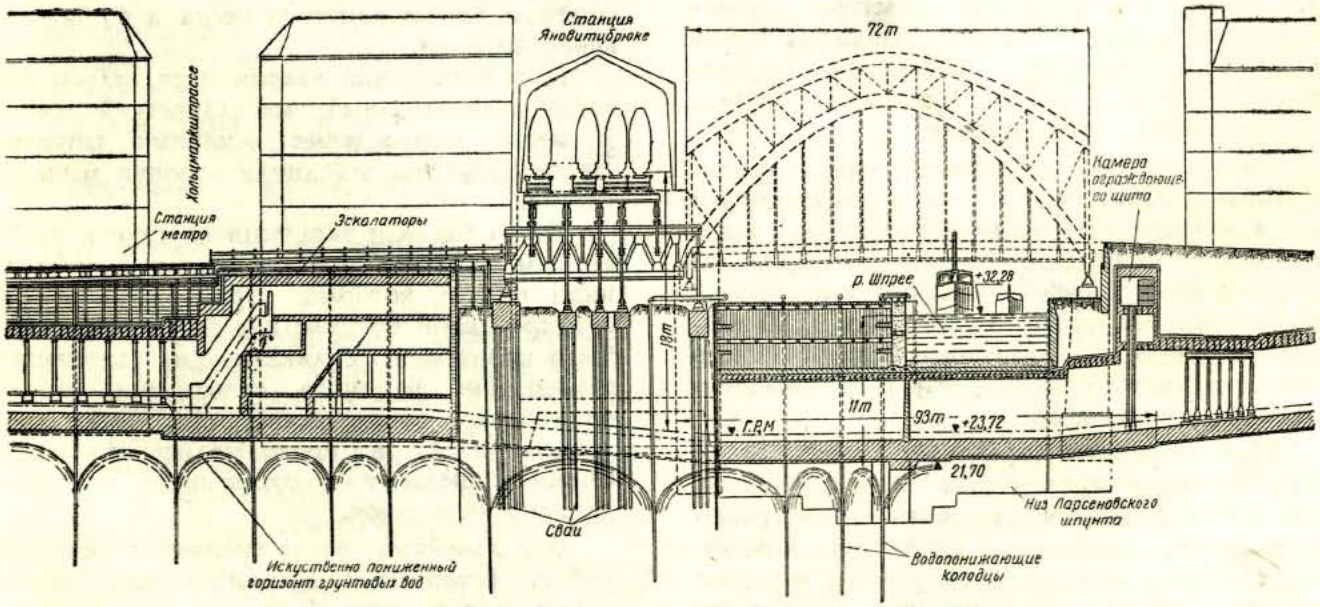


Рис. 638. Подводный тоннель метрополитена под р. Шпрее у Яновитцбрюке с показанием аварийных гидравлических затворов

Предварительно были переложены сооружения подземного хозяйства по узкой полосе моста у грани конструкции тоннельной станции. Потребовалось устройство дюкера и глубоко заложенного коллектора вблизи домов. Во избежание повреждения дома при перекладке коллектора у раскрытого широкого котлована в 17 *м* у дома был забит второй ряд шпунта в соответствии с глубиной заложения коллектора.

В дальнейшем приступили к ломке части моста по контуру расположения тоннеля станции. Ломка сводов производилась при строжайшем соблюдении очередности по пролетам, с учетом уравновешенности распоров существующей конструкции моста. Снимались отдельные полосы, причем всегда оставались свободными 2 пролета для пропуска судов под мостом. Затем была убрана часть опор по ширине вырезаемой полосы моста. Разборка производилась как взрывами, так и пневматическими инструментами, причем камень сбрасывался непосредственно в подведенные баржи. На участке нерабочих двух пролетов располагались подсобные складочные помещения и оборудование.

После перечисленных работ приступили к забивке металлических шпунтовых ограждений первого участка, захватывающего три пролета моста. Забивка шпунта и выемка котлована происходили при следующих условиях геологических напластований.

Непосредственно под насыпью лежат илистые пески, под которыми залегают перемежающиеся между собой выклинивания торфа и глины с включением разнозернистых песков, насыщенных водой. Указанные грунты подстилаются слоем мергеля.

Металлические шпунты системы Ларсена, Круппа и Хоша забивались пневматическим молотом весом 390 *кг*. Там, где шпунт наталкивался на старый деревянный ростверк, применялся копер с бабой весом в 3 *т* и свайный молот системы Демаг весом в 3 *т* (240 ударов в минуту). Последним производилась забивка шпунта вблизи домов при незначительных сотрясениях.

При устройстве перемычки, необходимой для осушения огражденных пролетов моста, забивался двойной ряд десятисантиметровых деревянных шпунтов с глиняным заполнением. Шпунт забивался в мергель и выступал на поверхность самого высокого уровня вод Альстера, причем длина его из этого расчета получилась от 14,5 до 16,5 *м*.

После ограждения котлована приступили к выемке породы при помощи грейфера, помещенного на подвижной крановой балке. Для этой цели применялся балочный кран, который перемещался по бровке котлована. Последний, шириной 17 *м* и глубиной 11,5 *м*, раскреплялся двумя рядами металлических расстрелов с расстоянием по высоте в 4,5 *м*; каждый из двух швеллеров был без промежуточных свай. Вес каждого расстрела около 3 *т*. На постройке имелось около 80 расстрелов. Они устанавливались краном грузоподъемностью в 4 *т*, перемещавшимся по крановой балке.

Особенно большие трудности представляла разработка насыпного грунта с деревянными растверками. Деревянные сваи подрезали, но ни в коем случае не выдергивали, опасаясь возможности устремления через отверстие напорной воды.

Для осушения котлована был применен метод искусственного понижения грунтовых вод. В каждом котловане было заложено до четырнадцати водопонижающих колодцев. Трубы диаметром 150 *мм* входили в мергель на 4 *м*. Гравийный фильтр был диаметром 300 *мм*. Дебит воды от 15 до 25 *л/сек*.

Во время удаления грунта, когда профиль котлована был раскрыт примерно на 7 *м*, прорывом воды его затопило до уровня стояния воды Альстера. При техническом обследовании установили: а) расхождение шпунтов на отметке напластования прослойка торфа и линзы илистого песка и б) образование воронки.

Для ликвидации аварии параллельно был забит оградительный металлический шпунт у места расхождения основных шпунтин. Затем водолазы заполнили воронки мешками бетона.

Часть торфа и нарушенного грунта между старым и новым шпунтом удалили и заменили песком, который утрамбовывался при одновременной поливке водой сверху. Затем была произведена силикатизация (химическое закрепление песчаного заполнения) междушпунтового пространства. Эти работы по ликвидации аварии продолжались две недели. Откачка воды из заполненного котлована длилась двое суток.

В дальнейшем, после окончания земляных работ, бетонные и железобетонные работы велись при помощи бетононасоса производительностью в 20 $м^3$ бетона в час, при трубопроводе диаметром 150 *мм*.

Изоляция тоннеля устраивалась четырехслойной, из гудронированного толя на горячей клебемассе по защитной кирпичной стенке. После устройства перекрытия тоннеля станции продолжались работы по сооружению элементов моста в виде железобетонных опор и пролетного строения. Тоннель подземной станции и тоннель моста представляли общую железобетонную конструкцию.

В дальнейшем, также открытым способом, были устроены тоннельные галлереи и подземные подходы к станции. Поскольку по своему направлению сечения подземных переходов попадали в старые фундаменты домов, предварительно раскрывались траншеи глубиной в 3 *м*. Удалялись мешающие части кладки фундаментов, и из траншей производилась забивка двутавровых свай через 2 *м* на глубину 4 *м* ниже подошвы траншей.

Затем работы продолжались обычным открытым способом.

СООРУЖЕНИЕ ПОДВОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ ОПУСКАНИЕМ КЕССОНОВ-ТОННЕЛЕИ

А. *Подводный тоннель для пешеходного движения под р. Шпрее в Фридрихсгафене (Берлин).* В отличие от принятого в германской технике метода сооружения подводных тоннелей под р. Шпрее для Берлинского метрополитена (открытый котлован при шпунтовом ограждении и искусственное водопонижение), строительство подводного тоннеля для пешеходного движения под р. Шпрее в Фридрихсгафене велось специальным методом опускных кессонов.

Общая длина подводного тоннеля 120 *м*, из которой 19,8 и 20,1 *м* падают на портальные части тоннеля, содержащие лестницы.

Поперечное сечение тоннеля прямоугольное, размерами в свету 5 *м* по ширине и 2,5 *м* по высоте.

Учитывая возможные отклонения кессонов в плане и профиле, в соответствии с практикой опускания кессонов-тоннелей, был предусмотрен запас в габаритах на смещение тоннеля в плане на 20 *см* и в профиле на 10 *см*.

При этих условиях сечение тоннеля в свету было выполнено $5{,}2 \times 2{,}6$ *м* (рис. 639, 640).

Требование непрерывности судоходства по реке на время производства работ отразилось на последовательности этапов их. Тоннель в реке был разделен на три строительных участка: два береговых кессона-тоннеля и один островной участок стыкования этих тоннелей. Длина каждого кессона-тоннеля была

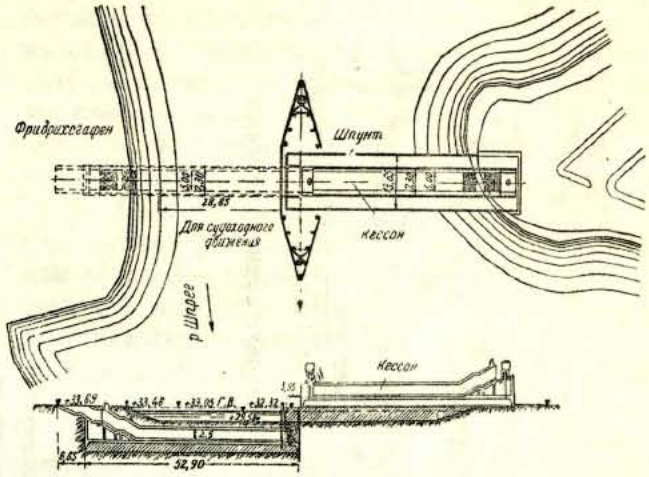


Рис. 639. Подводный тоннель для пешеходного движения под р. Шпрее в Берлине (Фридрихсгафене) (опускание и стыкование кессонов-тоннелей)

52,8 *м* при ширине 7,65 *м*. Необходимо отметить, что подобное соотношение (1 : 6,9) является чрезмерным и обычно связано с неравномерными осадками и деформациями конструкций. Однако опускание этого тоннеля-кессона площадью в 405 $м^2$, производившееся с исключительной тщательностью, выявило прогиб железобетонной конструкции кессона около 1 *см*, что не имело значения. При этом конструкция кессона была усилена постановкой системы поперечных жестких диафрагм из двутавровых металлических балок.

Конструкции береговых частей тоннеля, включающие лестницы по 6,95 *м*, были устроены открытым способом, применением системы искусственного водопонижения.

В отличие от применяемой в практике тоннелей-кессонов цельной конструкции, здесь опускались кессоны раздельной конструкции в виде совершенно самостоятельных элементов. Над железобетонной конструкцией рабочей камеры кессона была возведена самостоятельная раздельная конструкция тоннеля с внешней, мягкой, оклеечной изоляцией из четырех слоев гудронированной ткани на горячей клебемассе.

Эта раздельная конструкция, освобождающая тоннель от сжатого воздуха, была принята потому, что сжатый воздух отрицательно

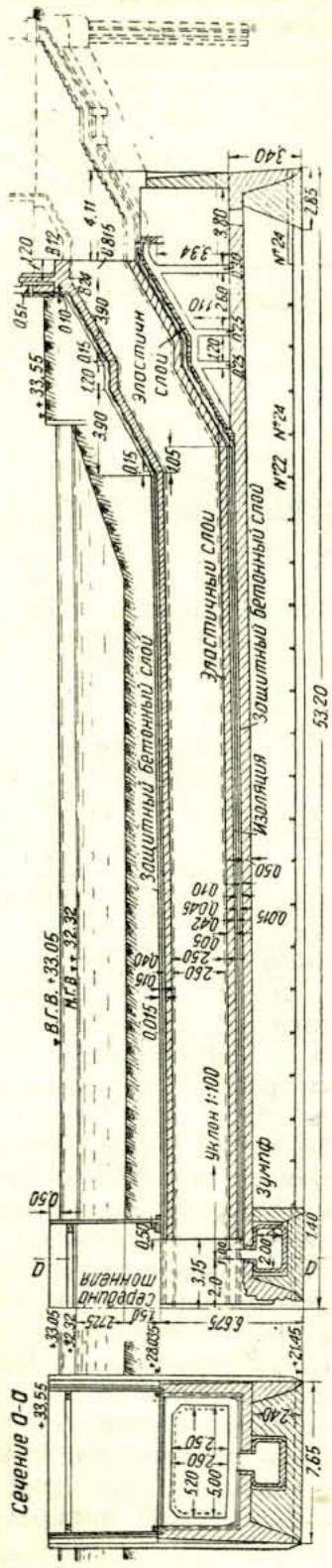


Рис. 640. Подводный тоннель для пешеходного движения под р. Шпрее в Фридрихсгафене (опускание кессонов-тоннелей)

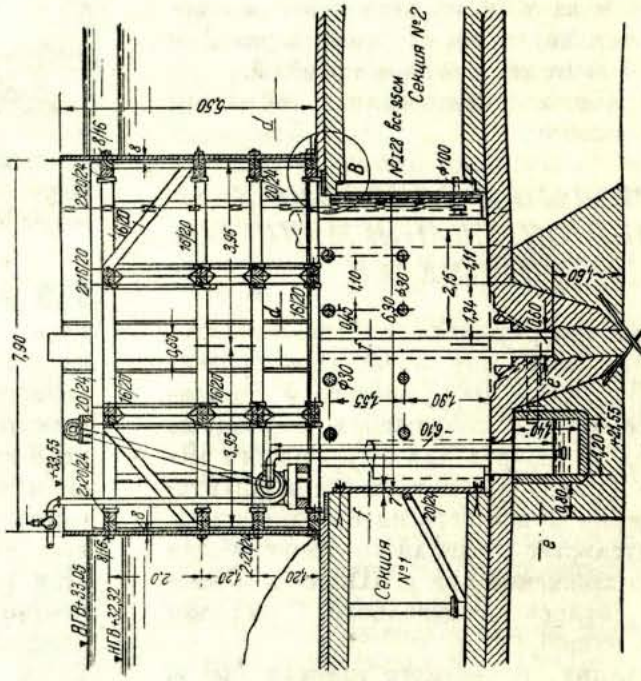


Рис. 641. Подводный тоннель для пешеходного движения под р. Шпрее в Фридрихсгафене (стыкование кессонов-тоннелей)

влияет на качество изоляции, образуя в ней сеть игольчатых пор.

Вопрос опускания раздельных секций тоннелей-кессонов осложнялся тем, что профиль тоннеля имел уклон в 0,01; вследствие этого замкнутая рама тоннеля проявляла тенденцию к сползанию по уложенному слою битуминозных эластичных плит толщиной 3 *см* над потолком кессона.

Торцовые стенки кессонов опускались по проекту на расстояние 60 *см* при интервалах между торцовыми стенками лежащих над ними тоннелей в 6,3 *м*.

Ширина железобетонного кессона между краями ножа 7,65 *м*, высота 4 *м*, толщина железобетонной плиты потолка рабочей камеры 50 *см* при высоте самой камеры 2,7 *м*. Толщина элементов железобетонной рамной конструкции тоннеля 45 *см*, а толщина армированного защитного бетонного слоя по внешней оклеечной изоляции тоннеля 15 *см*.

До приступа к основным работам было проведено землечерпание по трассе тоннеля на глубину 2,5 *м* от дна реки.

Производство работ по сооружению подводного тоннеля началось с устройства посередине реки струенаправляющего шпунтового ограждения с рядом маячных свай.

Движение судов перевели на одну половину реки. По трассе тоннеля устроили шпунтовое ограждение, при расстоянии между стенками в 13,65 *м*, и приступили к опусканию кессона-тоннеля при помощи сжатого воздуха при двух шлюзовых аппаратах, расположенных ближе к концу каждого кессона. Пересекая неоднородно залегавшие слои глины с включением гравия, нож кессона опустился до проектной отметки на глубину 8,17 *м* от дна реки, при кровле грунта 1,5 *м* и высоте стояния воды 2,73 *м*. Процесс опускания первого кессона-тоннеля длился 35 дней. Сам тоннель не претерпел никаких деформаций.

Следующим этапом явилось ограждение второго строительного участка после пропуска воды и судоходного движения через опущенный тоннель. Работы велись аналогично опусканию первого тоннеля-кессона. Продолжительность сооружения и опускания тоннеля-кессона 90 дней.

Подача бетона производилась с пловучего бетонного завода.

Одним из ответственных моментов оказалось стыкование тоннелей-кессонов (рис. 641). При расстоянии между торцовыми стенками тоннелей 6,3 *м* и кессонов 60 *см* было устроено шпунтовое ограждение по длине тоннеля в 7,9 *м*. Заделка отверстий изоляцией и бетоном с добавлением трикозоля была произведена с применением водолазных работ. Два раза имели место прорывы воды, но все же строительные затруднения были преодолены, и подводный тоннель закончен в течение 11 месяцев.

Б. *Подводные тоннели метрополитена при пересечении р. Сены в Париже.* При подводном тоннелировании в Париже, кроме метода щитовой проходки, применялся также прием вертикального опускания кессонов-тоннелей.

С помощью кессонов-тоннелей были сооружены подводные тоннели при пересечении р. Сены у моста Мирабо, где построены станции метрополитена Сен-Мишель и Старый Город.

Сущность этой системы применительно к подводному тоннелированию заключается в следующем.

Заранее монтировались в стороне, на стапелях, металлические конструкции тоннелей-кессонов, состоявшие из ряда ферм, обтянутых внешней металлической оболочкой.

Для обеспечения полной водонепроницаемости устраивалась также внутренняя облицовка из чугунных, сболченных между собой сегментов.

Устроенные абсолютно водонепроницаемыми секции тоннелей-кессонов были доставлены на плаву к намеченной трассе. Заранее в месте опускания кессона было подготовлено ложе с целью облегчения посадки его. Предварительно кессон поддерживался с эстакад. Затем производилось бетонирование металлического каркаса обделки тоннеля-кессона и опускание его на дно реки (рис. 642, 643). В дальнейшем рабочую камеру освободили от воды, а внутреннее пространство тоннеля-кессона, наоборот, заполнили водой для его погружения.

Работа производилась под сжатым воздухом.

Опускание парижских кессонов-тоннелей велось при следующем расчете: вес металлической конструкции 300 *т*, вес воды балласта 2 000 *т*, вес бетона 2 000 *т*, общий вес 4 300 *т*.

После посадки тоннеля на проектную отметку бетонировали рабочую камеру, тоннель освобождали от воды и заделывали отверстия в месте примыкания шахтных

труб. Далее потолок тоннеля тщательно засыпали грунтом до уровня дна реки.

Наиболее ответственным моментом при сооружении тоннелей-кессонов является стыкование отдельных секций между собой (рис. 644). При расстоянии между отдельными секциями от 0,26 до 1,5 *м* в парижской практике привился метод стыкования при помощи трех съемных кессонов. По бокам стыка, между двумя соседними кессонными тоннелями, опускались два малых съемных кессона размерами в плане 1,75 × 4 *м* с песчаным балластом ниже потолка камеры основных кессонов на 1,5 *м*.

В дальнейшем производилась бетонировка слоями в 0,25 *см*, причем кессон поднимался вверх с помощью гидравлических домкратов, каждый мощностью в 125 *т*. После устройства двух оградительных стенок опускался третий, средний кессон, который должен был перекрыть сток сверху по кровле тоннелей.

При размерах в плане 3 × 11 *м* работы по выемке породы стыка велись при ограждении двумя стенками основных тоннелей-кессонов и боковых стенок малых съемных кессонов.

Для обеспечения водонепроницаемости на время производства этих работ и устройства изоляции приходилось прибегать к помощи водолазов.

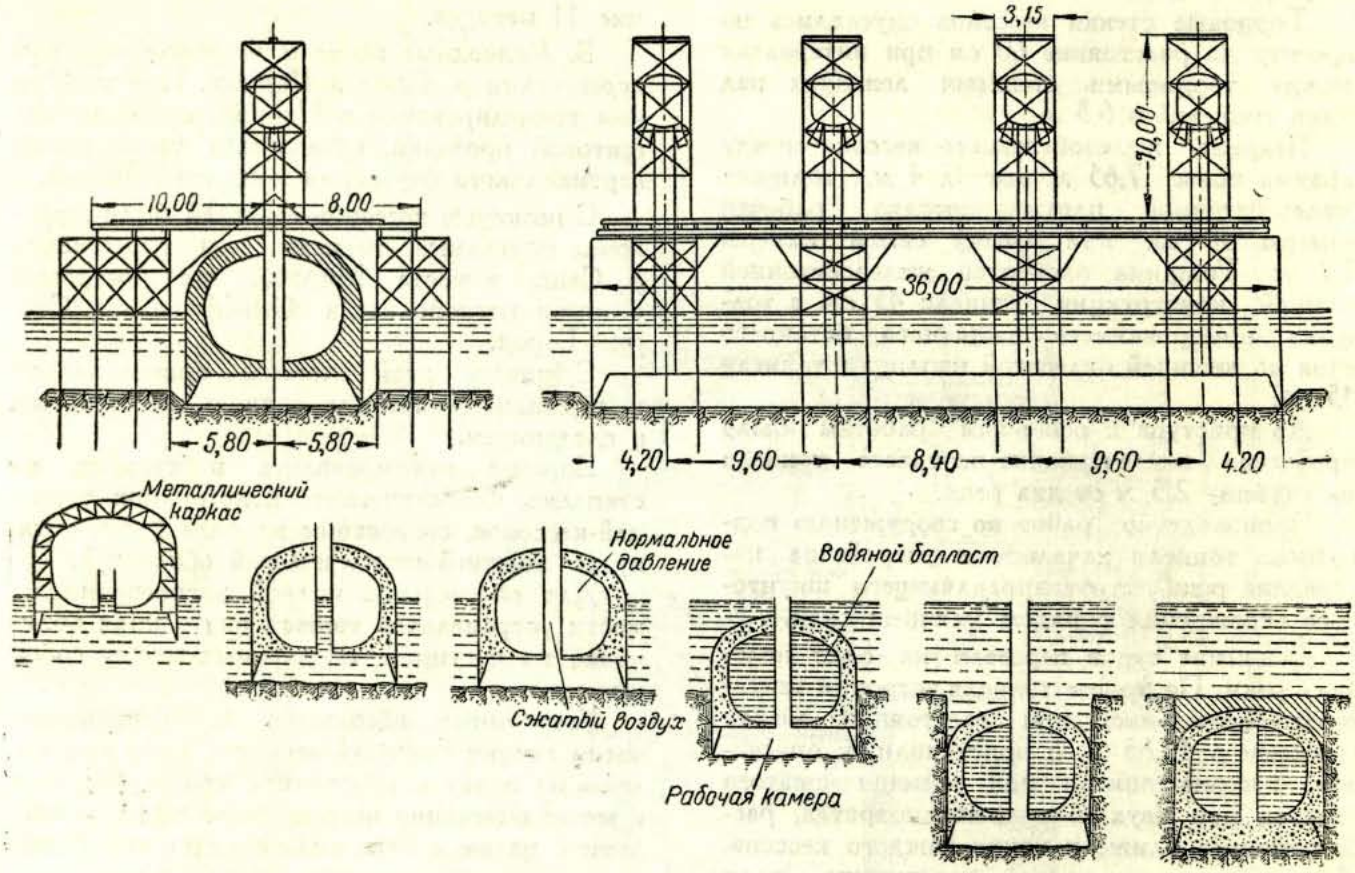


Рис. 642. Последовательные фазы производства работ по опусканию кессонов-тоннелей посредине р. Сены

Вслед за выборкой породы устраивался стык свода. После пробивки торцовых стенок тоннелей-кессонов получался сквозной подводный тоннель.

Обращает внимание подводный кессон-тоннель у моста Мирабо под р. Сеной.

При сооружении тоннельного участка метрополитена в месте подхода подводного участка р. Сены к станции Сен-Мишель строители столкнулись с чрезвычайно слабыми водоносными грунтами, которые потребовали применения специальных приемов тоннелирования. Необходимо было соединить опущенный под р. Сеной кессон-тоннель № 5

со станцией Сен-Мишель тоннелем метрополитена на протяжении 60 *м*. Условия осложнялись тем, что тоннель проходил под путями

Непосредственно под р. Сеной вести дальнейшие тоннельные работы обычным путем уже не представлялось возможным. Здесь

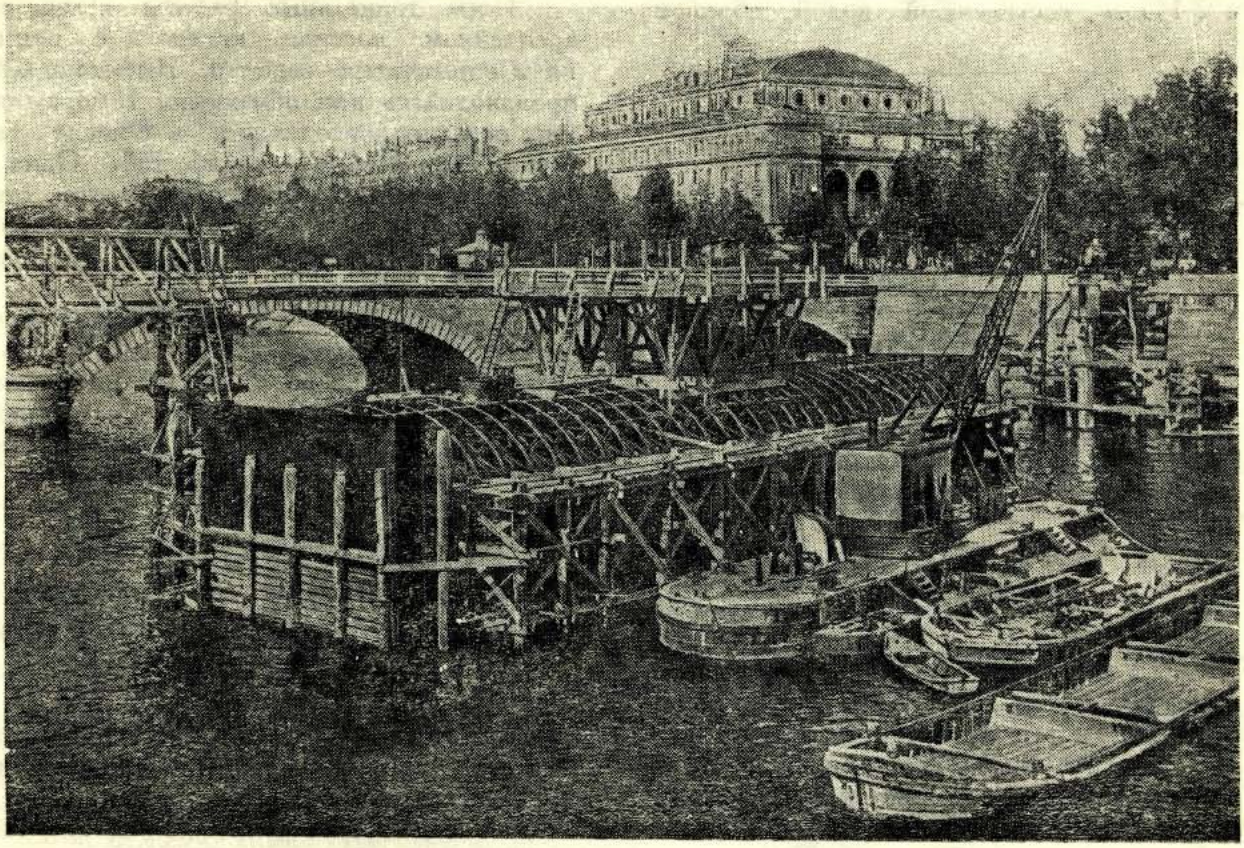


Рис. 643. Общий вид работ при опускании кессона-тоннеля на р. Сене

Орлеанской железной дороги. Чтобы обеспечить непрерывность движения поездов и предохранить железнодорожное полотно от осадок, решено было предварительно сделать соответствующие укрепления. Устои и пути были взяты на систему арок и металлических балок, которые опирали на кессоны, спущенные под сжатым воздухом на 1 *м* ниже подошвы прокладываемого тоннеля метрополитена (примерно на глубину 12 *м* от головки рельсов железнодорожных путей).

После завершения этих укрепительных мероприятий была предпринята проходка на деревянном креплении с верхним штольневым ходом. Последовательное раскрытие профиля велось на полное сечение.

Эти работы проводились под уклон в 40‰, при мокром забое. Особенно осложняла работы борьба с водой, дебит которой иногда доходил до 220 $м^3$/*час*.

грунты состояли из аллювиальных отложений ила, гальки и песка, которые подстилались мергелями.

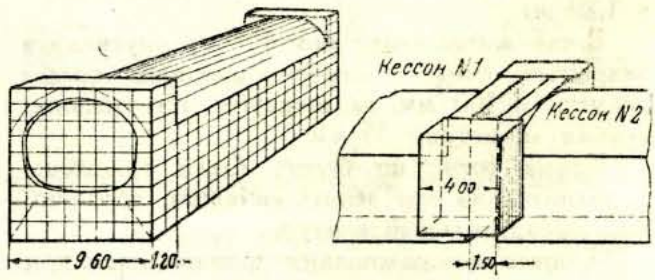


Рис. 644. Парижский метрополитен (схема стыкования кессонов-тоннелей на р. Сене)

Этот участок тоннеля в виде треугольника в плане с размерами сторон порядка 14,5—16 *м* решено было пройти при замораживании земляного массива. Из общей длины

участка 14,5 *м* часть его протяжением 8,7 *м* проходит непосредственно под руслом р. Сены.

Необходимо было заморозить объем грунта в 2 145 $м^3$, насыщенный водой объемом

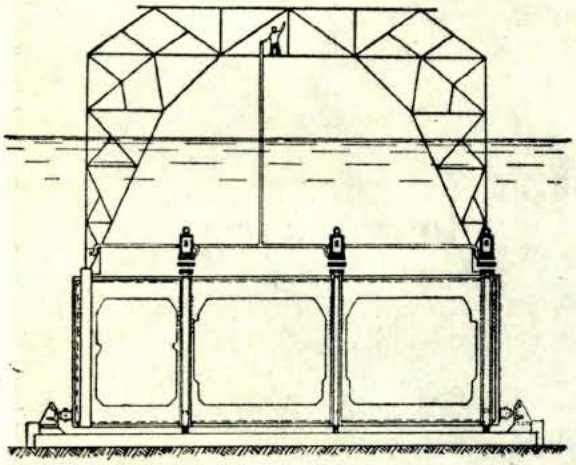


Рис. 645. Схема опускания заводных секций подводного тоннеля

в 750 $м^3$. Учитывая, что при проточной воде не представляется возможным эффективно провести замораживание, предварительно забили оградительный деревянный шпунт и устроили перемычки с глиняным заполнением. Кроме того, на подводном участке, подлежавшем замораживанию, была произведена засыпка на 1 *м* и выше уровня в р. Сене. В дальнейшем было пробурено сорок восемь скважин по контуру двух концентрических треугольников. Глубина заложения скважин была около 17 *м*, на 1 *м* ниже отметки подошвы тоннеля, при расстоянии между ними в 1,20 *м*.

В скважины диаметром 250 *мм* опускались закрытые снизу замораживающие трубы диаметром 100 *мм*, включавшие питательные трубки диаметром 35 *мм*.

Кроме того, по берегу были заложены дополнительно еще девять скважин, образующих оградительный контур.

Процесс замораживания производился при двух станциях. Одна — холодопроизводительностью в 130 000 фригорий/час — обслуживала тридцать две скважины и была оборудована двумя аммиачными компрессорами при двигателе в 100 *л. с.* Другая — в 65 000 фригорий/час — обслуживала двадцать пять скважин и была оборудована одним аммиачным компрессором при моторе в 120 *л. с.*

В трубах циркулировал охлажденный до —23° С раствор хлористого кальция; продолжительность процесса замораживания — месяц.

Затем тоннельные работы велись в закрепленном массиве, иногда с применением взрывчатых веществ. Выемка профиля производилась при обнажении замораживающих скважин, входивших в сечение выработки, без особых осложнений. Один раз вода прорывалась через массивную стенку набережной и залила тоннельные разработки, чем в значительной степени расстроила крепления.

Для ликвидации аварии был забит дополнительный оградительный шпунт с крыльями общей длиной в 80 *м*. Затем интенсивным водоотливом выработки были освобождены от воды. При дальнейшей работе замораживающей установки, обеспечивавшей крепость пересекаемого земляного массива, тоннельные работы были завершены.

СООРУЖЕНИЕ ПОДВОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ ОПУСКАНИЕМ ЗАВОДНЫХ СЕКЦИЙ

А. *Общие данные.* Сущность метода заводных секций при сооружении подводного тоннеля заключается в следующем.

На берегу, на стапелях, в стороне от трассы тоннеля создаются отдельные секции тоннеля железобетонной или металлической конструкции. В соответствии с габаритами и эксплоатационным назначением тоннеля секции устраиваются на 2, 3 и даже на 5 путей. Каждая секция имеет с одного конца раструб, а с другого — зауженный конец для удобства взаимного телескопического стыкования заводных секций между собой. В торцах каждой из секций устроены стенки временного характера для придания секциям водонепроницаемости и плавучести. Параллельно с указанными работами по трассе подводного тоннеля, в направлении, перпендикулярном к оси водного потока, землечерпанием устраивается траншея глубиной несколько больше высоты тоннеля. Глубина траншеи и заложение откосов ее устанавливаются в каждом отдельном случае в зависимости от физико-механических свойств грунтов подрусловой части и скорости движения воды в реке.

Основание траншеи, в соответствии с характером грунта, устраивается обычно бетонным. При наличии слабых грунтов делается

искусственное основание в виде железобетонного ростверка на сваях.

После подготовки основания следует буксировка спущенных на воду заводных секций к трассе сооружаемого тоннеля.

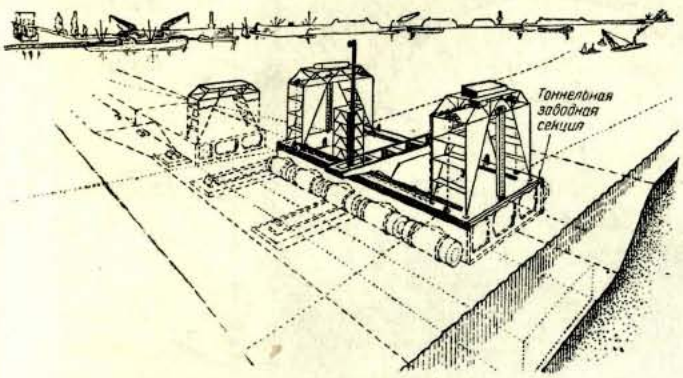


Рис. 646. Схема опускания и стыкования заводных секций подводного тоннеля

Опускание секции на подготовленное бетонное основание совершается точно по створам путем выпуска воздуха из баллонов секций, обладающих необходимой пловучестью (рис. 645, 646).

Стыкование секций между собой производится водолазами или с помощью кессонных работ (рис. 647). Стыкование секций Роттердамского подводного тоннеля было осуществлено при помощи химического укрепления грунта. Сквозное соединение отдельных звеньев заводных секций между собой, образующих подводный тоннель, производится пробивкой торцовых стенок.

Методом заводных секций сооружен ряд подводных тоннелей в Америке: тоннель Детройт—Виндзор под р. Детройт, тоннель под р. Гарлем, тоннель под р. Детройт, соединяющий озера Гурон и Эри, тоннель Оклэнд — Аламеда в Калифорнии и другие.

Б. *Подводный тоннель под р. Детройт, соединяющий озера Эри и Гурон (Северная Америка).* При глубине воды в реке 10,5 *м*, местами доходящей до 15 *м*, при наличии плотно слежавшегося песка оказалось возможным опустить заводные секции железобетонной конструкции в виде спаренного тоннеля-бинокля при внутреннем диаметре каждого из тюбов 6,1 *м* (рис. 648). Расстояние между осями тюбов 8 *м*. Подводная часть тоннеля состояла из 10 секций длиной до 78,75 *м* и одной секции длиной 13,35 *м*. Все эти секции были сооружены на берегу (рис. 649) и по воде доставлены непосредственно к месту опускания тоннеля (рис. 650). По трассе подводного тоннеля при помощи землечерпания была устроена траншея с откосами 1 : 2. Для основания была устроена подготовка в виде ростверка железобетонной конструкции. Объем каждой заводной секции составлял 315 $м^3$, а вес доходил до 550 *т*.

Опускание конструкции производилось путем выпуска воздуха из заводной секции и из восьми воздушных баллонов, сообщавших заводной секции необходимую пловучесть.

Стыкование секций между собой было сделано водолазами. При этом бетонирование стыков производилось подводным способом при давлении до 10 *ат*. Протяжение подводного тоннеля под р. Детройт 806 *м*.

В. *Подводный тоннель Детройт — Виндзор под р. Детройт.* Этот тоннель (рис. 651), построенный для автомобильного движения, связывает Соединенные Штаты Америки с Канадой.

Тоннель имеет ширину проезжей части 6,7 *м*. Общее протяжение его с подходами 1 782 *м*. Длина тоннеля без подходов 1 585 *м*. Максимальная пропускная способность тоннеля 2 400 автомобилей в час.

Высота тоннеля в свету по поперечному сечению 4,1 *м*.

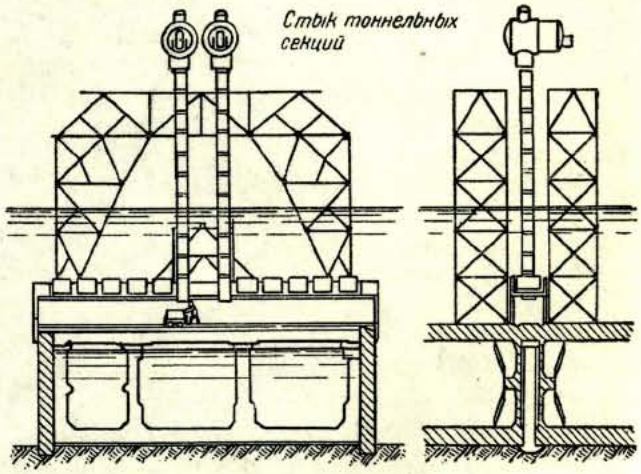


Рис. 647. Схема стыкования заводных секций подводного тоннеля

Тоннель Детройт — Виндзор по типам конструкций и методам производства работ можно разделить на три характерных участка.

Первый участок, представляющий среднюю подводную часть тоннеля, протяжением

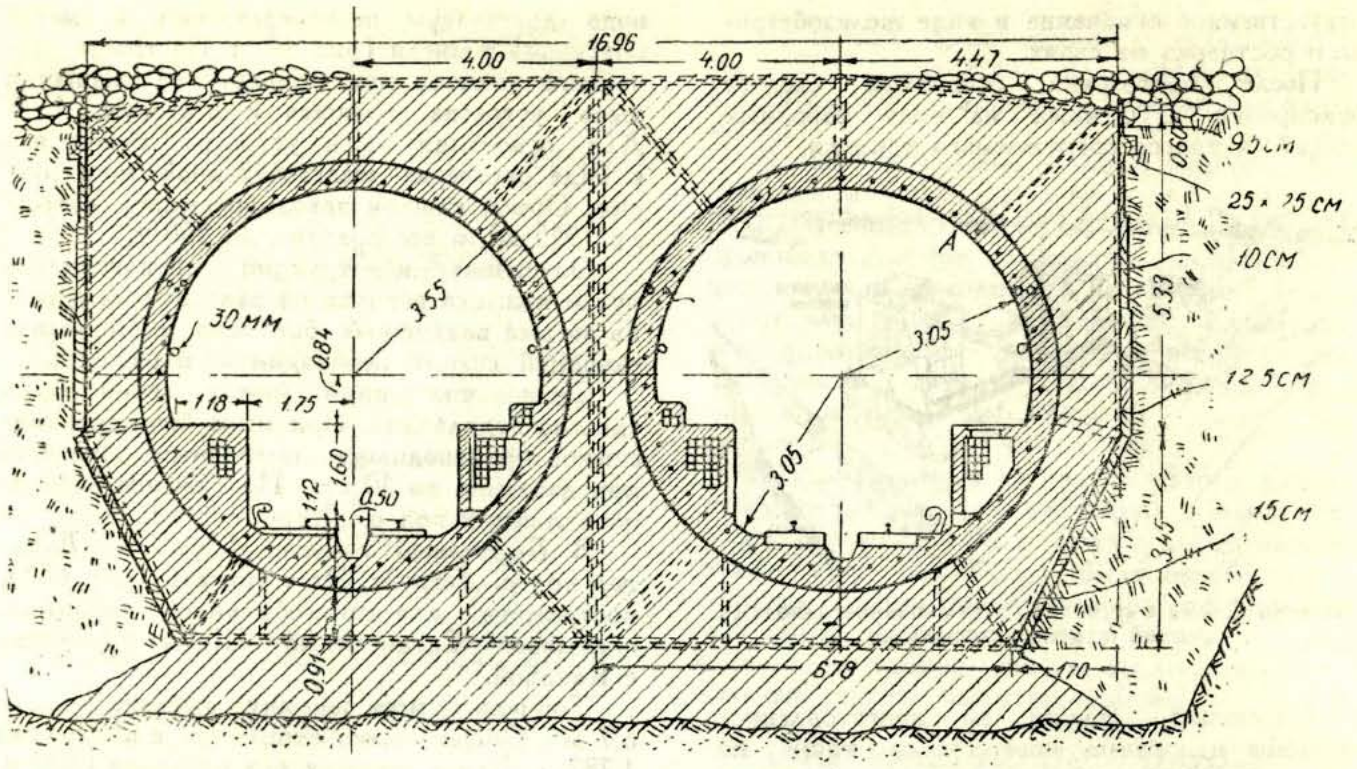


Рис. 648. Поперечное сечение конструкции заводной секции подводного тоннеля под р. Детройт

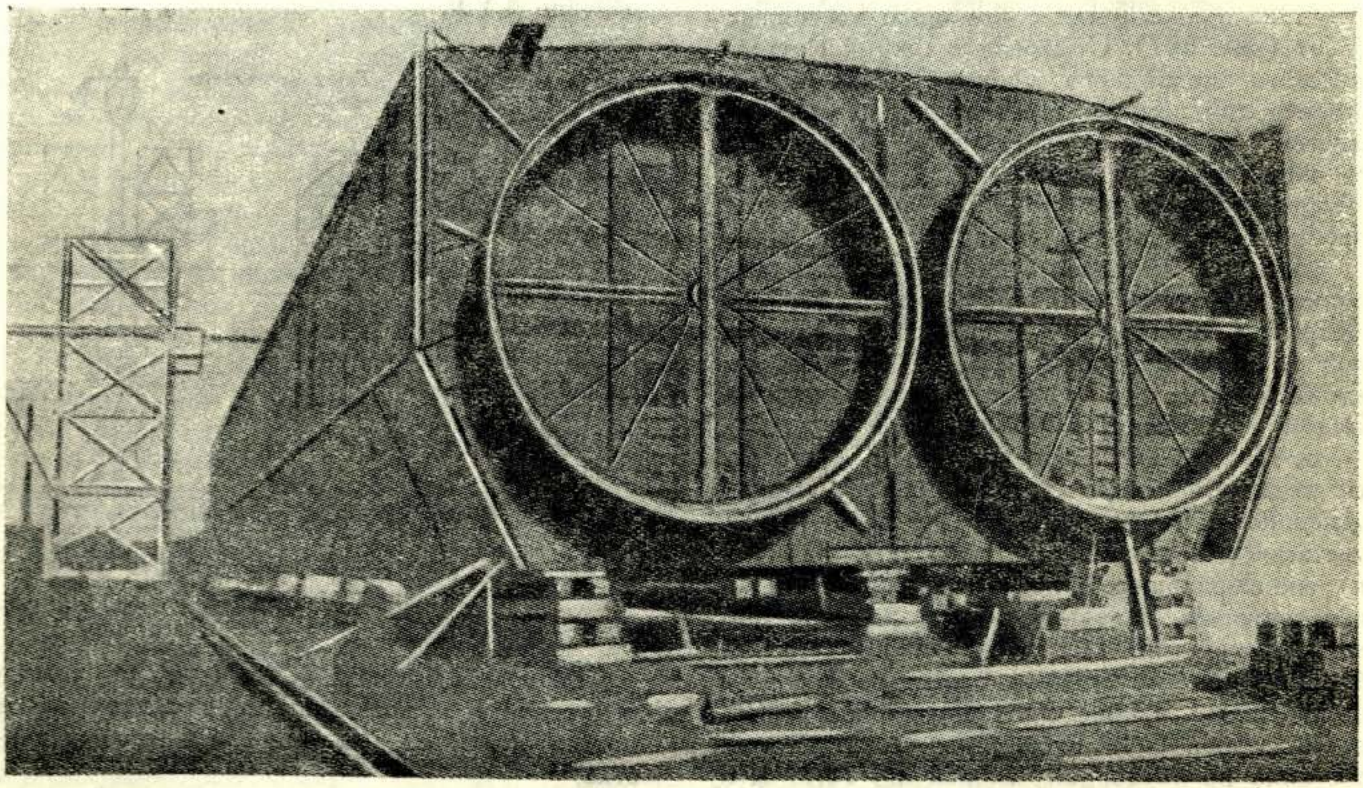


Рис. 649. Подводный тоннель под р. Детройт (общий вид изготовленной на берегу заводной секции)

665 *м*, сооружен методом заводных секций. Другие участки, примыкающие к подводной части тоннеля, пройдены щитами на протяжении 570 *м*. Подходные тоннели были сооружены открытым способом. Открытый способ производства работ был применен при металлическом шпунтовом ограждении. Конструкция тоннельных подходов имела плоское перекрытие и представляла собой железобетонную прямоугольную раму. Изоляция тоннельных подходов внешняя, оклеечная. Для подачи свежего и вытяжки испорченного воздуха в верхней части профиля тоннеля были устроены два вентиляционных канала.

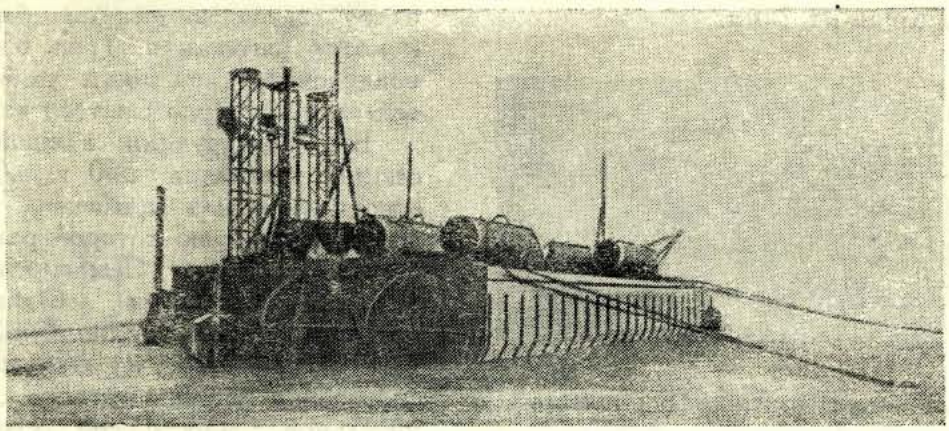


Рис. 650. Подводный тоннель под р. Детройт (доставка заводной секции на плаву к месту опускания)

Отличительной особенностью конструкции тоннельной обделки подводной части тоннеля, пройденной щитовым способом, являлась обделка из стальных тюбингов. Применением стали удалось достигнуть значительной экономии. Процесс монтажа легких тюбингов был значительно облегчен, что отразилось на увеличении темпов сооружения самого тоннеля. Для обеспечения жесткости тоннельной обделки внутри стальной облицовки была устроена железобетонная оболочка толщиной в 47 *см*. При внешнем диаметре обделки в 9,47 *м* внутренний диаметр составлял, таким образом, 8,53 *м*. Вес щита, примененного для проходки этого тоннеля, составлял 275 *т*. Он был оснащен тридцатью гидравлическими домкратами, развивавшими общую мощность для продвижения щита вперед в 4 500 *т*. Эректор был помещен непосредственно на корпусе щита и имел гидропривод.

Проходка тоннеля в условиях слабых, неустойчивых водоносных пород велась при помощи щита под сжатым воздухом (воздушное давление до 1,8 *ат*).

При пересечении щитом плотной глины разработку производили посредством специальных скребков, причем порода передавалась скребковым транспортером на вагонетки подземной откатки.

Конструкция стальной обделки тоннеля составлялась из одиннадцати нормальных и одного ключевого сегментов. Ширина тюбинга принята в 75 *см*. Нормальный тюбинг весил

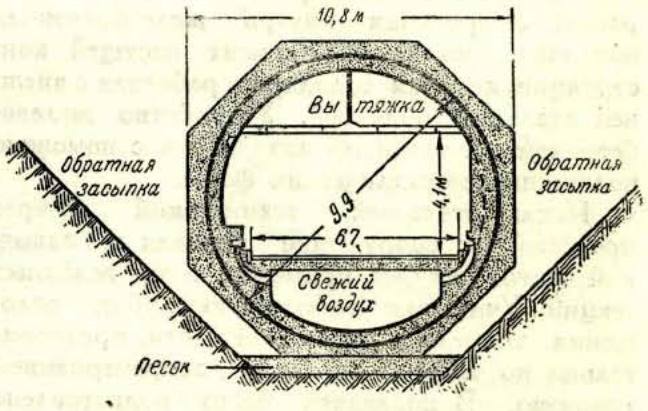


Рис. 651. Подводный тоннель под р. Детройт (заводная секция, опущенная в траншею на проектную отметку)

400 *кг*. Элементы этих легких стальных тюбингов получались штамповкой их прессом мощностью в 1 500 *т*. При этом выдерживался определенный радиус кривизны штамповки деталей, в соответствии с радиусом тоннеля. Штампованные стальные элементы сваривались, образуя форму тюбинга. При

этом на каждый тюбинг требовалось до 10 *пог. м* сварки.

При изготовлении и сварке стальных тюбингов была достигнута исключительная точность. Диаметр кольца, собранного из стальных тюбингов, отличался от теоретического диаметра лишь на 2 *мм*.

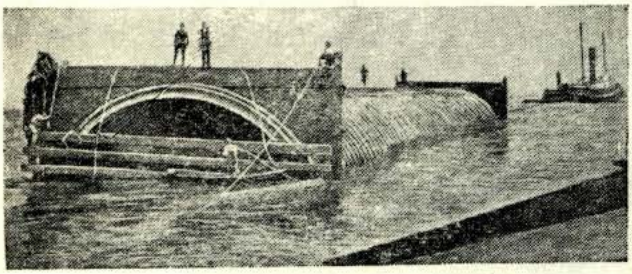


Рис. 652. Буксировка заводной секции тоннеля

Расчет тоннельной обделки велся на пятнадцатиметровую толщу породы и на полное гидростатическое давление. Вес 1 *пог. м* стальных тюбингов составлял до 7 *т*. Вес чугунной обделки для данного тоннеля превышал вес стальной обделки примерно в три раза.

В условиях детройтской глины обделка из стальных тюбингов являлась как бы временной крепью в период производства щитовых работ. Устроенная внутри железобетонная оболочка составляла элемент несущей конструкции, которая солидарно работала с внешней стальной обделкой. Устройство железобетонной оболочки производилось с помощью подвижных металлических форм.

Исключительный технический интерес представляет сооружение тоннеля в подводной части, где был применен метод заводных секций. Учитывая небольшую глубину заложения тоннеля в подводной части, предварительно по трассе устроили землечерпанием траншею. В последней было подготовлено бетонное основание для опускания девяти тоннельных секций, изготовленных на берегу и опущенных на проектную отметку. Тоннель подводной части состоял из восьми секций длиной по 75 *м* и одной—в 65 *м*. Каждая из заводных секций представляла собой металлический тюб диаметром 9,3 *м* из стали толщиной 9,5 *мм*, сваренный из отдельных листов. Для увеличения жесткости тюба через каждые 3,6 *м* поставлены уголки жесткости. Последние служили для прикрепления формы, необходимых для устройства внешних железобетонных конструкций.

Все заводные секции были изготовлены на берегу, на расстоянии 10 *км* от трассы тоннеля, и опущены по стапелю, имевшему уклон 1 : 10, непосредственно на воду. На плаву заводные секции были доставлены к месту опускания (рис. 652). Испытание воздухонепроницаемости тюбов было произведено с помощью сжатого воздуха.

Вес конструкции каждой из заводных секций составлял 500 *т*. Для подготовки основания была применена скреперная машина, с помощью которой разравнивалось основание траншеи. Сам скрепер приводился в действие четырьмя лебедками, поставленными на понтоны, длиной в 20 *м*, которые были укреплены на якорях. Применением скреперной машины удалось достигнуть значительной точности при устройстве основания под заводные секции подводного тоннеля.

Следующим этапом работ было подведение секций непосредственно по линии подготовленных поперечных траншей. Заводные секции были установлены точно по маячным сваям. Затем (при глубине воды в реке в период опускания 7 *м*), используя водяной балласт в качестве груза, произвели опускание секций в траншею. Заводные секции были опущены, исходя из расчета устройства кровли над шелыгой конструкции под дном реки, толщиной 1,3 *м*.

Особо важным моментом явилось стыкование секций между собой, что было осуществлено водолазами.

Г. *Гарлемский подводный тоннель*. Этот тоннель был сооружен комбинированным способом следующим порядком. Предварительно по трассе подводного тоннеля была землечерпанием устроена поперечная траншея глубиной в 5 *м*. Параллельно производилась забивка свай и устройство подмостей, поднятых выше горизонта воды в реке. Эти подмости предназначались для производства работ, подачи материалов, укладки путей, по которым передвигались копры для забивки шпунтов, ограждающих котлован, и т. д. После устройства шпунтового ограждения непосредственно на шпунты было уложено перекрытие деревянной конструкции толщиной в 1 *м*. Эта конструкция была полностью засыпана грунтом, чтобы обеспечить водо- и воздухонепроницаемость (рис. 653). Затем, под защитой искусственно созданной кровли,

под сжатым воздухом началась проходка и сооружение спаренного тоннеля-бинокля железобетонной конструкции. Внутри бетонной конструкции тоннеля-бинокля были уложены чугунные тюбы диаметром 4,8 *м*. деревянной конструкции — потолка вниз — была опущена железобетонная конструкция верхней части тоннеля-бинокля, которая сверху засыпалась грунтом. Под защитой этой конструкции производилась выборка штросс-

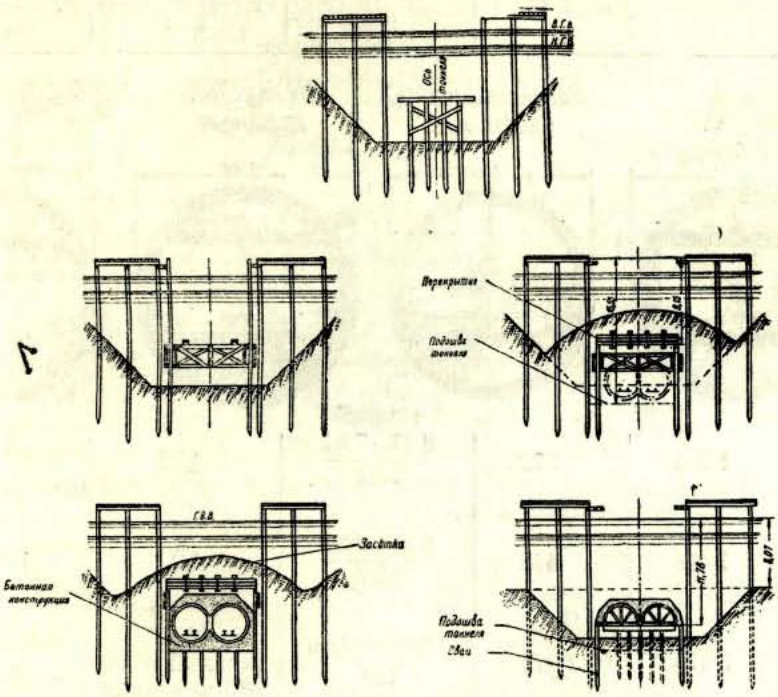


Рис. 653. Гарлемский подводный тоннель (фазы сооружения тоннеля)

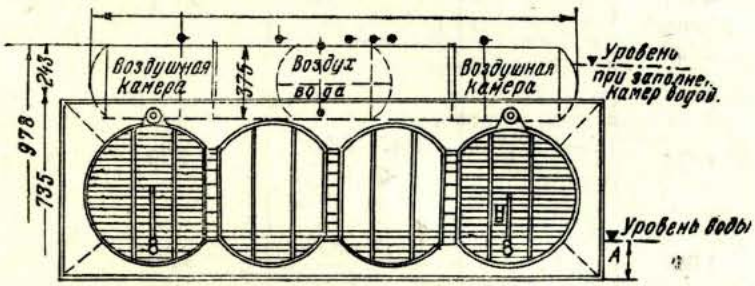


Рис. 654. Схема заводной секции с воздушными камерами

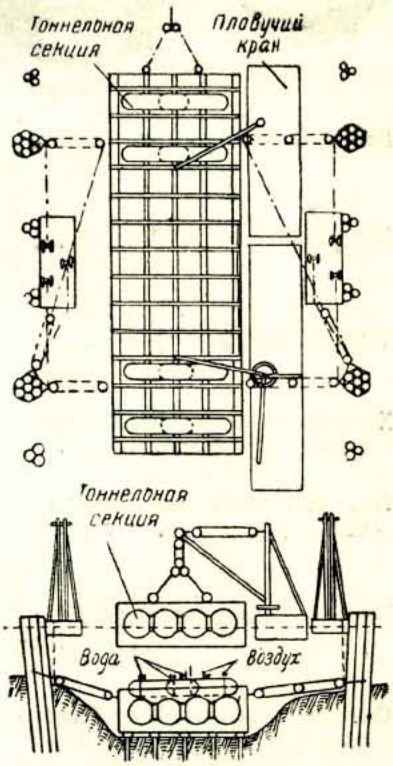


Рис. 655 и 656. Схема опускания заводной секции в траншею на проектную отметку

Считаясь с необходимостью минимального стеснения судоходства по реке, сооружение тоннеля производили последовательно на трех рабочих участках (при длине тоннеля в 183 *м*). Таким образом, при работе на одном из участков две трети сечения реки были свободны для судоходства. На одном из рабочих участков вышеприведенный гарлемский способ был рационализирован тем, что вместо защитной

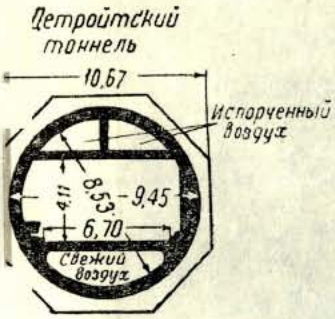
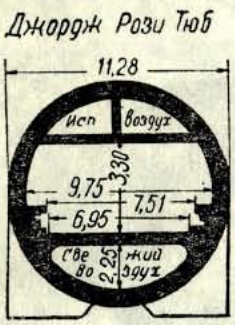
ного профиля и подводка нижней части, замыкавшей полную конструкцию тоннеля.

Д. *Тоннель метрополитена в Нью-Йорке под р. Гарлем.* Этот тоннель был сооружен методом заводных секций. Каждая тоннельная секция состояла из четырех спаренных тюбов внутренним диаметром 5,8 *м*, при толщине металла 9,5 *мм*. Тюбы расположены были на взаимном расстоянии 5,2 *м*; четыре

Сравнительная таблица подводных

Наименование подводного тоннеля	Длина тоннеля с подходами в *м*	Длина тоннеля без подходов в *м*	Длина подводной части тоннеля в *м*	Внешний и внутренний диаметры тоннеля. Сечение в $м^2$	Ширина проезжей части и тротуара для пешеходов	
					проезжая часть в *м*	тротуары для охраны
Эльбский подводный тоннель						
Блекуэльский тоннель						
Холланд тоннель						
Ротергайтский тоннель						
Шельдский тоннель						
Подводный тоннель под Гудсоном						
Блекволл (под р. Темзой) . .	1 890	1 300	372	$\frac{8{,}23-7{,}62}{53{,}2}$	4,90	0,94 *м* (два тротуара)
Ротергайт (под р. Темзой) . .	2 083	1 498	478	$\frac{9{,}14-8{,}23}{65{,}7}$	4,90	1,45 *м* (два тротуара)
Тоннель под р. Мерси	4 630	3 470	1 372	$\frac{14{,}03-13{,}41}{156}$	10,97 главный путь 5,80 ответвления	Два тротуара
Холланд-тоннель (Нью-Йорк Сити — Джерси Сити) . . .	Северный 2 798	Северный 2 607	1 028	$\frac{8{,}99-8{,}08}{63{,}4}$	6,10	Один тротуар
Под р. Гудсон два однопутных тоннеля	Южный 2 827	Южный 2 551	—	—	—	—
Детройт—Виндзор (под р. Детройт)	1 782	1 585	1 218	$\frac{9{,}47-8{,}58}{73{,}1}$	6,70	Один тротуар
Оклэнд—Аламеда (Сан-Франциско, Калифорния, США) .	1 372	1 081	1 067	$\frac{11{,}28-9{,}75}{107}$	6,96	1,04 *м*
Бостонский тоннель	2 012	1 691	1 182	$\frac{9{,}45-8{,}58}{70{,}4}$	6,55	Один тротуар
Антверпенский тоннель (под р. Шельдой)	2 110	1 769	395	$\frac{9{,}16-8{,}69}{69{,}0}$	6,75	»
Мидтаун-тоннель (под р. Гудсон) (Нью-Йорк Сити—Нью-Джерси, Линкольн)	—	2 438	945	$\frac{,45-8{,}38}{70{,}0}$	6,55	»
Дертфорд (под р. Темзой) . .	2 274	1 540	823	$\frac{10{,}36-9{,}16}{84{,}4}$	5,80	1,45 *м* (два тротуара)

тоннелей под обыкновенную дорогу Таблица 48

Автомобильное движение	Максимальная свободная высота и максимальный уклон	Максимальное заглубление при высоком горизонте воды в реке	Характеристика существующего движения (число автомобилей)	Максимальная пропускная способность (число автомобилей)	Стоимость сооружения (в фунтах стерлингов)	Год открытия
						
						
						
						
Двухпутное	4,42 / 1 : 34	24,4	428 в час (среднее за 12 час.); 680 в час (максимум — 1931 г.); 5,142 за 12 час. (средняя за 1930 г.)	1 440 в час	869 476 (работы) 537 510 (право собственности)	1897
»	4,88 / 1 : 36,5	29,6	389 в час (среднее за 12 час.); 537 в час (максимум 1931 г.); 4 664 за 12 час. (средняя за 1930 г.)	1 440 в час	1 0150 000 (работы) 638 878 (право собственности)	1908
4 пути на главном тоннеле и 2 пути на ответвлениях	5,18 / 1 : 30	51,8	—	4 150 в час (при четырех путях)	7 707 800	1934
Однопутное движение в каждом тоннеле	4,12 / 1 : 28	31,4	12 765 174 в 1931 г., максимально в час в 1929 г. 1 926 + 2 074 = 4 000. Максимум в день в 1931 г. — 59 000. Максимум в час в одном тоннеле — 2 500	1 900 в час в каждом тоннеле, 17 000 000 в год, 46 000 в день. Возможно до 60 000 в день	9 500 000	1927
—	—	—	—	—	—	—
Двухпутное	4,12 / 1 : 20	25	Максимум 1 200 + 800 = = 2 000 в час. Движение в июле 1931 г. — 151 000	2 400 в час	2 000 000; из этой суммы 240 000 — стоимость вентиляции	1930
»	4,52 / 1 : 22,2	26,5	По 1 800 в каждом направлении — 3 600 в час. Среднее за праздники 22 000 — 27 000. В обыкновенные дни 18 000 — 20 000	4 224 в час, при скорости 32 *км/час*	1 040 000 (из этой суммы строительная стоимость тюбов — 780 000; вентиляции и оборудования — 50 000)	—
»	— / 1 : 23,8	33,5	—	—	—	1932
»	450 / 1 : 28,5	30,2	—	2 000 в час	1 425 000	1933
»	4,27 / 1 : 28,5	32		Для двух однопутных тоннелей — 17 500 000 в год. Максимум 60 000 в день	Южный тоннель 40 000 000 долларов. Оба тоннеля — 70 000 000 долларов	Первый тоннель — 1934 г., второй тоннель — 1940 г.
»	4,88 / 1 : 28	34,1	—	—	2 993 000	Проектируется

параллельных тюба заводной секции были соединены между собой жесткими деревянными фермами. При этом получился деревянный понтон внешними размерами 7,35 × 23,2 *м* (рис. 152, 654). Заводные секции были изготовлены на стапелях, спущены на воду и отбуксированы к трассе тоннеля (рис. 655, 656). По трассе землечерпанием была устроена поперечная траншея шириной понизу 25 *м*, поверху 45,8 *м*. Глубина воды в реке была 8 *м*, а глубина траншеи 10,7 *м*.

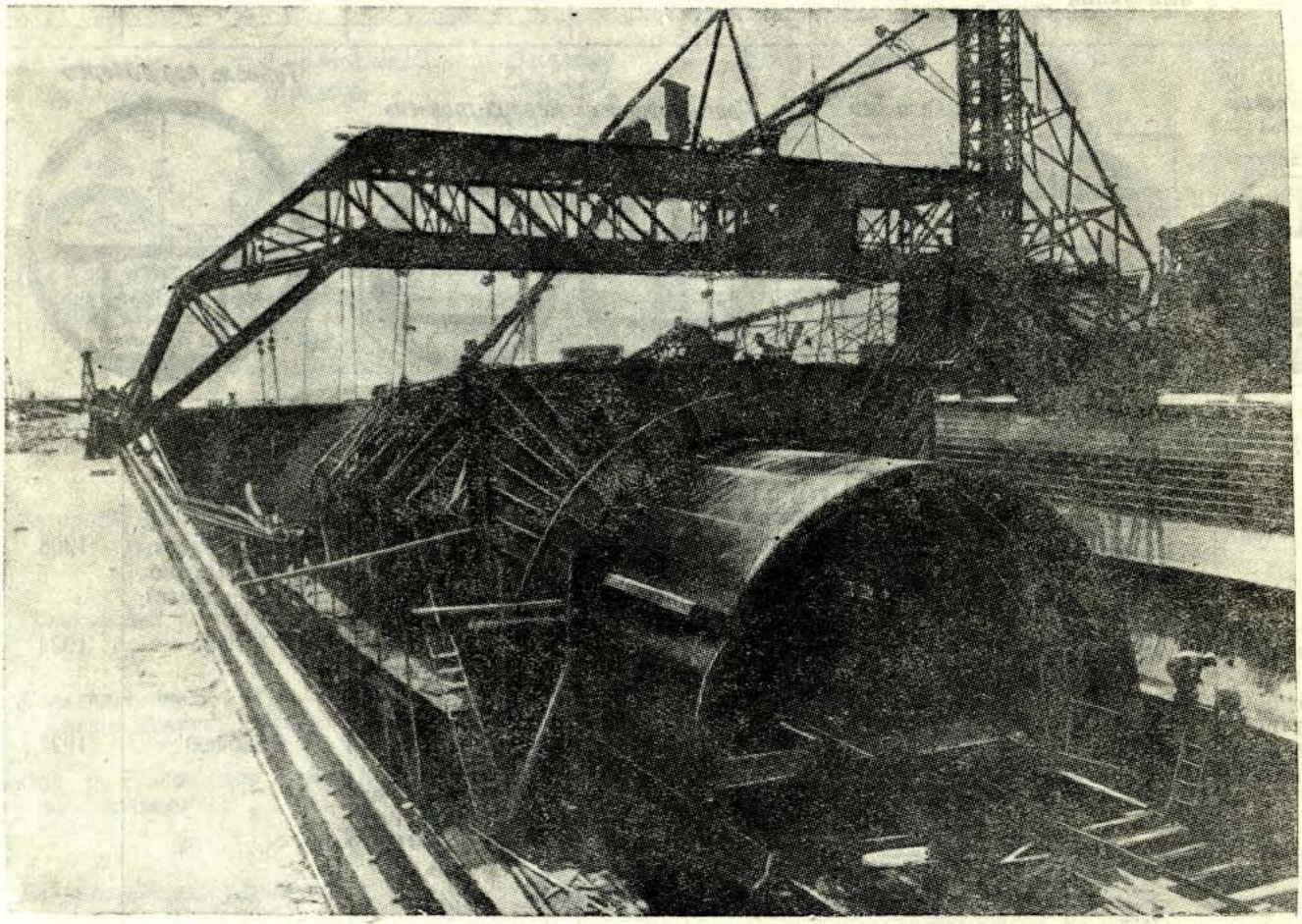


Рис. 657. Подводный тоннель Оклэнд—Аламеда (изготовление железобетонной конструкций заводной секции в сухом доке)

Пловучесть каждой секции обеспечивалась пятью баллонами, соединенными непосредственно с тоннельной конструкцией. Каждый баллон представлял собой металлическую трубу длиной 20,48 *м*, диаметром 3 *м*, при толщине листа в 16 *мм*.

Пловучесть баллона для каждой секции определялась подъемной силой 76 *т*. При объеме в 722 $м^3$ вес секции составлял 646 *т*. Каждая секция направлялась по створам, установленным на берегу, и опускалась в траншею на подготовленное основание. Стыкование секций друг с другом производилось водолазами; при этом была устроена металлическая конструкция, обеспечивавшая взаимное болтовое соединение. После опускания секции на основание производилось заполнение форм и бетонирование конструкций под давлением до 10 *ат*.

В заключение оставалось пробить торцовые стены заводных секций и устроить окончательную внутреннюю железобетонную сквозную обделку тоннелей (тюбов).

Е. *Подводный тоннель под проливом между Оклэндом и Аламедой.* Этот подводный тоннель протяжением 1 372 *м* сооружен в Калифорнии, у Сан-Франциско. При наличии незначительной кровли над тоннелем в подрусловой части вести здесь щитовую проходку тоннеля под сжатым воздухом в условиях слабых, неустойчивых пород было рискованно.

Вследствие этого остановились на методе заводных секций. Каждая из секций представляла собой железобетонную конструкцию длиной в 61 *м*, при внутреннем диаметре 9,75 *м* и внешнем диаметре 11,28 *м*. Толщина внутреннего железобетонного кольца составляла 75 *см*.

Всего было спущено двенадцать заводных секций. Секции бетонировались в сухом доке Сан-Франциско (рис. 657). При этом применялась подвижная металлическая опалубка. Для сообщения тоннелю водонепроницаемости была применена внешняя асфальтовая изоляция. После устройства тоннельных секций в доке последний наполнялся водой, секции всплывали и направлялись буксиром к трассе сооружаемого тоннеля (рис. 658). Одновременно по трассе подготовлялась землечерпанием поперечная траншея. Учитывая исключительную слабость илистого грунта, устроили искусственное основание из бетонных свай. После этого производилось погружение секций с применением водяного балласта. При опускании секции поддерживались пловучими кранами.

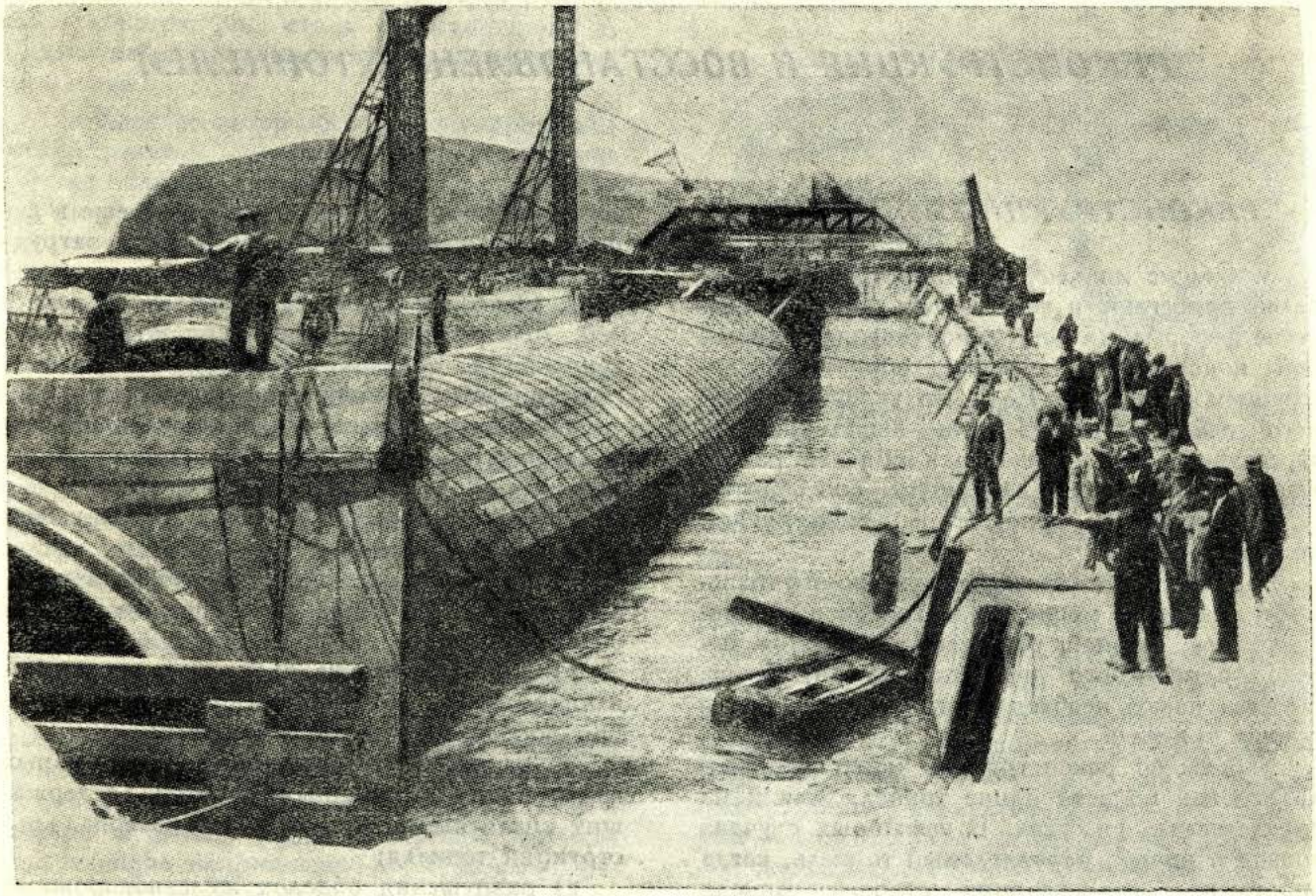


Рис. 658. Всплытие заводной секции в доке

Для обеспечения полной изоляции стыков заводных секций применялся свинец и пропитанный битумом брезент.

Для характеристики тоннелей на рис. 659 приведены сечения подводных тоннелей под обыкновенную дорогу, а в табл. 48 — размеры их.

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ

РЕКОНСТРУКЦИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОННЕЛЕЙ

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТОННЕЛЕЙ

1. *Общие данные.* К реконструкции тоннелей прибегают в тех случаях, когда вследствие деформаций поперечное сечение тоннельной конструкции не удовлетворяет обусловленным габаритам. Если, по условиям вредного действия газов или выщелачивания агрессивных вод, тоннельная обделка разрушается, теряя свою несущую способность, также приходится прибегать к реконструкции тоннеля (рис. 660).

Развитие техники железнодорожного транспорта, введение мощных электровозов и большегрузных вагонов, увеличение габаритов, перевод однопутного движения на двухпутное обусловливают необходимость реконструкции старых тоннелей.

Работы по реконструкции могут производиться как по всей длине тоннеля, так и на определенных участках. В некоторых случаях возводят новый, параллельный тоннель, когда работы по реконструкции старого тоннеля при наличии движения поездов могут оказаться более сложными и дорогостоящими, чем строительство нового.

Обычно стоимость работ по реконструкции тоннеля весьма высока. В особенности сложность реконструкции сказывается на линиях с густым движением, когда приходится прибегать к значительному стеснению его на время производства работ. Следует, впрочем, указать, что реконструкция двухпутных тоннелей может быть произведена без перерыва движения.

Если габариты тоннелей весьма ограничены, то при срочных работах значительного объема приходится переводить движение с двухпутного на однопутное.

Сложность и высокая стоимость работ по реконструкции указывают, насколько тщательно следует относиться к подбору материалов тоннельной обделки, конструктивным размерам ее и качеству выполнения еще в период сооружения тоннеля. Особенно затруднительна реконструкция свода обделки.

2. *Основные причины разрушения тоннелей.* Деформации и разрушения конструкции тоннельных обделок зависят от комплекса геотехнических причин следующего порядка:

а) несоответствия типа и размеров элементов конструкции проявляемому горному давлению;

б) слабой несущей способности окружающих тоннель грунтов;

в) недоброкачественности материала кладки и низкого качества работ при возведении обделки тоннеля;

г) работы дренажа в связи с выщелачиванием породы, выноса частиц грунта с водой, при образовании пустот вокруг обделки;

д) разрушающего влияния агрессивных вод и минерализованных грунтов (содержащих кислотные компоненты) на материал конструкции тоннеля;

е) разрушения обделок железнодорожных тоннелей от действия сернистых газов (при паровой тяге);

ж) вредного влияния сурового климата на состояние водообильных тоннелей;

з) деформации обделки в связи с незаконченностью тоннельного контура;

и) состояния надтоннельной поверхности;

к) влияния соседних выработок;

л) разрушающего влияния сейсмики в районах, подверженных землетрясению;

м) влияния оползневых явлений.

Рассмотрим эти геотехнические причины, каждую в отдельности.

а) Тоннельная практика богата примерами деформации и даже разрушения обделок в случаях, когда назначенный тип конструкции не соответствовал характеру и величине действительного горного давления. Очертание профиля и размеры элементов конструкции могли в процессе строительства и в начальный

период эксплоатации как будто удовлетворять необходимым требованиям. Но в дальнейшем, по мере нарастания, под влиянием природных факторов, величины горного давления (действующего сверху вниз, снизу вверх, вдоль оси тоннеля, с боков и т. д.), несущая способность конструкции стала недостаточной, и, следовательно, обделка могла претерпеть повреждения.

На Кавказе автор обследовал гидротехнический тоннель, имевший на определенном участке обделки, рассчитанные на давление в 13 *т/м²*, а в натуре проявилось давление в 48 *т/м²*. Естественно, обделка обнаружила признаки явно приближающегося момента разрушения. Потребовались экстренные меры для усиления конструкции.

Можно наблюдать обделки нормального профиля, рассчитанные только на вертикальное горное давление и деформированные под влиянием одностороннего бокового давления. Это указывает на то, что тип обделки при строительстве тоннеля был выбран неправильно, так как в данных условиях требовалось устройство несимметричного типа обделки с обратным сводом, способного воспринять одностороннее боковое давление.

б) Уменьшение несущей способности грунта возможно в случае, когда под влиянием факторов воды и воздуха грунт в период производства работ меняет свои физико-механические свойства. Например, пласты глин и сланцев и другие плотные, крепкие грунты, допускающие напряжения до 9 *кг/см²*, превращаются в жидкообразную глинистую массу, не могущую воспринимать давления от элементов тоннельных конструкций. Как пример можно привести случай на одной из станций метрополитена. При проходке нижних штолен в мергелистой глине, в начале работ, имелась возможность допустить давление на грунт до 12 *кг/см²*. Однако в дальнейшем после длительного стояния выработок на деревянных крепях и в особенности под размывающим действием подземных вод, отжимаемых сжатым воздухом (под которым велась щитовая проходка тоннелей из соседней шахты), глина настолько потеряла свою несущую способность, что пришлось в условиях «дутья» породы и давления снизу вверх, ломавшего пороги штольневых рам, углубить подошву выработок при допускаемом давлении лишь до 3 *кг/см²*. Аналогичные явления пучения грунта под влиянием изменения режима и токов подземных вод могут проявиться и при эксплоатации тоннельных сооружений. При этом, в связи с уменьшением несущей способности грунта и увеличением податливости его, возможны осадки и смещения элементов конструкции, приводящие к повреждениям тоннеля.

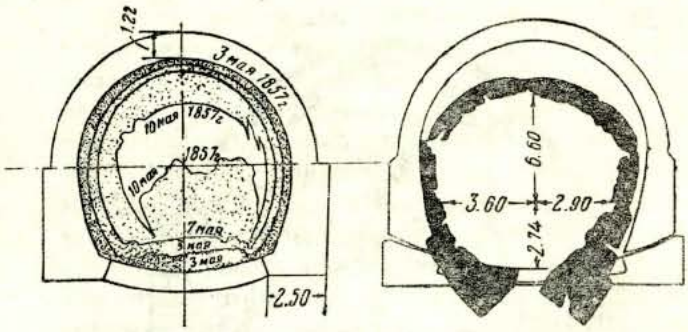


Рис. 660. Тоннель Черниц (нарастание процесса деформаций тоннеля с 3 по 10 мая 1857 г.)

Это обстоятельство можно проиллюстрировать на примерах из американской практики.

В Нью-Йорке под р. Гудсон, между Джерси и Манхэттеном, проложен был ряд подводных тоннелей. При глубине воды в реке от 12 до 15 *м* тоннели пришлось прокладывать преимущественно через илистый грунт (гудсонский ил), мощность которого достигает 15—18 *м* ниже дна реки. Местами выклинивались скалистые породы. В некоторых местах глубина заложения скальных пород доходила до 80—100 *м* от поверхности воды в реке.

При сооружении тоннелей в слабых грунтах может оказаться, как это и имело место на ряде американских подводных тоннелей под. рр. Гудсон и Ист-Ривер, что конструкция тюба не обеспечивает достаточной жесткости. В период эксплоатации от сотрясения и вибрации при движении поездов тоннельная обделка начинает претерпевать значительные деформации. Это приводит к тому, что внутри тюбов приходится создавать мощные железобетонные конструкции обделки и по основанию тоннеля устраивать балку жесткости в виде мощной железобетонной плиты. В тех случаях, где сверх того на конструкцию тюбов подводных тоннелей воздействуют приливы и отливы, тюб, заложенный в неустойчивых породах, приходится основывать на специальных сваях, опущенных до материка. В соответствии с расчетом носности свай тюб опирается на отдельно стоящие сваи или на

кусты свай. Сваи применяются бетонные, набивные, забуренные непосредственно из тюба. В американской практике, там, где от указанных мероприятий нельзя было ожидать надлежащего эффекта, применялась специальная конструкция тюба в виде тоннеля-моста. Не-

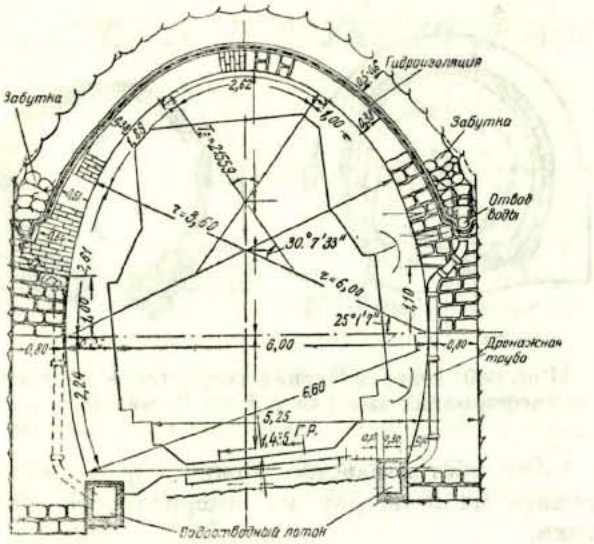


Рис. 661. Конструкция каменной обделки железнодорожного тоннеля с дренажной системой

посредственно из проложенного тоннеля опускались значительных размеров колодцы, в зависимости от диаметра тюба, которые, будучи заполнены бетоном, создавали надлежащие опоры. Затем внутри тюба, вне габаритов приближения строений, монтировалась конструкция металлического пролетного строения и проезжей части с пролетами, соответствующими возведенным опорам.

Приведенными примерами из мировой тоннельной практики подтверждается возможность обеспечить надлежащую устойчивость тоннельных конструкций, сооружаемых в условиях неустойчивых пород на слабом естественном основании.

в) Совершенно ясно, что употребление плохого материала, а равно неудовлетворительное качество работ по возведению конструкций приводят к дефектности тоннельного сооружения; при этом необходимость в ремонте, а иногда и в коренной реконструкции может возникнуть еще в период строительства тоннеля, до сдачи его в эксплоатацию. Помимо явных дефектов в конструкции, бывают случаи, когда после раскружаливания несущего свода обнаруживается смещение его от проектного профиля при явной негабаритности данного кольца. *Тоннель*, инженерное сооружение, относящееся к разряду I класса, требует применения высокосортного материала обделки при качественном выполнении работ.

г) При наличии около тоннеля действующей дренажной системы, в зависимости от режима подземных вод, градиента вод и скорости фильтрации, в соответствии с физико-механическими и химическими свойствами залегающих пород, может выявиться значительный вынос грунта с водой, сопровождаемый образованием значительных каверн и пустот в горном массиве. Наблюдаются случаи и химического разложения горных пород под агрессивным влиянием проточных минерализованных вод. Все эти явления нарушают статические условия работы тоннельной обделки, которая местами лишается пассивного отпора грунта, что неминуемо связано с появлением трещин, деформаций, а иногда и с разрушением обделки. Образование пустот вызывает отрыв отдельных масс породы и образование вывалов; при этом отдельные глыбы, падая на конструкцию, дают динамический удар, который обычно обделка не в состоянии воспринять. При наличии дренажных окон в конструкции обделки сам тоннель, являясь дренажем в грунтовом массиве, каптирует воды последнего и непрерывно нарушает естественный режим окружающих напластований (рис. 661). Этому явлению сопутствует нарастание горного давления, а главное, проявление неравномерного давления, являющегося первопричиной деформаций тоннеля.

д) Одной из главных причин разрушения конструкции тоннеля является вредное воздействие минерализованных подземных вод или грунтов на материал обделки. Чем больше скорость движения агрессивных подземных вод, тем процесс разрушения тоннеля протекает интенсивнее. От воздействия кислотных компонентов в практике наблюдается коррозия бетона или цементного раствора.

Характер разрушения обделки под действием агрессивных подземных вод становится более опасным при наличии скорости движения вод от 1 *м/сек* и выше.

Разрушающе действуют на материал обделки тоннеля сернокислые и сернистые подземные воды с содержанием сульфата кальция ($CaSO_4$), сульфата натрия (Na_2SO_4) или сульфата магния ($MgSO_4$).

Под действием сернокислых вод на бетонную кладку или на цементный раствор обделки происходит химическое соединение серной

кислоты с глиноземом и известью, при образовании сульфо-алюмината извести:

$$Al_2O_3 \cdot 3CaO + 3Ca_2SO_4 + 28{,}5H_2O.$$

Таким путем образуются соли Деваля (*цементная бацилла*), разрушающие кладку тоннеля; в результате конструкция обделки постепенно теряет свою несущую способность.

Степень агрессивности и вредности для кладки устанавливается в каждом отдельном случае химическим анализом подземных вод или вытяжек из минерализованных пород, окружающих тоннель. Если своевременно не принять мер по защите обделки тоннеля от вредного воздействия агрессивных вод, то болезнь конструкции продолжает развиваться вплоть до полного разрушения материала обделки.

е) Практика эксплоатации железнодорожных тоннелей под паровую тягу богата многочисленными примерами разрушения обделки от воздействия сернистого газа дыма паровозов. Вместе с тем следует отметить, что на тоннеле в 48 *км* от Лос-Анжелоса с успехом применено внутреннее покрытие поверхности тоннеля специальным слоем противодымной штукатурки, при этом никаких разрушений кладки от воздействия сернистого газа не наблюдается.

ж) Эксплоатация водообильных тоннелей в условиях сурового климата (при низких температурах) весьма осложняется. Вода, омывающая тоннель сверху и поступающая внутрь профиля, замерзая, образует на сводчатой поверхности обделки сталактиты и, падая на железнодорожный путь, сталагмиты. Поперечное сечение в свету настолько стесняется образовавшимся льдом, что движение по тоннелю временно прекращается. В двухпутных тоннелях скалываемый лед сбрасывается на один путь, и движение временно (на период уборки льда) производится по другому пути.

Процесс замерзания и оттаивания обделки разрушающе действует на конструкцию; вопрос усугубляется наличием за кладкой обделки ледяных «*мешков*», производящих усиленное местное давление на обделку и являющихся причиной трещин и деформаций конструкции.

з) В практике известны случаи деформации и разрушения тоннелей по причине незаконченности обделки, в частности обратного свода. Так, при постройке двухпутного тоннеля Парижского метрополитена в связи с тем, что не был своевременно уложен лоток, произошло смещение стен внутрь профиля при скольжении подошвы фундамента по основанию глинистых грунтов. Это повлекло за собой разрушение и обвал конструкции тоннеля на протяжении около 60 *м*.

и) На водообильность тоннелей влияет в определенной степени состояние поверхности «воздушной» части тоннеля. Имеется в виду наличие озер и речек, протекающих вблизи трассы тоннеля, могущих иметь гидравлическую связь с подземными водами горного массива, в котором заложен тоннель. Заболоченность надтоннельной поверхности, отсутствие надлежащего дренажа и поверхностного водоотвода приводят к тому, что ливневые и снеговые воды проникают через грунтовый массив к обделке, усугубляя тем самым положение водообильности тоннеля.

к) Влияние соседних выработок на возведенные тоннели может иногда отрицательно сказаться на устойчивости конструкции. В частности, при сооружении горным способом станций метрополитена трехсводчатого типа, после сооружения крайних тоннелей, начало проходки среднего тоннеля в некоторых случаях сопровождается появлением продольных, косых и поперечных трещин и сдвигов в крайних тоннелях. При разработке соседней, расположенной вблизи выработки не исключена возможность смещения грунта и сдвига существующей конструкции тоннельной обделки. Во избежание деформации необходимо рассчитывать целики в зависимости от характера и физико-механических свойств пересекаемых пород, а самые работы вести малыми участками.

л) В районах, подверженных землетрясениям, можно наблюдать разрушения тоннелей от сейсмических явлений главным образом на портальных участках и в зонах тектонических разрывов горного массива.

Японский опыт, в частности эксплоатация тоннельных сооружений Токийского метрополитена, показал, что собственно конструкция тоннелей, заложенных в грунтовом массиве, не страдает от влияния сейсмики, за исключением припортальных участков. Это приходится учитывать при проектировании и строительстве тоннелей в указанных условиях. Во избежание появления трещин, деформаций, а иногда и разрушения припортальных конструкций последние надлежит проектировать в виде жестких железобетонных, сильно арми-

рованных, замкнутого контура рамных элементов, в соответствии с динамическими расчетами при действии горизонтальных сил.

м) В практике эксплоатации горных тоннелей наряду с обнаружением трещин и деформаций в обделках наблюдается и смещение отдельных колец в сторону от оси тоннеля. Смещения возникают на участках, подверженных оползням, при наличии наклонных, скользящих пластов. Этому может сопутствовать, кроме того, проявление одностороннего бокового давления; в результате обделка получает такие деформации и нарушения отдельных элементов конструкций, что дальнейшая эксплоатация такого сооружения становится уже небезопасной.

Подобный случай имел место на участке железнодорожного тоннеля Хур — Ароза (Швейцария). Дело осложнялось тем, что при отсутствии обратного свода, в условиях обильно смоченного основания при наличии сильного бокового давления, подошвы фундаментов стен имели тенденцию к скольжению. Последнее обусловило трещины обделки и нарушение проектного положения отдельных элементов конструкции (рис. 662).

В целях предотвращения указанных явлений приходится прибегать к устройству мощных несимметричных обделок; в частности, стрелу свода при этом располагают параллельно направлению плоскости скольжения и линии действия доминирующих сил горного давления.

В других случаях прибегают к местному усилению отдельных колец тоннеля специальными контрфорсами размерами 2—3 *м* по оси тоннеля и 2 *м* по радиусу за очертанием внешнего контура нормальной обделки. Такие усиленные кольца в практике обычно называют *кампионами*. Последние применяются часто на припортальных участках, где сильно сказываются силы горного давления, направленные вдоль оси тоннеля, опрокидывающие кольца. В этом случае кампионы рассчитываются, как опорные кольца. Кампионы применялись на некоторых участках Симплонского и Сурамского тоннелей и особенно при сооружение Большого Апеннинского тоннеля на железнодорожной линии Болонья — Флоренция (Италия).

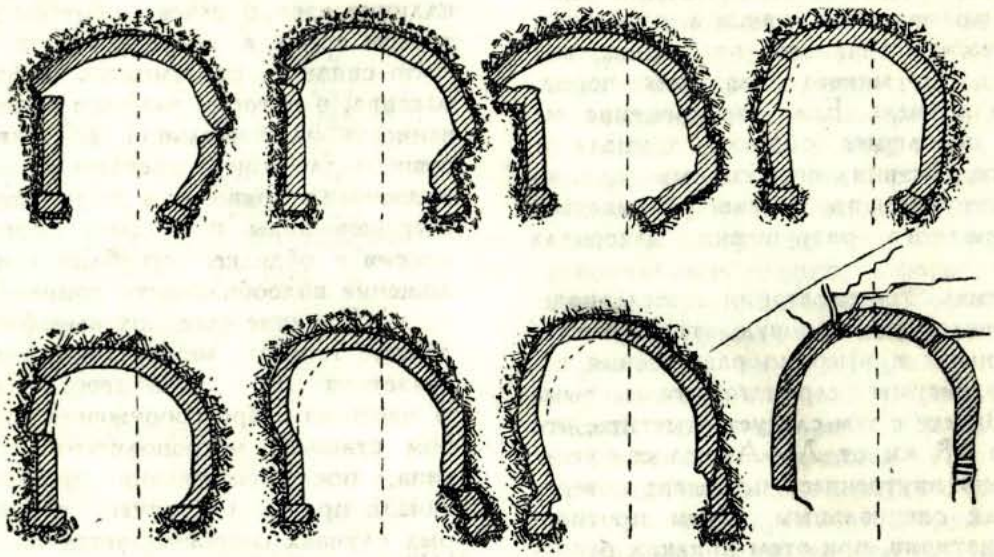


Рис. 662. Разрушения обделки тоннеля Хур—Ароза

3. *Главнейшие виды повреждений и деформаций тоннелей.* В процессе эксплоатации тоннелей наблюдаются многообразные виды трещин, деформаций, перекосов, разрушений, вплоть до катастрофических обвалов тоннелей по причинам, изложенным в предыдущем разделе.

При обследовании тоннельных сооружений в период эксплоатации можно наблюдать следующее:

а) *трещины*, поражающие тело тоннеля в отдельных местах, в поперечном, продольном и косом направлениях;

б) *деформации* отдельных элементов конструкции обделки: стен, несущего свода, лотка, обратного свода, ниш и порталов тоннеля;

в) *осадки и перекосы* отдельных колец обделки и смещение их по оси тоннеля, что приводит во многих случаях к нарушению требуемых габаритов;

г) *вывалы отдельных камней* и кусков кладки обделки;

д) разрушение материала тоннельной обделки под действием выветривания;

е) *выщелачивание раствора* в связи с водообильностью тоннеля;

ж) *пучение* железнодорожного пути в тоннеле.

В период эксплоатации тоннелей должны вестись регулярные наблюдения за жизнью сооружения и окружающего его горного массива.

При обнаружении трещин в обделке устанавливаются периодические наблюдения за состоянием тоннеля. По характеру возрастания размеров трещин или, наоборот, по стабилизации их устанавливается, насколько серьезна деформация тоннеля. Особенно внимательное и серьезное изучение требуется при появлении продольных трещин в своде.

На трещины, за которыми устанавливается наблюдение, накладывают алебастровые или цементные маяки, круглые или прямоугольные (8×6 *см*). На маяках указывается номер и дата. За поведением трещин можно следить и по парным пластинкам (с риской), укрепленным шурупами к кладке. По степени расхождения пластинок можно судить в миллиметрах о размерах увеличения наблюдаемой трещины.

Если замечаются деформации, перекосы элементов конструкции, то необходимы периодические измерения поперечного профиля тоннеля в отдельных сечениях колец для установления характера изменяемости очертания обделки. Кроме того, наблюдения за перекосами, осадкой и смещением колец должны вестись при геодезических измерениях, базирующихся на незыблемом репере.

Очертания профиля характерных колец устанавливаются при помощи специальной габаритной рамы или системы пантографа из труб на тележке.

Пантограф укрепляется на металлической треноге с планшетом, к которому прикрепляется лист бумаги с нанесенным на нем проектным профилем тоннеля. Прибор имеет приспособление, позволяющее строго центрировать его в соответствии со снимаемым сечением. Если вести иглу пантографа с прикрепленным к концу металлическим шариком по очертанию внутренней поверхности обделки данного сечения тоннеля, то на планшете (лист бумаги 20×20 *см*) автоматически вычерчивается в определенном масштабе (в частности, 1 : 30) действительный контур снимаемого кольца. Преимущество этого прибора заключается в том, что он дает возможность быстро производить все необходимые измерения. Подвижные металлические пантографы для съемки поперечных сечений тоннелей имеют распространение в тоннельной практике Америки (Коббл-Маунт) и Англии (Холливел).

Съемка поперечных сечений обделок обычно проводится и при помощи металлического телескопического шеста. Закрепив костыли на фиксированном расстоянии от обреза фундамента при определенном базисе, проводят замеры шестом для определенных точек, размеченных по внутреннему контуру обделки. Кроме того, засекаются контрольные замеры от головок рельсов железнодорожного пути тоннеля.

Данные замеров заносятся в журнал по следующей форме:

Журнал замеров габаритов тоннельных колец

Кольцо № 15 Сечение № 3
ПК 96+20 От Западного портала 70 *м*

№ точек по поперечному сечению	Засечки		Примечания
	1-а	1-б	Контроль
3	5,2	6,2	2,8
10	5,9	7,8	3,9

Проводя повторные измерения и сопоставляя их данные, можно представить себе заключение о ходе, характере и интенсивности процесса деформации тоннеля. Все трещины и деформации по каждому кольцу заносятся с зарисовкой в тоннельную книгу. В дальнейшем необходимо выявить основные причины деформации и принять необходимые меры для ликвидации процесса деформации.

При регулярном осмотре тоннеля ведутся наблюдения за состоянием бетонной обделки, за процессом коррозии металлической обделки и болтовых соединений, за состоянием скальной выработки под влиянием выветривания, в случае эксплоатации тоннеля без обделки.

Особое внимание в железнодорожных тоннелях приходится уделять состоянию пути. Имеются в виду пучины, просадки, перекосы пути. При сырых и водообильных тоннелях рельсы в сильной степени подвергаются коррозии. При паровой тяге (на угле) сернистые

газы, соединяясь с водой в тоннеле, образуют серную кислоту, которая разъедающим образом действует на рельсы и скрепления. Поэтому при эксплоатации некоторых железнодорожных тоннелей рельсы два раза в месяц покрывают известковым молоком (2% извести). Этим мероприятием достигается химическое соединение извести с серной кислотой, что ослабляет вредное воздействие последней.

Для защиты от коррозии поверхности рельсов покрываются различными лаками и смолами, но эта мера при непрерывном движении поездов носит паллиативный характер и не решает полностью задачи.

В условиях сурового климата в водообильных тоннелях вода, замерзая, образует наледи, которые подчас служат причиной схода поезда с рельсов.

4. *Методика обследования тоннельных обделок, подверженных воздействию разрушительных процессов, и установление мероприятий по их ликвидации.* Для возможности установления наиболее целесообразных методов лечения тоннелей, подверженных воздействию разрушительных процессов, надлежит прежде всего провести следующие работы, связанные с обследованием состояния тоннеля:

а) подбор геотехнических материалов о состоянии тоннеля в период его постройки и эксплоатации;

б) выявление физико-механических свойств пород, окружающих тоннель, и общей геологической и гидрогеологической характеристики горного массива;

в) обследование состояния тоннелей в отношении деформации и разрушения элементов конструкции тоннельной обделки; съемка характерных поперечных сечений тоннеля и постановка маяков;

г) выявление негабаритности отдельных тоннельных колец;

д) взятие образцов материала обделки и испытания механической прочности их; взятие проб подземных вод для химического анализа с целью установления степени агрессивности их;

е) обследование «воздушной» части тоннеля и дренажных устройств для установления характера влияния поверхностных вод, проникающих вглубь через горный массив к обделке тоннеля;

ж) систематизация и камеральная обработка всех материалов обследования для возможности разработки методов лечения тоннеля;

з) назначение технических мероприятий по ликвидации деформации и разрушающих тоннель явлений (инъекция, силикатизация, усиление конструкций тоннеля, дренаж, реконструкция тоннеля), а равно мер по устранению негабаритности отдельных колец.

Данные обследования на месте тоннеля обычно вносятся в специальную карточку-таблицу, образец которой приводится ниже:

№ п.п.	№ колец	Длина кольца	Габаритность	Наличие трещин	Наличие течей	Общие данные по тоннельному кольцу	Примечание
36	17	4,2	5 *см* негабаритно	нет	Большие течи	Тоннельное кольцо из бутовой кладки. Цементный раствор выщелочен из фундамента	
37	21	4,1	Габаритно	косые трещины по своду в 2—3 *см*	—	—	
38	22	6,5	Отрехтовать путь на 7 *см* влево	—	Капеж со свода	В своде отдельные вывалы кладки	
39	43	6,4	13 *см* негабаритно	нет	Значительная течь в пяте свода	Дефектов в конструкции кольца нет. С правой стороны наледи	

Базируясь на полноценных данных обследования тоннеля, приступают к назначению технических мероприятий по лечению этого тоннеля, выражающихся главным образом в: а) ликвидации водообильности тоннеля и обледенения его, б) уничтожении негабаритности тоннельных колец, в) укреплении тела обделки и окружающего тоннель грунта,

г) ликвидации пучения железнодорожного пути в тоннеле и д) решении вопросов вентиляции тоннеля, а в суровых климатических условиях вопросов отепления и отопления тоннеля.

Одновременно приходится разрешать вопросы непосредственной реконструкции тоннельных обделок:

1) укрепление отдельных элементов конструкции тоннеля, в частности фундаментов, стен, обратных сводов и ниш;

2) укрепление тоннельной обделки по существующему контуру путем замены новой кладкой в связи с нарастанием сил горного давления;

3) укрепление существующей обделки дополнительной внутренней железобетонной рубашкой;

4) реконструкция существующего тоннеля по требованиям новых габаритов, в частности расширение тоннеля однопутного профиля в двухпутный;

5) реконструкция метрополитенного перегонного тоннеля в станционный;

6) укрепление припортальных участков и конструкции порталов тоннелей.

Работы по реконструкции тоннелей должны проводиться методами, обеспечивающими непрерывность железнодорожного движения в период эксплоатации. Только в исключительных случаях может быть допущена работа с перерывом железнодорожного движения. В практике наблюдается система работ в «окна», строго увязанная с графиком движения поездов. При реконструкции двухпутных тоннелей возможен перевод движения с двухпутного на однопутное.

5. *Борьба с водообильностью и наледями в тоннелях.* Многообразной и богатейшей практикой строительства и эксплоатации тоннелей установлено, что упорная борьба с подземными водами необходима для сохранения подземного сооружения.

Подземные воды, в зависимости от их напора, скорости движения и степени агрессивности, разрушают кладку обделки тоннеля, а равно размывают окружающий грунт. В условиях сурового климата вода, замерзая, образует наледи и также разрушающе действует на материал кладки. В зависимости от режима подземных вод, от характера гидравлической связи их с атмосферными водами или с другими источниками, в соответствии с физико-механическими свойствами пород, устанавливается влияние дренажных устройств.

Современная тоннельная техника в СССР и за границей в принципе отрицает, в большинстве случаев, целесообразность устройства обделок с дренажными устройствами, запроектированными как непосредственно в конструкции обделки в виде дренажных окон, так и при раздельной системе дренажных галле-

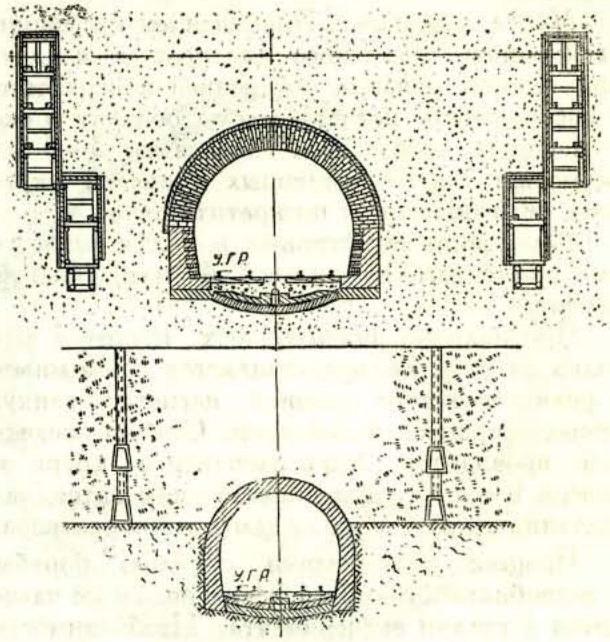


Рис. 663. Системы дренажных галлерей для осушения тоннелей

рей. Работа дренажа за определенный период эксплоатации обычно приводит к нарушению нормального режима горного массива и к деформации, а в худшем случае к разрушению тоннеля.

Пример эксплоатации Габасского тоннеля свидетельствует о значительных выносах окружающего тоннель грунта, при наличии системы двухсторонних многоярусных галлерей (рис. 663). В некоторых условиях, при наличии коренных устойчивых пород и значительного гидростатического напора, пробивка дренажной галлереи может дать определенный эффект; однако при этом надлежит изучить характер трещиноватости пород, так как в практике известны случаи, когда штольня, проведенная в массиве скальных пород, не пересекала водопроводящих трещин и фактически воду не перехватывала, так что затраты на ее пробивку оказывались неоправданными.

Современная тоннельная практика ориентирует строителей на создание в водообильных горных массивах замкнутого контура

обделок, не допускающих воду в тоннель. В частности, в условиях метростроения это вызывается жесткими требованиями водонепроницаемости и сухости при эксплоатации тоннельных сооружений.

Борьба с водообильностью в тоннельных сооружениях проводится следующими методами.

Метод тампонажа. Применением инъекции, нагнетанием цементного раствора в кладку, при торкретировании внутренней поверхности с последующим нагнетанием за обделку в окружающую породу под давлением 3—5 *ат* возможно для определенных тоннелей укрепить тело обделки и прекратить течь.

В условиях агрессивных вод для нагнетания применяют пуццолановый или зольный цемент.

При наличии значительных пустот и вывалов за обделку представляется возможным в целях экономии цемента нагнетать глину, проводя процесс глинизации. Однако последней проводится лишь заполнение крупных каверн и пустот, при обязательном затем нагнетании вокруг обделки цементного раствора.

Процесс битумизации с целью борьбы с водообильностью в тоннелях пока еще находится в стадии эксперимента. Необходимость значительной величины давления для нагнетания битума является некоторым препятствием, поскольку чрезмерное, неравномерное и сосредоточенное давление при нагнетании битума через отверстие может отрицательно сказаться на устойчивости конструкции. Это особенно опасно при наличии обделки, в значительной степени ослабленной разрушающим действием факторов выветривания.

Устройство гидроизоляции тоннеля. После укрепления обделки тоннеля инъекцией цементного раствора возможно покрытие внутренней поверхности тоннеля торкретом. Однако следует учесть, что торкрет, являясь жесткой изоляцией, дает трещины и не обеспечивает полной изоляции тоннеля. В условиях жестких требований метростроения необходимо применение мягкой оклеечной изоляции.

Как известно из практики строительства, устройство внешней изоляции тоннеля, в особенности свода, представляется исключительно сложным делом, тем более в условиях эксплоатации тоннеля. Поэтому в последнем случае возможно ориентироваться на устройство внутренней оклеечной гидроизоляции с защитной железобетонной рубашкой. Это довольно сложное мероприятие при высококачественном его выполнении может обеспечить водонепроницаемость тоннеля.

Отвод вод от тоннеля системой дренажных галлерей. Это мероприятие, как указывалось выше, можно проводить лишь при достаточно изученном режиме подземных вод и при условии, что работа дренажной системы не повлияет на состояние окружающего массива и не повредит устойчивости эксплоатируемого тоннеля, а лишь снимет напор, скаптирует воду и тем самым осушит тоннель.

Устройство зонтов. В случаях, когда требуется получить исключительно сухое помещение, свободное даже от пятен, возможно применить систему зонта. Конструкция зонта в виде несущей легкого типа металлической оболочки или из асбестоцемента устраивается в сводчатой части обделки и предназначена снимать ничтожный избыток воды, протекающей через тоннельную обделку, которая отводится лотками в общий дренаж (рис. 664).

Современная советская практика применения зонтов на эскалаторных тоннелях ($D = 8{,}5$ *м*), на односводчатой станции ($L = 16$ *м*) Библиотека имени Ленина Московского метрополитена и на всех станциях метрополитена 3-й очереди доказала целесообразность применения этой системы в условиях метростроения. Особо следует отметить применение зонтов из асбестоцементной фанеры, полностью разрешивших задачу обеспечения сухости станционных и эскалаторных тоннелей Покровского и Замоскворецкого радиусов Московского метрополитена 3-й очереди строительства.

Уровень техники гидроизоляционных работ при сооружении станции глубокого заложения из тюбингов не позволяет достигнуть абсолютной водонепроницаемости обделки.

Применяя чугунные тюбинги с обработанными поверхностями, необходимо особо тщательно производить работы по расчеканке стыков и по изоляции болтовых отверстий. Значительная протяженность расчеканочных канав и огромное количество болтов, исчисляющееся 150 тысячами на станции, создают известные затруднения. Если допустить, что работы по гидроизоляции болтовых отверстий производятся настолько тщательно, что дефекты могут быть обнаружены в размере 0,1% от общего количества болтов (а в натуре несравненно больше), то даже это составит 150 пунктов, неблагополучных по течи, что никак не может удовлетворить высоким

требованиям, предъявляемым к гидроизоляции станции, где требуется абсолютная сухость. Наличие капежа и пятен на сводчатой поверхности никак не увязывается, к тому же, с архитектурным оформлением станции. В результате изысканий впервые на станциях Павелецкая и Новокузнецкая Замоскворецкого радиуса была создана система водозащитных зонтов, обеспечивающих полную водонепроницаемость и сухость станции. Зонты из асбестоцемента запроектированы сборной конструкции из отдельных стандартных элементов, изготовленных в массовом масштабе заводским способом.

Зонты созданы в виде легкой подвесной конструкции раздельно от основной несущей тоннельной обделки станции. На 3-й очереди были применены две системы подвесной конструкции зонтов. По одной системе перекрытие зонта создано из ряда железобетонных арок в асбестоцементном кожухе, перекрываемых отдельными асбестоцементными плитами-картинами толщиной 12 *мм*, криволинейного очертания, образующих поверхность зонта (станция Павелецкая).

По другому варианту плиты-картины зонта непосредственно крепятся к основной тюбинговой обделке рядом болтов, заделанных в заполненные бетоном отдельные ячейки тюбингов тоннеля (станция Новокузнецкая).

Для придания конструкции зонтов водонепроницаемости поверхность последних с наружной стороны покрывается битумом. Вода, могущая попасть на наружную поверхность зонта, отводится через водоотводные трубки по желобкам, расположенным в пятовых частях арок, в общую дренажную сеть.

Применение нового вида материала обеспечило удобный и легкий монтаж конструкции в рекордные сроки. При этом достигнута значительная экономия в расходе металла и цемента. В дальнейшем в конструкцию зонтов были внесены усовершенствования, позволившие на станциях и наклонных эскалаторных тоннелях Покровского радиуса создать конструкции водозащитных зонтов в еще более короткие сроки. Опыт эксплоатации подтвердил высокое качество конструкции сооруженных водозащитных зонтов, и сейчас они применяются в широком масштабе на строительстве подземного кольца 4-й очереди, а равно на ряде тоннельных переходов между станциями.

Сооружение зонтов из асбоцемента является одним из замечательных достижений проектно-творческой мысли советских инженеров.

Применение пористого бетона. В тех случаях, когда по условиям эксплоатации тоннельного сооружения требуется его абсолютная сухость, возможно применение пористого бетона. Последний является лишь дополнительным средством к изоляции несущей бетонной или металлической обделки.

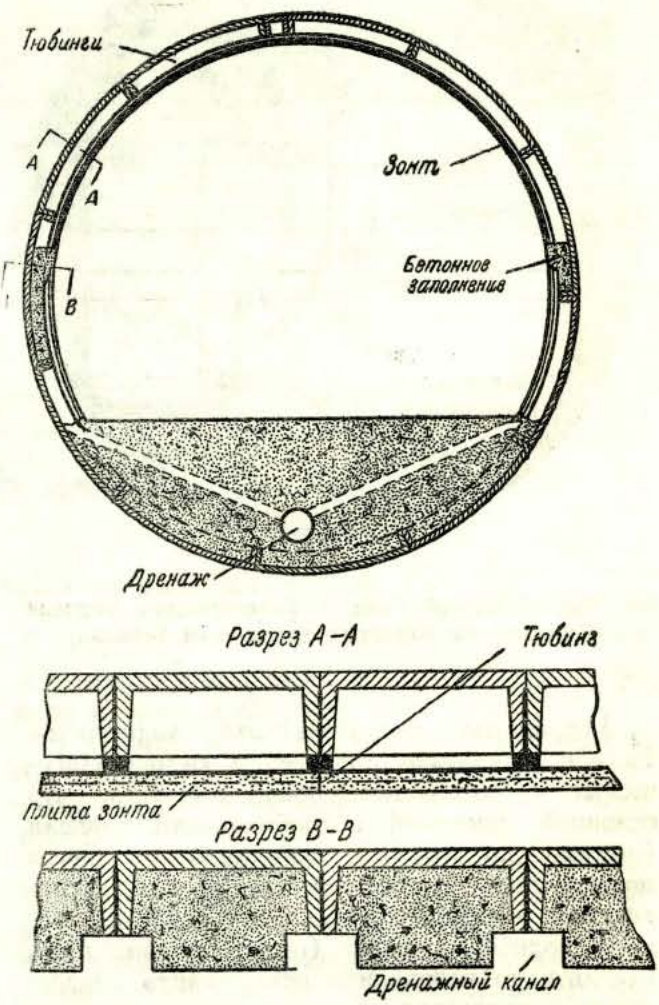


Рис. 664. Дренажный зонт в тоннеле

По внутренней поверхности тоннельной обделки укладывается слой пористого бетона, обладающего дренажными свойствами, который, перехватывая возможные течи из отдельных мест обделки, отводит воду по дренажным трубам, уложенным в нижней части тоннеля.

Пористый бетон покрывается по внутреннему контуру слоем цементной смазки или торкретом. Дренажный пористый бетон может

дать эффект для получения сухих тоннельных сооружений (рис. 665).

Автор наблюдал хорошие результаты, достигнутые применением пористого бетона, в условиях Эльбского подводного тоннеля в Гамбурге [1].

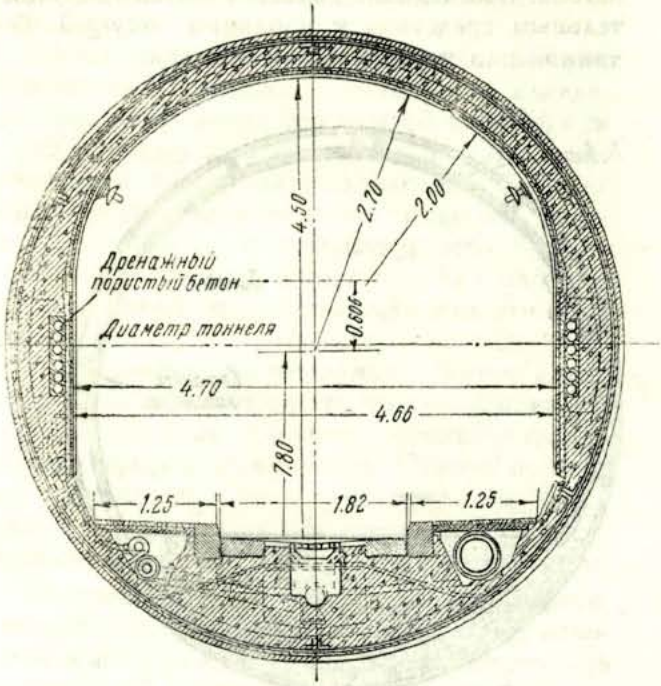


Рис. 665. Эльбский тоннель (конструкция тоннеля с заполнением пористым дренажным бетоном)

Устройство поверхностного водоотвода. Если в результате проведения гидрогеологических обследований обнаруживается, что основной причиной водообильности тоннеля (помимо подземных источников) является поступление в глубь горного массива атмосферных и поверхностных вод в связи с наличием водных потоков (озера, ручьи, реки, каналы), то необходимо осуществить поверхностный водоотвод. В зависимости от пересеченности и рельефа местности проводят ряд канав, мощеных лотков и траншей, засыпают ямы, ликвидируют заболоченные участки таким образом, что поверхностные воды отводятся от района расположения тоннеля. Ручьи и реки также надлежит отвести или принять меры против поступления воды в глубь горного массива, к тоннелю.

Так, например, укреплением слоем бетона толщиною 35 *см* дна р. Джаджурки, пересекающей тоннель на железнодорожной линии Тбилиси — Джульфа у Южного портала удалось полностью осушить припортальные кольца тоннеля.

Указанным мероприятием было приостановлено поступление воды из реки через трещиноватые породы к обделке тоннеля.

Нельзя не упомянуть, что, кроме приведенных мероприятий, в практике борьбы с водообильностью применяют систему дренажа в виде сухой забутки по внешнему контуру свода и стен обделки с выводом вод через специальные дренажные устройства (щели, окна, трубки, колодцы) в водоотводный лоток.

Как уже указывалось выше, такая система неприемлема, тем более в условиях необходимости укрепления тела тоннеля инъекцией. В результате проведенного нагнетания эффективность дренажа сводится к нулю, так как материал нагнетания, в частности цемент, неизбежно заполнит поры забутки и дренаж потеряет свое значение.

Борьба с наледями может вестись главным образом предотвращением поступления воды в тоннель. В этом случае полезными мероприятиями являются тампонаж (инъекция) и гидроизоляция тоннелей. Вопрос о влиянии ледяных *мешков*, образующихся за обделкой, должен решаться в каждом случае индивидуально.

6. *Работа инъекционного поезда.* В современной практике работы по капитальному ремонту тоннелей, подверженных разрушению, производятся с применением *инъекционного* поезда. В зависимости от объема предстоящих работ инъекционный поезд формируется из трех, четырех и больше специальных подвижных рабочих платформ, оснащенных необходимым оборудованием (рис. 666) для производства следующих работ:

а) разборки и отбойки разрушенных мест внутренней поверхности обделки тоннеля;

б) инъекции цементного раствора за обделку и цементации собственно материала конструкции обделки (рис. 667, 668 а и б);

в) торкретирования внутренней поверхности обделки (рис. 669).

Инъекционный поезд оборудуется компрессорами, растворонагнетателями, песко-

[1] См. В. Л. Маковский, Сооружение тоннелей метрополитенов. М., 1935, стр. 362.

струйными аппаратами, отбойными инструментами, торкрет-пушками, буровыми инструментами и т. д. Для примера приведены данные по организации работ с инъекционным поездом при восстановлении однопутного тоннеля длиной 1700 *пог. м*.

Инъекционный поезд состоял из трех

С 3-й платформы проводились работы по устройству торкрета по металлической сетке (рис. 671).

Готовая торкретированная поверхность впоследствии очищалась металлическими щетками. Затем применяли покрытие специальным дымоизолирующим слоем и протирали

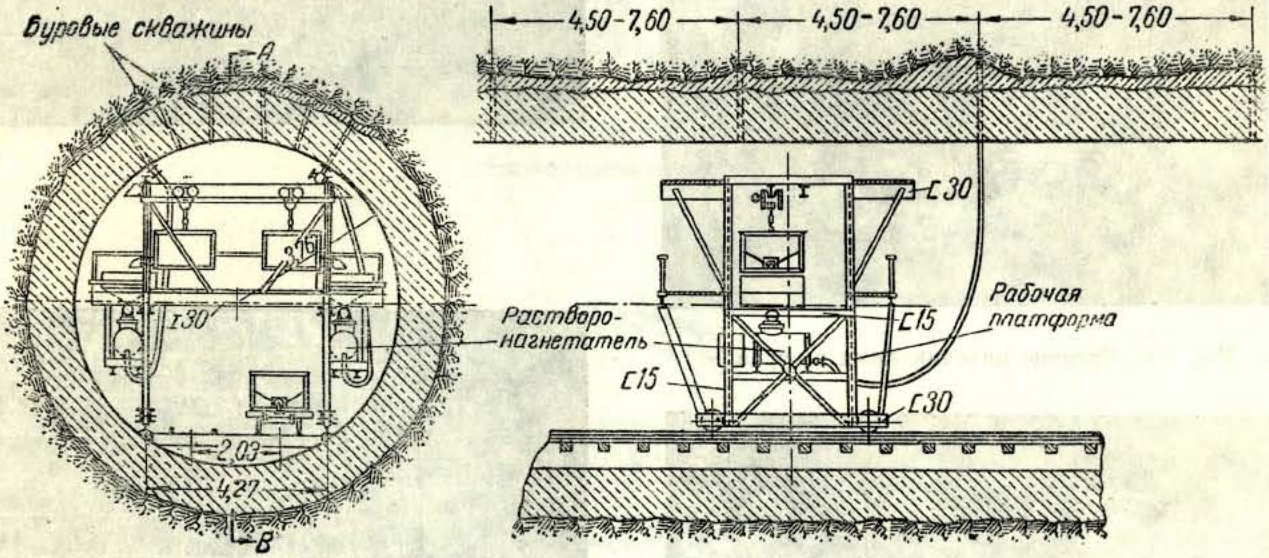


Рис. 666. Рабочая платформа для нагнетания раствора за обделку

подвижных платформ. Последние имели по два яруса и, в соответствии с габаритом тоннеля, ряд откидных платформ для удобства доступа к обрабатываемой внутренней поверхности тоннеля (рис. 670).

В зависимости от графика движения поездов в окно инъекционный поезд устанавливался в требуемое место, и бригада в 40 человек приступала к работе.

С 1-й платформы при помощи пескоструйных аппаратов и пневматических молотков производилась очистка поверхности от копоти и разборка слабых частей конструкции. Эта платформа имела компрессор производительностью 10 $м^3/мин$ при работе 6—14 человек. Глубина съема поврежденной обделки — от 5 *см* и выше (а в некоторых местах до 30 *см*).

Со 2-й платформы велась инъекция цементного раствора. Проходились буровые скважины диаметром 5 *см* и нагнетание под давлением до 7 *ат*. На этой платформе находились два компрессора: один производительностью 6 $м^3/мин$, а другой — 4,5 $м^3/мин$.

его особым механизмом с карборундовым колесом (рис. 672).

На время пропуска поездов по графику железнодорожного движения инъекционный поезд отводился на ветку, уложенную вблизи портала.

Способы реконструкции тоннелей. Практика строительства и эксплоатации тоннелей различных видов и назначений в разнообразнейших природных условиях выявила целый ряд приемов и способов реконструкции и восстановления тоннелей, проведение которых диктовалось условиями безопасности в период службы тоннельного сооружения.

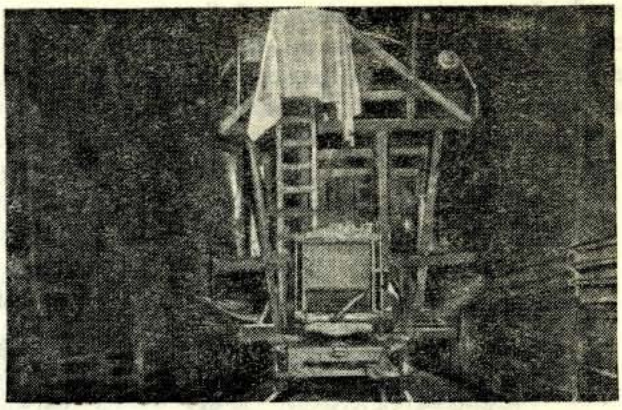
В практике установились следующие виды реконструкции тоннелей.

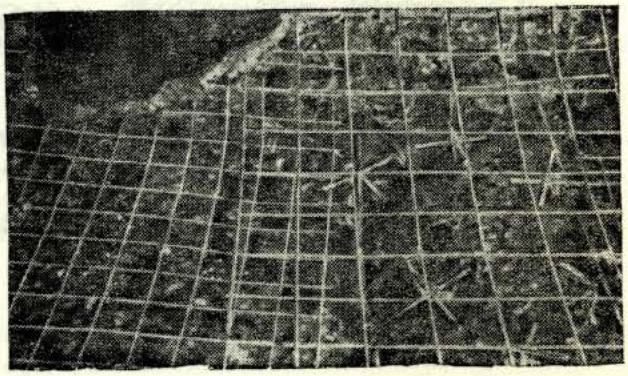
I. *Реконструкция деформированных тоннельных обделок:* а) замена старой обделки новой без изменения внутренних габаритов сооружения: б) усиление старой обделки тоннеля дополнительной внутренней конструкцией.

II. *Реконструкция недеформированных тоннельных обделок*: а) полная замена старой



Рис. 667. Бурение инъекционных шпуров





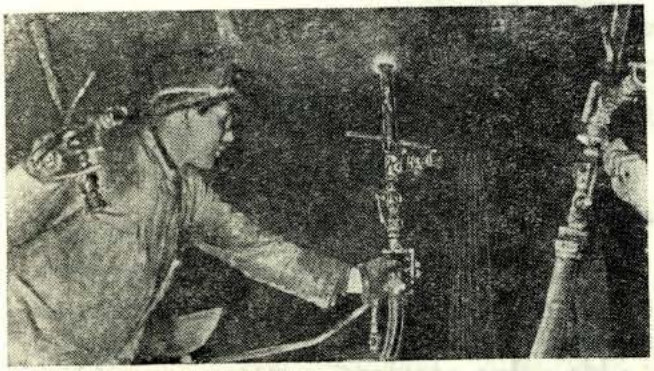


Рис. 668 а. Установка сопла в инъекционное отверстие

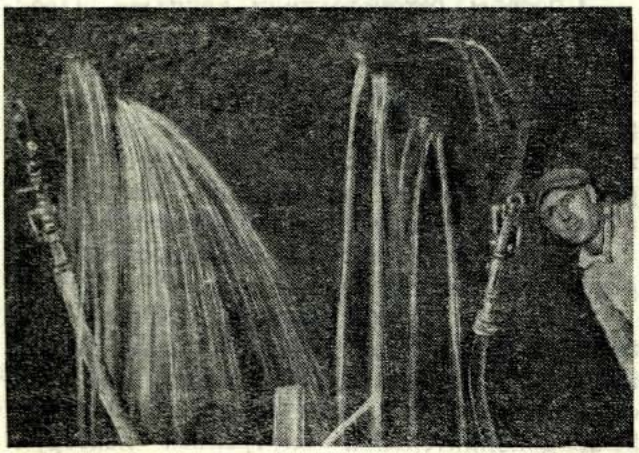


Рис. 668 б. Протекание воды через обделку в процессе инъекции

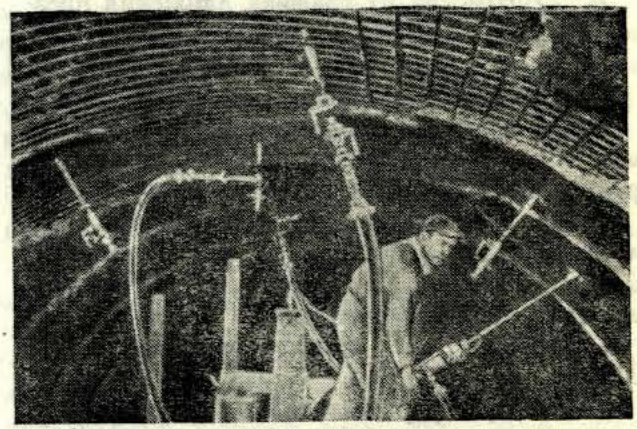


Рис. 669. Армирование и торкретирование поверхности разрушающегося свода обделки

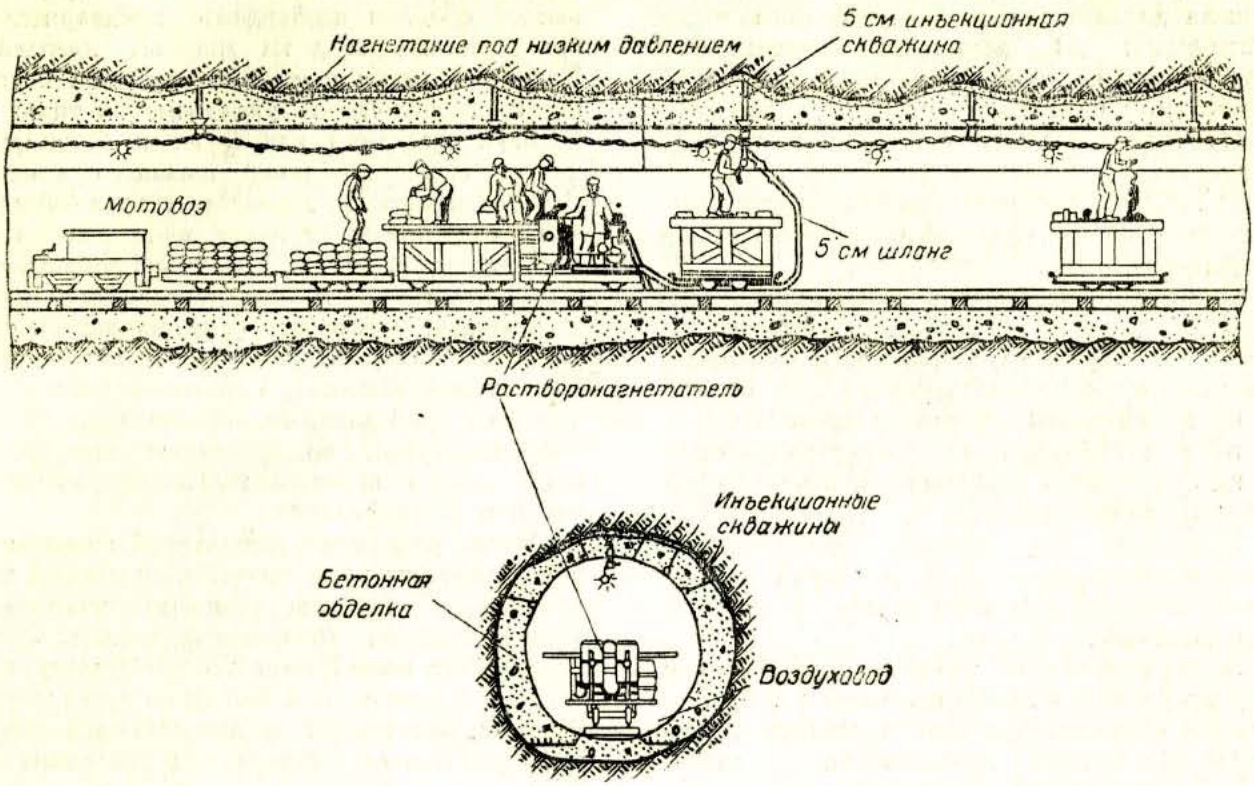


Рис. 670. Производство работ по нагнетанию раствора за тоннельную обделку

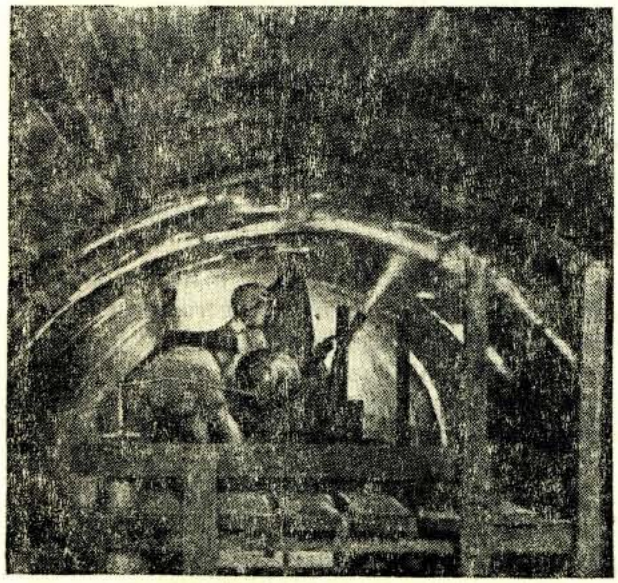


Рис. 671. Вид работ по торкретированию внутренней поверхности тоннеля (торкет по сетке)

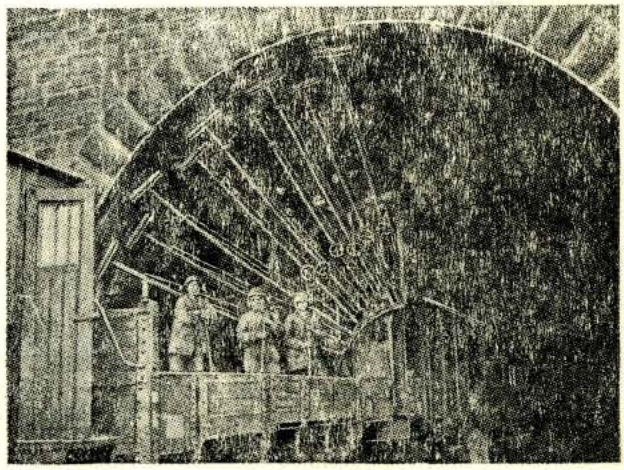


Рис. 672. Инъекционно-ремонтный поезд

обделки новой в связи с расширением профиля (в частности, замена однопутного тоннеля двухпутным или двухпутного четырехпутным); б) расширение тоннельного профиля при частичном использовании старой конструкции обделки.

III. *Реконструкция перегонного тоннеля метрополитена в станционный.*

IV. *Местная реконструкция и восстановление тоннеля по отдельным элементам конструкции обделки.*

Выработанные практикой способы реконструкции обделки могут быть проведены:

а) без перерыва движения и изменения условий эксплоатации тоннеля,

б) с частичным перерывом движения,

в) при работах по реконструкции в «окна»,

г) при полном перерыве движения на период реконструкции.

При составлении проекта реконструкции тоннеля необходимо изыскать такой способ работ, который решил бы задачу без нарушения движения.

К реконструкции тоннеля с нарушением движения следует прибегать лишь в исключительных случаях; при этом требуется специальное обоснование принятого метода работ.

I. *Реконструкция деформированных тоннельных обделок.* В зависимости от состояния конструкции обделки и характера ее деформации работы по реконструкции тоннеля, т. е. по замене старой кладки новой, более мощной, различают два основных способа работ, а именно: *внешний* способ реконструкции и *внутренний* способ реконструкции.

Внешний способ реконструкции. При внешнем способе реконструкции тоннеля основные работы по замене обделки по разработке и выдаче грунта и креплению проводятся за пределами внешнего контура деформированной обделки (рис. 673, 674).

В зависимости от местных условий к реконструируемому участку тоннеля задают подходные штольни на отметке подошвы существующих фундаментов.

Далее, на протяжении реконструируемого кольца проходят вдоль оси фундаментов и стен нижние, боковые штольни. Параллельно проходят верхнюю, центральную штольню над замком реконструируемого кольца. Высота этой штольни делается минимальной (около 1,6 *м*). Затем по внешнему контуру обделки раскрывается штольневая калотта ($l = 2$—3 *м*) с постановкой креплений штендеров тоннельной формы непосредственно на старую кладку. При наличии сильного горного давления или значительно деформированной обделки необходимо предварительно брать старый свод на мощные крепления. После раскрытия профиля по внешней поверхности старого свода укладывается толь; используя последний как кружала, бетонируют новую мощную обделку внешнего контура. В последнем этапе ломается старая обделка, легко отделяемая от новой прослойкой толя.

Недостаток этого способа заключается в том, что вновь получаемая обделка имеет избыточные габариты (внутренний контур новой обделки соответствует внешнему контуру старой обделки), которые могут и не вызываться требованиями эксплоатации. Чтобы избежать этого, видоизменяют этот способ путем сдвига последовательности фаз разработки и бетонирования.

После раскрытия штольневой калотты на 3 *м* ломают на этом протяжении старый свод и стены, а элементы крепления тоннельной фермы опирают на соседние кольца. Затем бетонируют новый свод по требуемому проектному профилю, а избыточное пространство калотты забучивают с последующей инъекцией цементного раствора под давлением 3—4 *ат*.

Подход к реконструируемому участку тоннеля с внешней стороны горного массива подходными штольнями не всегда представляется целесообразным из-за значительного их протяжения; поэтому внешний метод работ может быть осуществлен заходом изнутри тоннеля в такой последовательности:

1) раскрепление внутри тоннеля деформированной обделки;

2) заход за кладку на уровне обреза существующего фундамента и закладка нового фундамента и стены по внешнему контуру;

3) пробивка отверстий в пятах свода и заход за кладку по контуру штольневой прорезью с последующей закладкой стен;

4) пробивка лаза в замке существующего свода с раскрытием по контуру штольневой калотты при последующей кладке свода.

Необходимо указать, что хотя применение внешнего способа работ и решает задачу реконструкции, однако надлежит учитывать ряд трудностей, с которыми приходится неизбежно сталкиваться при реализации этого способа, а именно:

а) создание ряда подходных и вспомогательных выработок для подхода к реконструируемому кольцу;

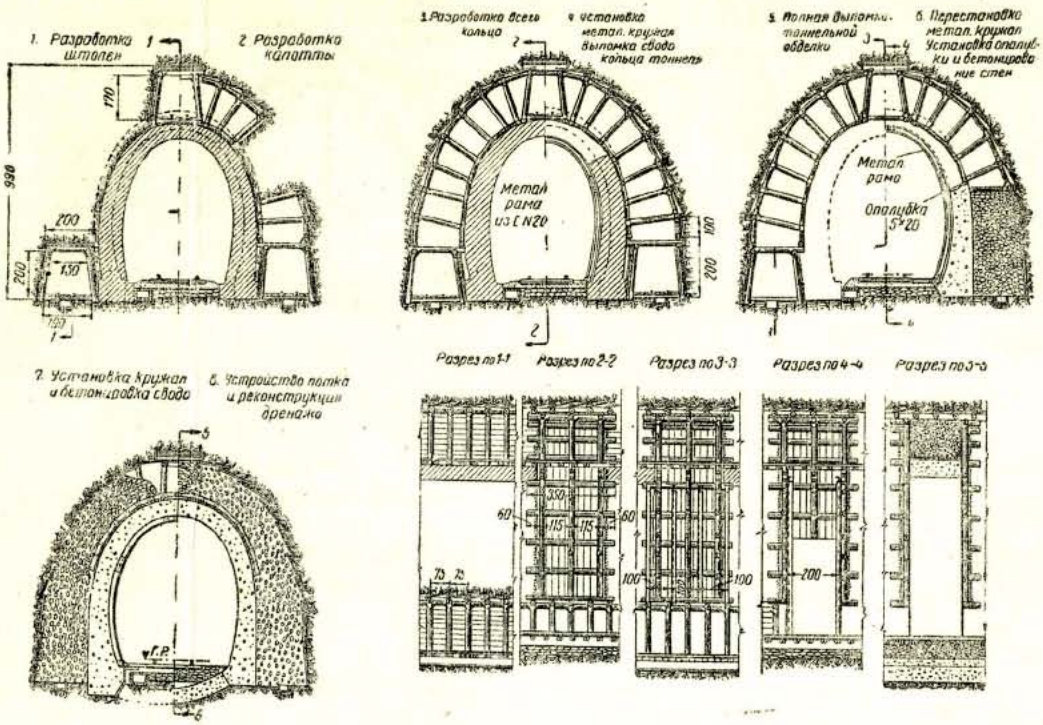


Рис. 673. Внешний способ реконструкции тоннеля

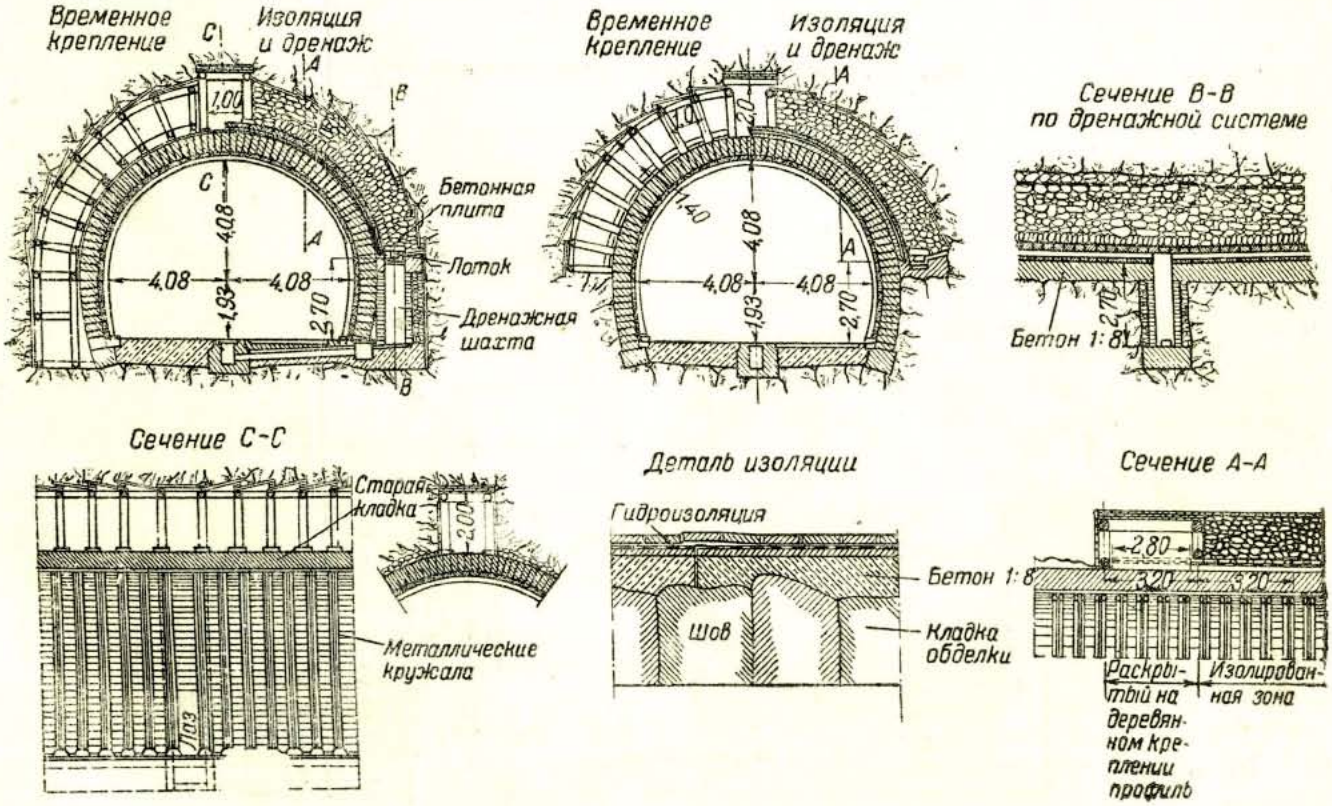


Рис. 674. Схема реконструкции тоннеля внешним способом

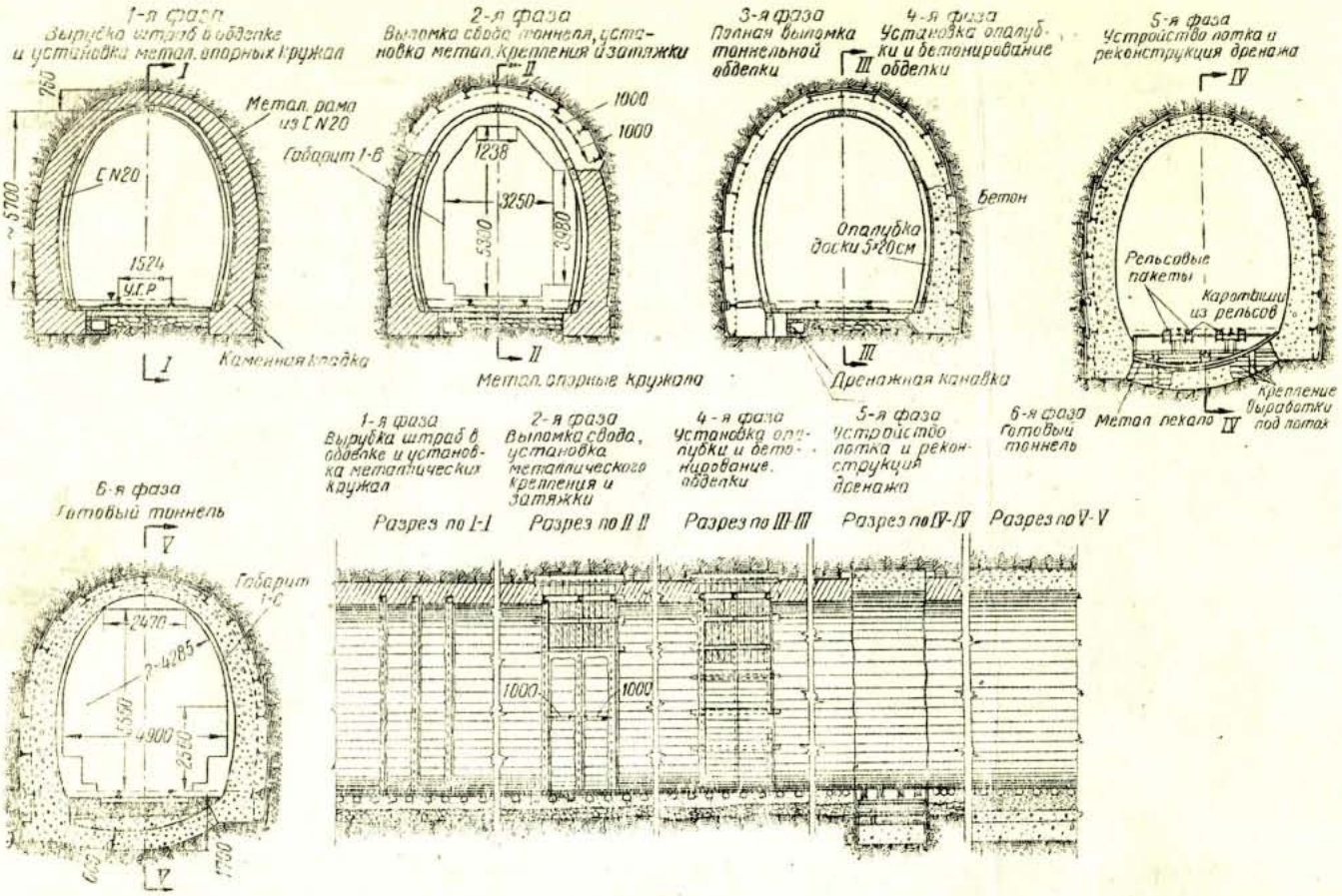


Рис. 675. Кружальный метод реконструкции тоннеля

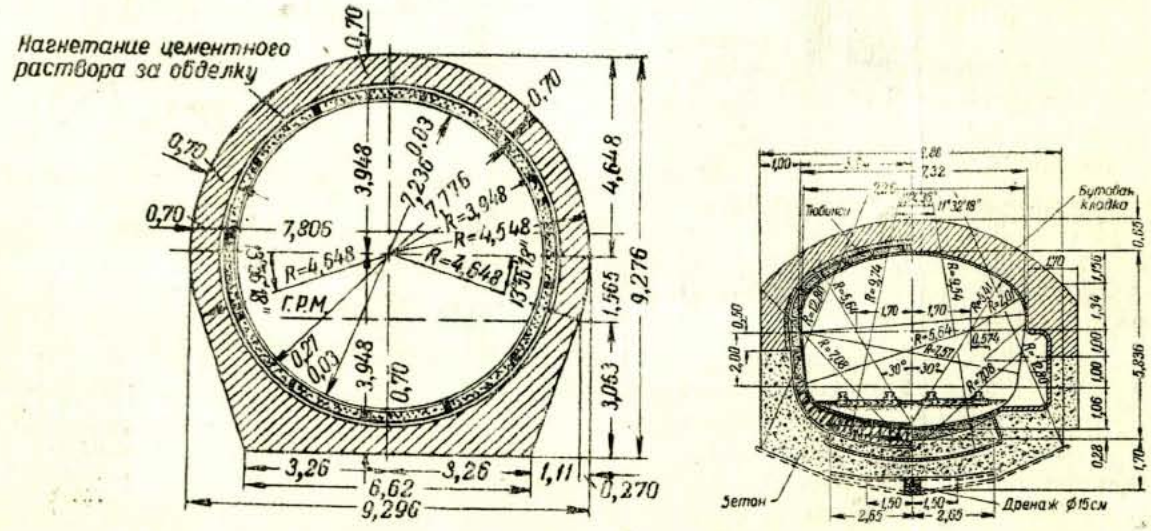


Рис. 676. Укрепление и изоляция тоннельной обделки внутренней чугунной конструкцией

б) ограниченность, узость фронта и теснота работ;

в) затруднения в транспортировке выработанной породы, старой кладки и в подаче крепежных и строительных материалов;

г) трудности вентиляции;

д) трудности технического надзора и

е) медленность производства работ.

Все эти обстоятельства в значительной степени влияют на качество работ по реконструкции тоннеля.

Внутренний способ реконструкции. Применением внутреннего способа реконструкции все работы по ломке старой кладки и по возведению новой обделки проводятся со стороны внутреннего сечения тоннеля. В этом случае, при наличии значительного процесса деформации, старая обделка берется на усиленную конструкцию временных креплений и работы по замене старой кладки новой проводятся в последовательном порядке отдельными прорезами шириной в 2 *м*, начиная с фундаментов, стен, по направлению к замку свода. При этом производят добор и расширение профиля, если это вызывается требованиями проектных размеров новой обделки.

Одним из эффективных вариантов внутреннего способа, применяемого в практике реконструкции тоннелей, является так называемый *кружальный метод*, отличающийся простотой выполнения (рис. 67). Сущность кружального метода и последовательность работ усматриваются из приводимых фаз производства работ по реконструкции однопутного железнодорожного тоннеля.

I фаза — вырубка штраб в обделке и постановка металлических опорных кружал I № 20 по внутреннему контуру кольца через 1 *м* по длине тоннеля.

II фаза — выломка деформированного свода тоннеля по длине кольца в 2—3 *м* с последовательной постановкой металлических двутавровых балок — лонгарин I № 30 вдоль оси тоннеля, на взаимном расстоянии 1 *м*, с перекрытием деревянными затяжками 5×20 *см*.

III фаза — полная выломка старой кладки по всему контуру с установкой кружал и опалубки и бетонирование новой конструкции обделки.

IV фаза — устройство лотка и дренажа.

Устройство лотка или обратного свода производится в отдельных поперечных траншеях с пропуском подвижного состава по рельсовым пакетам без перерыва движения.

Кружальный метод является весьма простым и удобным, но подлежит дальнейшему усовершенствованию. С применением подвижных кружал и подмостей этот метод даст возможность большей мобильности в производстве работ.

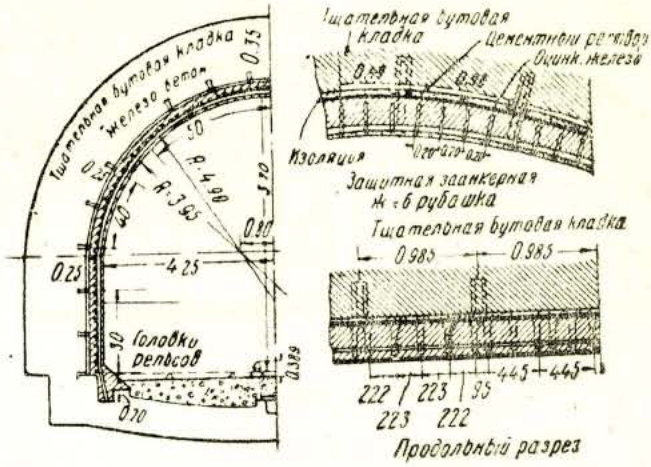


Рис. 677. Гидроизоляция и детали укрепления внутренней железобетонной оболочки

В тех случаях, когда позволяют внутренние габариты и очертание тоннеля, усиление конструкции деформированной обделки может быть осуществлено сооружением внутреннего мощного железобетонного кольца или укладкой металлических тюбинговых колец (рис. 676 и 677). В практике имеются примеры такого усиления: Мадонский тоннель, тоннели Парижского метрополитена и ряд железнодорожных тоннелей Швейцарии.

НОВЫЕ МЕТОДЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ТОННЕЛЕЙ

Реконструкция тоннелей представляет собой наиболее сложную область тоннельного дела. При этом техническое решение задачи затрудняется необходимостью производства работ без перерыва движения. Существующие в практике методы реконструкции тоннельных обделок хотя и позволяют решить поставленную задачу, но сам процесс производства работ протекает весьма медленно, в тесных пространствах подземных разработок, преимущественно кустарным порядком.

Таким образом протекали работы по реконструкции и восстановлению тоннелей.

Однако механизированные методы нашего строительства, в особенности поточно-скоростные приемы, проводимые с успехом при

нормальных тоннельных работах, толкают нас на необходимость изыскания более совершенных и механизированных способов работ и в области реконструкции тоннелей.

Профессором В. Л. Николаи и автором настоящего труда разработаны схемы работ,

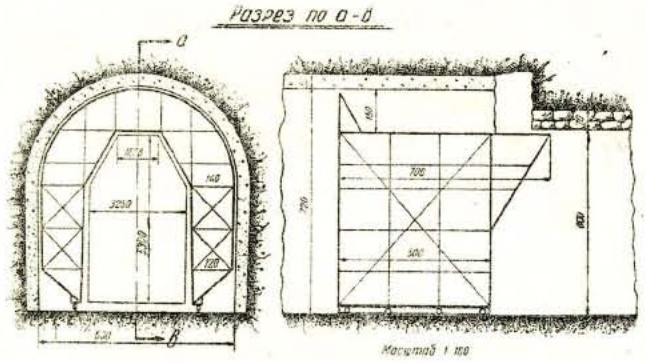


Рис. 678. Система подвижной рамы

которые могут позволить проводить процесс реконструкции тоннелей без перерыва движения, обеспечив: а) темпы производства работ, б) качество работ, в) механизацию трудоемких процессов, г) освобождение от громоздкого временного деревянного крепления, д) безопасность следования поездов по тоннелю в период реконструкции.

Существующие методы реконструкции тоннелей этим требованиям полностью не удовлетворяют.

Разработаны три схемы для работ в условиях устойчивых коренных пород.

Схема 1. Система подвижной рамы. В тех случаях, когда требуется произвести реконструкцию тоннеля, очертание обделки которой не удовлетворяет требованиям габарита на значительном протяжении (в частности, начиная с портала), возможно применить подвижную металлическую раму (рис. 678). Эта рама проектируется с таким расчетом, чтобы, пропуская подвижной состав, образовать рабочее пространство за счет придания большего подъема новому своду, с учетом толщины этого последнего. При этом возникает возможность вести работы по разборке старой кладки, по перебору профиля и по возведению обделки. Рама должна быть оснащена металлическим панцырем по контуру подвижного состава для ограждения от падения кусков породы и кладки на вагоны проходящего поезда. В окна по графику движения поездов с рамы откидываются специальные рабочие платформы, облегчающие доступ ко всему контуру обделки.

Конструкция рамы проектируется на колесах для возможности ее последовательного перемещения; кроме того, она рассчитана на такую прочность, чтобы в случае необходимости при нарастании горного давления могла воспринять последнее при соответствующем усилении конструкции дополнительными несущими элементами, обеспечивая при этом достаточную жесткость системы в целом.

Удаление породы и подача материалов могут производиться рабочим поездом из специальных платформ с мотовозом, подаваемым к раме «в окна».

Схема 2. Система несущих кружал. Идея системы несущих кружал заключается в том, что процесс замены старой обделки новой осуществляется при помощи металлических кружал, используемых в дальнейшем как несущая конструкция новой обделки (рис. 679).

Металлические кружала, монтируемые из отдельных сегментов швеллера I № 30, заводятся в борозды старой кладки на взаимном расстоянии 1,2—1,8 *м*. Далее приступают к разборке старой кладки между двумя смежными кружалами, начиная с замка свода, сверху вниз, с последующей заводкой деревянных затяжек по всему контуру обделки.

В следующей фазе устраивается опалубка, по внутренней поверхности обделки укладывается каркас из гибкой арматуры для связи кружал-швеллеров. Далее, с помощью бетононасоса, установленного в нише, производится нагнетание бетона для возведения новой бетонной обделки. Таким образом создается конструкция железобетонной обделки с жесткой арматурой.

В виде варианта можно между кружалами заводить бетонные блоки, изготовленные заранее заводским способом на поверхности. Установка блоков новой обделки может быть механизирована применением специального блокоукладчика.

Этот прием открывает пути для широкой механизации работ по реконструкции обделки и получения высококачественного тоннеля, сооружаемого быстрыми темпами.

Работы по реконструкции обделки должны проводиться с рабочего поезда из платформ-подмостей, пропускающих подвижной состав нормального габарита, без помех нормальному движению.

Схема 3. Специальный полущит для работ по реконструкции. В тех случаях, когда предполагается проводить работы по реконструкции тоннеля сплошь на большом протяжении (более 200 *м*), даже в условиях мягких, глинистых пород, проявляющих горное давление, устойчивых или плывунных пород необходимо предварительно до начала работ по реконструкции провести искусственное укрепление грунтов, применяя замораживание, силикатизацию и т. д. Однако сложность работ по реконструкции тоннелей в неустойчивых

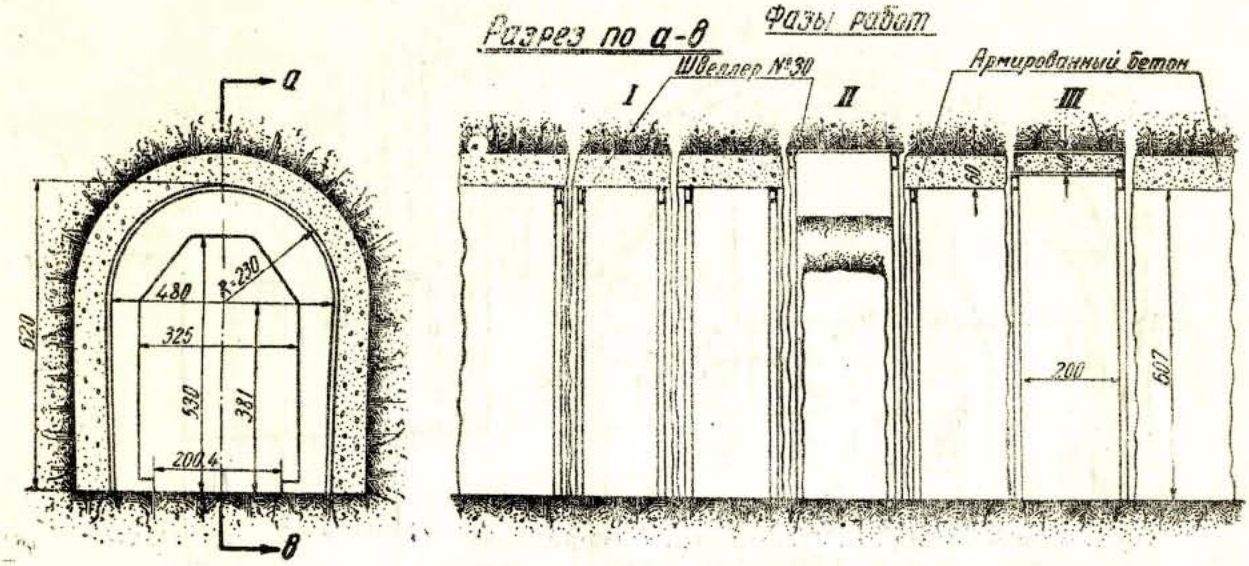


Рис. 679. Система несущих кружал, входящих в конструкцию новой обделки

имеется возможность механизировать работы при помощи специальной системы полущита. Последний имеет внешнее очертание по контуру новой обделки и внутреннее очертание по габариту подвижного состава. Этот полущит, снабженный двумя ногами-опорами (по отметке верхнего строения пути), под действием гидравлических домкратов перемещается на ход поршня. Механизация укладки обделки из готовых бетонных блоков осуществляется при помощи каретки, перемещающейся по внутреннему контуру обделки. Полущит имеет развитый аванбек, закрепляющий впереди кровлю выработки (рис. 680).

Выбранная кладка старой обделки складывается временно на платформы полущита. В окна рабочим поездом подаются строительные материалы, а равно убирается порода и разобранная старая кладка.

Монтаж полущита, в зависимости от местных условий, производится с портала или в специальной щитовой камере в тоннеле.

Все эти три способа реконструкции тоннельной обделки дают возможность вести работы в условиях коренных устойчивых пород. При наличии слабых, сыпучих, непородах может оказаться настолько значительной, что по технико-экономическим соображениям в определенных случаях может представиться более выгодной прокладка нового параллельного тоннеля.

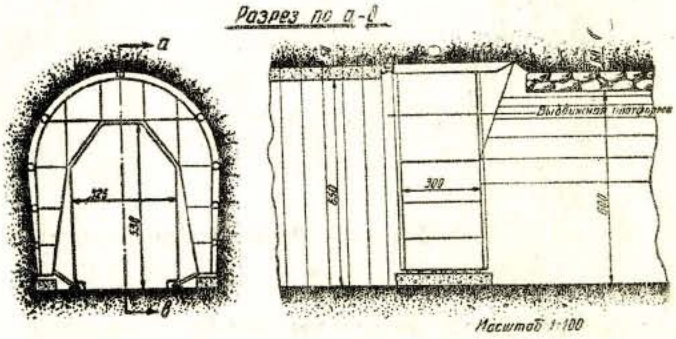
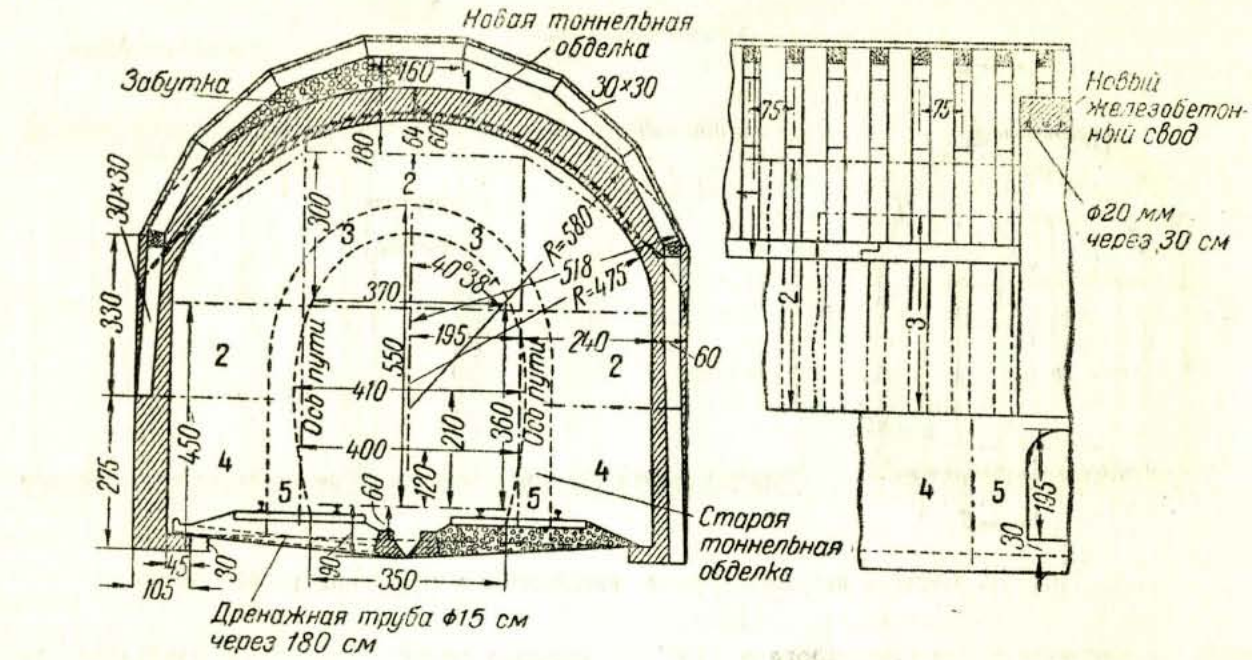


Рис. 680. Схема специального полущита для реконструкции обделки

II. *Реконструкция недеформированных тоннельных обделок.* В связи с возросшими требованиями эксплоатации тип и габариты существующего тоннельного сооружения могут с определенного момента оказаться неприемлемыми. При этом выявляется необхо-

димость в тоннеле более значительного профиля (рис. 681). В таких случаях прибегают к реконструкции тоннеля, если это для данных конкретных условий оправдывается технико-экономическими соображениями и расчетами. При некоторых условиях может преддвижения поездов. Открытие фронта работ ведется из порталов или из люков в замковой части существующего свода, откуда и пробивается верхняя центральная штольня. Затем двухпутный профиль прорезается отдельными штольневыми калоттами, опускаемыми в ко-



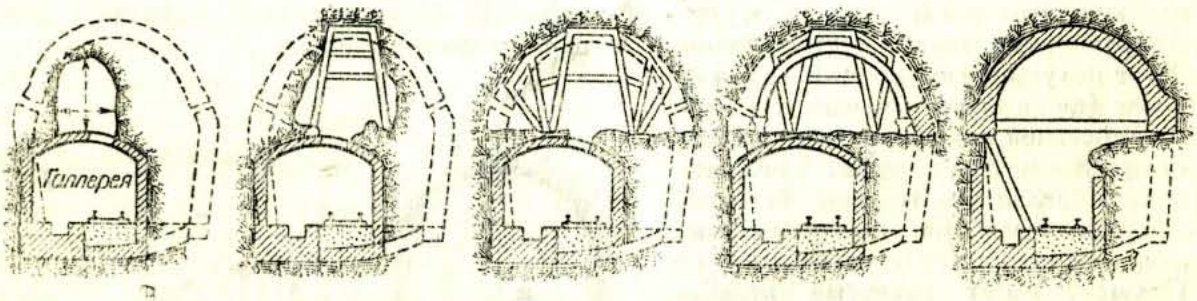


Рис. 681. Реконструкция тоннелей однопутного профиля в двухпутный

ставиться даже более выгодной прокладка параллельно нового тоннеля.

Превращение железнодорожного тоннеля однопутного профиля в двухпутный осуществляется при двух случаях:

а) *Реконструкция тоннеля при совпадении осей однопутного и двухпутного профилей.*

Работы по реконструкции тоннеля при совпадении осей проводятся без перерыва

лодцах до подошвы фундамента, обрамляя существующий однопутный тоннель. Следующий этап — бетонирование фундаментов, стен и свода обделки. Выложив на участке определенного протяжения конструкцию обделки двухпутного профиля, можно без особых осложнений, в окна графика движения, выдать сломанную обделку однопутного профиля за пределы тоннеля.

Следует отметить, что указанной системе работ присущи недостатки изложенного выше

так называемого «внешнего» метода работ. На весь период основных работ движение по однопутному тоннелю не прерывается.

загромождают сечение и являются помехой для нормального движения поездов. Этот способ применялся при реконструкции тон-

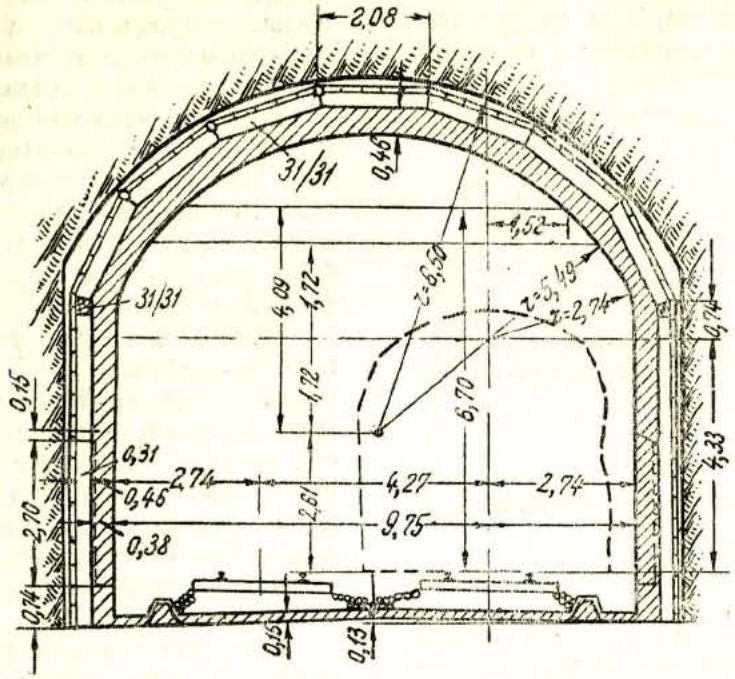


Рис. 682 а. Реконструкция тоннеля однопутного профиля в двухпутный

б) *Реконструкция тоннеля при смещении оси двухпутного профиля от оси однопутного.*

Когда реконструкцию тоннеля намечают провести при смещении осей двухпутного и однопутного профиля (рис. 682 а и б), то имеется в виду использование кладки стены тоннеля и выработанное сечение. Для этого очертание конструкции обделки двухпутного сечения проектируют по возможности совпадающим по кривизне с контуром существующего однопутного тоннеля.

Приступая к работам, обделку последнего берут на временные крепления, поставленные таким образом, чтобы иметь возможность сделать калоттную прорезь и вести дальнейший комплекс работ по выломке старого свода, разработке породы и бетонированию новой обделки. В зависимости от крепости пород работы можно вести аналогично бельгийскому способу с опиранием нового свода с одной стороны на породу, с другой — на старые стены, или австрийским способом раскрытия на полный профиль. При таких условиях, естественно, работы ведутся с перерывом движения, поскольку крепления, рассчитанные на восприятие горного давления,

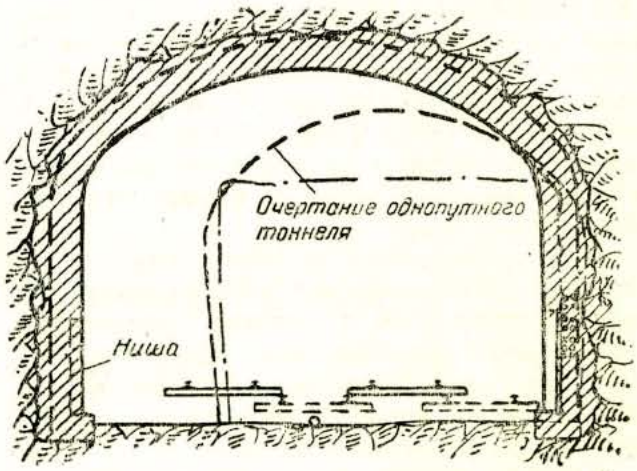


Рис. 682 б. Реконструкция тоннеля однопутного профиля в двухпутный

нелей Рюн-Корк в США, в Швейцарии, на Северных железных дорогах Франции. На рис. 683 показана схема взаимного размещения профилей при реконструкции тоннеля Торнпик.

Можно указать и на прием, позволяющий провести реконструкцию однопутного профиля

на двухпутный без перерыва движения, путем создания спаренного тоннеля (типа *тоннеля-бинокля*), примененного США при реконструкции Бостонского тоннеля. Параллельно существующему тоннелю на расстоянии 5,4 *м* от оси его сооружался с применением трехштольневого метода опорного ядра новый тоннель. Нижняя боковая штольня, примыкавшая к существовавшему тоннелю, была назначена таких размеров, чтобы иметь возможность возвести среднюю мощную стену, на которую должны были опираться оба смежных свода тоннеля-бинокля. Аналогичные конструкции применялись при сооружении переходных камер на горных участках Московского метрополитена.

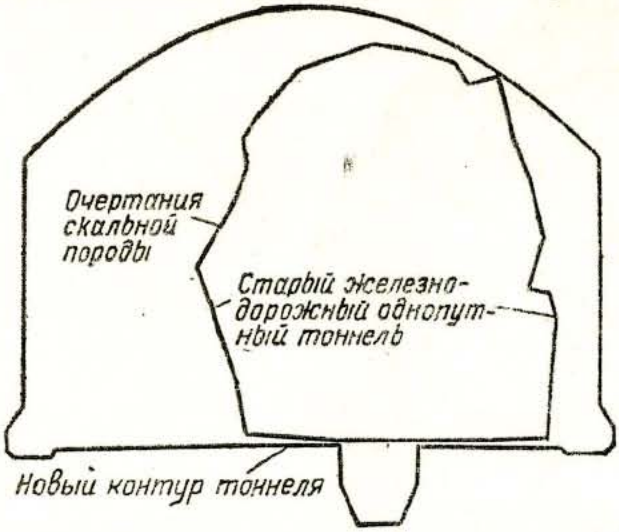


Рис. 683. Схема взаимного размещения тоннельных профилей при реконструкции железнодорожного тоннеля Торнпик (Пенсильванской железной дороги) в тоннель для автомобильного движения

В американской практике при реконструкции однопутного железнодорожного тоннеля в двухпутный с успехом применялось специальное полигональное крепление из стальных рам. Последние устанавливались без нарушения верхнего строения существующего железнодорожного пути.

Работы велись в скальных породах взрывным способом с применением механической лопаты для погрузки породы в вагоны (рис. 684). Во избежание обрушения старой кладки в процессе реконструкции необходимо было обделку укреплять временным металлическим креплением кружального типа.

* * *

Реконструкция железнодорожного тоннеля Круа де л'Орм. Железнодорожный тоннель линии Лион — Сент-Этьен протяжением 2081 *м* пересекает напластования сланцев, песчаников и выклиниваний глин и залегает на глубине от 10 до 50 *м* от поверхности. Во время сооружения тоннеля сланцеватые породы, соприкасаясь с водой, значительно увеличивались в объеме, проявляли тенденцию «дышать» и создавали усиленно нараставшее давление на крепи. Вследствие этого уже в период строительства готовые тоннельные кольца двухпутного профиля претерпевали значительные деформации и в некоторых местах обрушивались. В связи с этим решено было усилить конструкцию постоянной каменной обделки.

Необходимо было устроить дополнительную, усиленного типа внутреннюю обделку, преобразовав пройденный тоннель двухпутного профиля в однопутный. Однако трудности эксплоатации дороги, созданные однопутным тоннелем, при развитии движения, вынудили администрацию железных дорог Париж—Лион—Средиземное море поставить вопрос о сооружении здесь двухпутного тоннеля.

Техническое решение этого вопроса могло пойти по двум направлениям: первое — создание второго однопутного тоннеля, параллельно существующему; второе — реконструкция имеющегося однопутного тоннеля в двухпутный без перерыва движения поездов. Дорогой был объявлен конкурс на проект наиболее эффективного решения. В результате был одобрен проект реконструкции существующего однопутного тоннеля в двухпутный. Полностью этот проект был принят

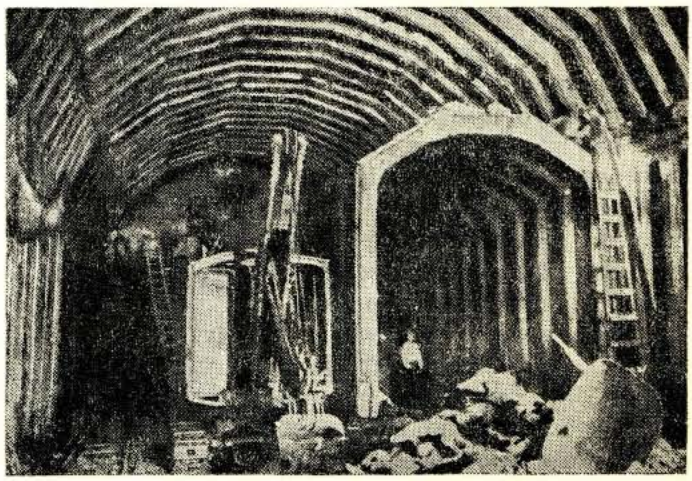


Рис. 684. Работа механической лопаты при реконструкции тоннеля

после проходки опытного участка протяжением 50 *м*.

Сущность запроектированной системы заключалась в следующем. Над шелыгой свода вдоль оси тоннеля была пройдена направляющая штольня. Вначале штольневые рамы были деревянные (рис. 685 а); при нарастании горного давления устраивали каменное крепление их, а потом перешли на металлические рамы, поставленные через каждые 1,2 *м* (рис. 685 б). Штендеры опирались непосредственно на кладку существующего каменного свода. Затем малыми частями, кольцами в 2,4 *м*, производилось раскрытие объемлющего калоттного профиля с опиранием штендеров на кладку обделки, как на опорное ядро (рис. 685 в). После разломки в пройденных заходках внешнего свода обделки штендеры перекреплялись на кладку свода внутренней обделки. Вслед затем на внешнюю поверхность последней укладывались специальные листы толя и возводилась кладка нового свода толщиной в ключе 0,8 *м*, а в пятах 1,2 *м* при использовании внутренней обделки как кружал.

Далее, временные деревянные крепления удалялись, а пространство рабочих выработок заполнялось бетоном (рис. 685 г). Пневматическими инструментами отбивался существующий внутренний свод и стены однопутного профиля.

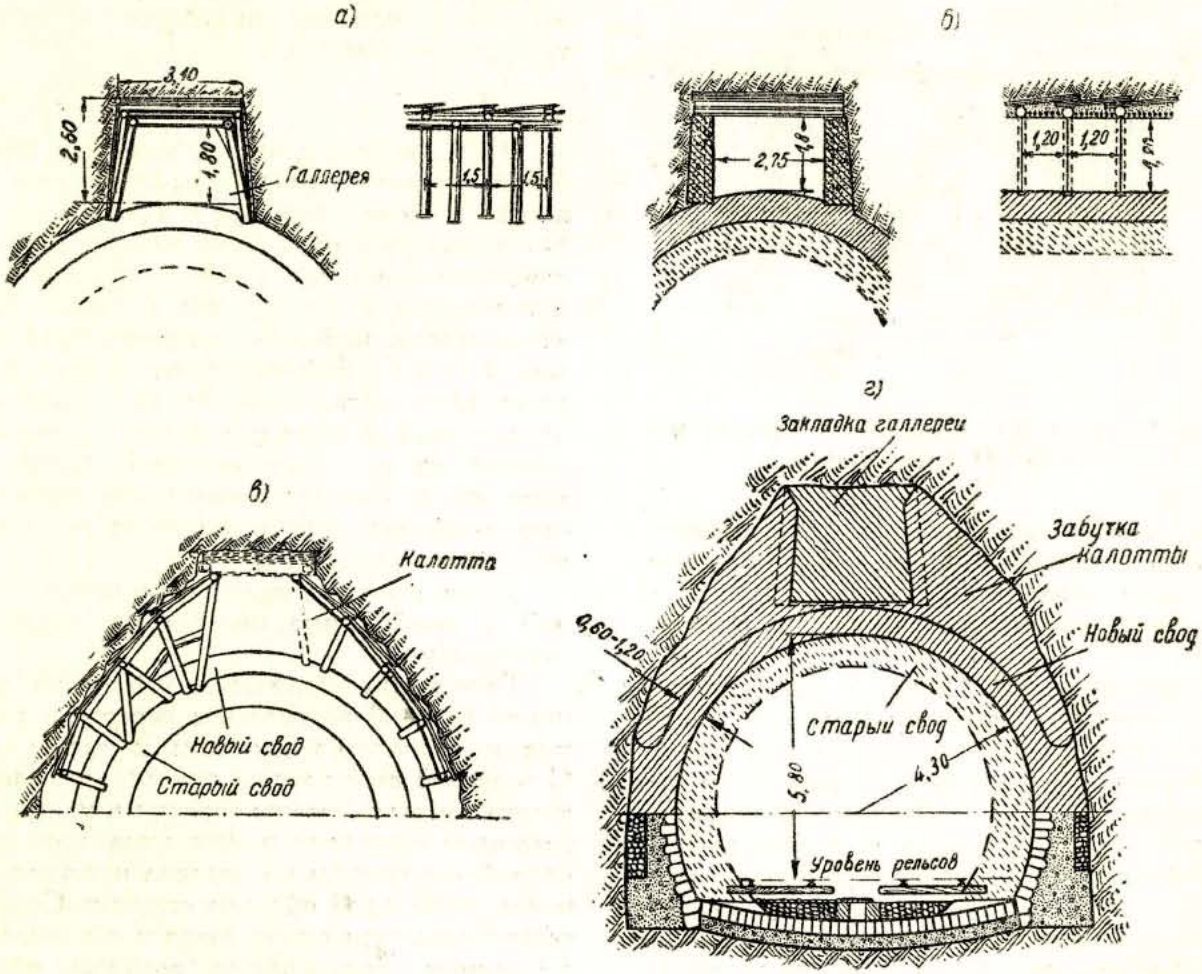


Рис. 685 а, б, в, г. Фазы работ по реконструкции тоннеля Круа де л'Орм

Тоннельные работы по реконструкции обделок велись с двух забоев. Северный участок имел протяжение 1 107 *м*, южный—974 *м*.

Для заполнения всех пустот и обеспечения пассивного отпора окружающего грунта за обделку производилось нагнетание цементного и известкового растворов. Никаких деформаций вновь устроенных обделок обнаружено не было.

* * *

Реконструкция тоннеля метрополитена у станции Эколь Милитер (Париж). В виде примера приводится описание реконструкции двухпутного тоннеля в трехпутный у станции Парижского метрополитена Эколь Милитер.

Работы по реконструкции, которые изучал автор, были предприняты в связи с прим

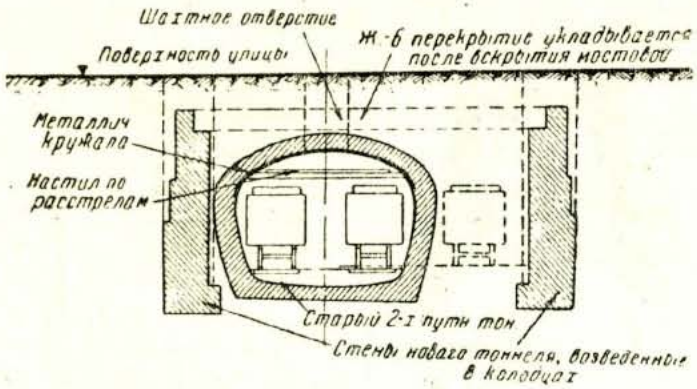


Рис. 686. Реконструкция двухпутного тоннеля метрополитена в трехпутный

канием новой линии по Рю де Коммерс. Основным требованием было ведение работ при полном обеспечении непрерывности движения поездов метрополитена на данном участке.

Реконструируемый тоннель проходит непосредственно под Пляс де Инвалид. Здесь без стеснения уличного движения был огорожен участок, и работы производились комбинированным способом. Двухпутный тоннель сводчатого профиля входил в сечение нового трехпутного тоннеля, представляющего две бетонные стены с плоским железобетонным перекрытием (рис. 686).

Предварительно реконструируемый сводчатый тоннель был взят на временные крепления из металлических двутаврового профиля кружал, по внутренней поверхности свода. Под пяты кружал были подведены штребля, вне габарита подвижного состава. Кружала поставлены друг от друга на расстоянии 1,6 *м*. По пятам кружал были расставлены тиранты и на них уложен дощатый помост, необходимый для производства работ. Установка этих кружал производилась ночью, в период приостановки движения поездов.

Устройство стен велось сверху, в колодцах, пройденных забивной крепью, в условиях песчаных грунтов естественной влажности.

Далее, отдельными участками, частично пользуясь устроенным настилом, производили укладку арматуры и бетонировали балки несущего перекрытия, перерезавшего свод тоннеля, не засоряя верхнего строения пути.

После устройства основной конструкции тоннеля в виде бетонных стен и плоского железобетонного перекрытия ночью производили разборку свода, стен и выборку земляного массива, входящего в профиль трехпутного тоннеля.

* * *

III. *Реконструкция перегонного тоннеля метрополитена в станционный.* Условия эксплоатации метрополитена и влияние архитектурно-планировочных и городских факторов, изменение характера людских потоков и т. д. могут привести к тому, что с точки зрения эксплоатации всей сети метрополитена в целом, в связи с работой других видов городского транспорта, окажется необходимым создание новой станции метрополитена непосредственно на оси существующей линии. При этом встает сложная тоннельно-строительная задача превращения однопутного перегонного тоннеля в станционный.

Опыт реконструкции перегонных тоннелей в станционные имеется на лондонском Андерграунде.

Тоннельно-строительные работы по удлинению станций ведутся без перерыва движения и сводятся в основном к следующему. С торцовой стены конца станции, у устья путевого тоннеля, делают заходку в ключе и отдельными секторами сверху вниз производят разработку породы по ширине чугунного сегмента тоннельной обделки станции. Сегменты устанавливаются снизу вверх и сбалчиваются с соседним станционным кольцом обделки (рис. 687, 688).

Работы производятся с опиранием крепления на внешнюю обделку путевого тоннеля, как на центральное ядро.

Порода транспортируется ночью специальными рабочими поездами, подходящими к платформам подземных станций (рис. 689).

В условиях лондонской плотной глины при работе пневматическими лопатами и постановке сегментов без эректора темп работ по реконструкции перегонного тоннеля в станционный выражался около 1,5—2 *м* в неделю. Эта производительность была достигнута при удлинении станций Холборн и Ченсери Лэйн.

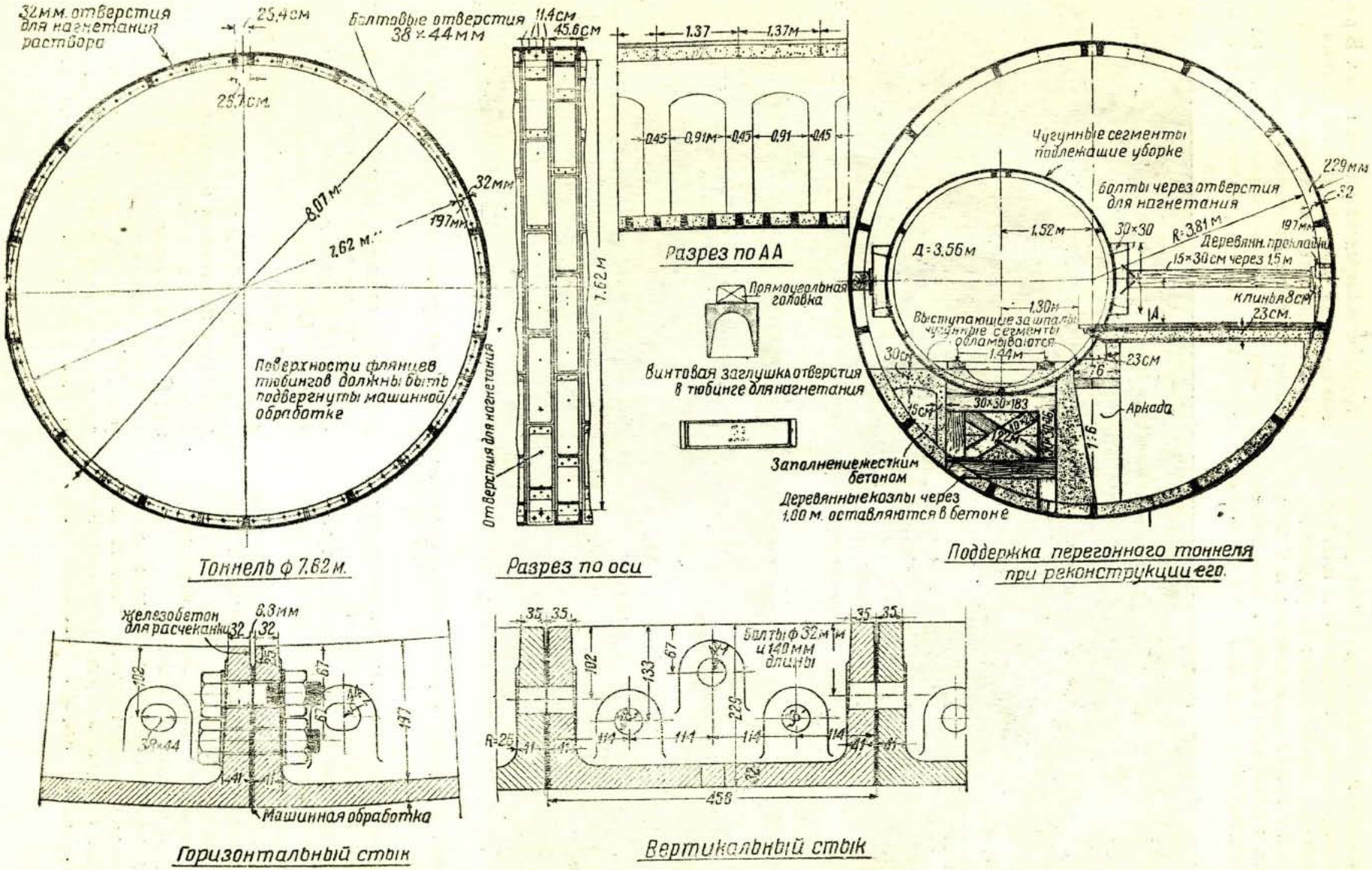


Рис. 687. Реконструкция перегонного тоннеля метрополитена в станционный тоннель

По окончании тоннельных работ удлинение железобетонных станционных платформ не представляет строительных затруднений.

В зависимости от расположения и подхода эскалатора к платформам станций приходится строить подходные галлереи и мосты, часто пересекающие сводчатую часть профиля перегонных или станционных тоннелей.

Сооружение внутренних мостов, пересекающих станционные тоннели, производится в следующем порядке.

На металлическом креплении рамного типа прямоугольного сечения из двутавров, с применением металлических затяжек, предпринимается проходка подходных коридоров, включающих переходные мосты.

Из кирпича с повышенным сопротивлением предварительно выкладываются стены-своды, назначенные передавать через укладываемые балки нагрузку от несущей мостовой конструкции непосредственно на грунт. В рамную конструкцию прямоугольного сечения вписываются сегменты верхней половины тюба с опиранием на кирпичную кладку.

Борта подходных коридоров по плоскости сечения сводов закрываются с двух сторон

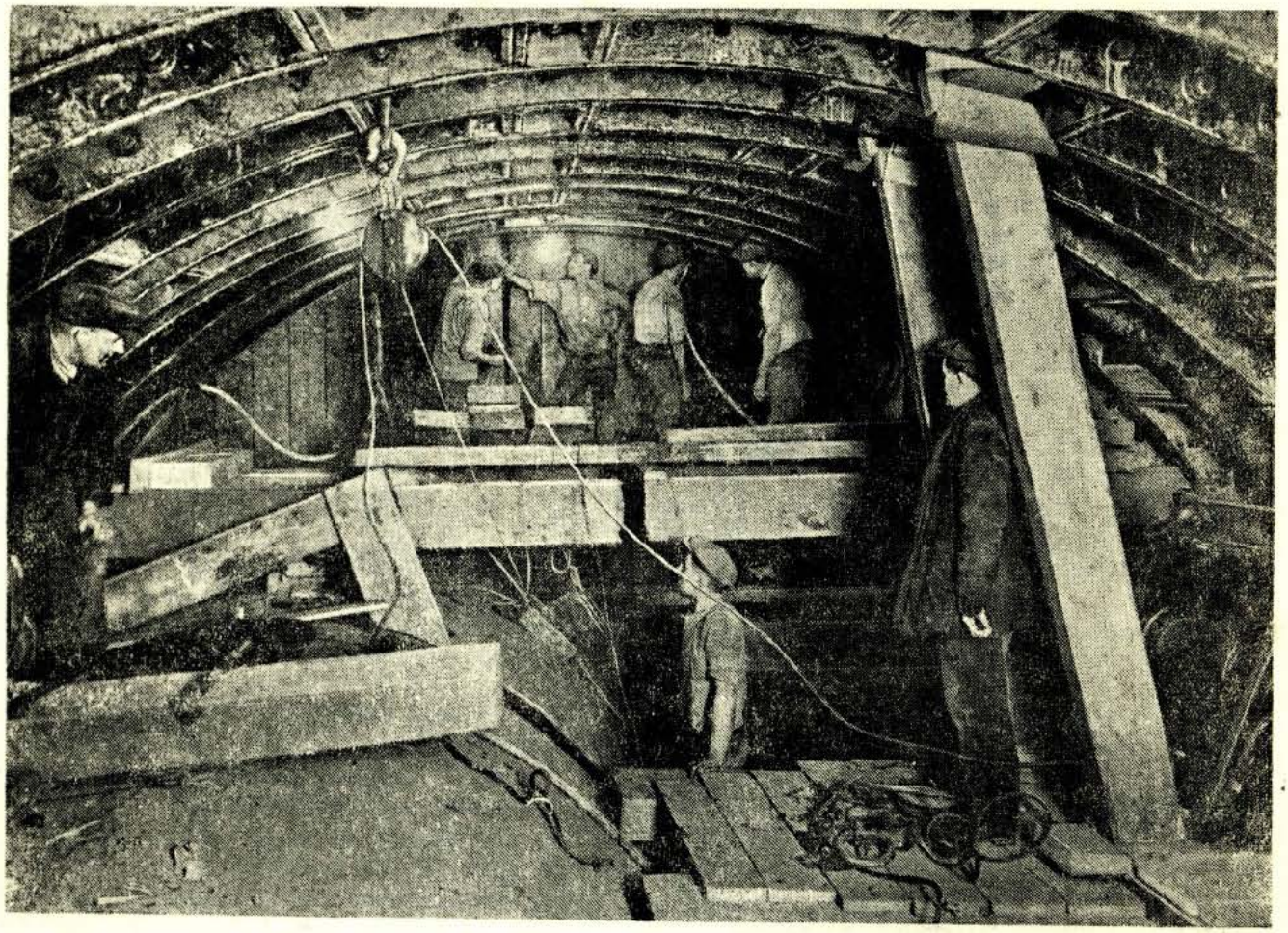


Рис. 688. Вид работ по реконструкции перегонного тоннеля метрополитена в станционный тоннель без перерыва движения

сплошной стенкой, склепанной из листов котельного железа толщиной в 12 *мм*, принимающей участие в работе мостового перекрытия. Очень часто устраивают двойную стенку в целях проведения вентиляционных ходов.

Большие работы по реконструкции существующих перегонных и станционных тюбов производились в свое время на линии Сити энд Сауз лондонского Андерграунда.

Реконструкция перегонного тюба диаметром 3,19 *м* в тюб' диаметром 3,56 *м* велась при помощи щита системы Гретхэда. Щит диаметром 3,76 *м*, длиной 2,21 *м* состоял из

пяти металлических листов толщиной 12,7 *мм* с накладками (такой же толщины) и имел впереди открытую грудь диаметром 3,25 *м*. Таким образом, щит телескопически входил в существующий тюб диаметром 3,19 *м*, не нарушая габарита поездов метрополитена. Работы интенсивно велись только в ночное время. Движение поездов днем происходило без нарушения графика (рис. 690).

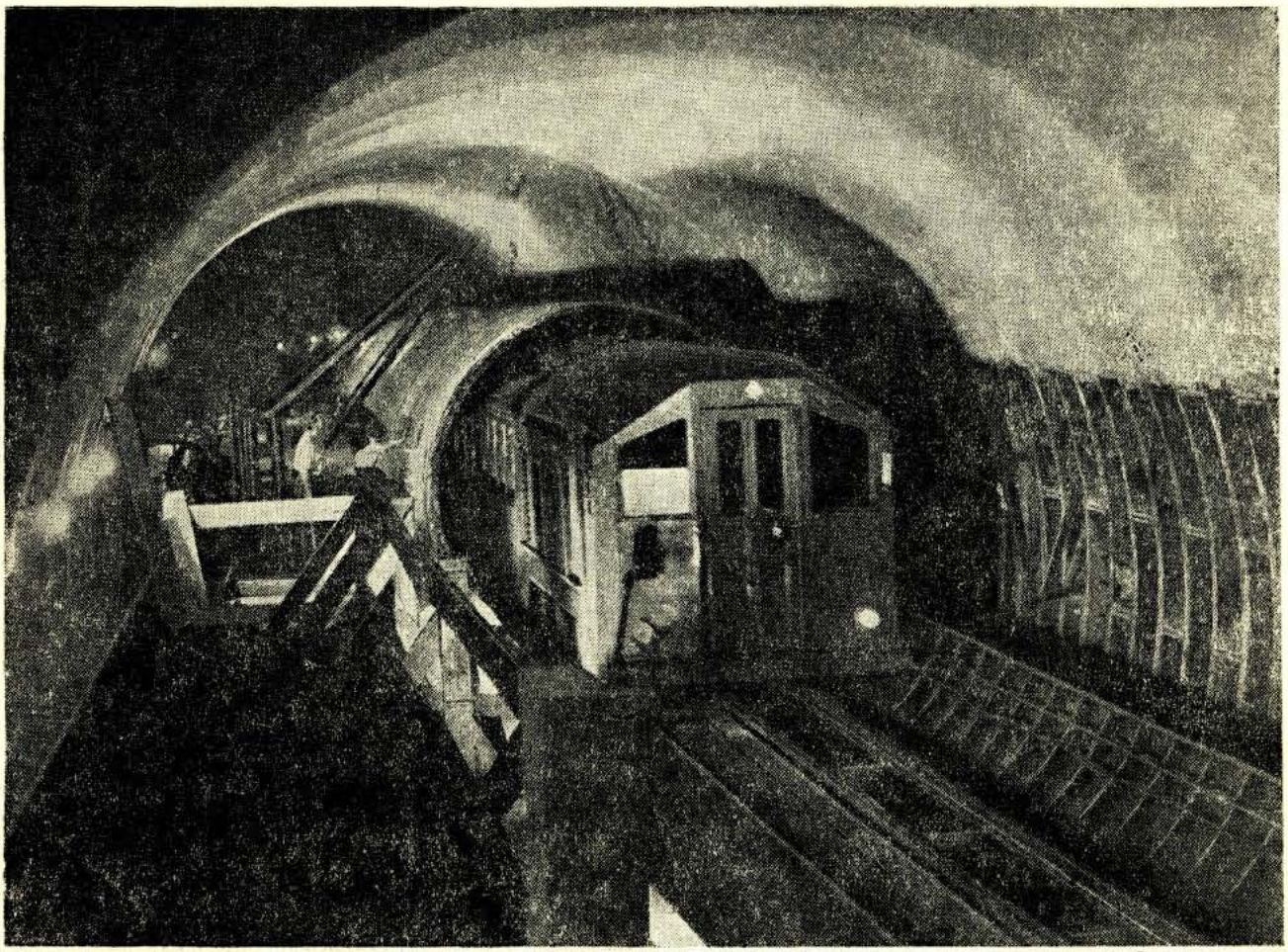


Рис. 689. Реконструкция перегонного тоннеля метрополитена в станционный тоннель без перерыва движения

Впереди щита разбирались чугунные тюбинги реконструируемого тоннеля. Основные сегменты снимались без какой-либо порчи их. Повреждения получали лишь некоторые из ключевых сегментов. Значительной ржавчиной были покрыты болты. Щит продвигался вперед при помощи десяти гидравлических домкратов диаметром 18 *см*.

Вначале работы по реконструкции тюба щитовым способом шли весьма медленно. За ночь укладывалось одно-два кольца. Впоследствии, однако, производительность возросла и доходила до 16,76 *м* в неделю. Немедленно по окончании ночных работ сечение щита освобождалось от временно установленных там баков, гидравлических насосов, оборудования, так чтобы беспрепятственно пропускать поезда метрополитена.

При производстве работ по реконструкции перегонных тюбов в лондонской глине при помощи щита не было никаких особых осложнений. Однако при реконструкции участка тоннеля, проложенного в свое время в слабых грунтах, имела место значительная по своим последствиям строительная катастрофа. Когда в забое при выемке старых сегментов тюба встретились с контактом включений водоносных песков, то на это обстоятельство сначала не обратили долж-

ного внимания. Ночные работы были прекращены обычным порядком. Когда же началось движение поездов метрополитена, то вследствие вибрационных сотрясений окружающих грунтов, приведенных, кроме того, в движение от тоннельных работ по реконструкции, произошел обвал грунта в тоннеле. Обрушилось около 380 $м^3$ песка, причем часть грунта настигла крышу последнего вагона поезда. На поверхности образовалась значительная воронка глубиной 3,7 *м* и диаметром до 15 *м*. В момент обвала лопнул газопровод диаметром 2 *м*, произошел взрыв, причем газ горел затем в продолжение семи часов. Впоследствии лопнула водопроводная магистраль диаметром 38 *см*, и вода по воронке устремилась в тоннель. В результате тоннель был завален водоносным песком, который лег под уклоном 1 : 7.

Движение по улице, где произошла катастрофа, было закрыто. Для ликвидации аварии немедленно приступили к бурению трубами диаметром в 10 *см* с поверхности до обделки тюба и произвели нагнетание раствора для укрепления приведенного в движение окружающего грунта. Было «загнано» около 45 *т* цемента и 10 *т* извести. С момента аварии движение на улице было восстановлено лишь через 1,5 месяца.

Освобождение тоннеля от грунта и восстановление его велось под сжатым воздухом. При помощи двух кирпичных перемычек толщиной по 1,15 *м* была образована шлюзовая камера длиной 4,10 *м*, оборудованная металлическими дверями. Работы производились под давлением 0,7 *кг/см²*, при производительности компрессорной установки 84 $м^3/мин$. Тоннель был полностью освобожден от завала породы лишь через 2 месяца после аварии.

С целью уменьшения текучести грунта и ограждения от утечки и прорывов воздуха в слабых грунтах применялась забивка глиной, а равно нагнетание извести с опилками.

Монтаж сегментов тюбов производился эректором, укрепленным на металлической раме. Эректор телескопически выдвигался в радиальном направлении и вращался при зубчатой и червячной передаче от двух пневматических моторов в 5 *л. с.* При этом эректор совершал один оборот в 4 минуты. В процессе дальнейших работ были приспособлены для монтажа чугунных сегментов перегонных тюбов лебедки. При тюбингах весом в 650 *кг*, которыми приходилось манипулировать на работах по реконструкции больших станционных тоннелей, применение эректора уже давало значительный эффект. Реконструкция тюбов больших профилей практиковалась главным образом в сочетании с пилот-системой (рис. 691 и 692); предварительно проходился один или два пилот-тоннеля, на которых, как на опорное ядро, раскрывался требуемый профиль.

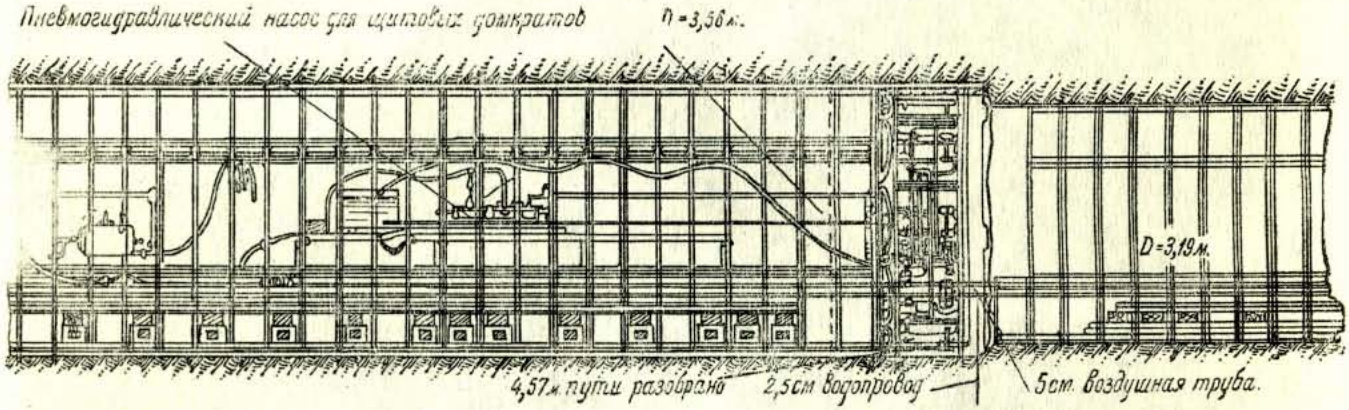


Рис. 690. Реконструкция перегонного тоннеля метрополитена при помощи щита без перерыва движения поездов

IV. *Местная реконструкция и восстановление тоннеля.* Местная реконструкция и восстановление тоннеля по отдельным элементам обделки не представляет собой ничего исключительного. Отдельные дефектные части фундаментов, стен и свода должны разбираться небольшими участками с особой

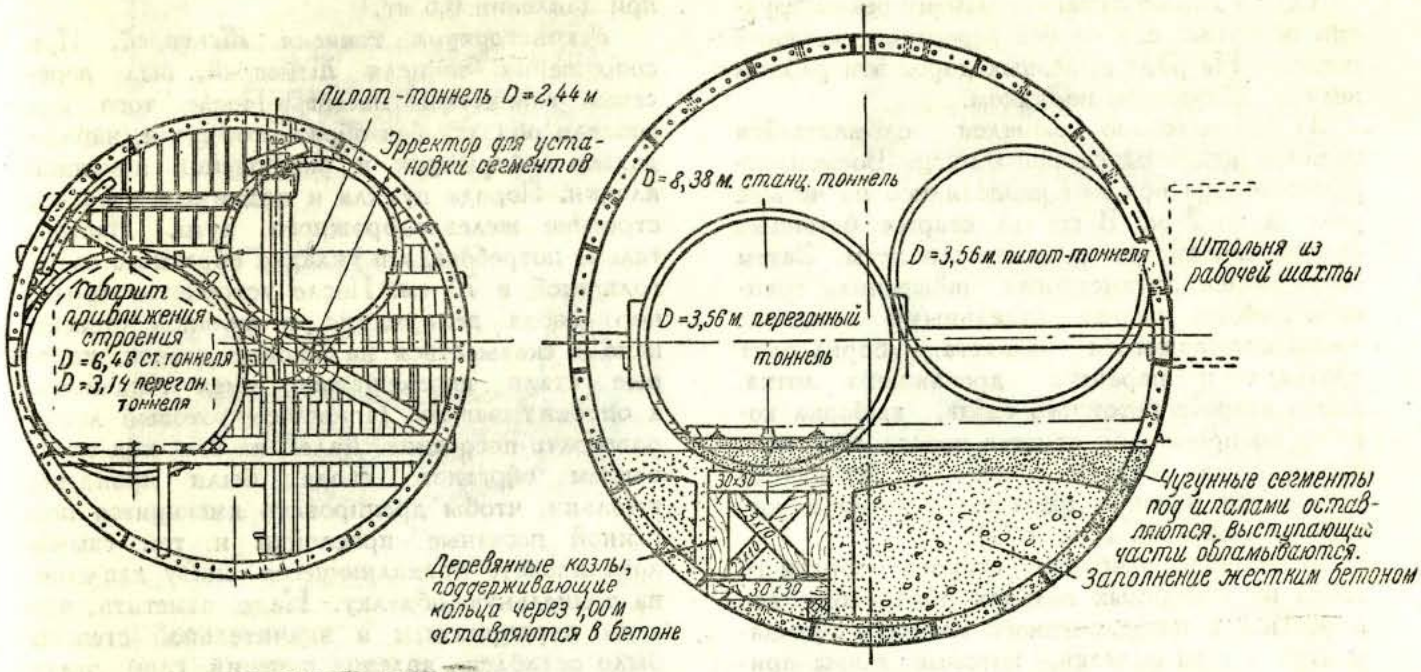


Рис. 691. Реконструкция перегонных тоннелей в станционные при помощи дополнительных пилот-тоннелей

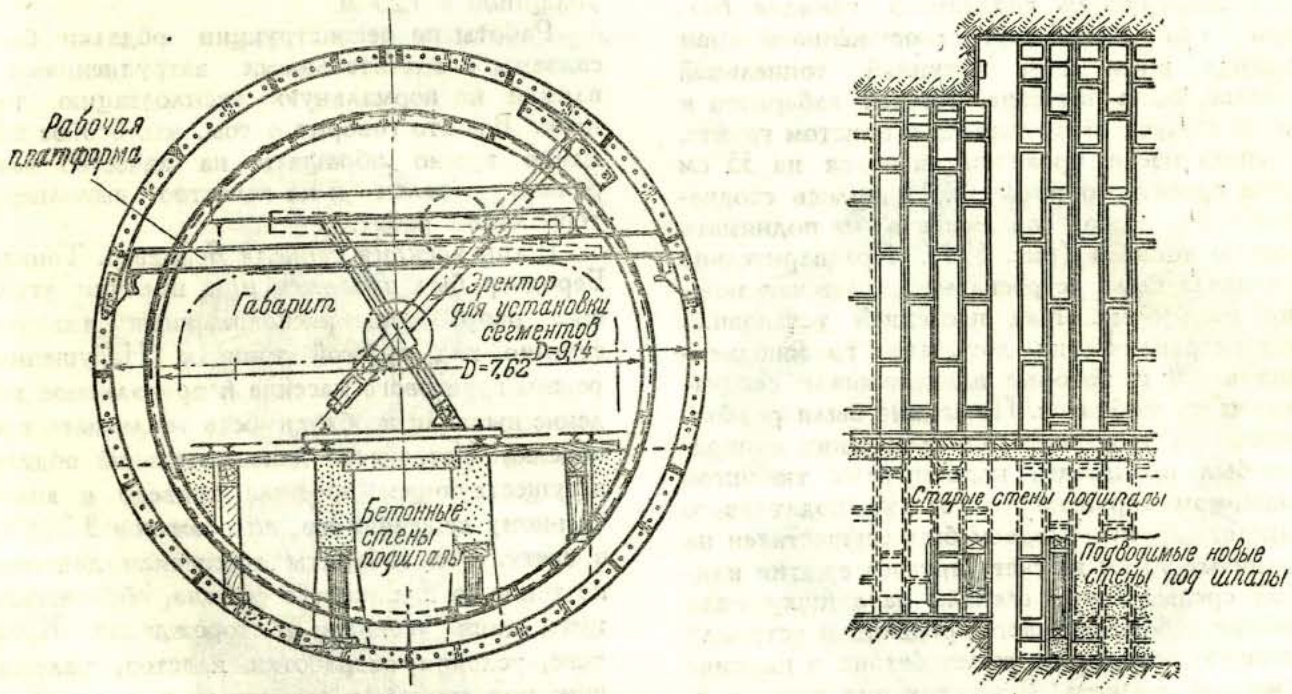


Рис. 692. Реконструкция Лондонского метрополитена (схема работы эрректора для установки тюбингов)

тщательностью и осторожностью. В нужных случаях должны применяться временные крепления.

Особо можно отметить момент реконструкции обратных сводов без перерыва движения поездов. На ряде железных дорог эти работы велись следующим порядком.

Предварительно ломался слежавшийся балласт железнодорожного пути. Восьмиметровые кольца обделки разделялись на четыре участка по 2 *м*. В гнезда старых бетонных сводов заводились рельсовые пакеты. Затем вскрывалась двухметровая поперечная траншея. Работы велись отдельными этапами: ломка слежавшегося балласта, уборка плит тротуара и парапета дренажного лотка, ломка старого бетонного свода, выборка породы по проектной отметке нового обратного свода (из бетона или из бетонитов) устройство нового дренажного лотка и восстановление пути (рис. 693).

В период разборки старого обратного свода на отдельных кольцах обнаружилась дефектность выщелоченного материала фундаментов и стен обделки, которые также пришлось восстанавливать.

ПРИМЕРЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ТОННЕЛЕЙ ИЗ МИРОВОЙ ПРАКТИКИ ТОННЕЛЕСТРОЕНИЯ

Реконструкция подводного тоннеля Батери под Ист-Ривер, сооруженного при помощи щита при чугунной тоннельной обделке, была вызвана потерей габаритов в связи с опусканием тоннеля в илистом грунте. Тоннель после проходки сказался на 35 *см* ниже проектного профиля. Пришлось сводчатую часть тюба разламывать и поднимать кровлю тоннеля (рис. 694). Предварительно в тоннеле была устроена металлическая мощная платформа. Над последней установили ряд гидравлических домкратов грузоподъемностью 60 *т*, которые поддерживали сводчатую часть тюбингов. Последние были разболчены. Под действием гидравлических домкратов был произведен подъем этих тюбингов поджимом окружающего весьма податливого илистого грунта. Подъем был осуществлен на величину 90 *см* за счет упругого сжатия илистой среды. Затем сделали раздвижку ряда тюбингов боковых частей обделки и устроили несущую обделку из железобетона и кирпича в четыре переката. Реконструкция этого тоннеля была произведена на протяжении до 800 *м*.

Следует отметить, что работы, во избежание выплыва грунта и прорывов воды в тоннель, производились под сжатым воздухом при давлении 0,6 *ат*.

Реконструкция тоннеля Женеврей. При сооружении тоннеля Женеврей был пересечен глинистый массив. После того как возвели обделку без обратного свода, наблюдались деформации и разрушения каменной кладки. Порода пучила и поднимала верхнее строение железнодорожного пути. Настоятельно потребовалась укладка обратного свода толщиной в 70 *см*. После устройства обратного свода деформация в сильной степени начала сказываться на боковых стенах, которые стали перемещаться, имея тенденцию к опрокидыванию. Пришлось готовый лоток разрезать посредине. Далее, на 8 *м*, под основанием обратного свода, были пройдены штольни, чтобы дренировать имеющиеся под глиной песчаные прослойки и тем самым локализовать проявляющееся снизу давление на тоннельную обделку. Надо отметить, что этим мероприятием в значительной степени было ослаблено явление пучения глин снизу вверх, но все же дальнейший процесс деформации продолжался. Полное прекращение явлений разрушения тоннеля было получено после того, как существующие стены были укреплены из штольни рядом контрфорсов толщиной в 1,25 *м*.

Работы по реконструкции обделки были связаны с значительными затруднениями и влияли на нормальную эксплоатацию тоннеля. Все это говорит о том, что особое внимание нужно обращать на качество материалов обделки и на качество выполнения тоннельных работ.

Реконструкция тоннеля Бородьер. Тоннель Бородьер был проложен при наличии угольных разработок, расположенных непосредственно под трассой тоннеля. Нарушенный режим грунтового массива и проявляемое давление выявили необходимость усиленного типа обделки. Устройство дополнительной обделки в существующем профиле привело к значительному сужению его, до размеров $3{,}5 \times 4$ *м* в свету. Эти габариты обеспечили движение по тоннелю подвижного состава, обслуживающего лишь угольное месторождение. Кроме того, условия разработки пластов, залегающих под тоннелем, приводили к осадкам последнего и к непрерывному сужению профиля его.

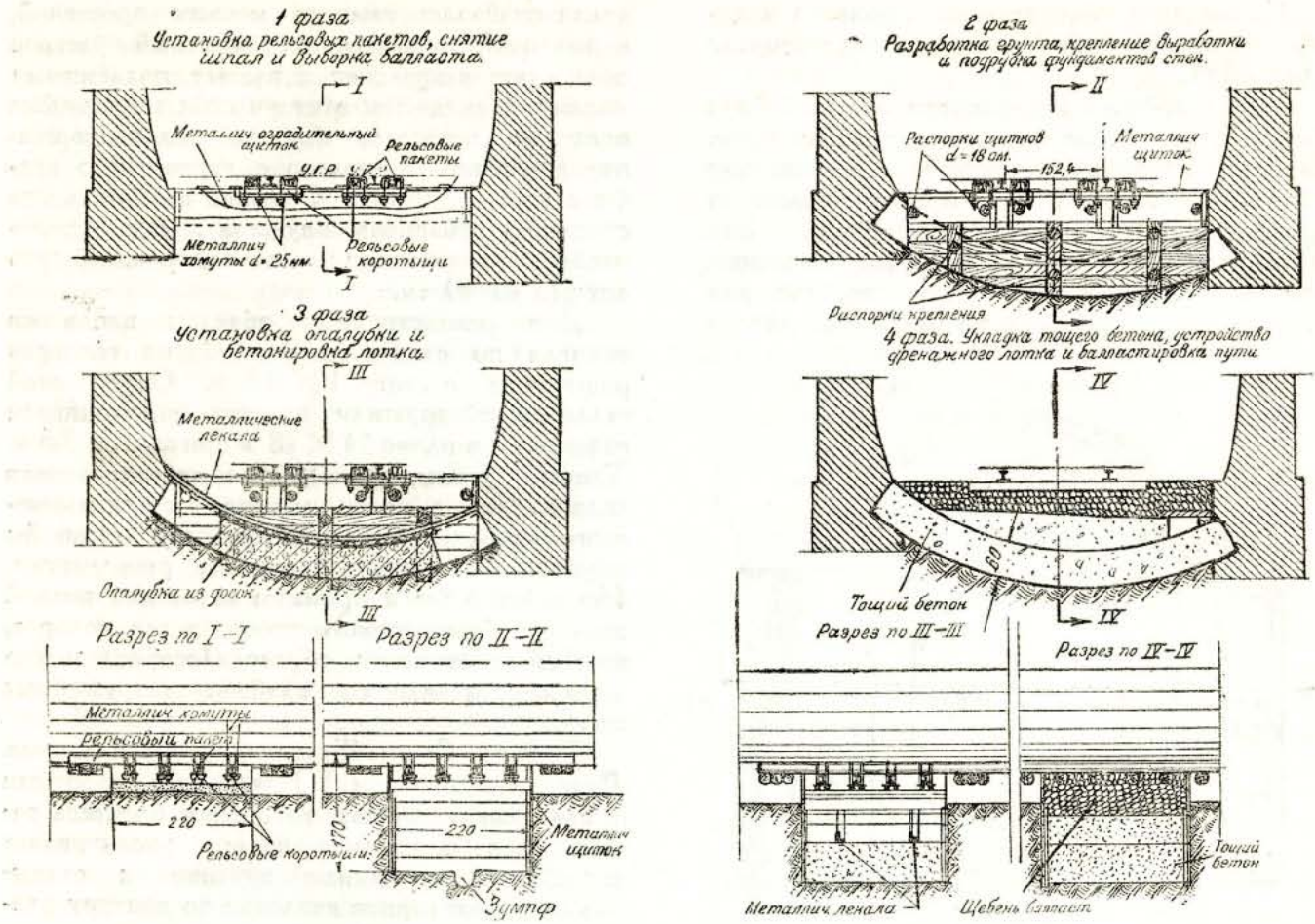


Рис. 693. Реконструкция обратного свода обделки

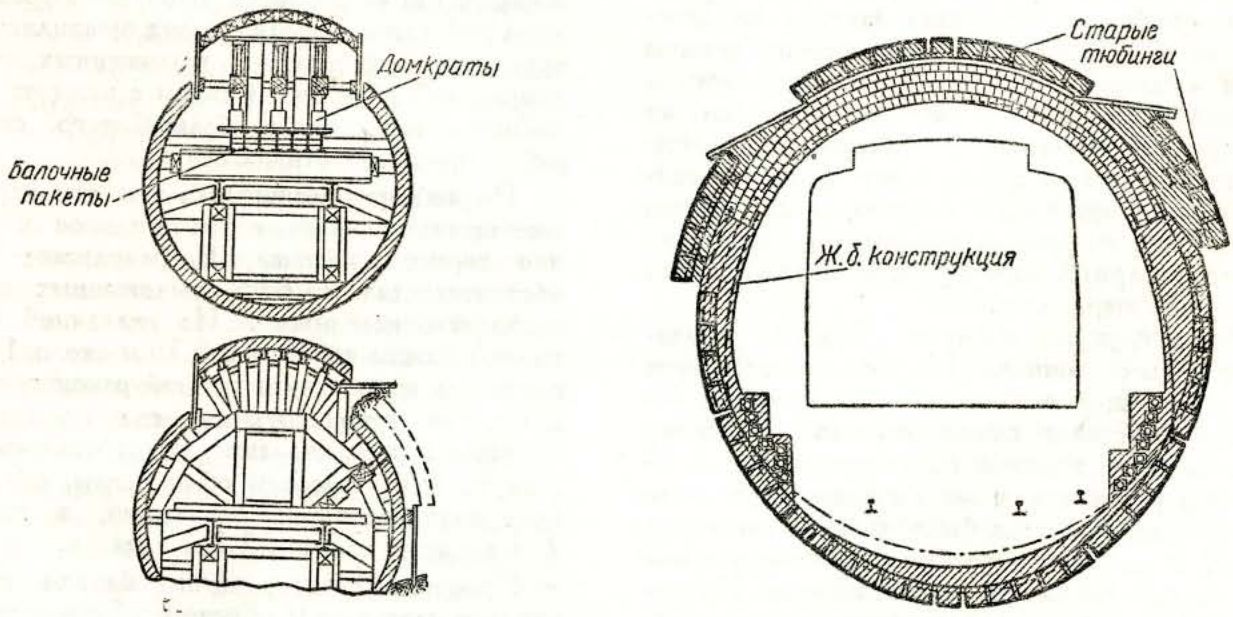


Рис. 694. Тоннель Баттери (реконструкция)

Сумма этих обстоятельств привела к необходимости полной реконструкции тоннеля (рис. 695).

По внутренней поверхности обделка была взята на временное металлическое крепление. Затем пройдены специальные нижние штольни по внешним боковым граням стен обделки, на временном деревянном креплении. Эти штольни были взяты на каменное крепление, причем в середине оставлено отверстие для прохода и возможности пропуска материалов

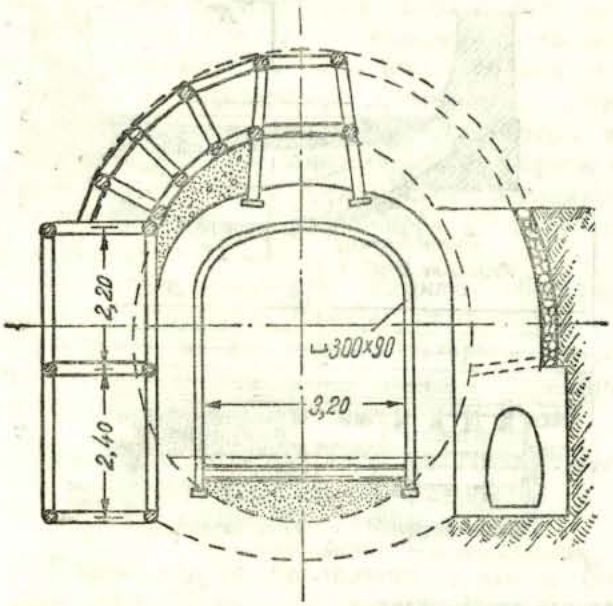


Рис. 695. Тоннель Бородьер (схема реконструкции)

и выдачи породы. Над этими двумя штольнями пройден второй ярус штолен на деревянном креплении и выложены стены и пяты свода будущей обделки. Последним этапом явилась проходка центральной штольни по оси существующего свода, раскрытие калотты и устройство свода с опиранием на стены, возведенные в штольнях второго яруса. Таким путем была сооружена тоннельная обделка по новому габариту, на нее уже не влияли осадки от горных выработок.

Реконструкция тоннеля Марней. Железнодорожный тоннель Марней протяжением 199 *м* заложен в массиве известняков и частично пересекает синий мергель. В период эксплоатации тоннеля на определенном участке обнаружилась сильная водопроницаемость его. Каменная кладка была обильно насыщена водой. В одном кольце было установлено выпадение группы камней из замка свода. Произведенным в обделке тоннеля бурением выявлено, что толщина свода и стенок тоннельной обделки оказалась намного меньше проектной, нормальной толщины и цементный раствор полностью выщелочен и вымыт подземными водами. Немедленно этот участок тоннеля был взят на кружала, причем железнодорожное движение переведено с двухпутного графика на однопутный. С целью минимального стеснения габаритов кружала были установлены металлические и железнодорожный путь опущен на 40 *см*.

Для реконструкции обделки вдоль оси тоннеля, по своду, была пройдена галлерея размерами в свету $1 \times 0{,}8$ *м*. Около этой галлереи обнаружили пустоту над тоннелем размерами в плане 14×18 *м* при высоте 3,5 *м*. Таким образом, выявилась непосредственная угроза отрыва части массива и динамического удара на свод обделки. Это могло бы привести к катастрофическим результатам. Немедленно были приняты меры для полной забутки обнаруженного пространства, которое, по всей вероятности, образовалось вследствие размыва и выноса слабых, разрушенных пород.

Тоннель Ронго. Железнодорожный тоннель Ронго протяжением 8,3 *км* был сооружен в сланцевых породах, которые в процессе работ под влиянием воды, увеличиваясь в объеме, проявляли пучение и оказывали сильное горное давление по контуру разрабатываемого профиля.

Вначале был применен бельгийский способ производства работ и представлялось возможным опирать свод на пересекаемые породы. Но в процессе выборки штроссного ядра действием пучения пород выявились значительные деформации выложенных сводов тоннельной обделки. В связи с этим от дальнейшего применения бельгийского способа работ пришлось отказаться.

Положение осложнялось тем, что нарезанные штольни вызвали значительное нарушение горного массива. В результате этого обстоятельства до 63% выложенных сводов оказались негодными. Из указанной выше полной длины тоннеля в 8,3 *км* около 1 870 *м* пришлось подвергнуть полной реконструкции. В местах реконструкции, где проявлялось большое горное давление, потребовалось прибегнуть к тоннельным облицовкам, обладающим значительными размерами, а именно: 2 *м* в ключе свода и 2,5 *м* в пятах.

Процесс реконструкции обделки производился следующим образом. Деформированный свод предварительно брался на кружала

и подкружальные крепления. Нарезался в замковой части направляющий ход, включающий вышеприведенную толщину свода в замке 2 *м*. Этот ход расширялся в калоттный профиль, который по своим значительным размерам приводил к необходимости крепления его по австрийскому способу.

Закладка стен производилась в колодцах, которые опускались из раскрепленной временным деревянным креплением калотты. После этого производились работы по закладке фундамента тоннельной обделки и кладка стен свода.

На других участках, в связи с значительным давлением на крепи раскрываемого профиля, применялась система предварительной закладки стен следующим образом: из центрального направляющего хода засекались поперечные штольни, откуда в колодцах устраивались фундаменты и стены обделки. После закладки стен раскрывалась калоттная часть профиля и возводился свод, опирающийся на стены, ранее возведенные в колодцах. Впоследствии штроссное ядро убиралось и закладывался мощный обратный свод обделки (рис. 696).

Под влиянием горного давления крепи претерпевали осадки около 15—20 *см*. С этим обстоятельством приходилось считаться при закладке проектной отметки стен и сводов сооружаемого тоннеля.

Реконструкция тоннеля Шези. Этот тоннель, протяжением в 450 *м*, поперечным сечением в разработке $7{,}4 \times 5{,}7$ *м*, пересекает напластования глин с включением разнозернистых песков. Качество кладки в период строительства было весьма низкое, что отразилось в последующие года на условиях эксплоатации тоннеля. Приступили к реконструкции ряда колец тоннельной обделки, на которой сказывался нарастающий процесс деформаций. Во время работ по реконструкции и разборке каменной кладки старого свода в выработку внезапно устремилась масса камня, а затем в течение $^1/_2$ минуты вывалился большой объем песка, в количестве 350 $м^3$. Вывалившийся песок заполнил сечение тоннеля до замка свода. Железнодорожное движение было прекращено.

Учитывая ограниченный габарит двухпутного тоннеля Шези, работы по реконструкции его были проведены следующим порядком. Существующий свод был подхвачен системой кружал для создания временной конструкции бетонного свода, из расчета пропуска движения по одному пути. Под защитой этого временного бетонного свода можно было безопасно пропускать поезда. С другой стороны над ним можно было проходить систему штолен, как по оси тоннеля, так и перпендикулярно к нему, для устройства постоянной мощной обделки реконструированного двухпутного тоннеля. По окончании работ с поверхности была пройдена вертикальная шахта на глубине 36 *м* и при помощи горизонтальной галлереи обнаружен купол, образовавшийся после обвала. Этот купол был впоследствии заполнен крупным щебнем, что дало возможность восстановить нормальный режим приведенного в движение после обвала горного массива.

Реконструкция тоннеля-канала Моваж. Тоннель-канал Моваж, соединяющий Марну с Рейном, имеет протяжение 4 800 *м*. Этот тоннель пересекал мергелистые породы, которые в момент проходки в плотном теле представляли собой вполне устойчивую породу. В дальнейшем, по мере соприкасания породы с водой, он пучился и проявлял усиленное горное давление. Выложенная тоннельная обделка толщиной свода и стенок в 30 *см*, без обратного свода, оказалась не соответствующей горному давлению, и после пропуска воды через этот тоннель-канал обнаружились сдвиги стен, деформация свода, так что потребовалось усиление выложенной обделки. Тоннель непрерывно продолжал деформироваться. В дальнейшем оказались перед необходимостью обязательной реконструкции тоннеля во избежание внезапной аварии.

Была замечена подвижка стены на протяжении в 160 *м*. Произведенным бурением в своде было установлено наличие значительных осыпей каменных пород за сводом и образование «куполов», размерами в плане 5×7 *м* при высоте до 1,5 *м*. При этих условиях не была исключена возможность внезапного обвала и динамического удара породы о конструкцию существующего свода.

Проект реконструкции тоннеля предусматривал проведение работ следующим методом. По длине тоннель был разделен на ряд секций протяжением каждая в 200 *м*. Эти секции ограждались понтонными шлюзами. Участок между последними освобождался от воды путем откачки ее насосами, установленными на этих понтонах (рис. 697). Понтонные шлюзы, металлические, из листового железа, размерами по длине 8,4 *м* и ширине 4,7 *м*, в период прекращения навигации буксировались на определенное место в тон-

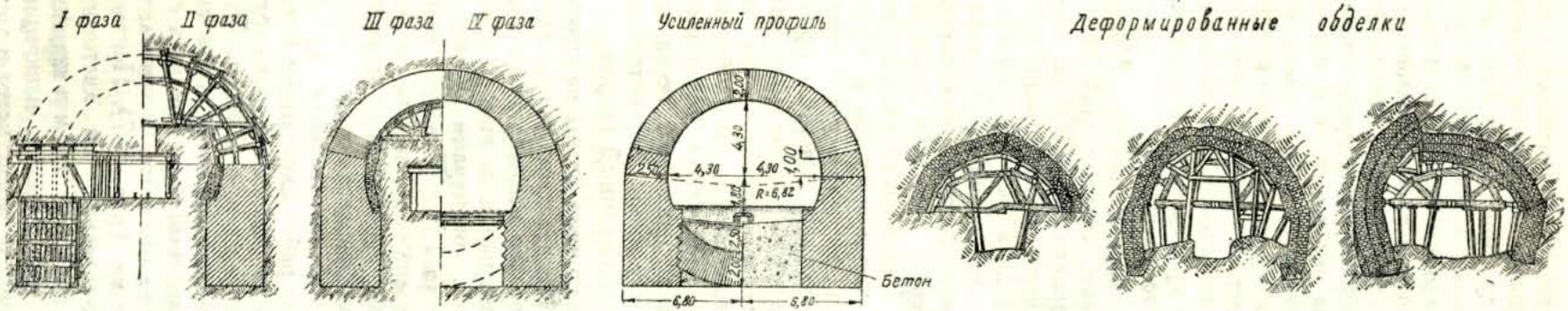


Рис. 696. Тоннель Ронго (фазы работ по реконструкции деформированного тоннеля)

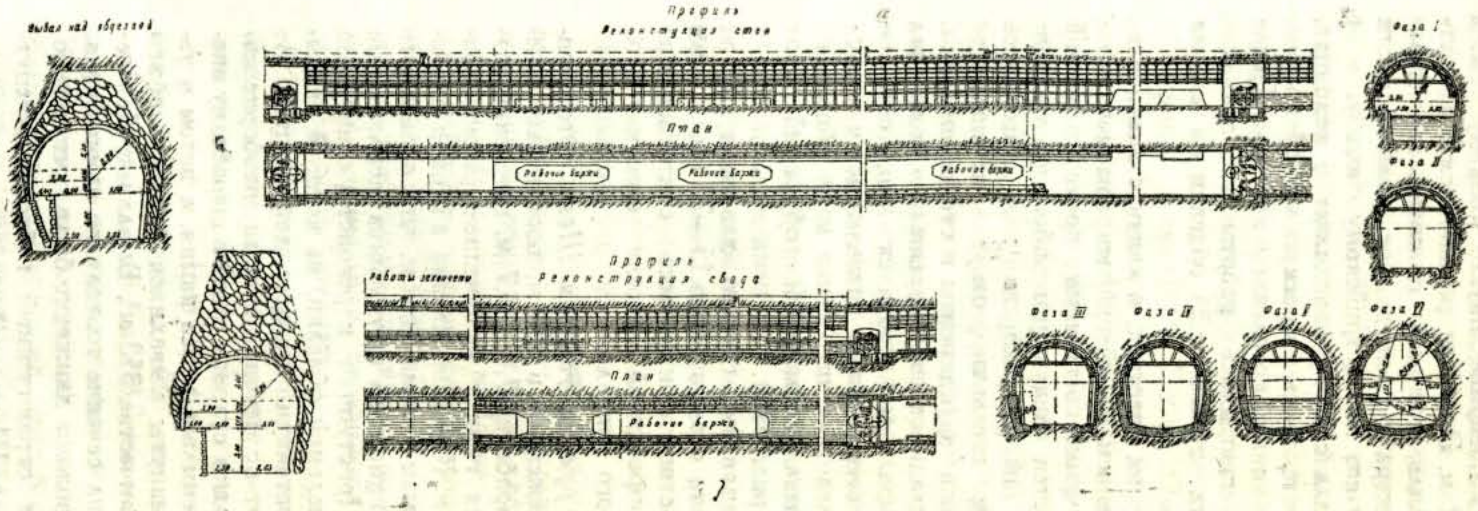


Рис. 697. Тоннель-канал Моваж (реконструкция)

нель. Понтонные шлюзы под водяным балластом погружались на подошву тоннеля и входили в пазы, устроенные в тоннельной обделке. Одновременно между шлюзами заводились и баржи, которые служили как для погрузки в них породы, так и для подачи необходимых строительных материалов. Непосредственно на понтонных шлюзах размещались два центробежных насоса, каждый производительностью 300 *л/мин*, для откачки воды из реконструируемого участка тоннеля. Кроме того, имелся один насос местного назначения, который служил для откачки просачивающейся воды между понтонными шлюзами. От насосной установки каждого из понтонных шлюзов шли водоотливные трубы, пропущенные через глиняные перемычки, устроенные в порталах тоннеля. Тоннельная камера, длиной 8,5 *м*, для шлюзового понтона имела паз, куда входил киль понтона. В этой камере были сделаны также зумпфы для откачки.

Производство работ в каждой отдельной секции протекало следующим образом. В рабочую зону буксировались баржа со строительным материалом и баржа для приемки породы. После их прохода в рабочую зону вводился шлюз-понтон и устанавливался в приготовленную тоннельную камеру. Вслед приводили в действие насосную установку и в течение одного часа откачивали воду по всей зоне на протяжении 200 *м*. После окончания необходимых тоннельных работ по реконструкции производилось вновь заполнение рабочей секции тоннеля водой, шлюз-понтон освобождался от водяного балласта и вместе с рабочими баржами выводился за пределы тоннеля.

До начала работ по реконструкции обделки тоннеля-канала деформированный свод брался на металлические кружала, поддерживаемые на консолях. Вторым этапом после освобождения тоннеля от воды являлись работы по сломке бичевника, бетонировке фундамента стен и взятие кружал на специальные стойки.

Реконструкция стен производилась участками от 4 до 6 *м*, причем эта работа проводилась в период перерыва навигации в течение 40 часов, с расчетом, что от момента окончания бетонирования стен до впуска воды в тоннель не должно было протекать меньше 20 часов, во избежание вымывания вновь уложенного бетона. При толщине стен в 80 *см* обратный свод устраивался толщиной в 60 *см* и укладывался участками в 4 *м* длиной. Дальнейшие работы по устройству тоннельной обделки уже протекали выше нормального горизонта воды в канале. Реконструкция свода производилась участками в 4—6 *м* длиной, в зависимости от горного давления. В некоторых случаях ограничивались лишь раскрытием двухметровой длины кольца.

Реконструкция тоннеля Гринтри (США). В 1943 г. были закончены работы по реконструкции участка двухпутного тоннеля Гринтри на железнодорожной линии Питсбург — Западная Виргиния.

Задача заключалась в изыскании метода работ, позволяющего без перерыва движения, при значительных грузопотоках, в условиях военного времени провести капитальные работы по реконструкции тоннеля.

Тоннель Гринтри протяжением $L = 1415$ *м* залегает в сланцах и песчаниках. На ряде участков конструкция тоннельной обделки выполнена из бетона (восточный участок), из кирпича (западный участок), а на среднем участке тоннеля длиною 450 *м* установлено деревянное крепление.

В связи с удалением целиков при разработке угольного пласта мощностью в 1,6 *м*, залегающего над тоннелем, в расстоянии 4,5 *м* от шелыги свода, произошли деформации последнего и появились значительные трещины. Процесс деформации на участке длиной в 90 *м*, в расстоянии 660 *м* от восточного портала, начал нарастать. С целью предотвратить возможное обрушение свода немедленно (как экстренное мероприятие) было установлено деревянное крепление полигонального типа. Отдельные рамы из брусьев поперечного сечения 30×30 *см* устанавливались на взаимном расстоянии в 1,2 *м* и поверхность между рамами обшивалась досками. Наличие рам стеснило габариты настолько, что движение в тоннеле пришлось с двухпутного перевести на однопутное.

Работы по замене деформированного свода новым потребовали исключительной тщательности и осторожности, в связи с проявлением значительной деформации конструкции.

Для реконструкции тоннеля был принят метод облицовки свода металлическими плитами, сбалчиваемыми между собой. Удаление деформированного свода, практически потерявшего условия равновесия и поддерживаемого деревянной крепью, производилось короткими арками при немедленной поста-

новке несущей металлической конструкции из плит.

Стальные плиты имели размеры 0,45 × × 1,5 *м*, при толщине плиты в 7 *мм* и высоте

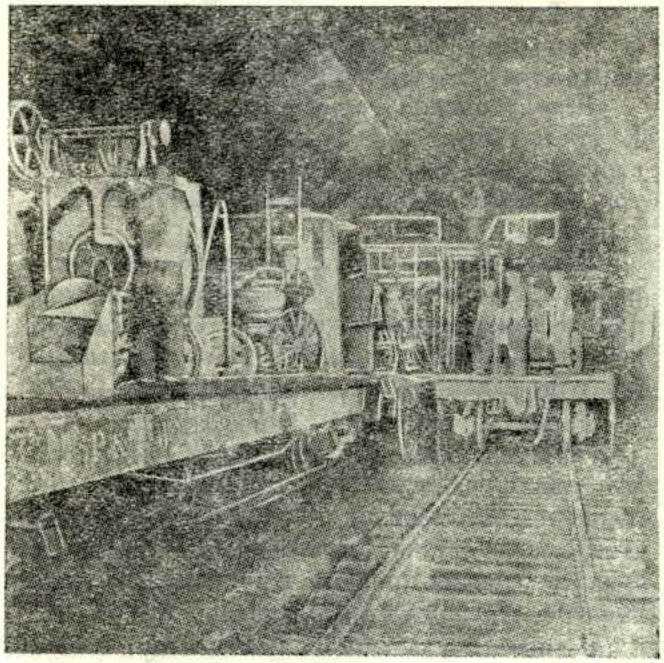


Рис. 698 а. Рабочий поезд в реконструируемом тоннеле Гринтри

стыковых ребер в 50 *мм*. Главное свойство принятого метода заключалось в отсутствии опалубки и коренных лесов, требуемых при устройстве бетонной обделки.

Работы в тоннеле производились с рабочего поезда, составленного из 5 приспособленных железнодорожных платформ (рис. 698 а, б), перемещаемых рабочим электровозом. На платформах были устроены рабочие леса и установлено оборудование. Последнее состояло из ряда отбойных молотов, растворонагнетателей, компрессоров, лебедок и т. д. Один из путей занимался рабочим поездом, второй был на весь период работ свободен. После удаления одной деревянной рамы убирали разрушенную кладку и вели подготовку в существующих стенах основания для пят монтируемого свода из металлических плит. Предварительно устанавливались опорные плиты с анкерными болтами диаметром 25 *мм*. Между отдельными плитами зажимались асфальтовые прокладки, сообщающие гидроизоляционные качества вновь возводимому своду.

Вслед за монтажем металлического свода производилось нагнетание за ним цементного раствора. С внутренней поверхности металлический свод покрывался торкретным слоем в 5 *см* по сетке.

Для характеристики темпов работ по реконструкции тоннеля достаточно указать, что работы на участке длиною в 60 *м* были начаты в июле 1942 г. и закончены в январе 1943 г. при сохранении непрерывного однопутного движения поездов по тоннелю.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОННЕЛЕЙ

Восстановление искусственно разрушенных в условиях военной обстановки тоннелей относится к разряду наиболее сложных отраслей инженерной техники.

Неопределенность характера и размеров разрушения, причиняемого обычно вследствие взрыва значительной силы в нескольких местах по длине тоннеля, осложняет решение задачи. Последствия взрыва обусловливают проведение сложных восстановительных работ, особенно в тех случаях, когда тоннель

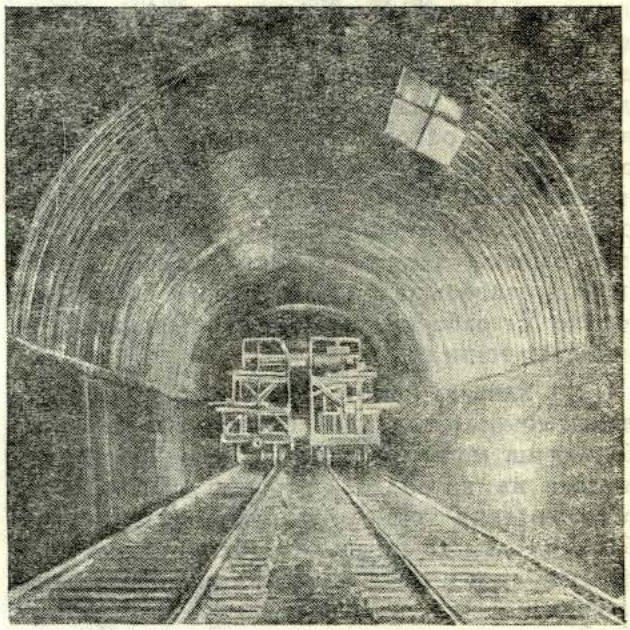


Рис. 698 б. Вид металлического свода тоннеля Гринтри после реконструкции

залегает в неустойчивых, водоносных породах. К восстановительным работам предъявляются в первую очередь жесткие требования быстрейшего их выполнения с целью кратчайшего ввода тоннеля в эксплоатацию.

Быстрое восстановление тоннеля способствует обеспечению полной пропускной способности железнодорожной линии для переброски войск и боеприпасов в соответствии с требованиями военного командования.

Из опыта первой и второй мировых войн выявлен характер разрушения тоннелей.

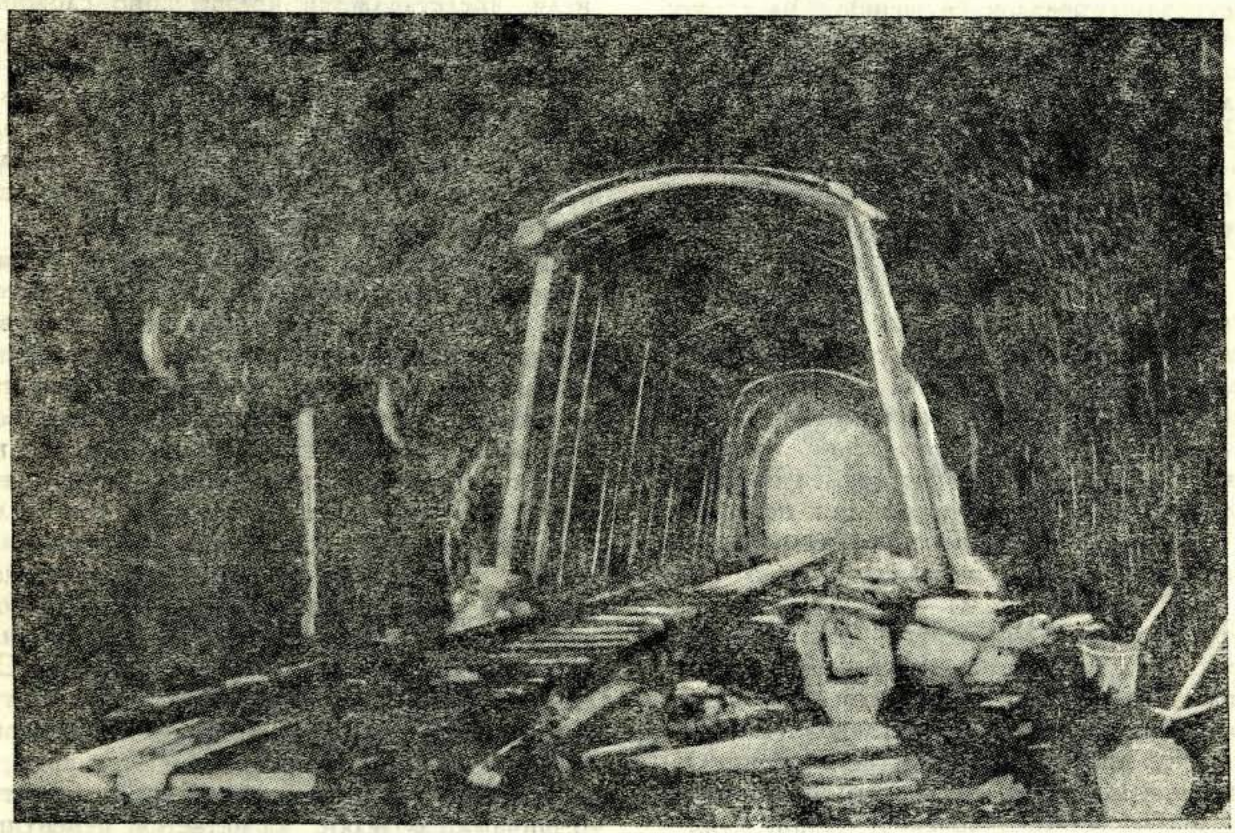


Рис. 699. Тоннель Труа Пон (временно восстановленный для однопутного железнодорожного движения)

На протяжении около 50—100 *м* разрушаются оба входных портала тоннеля и, кроме того, производится ряд обвалов внутри тоннеля, в которых заранее подготовляются камеры взрывчатых веществ. Так, на железнодорожной линии Аахен — Гомбург бельгийцами было произведено разрушение обоих порталов Гомбургского тоннеля на протяжении около 40 *м*, причем в середине тоннеля были обнаружены подготовленные для взрыва 35 ящиков, по 25 *кг* черного пороха в каждом, и значительное количество динамитных патронов.

В тоннеле Штавелот длиной 335 *м* были произведены обвалы портальных участков тоннеля, а равно завал в середине тоннеля. Последний был осуществлен при закладке в пяте свода обделки восьми минных камер. Две из последних не взорвались, и их разрядили в период производства восстановительных работ.

В связи с наличием неустойчивых, водоносных пород, приведенных в движение после взрыва, и проявлением усиленного горного давления параллельно с производством работ по восстановлению тоннеля Штавелот была сооружена временного характера обходная железнодорожная ветка, однако с малыми радиусами кривых и с крутыми уклонами.

Для восстановления тоннеля необходимо прежде всего сделать тщательное обследование и разведочные работы, выявляя геотехнические условия тоннеля и устанавливая характер его разрушения. Особое внимание должно быть обращено на поверхность по трассе тоннеля, на наличие образовавшихся местных воронок и провалов.

Расчистка входов в тоннель и восстановление портальных участков не может предста-

вить особых затруднений, поскольку работы ведутся открытым путем. При этом возможно применить широкую механизацию земляных работ. Оказывается в большинстве случаев целесообразным осуществить удлинение конструкции тоннеля, с обратной засыпкой грунтом. Освобождение забаррикадированного тоннеля от загромождения вагонами и паровозами поездов, пущенных навстречу в тоннель, идет быстрыми темпами. Центр тяжести работ, однако, заключается главным образом в восстановлении обрушенного тоннеля внутри горного массива.

В этом случае, в зависимости от геологических условий, восстановление тоннеля производится по следующим двум стадиям:

I — *временное восстановление тоннеля*, при котором в кратчайший срок обеспечивается безопасный пропуск поездов, осуществляемый при наличии временного деревянного или металлического крепления, возможно при сниженной скорости движения поездов;

II — *капитальное восстановление тоннеля*, при котором сооружается постоянная несущая конструкция обделки тоннеля для нормального движения поездов при полной пропускной способности железнодорожной линии.

При восстановлении двухпутного тоннеля в первую очередь, в зависимости от местных условий, можно восстановить один путь, а уже в период эксплоатации его восстановить окончательный профиль двухпутного тоннеля. Таким приемом был восстановлен тоннель Труа Пон на железнодорожной линии Гуви-Фильзальм — Труа Пон (рис. 699). Осуществляя стадию временного восстановления тоннеля, следует учитывать неизбежность последующего процесса капитального восстановления тоннеля, при наличии движения поездов, связанного с целым рядом осложнений производственного и эксплоатационного характера.

Опыт автора по восстановлению тоннелей в период Великой Отечественной войны показал, что приемами советской техники тоннелестроения имеется полная возможность успешно и быстро провести капитальное восстановление тоннеля, несмотря на значительные размеры разрушения, произведенного противником.

В результате взрыва тоннель в месте завала загромождается обломками и глыбами породы и кладки, при этом, в зависимости от силы взрыва, характера строения горного массива и от физико-механических свойств породы, образуется свод обрушения или обвал, ограниченный плоскостями обрушения, могущий распространиться до поверхности. Опыт восстановления разрушенных тоннелей показывает, что проникнуть к глубинному завалу, где порода и обрушенная кладка обделки закрывают почти полностью сечение тоннеля, представляется чрезвычайно сложным. Недоступность к завалу усугубляется, кроме того, присутствием вредных газов. Таким образом, выявление истинных размеров и характера зоны обрушения, а равно состояния элементов конструкции тоннельной обделки представляет собой задачу, требующую специального инженерного решения.

При подходе к завалу в тоннеле прежде всего производят тщательный осмотр состояния конструкции обделки в зоне действия взрыва, фиксируют трещины и повреждения обделки и приводят тоннель в состояние, требуемое условиями безопасности производства работ. В тех местах, где наблюдается нарастание процесса деформации тоннельных колец, прилегающих к завалу, устанавливаются несущей конструкции кружальные фермы, деревянные или металлические, с целью обеспечить состояние устойчивого равновесия. Производится очистка профиля от нависающих кусков кладки и породы. Отдельные небольшие вывалы и пустоты плотно заполняются породой или бетоном. Некоторые нарушенные места кладки заменяются армированным бетоном. Для укрепления покрытой трещинами обделки нагнетается цементный раствор под небольшим давлением (3—4 *ат*). После взятия кладки на кружала производится очистка пути для подступа к зоне завала и для возможности подъезда железнодорожных платформ грузоподъемностью до 50 *т* для выдачи породы и подачи необходимых крепежных материалов.

В зависимости от характера разрушения, проявляемого горного давления, мощности завала принимается определенный горный метод производства работ, в частности калоттное вскрытие сводчатой части, штольневой способ опорного ядра или раскрытие профиля тоннеля системой колодцев (рис. 700). Вне зависимости от метода проходки, работы должны вестись малыми участками при тщательном и мощном креплении выработок. Особое внимание следует обращать на крепление лба забоя.

Разработка нагроможденного завала

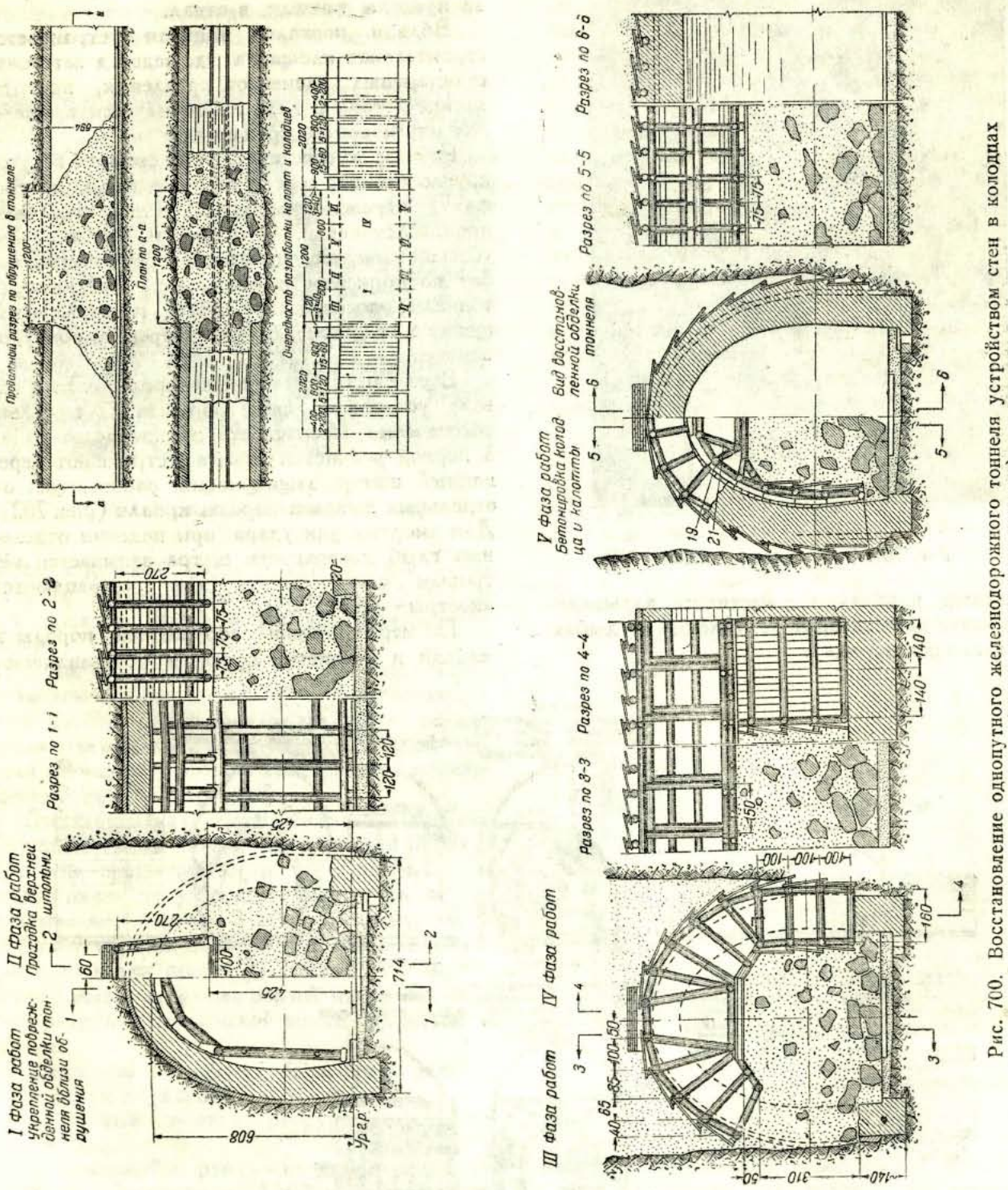


Рис. 700. Восстановление однопутного железнодорожного тоннеля устройством стен в колодцах (завал в середине тоннеля)

(рис. 701) в обрушенной зоне, дробление глыб породы и кладки осуществляются отбойными

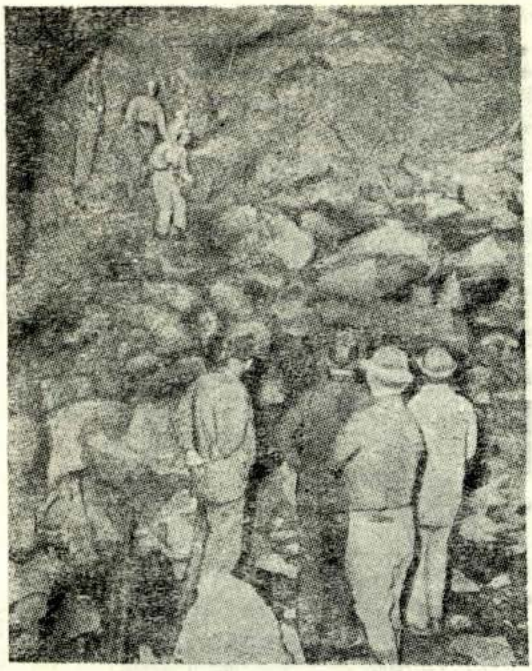


Рис. 701. Вид завала в тоннеле

молотками, кувалдами и местными взрывами (используя естественные углубления в глыбах для закладки заряда).

Откидка породы производится на металлические листы и через транспортеры на железнодорожные платформы, отвозящие породу за пределы тоннеля, в отвал.

Вблизи порталов тоннеля устраивается строительная площадка, где ведется заготовка стандартных элементов крепления, приготовление бетона и т. д. Рекомендуется применение инвентарного крепления.

Работы по восстановлению тоннеля ведутся круглосуточно, строго по определенному графику, отражающему выполнение отдельных производственных операций по часам. Для успешного проведения восстановительных работ по тоннелям рекомендуется организация тоннельно-восстановительных поездов, оснащенных специальным инвентарем и оборудованием.

В условиях устойчивых пород, когда в завале установлен свод обрушения, с целью обеспечения безопасности производства работ в период расчистки завала устраивают деревянный шатер, защищающий работающих от отдельных вывалов породы кровли (рис. 702). Для амортизации удара при падении отдельных глыб поверхность шатра засыпается метровым слоем грунта или устраиваются «костры» (рис. 703).

По мере выемки обрушенной породы и кладки и расчистки профиля устанавливают

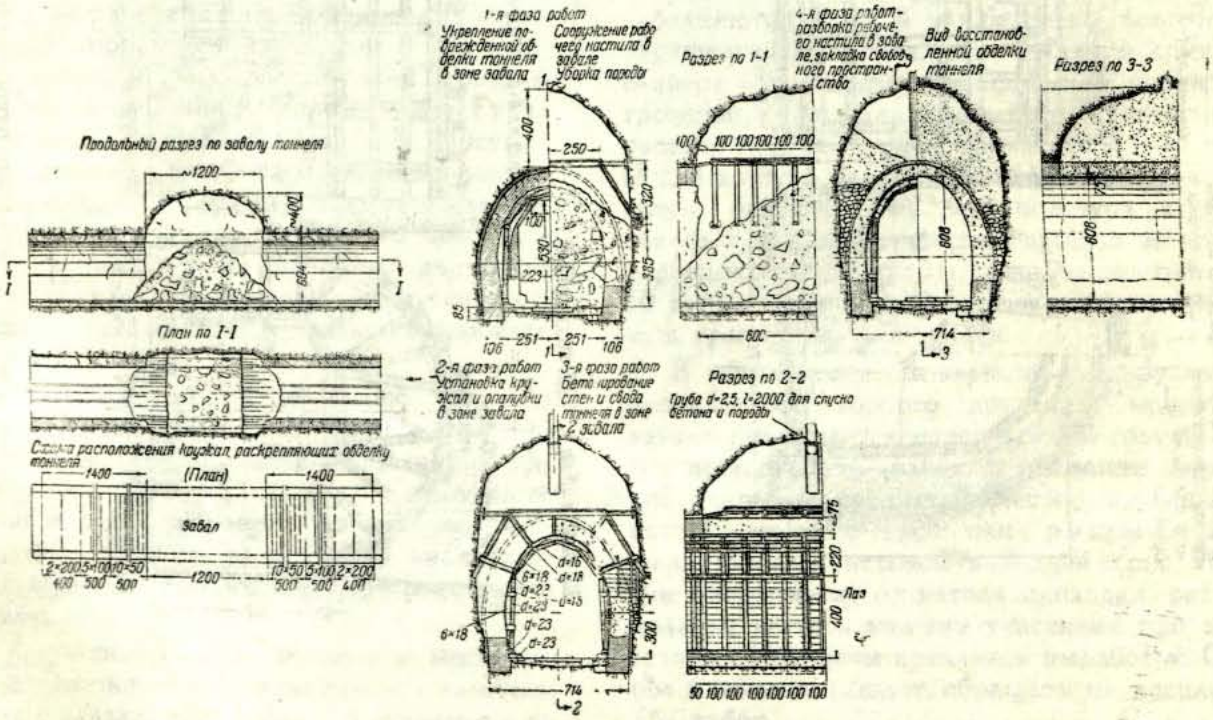


Рис. 702. Устройство защитного шатра при работах в глубинном завале

временное крепление, кружала и опалубку для бетонирования несущей конструкции свода и стен обделки тоннеля (рис. 704 а и б). Одновременно производится забутка пространства вывала за обделкой. Для ведения этих

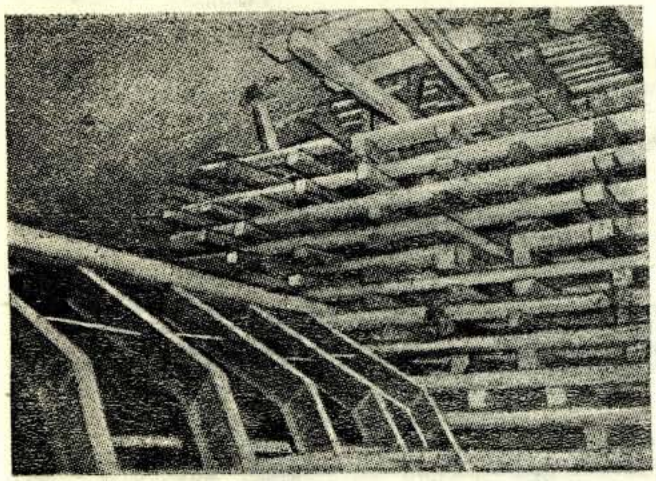


Рис. 703. Крепление завала „кострами"

работ в нижней части стены обделки оставляются специальные окна-лазы 1,5 × 1 *м* для прохода людей в период производства работ.

Если позволяет топография местности, возможно вместо завала прорубить скважину или пройти шурф, через которые осуществляется заполнение пустот за обделкой тоннеля песком, в пределах пространства образованного сводом обрушения.

Восстановление разрушенного тоннеля Оннуа. Тоннель Оннуа протяжением 2 365 *м* проходил преимущественно в глинистых пластах, причем на участке длиной в 350 *м* выклинивались весьма слабые, суглинистые и песчаные грунты, которые потребовали в процессе проходки применения сжатого воздуха. Этот тоннель во время первой мировой войны был разрушен германской армией при отступлении.

Обрушение тоннеля было произведено следующим порядком:

1) южный портал разрушен на длине около 75 *м*,

2) северный портал — на длине 100 *м*,

3) на расстоянии 1 900 *м* от северного портала произведено разрушение тоннеля на протяжении около 45 *м*.

Восстановление портальных частей не представляло особых затруднений.

Исключительную сложность составило восстановление разрушенного участка в середине тоннеля в условиях весьма слабых, водоносных грунтов. После обвала в середине тоннеля, на поверхности, обнаружены две воронки по 30 *м* в диаметре, глубиной от 10 до 12 *м*. Предварительно была пройдена штольня в плывунных грунтах в месте обвала, непосредственно под ключом свода обделки. Но эта штольня пройдена лишь на протяжении 11 *м*. Дальнейшее ее продвижение обычным способом оказалось весьма затруднительным. Вопрос осложнялся тем, что не был точно известен характер распространения обвала и разрушения тоннельной обделки. Грунтовые напластования суглинков и песков были значительно нарушены произведенным обвалом.

Первый проект восстановления тоннеля предусматривал пробивку ряда штолен с бетонным креплением, пройденных вдоль оси тоннеля под сжатым воздухом. Из этих штолен выработками, перпендикулярными оси тоннеля, включающими свод, рассчитывали устроить защитную бетонную кровлю, под которой впоследствии возможно было бы

Схема расположения полков для приема бетона с железнодорожной платформы и его последующего перемещения для укладки в обделку тоннеля

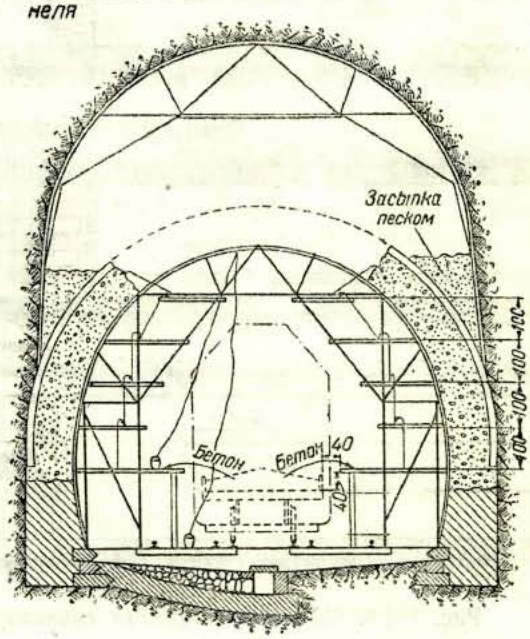


Рис. 704 а. Схема бетонирования обделки тоннеля в завале

беспрепятственное восстановление разрушенного свода (рис. 705 и 706).

До осуществления этого проекта были сделаны две разведывательные штольни, которые установили полное разрушение стенок тоннеля. Это обстоятельство привело к необменения этого способа работ в данных условиях пришлось отказаться, и было отдано предпочтение способу кессонов-тоннелей, опускаемых с поверхности. Был собран металлический кессон-тоннель размерами по длине 45,7 *м*, шириной 10,5 *м*; высота тоннельной

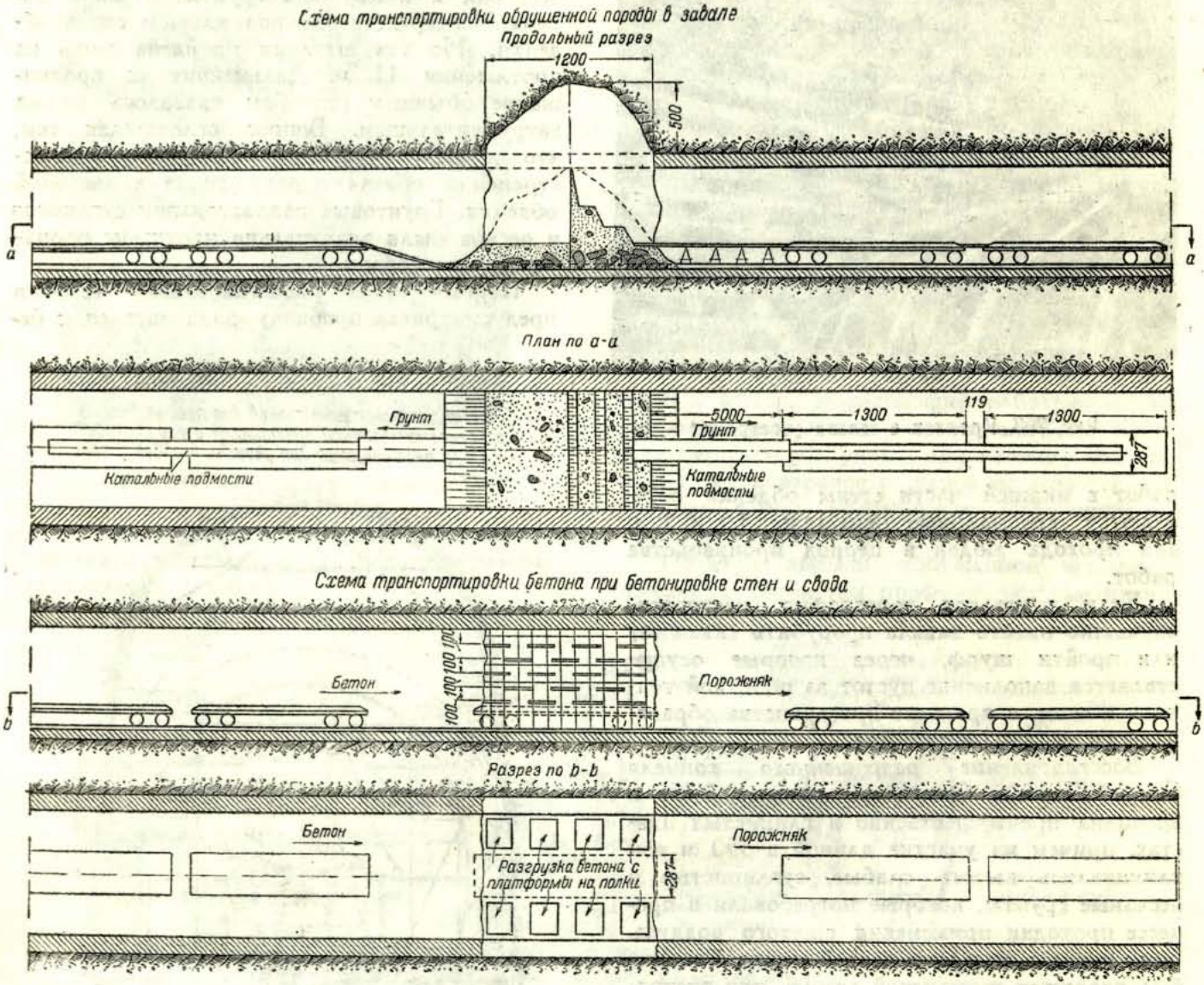


Рис. 704 б. Схема организации транспорта при тоннельно-восстановительных работах в завале

ходимости устройства не только свода тоннельной обделки, но и стен, а следовательно, прибегнуть к устройству многоярусной системы галлерей и штолен. Однако в процессе проходки выявились исключительные трудности ведения работ под сжатым воздухом при многоярусной штольневой системе. От при-

секции кессона 14 *м*. Глубина опускания тоннеля 34 *м*; высота рабочей камеры 2,5 *м*. Рабочая камера кессона была металлической конструкции с бетонным заполнением. По мере опускания ее была возведена тоннельная секция и устраивались ограждающие железобетонные стенки.

Людские рабочие шлюзы были размещены непосредственно в тоннельной секции. Последняя, в свою очередь, сообщалась с поверхностью по трем металлическим шахтам: средняя служила для удаления породы, для подачи необходимых строительных материалов, а две крайние — людские.

До опускания кессона в неразрушенной части тоннеля, примыкающей к завалу, были установлены железобетонные диафрагмы толщиной в 1,75 *м*. Было произведено усиление свода тоннельной обделки устройством внутреннего железобетонного кольца длиной 4,5 *м* при толщине обделки в 35 *см*. Металлическая рабочая камера тоннеля монтировалась в котловане размерами в плане 48 × 12,5 *м*. Вес металлической конструкции был 265 *т*.

После окончания монтажа металлической конструкции было произведено снятие кессона с подкладок, выборка грунта из-под ножа и опускание всей секции на 1 *м*, а затем бетонирование металлической секции. Во время бетонирования свода тоннельной секции наращивались стенки на 12 *м* от ножа. Песчаный грунт в значительной степени сифонировался и, кроме того, подавался через материальные шлюзы. По мере опускания вынимаемый грунт из рабочей камеры укладывался на свод тоннельной секции. Вес тоннельной секции с загрузкой от 3 900 *т* постепенно доходил до 21 000 *т*. В среднем в сутки кессон опускался на 28 *см*.

Последним этапом явилось устройство примыкания тоннеля к опущенному кессону-тоннелю. Ближайшие к кессону-тоннелю кольца претерпели значительные деформации и трещины. Это привело к необходимости реконструкции ближайших к кессону колец тоннельной обделки, чем и были закончены сложные работы по восстановлению разрушенного тоннеля.

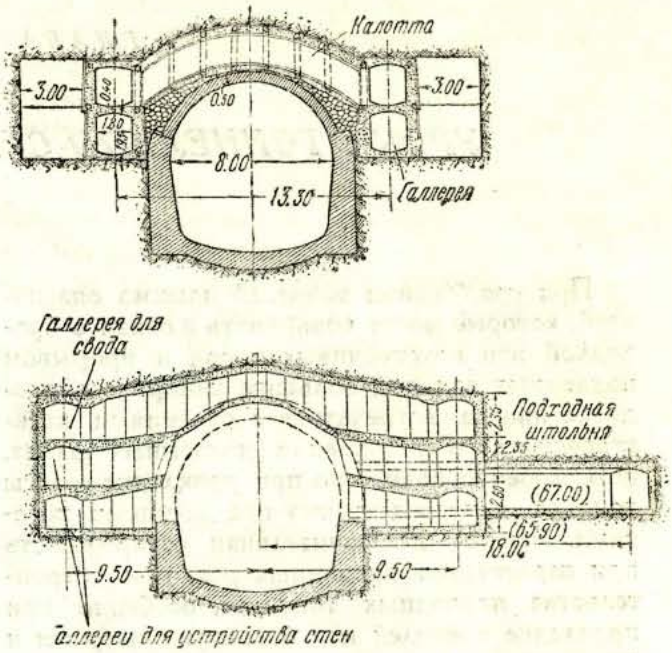


Рис. 705 и 706. Тоннель Оннуа (схема восстановления тоннеля при применении сжатого воздуха при многоярусной штольневой системе)

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ

УРОКИ ТОННЕЛЬНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ КАТАСТРОФ

При сооружении тоннелей помимо опасностей, которые могут возникнуть в связи с проходкой зон неустойчивых пород и прорывом подземных вод под большим напором, приходится иногда встречаться с явлениями катастрофического затопления подземных работ. Это особенно возможно при прокладке трассы тоннеля непосредственно под водными потоками. Нужна исключительная осторожность при пересечении подземных рек, при строительстве подводных тоннелей, особенно при прокладке тоннелей под большими озерами и пересечении подземными выработками под морскими заливами.

В практике известна проходка подземных выработок непосредственно под Ирландским морем в руднике Уайтхевен. Глубина заложения выработок под дном моря определяется в 240 *м*. При нарезке штреков в этом руднике имела место катастрофа (прорыв морской воды), были затоплены подземные выработки, погибло около 40 человек. Аналогичные работы велись и в Японии непосредственно под дном моря, на руднике Хигашимиризотэ. Там при внезапном прорыве воды погибло около 240 человек. Это указывает на то, что работы под большими водными бассейнами, в особенности под морем, требуют исключительной осторожности как в отношении предварительного исследования надежности кровли, так и в части мер безопасности, ограждающих от катастрофических последствий стихийного прорыва вод. Если по данным гидрогеологического прогноза или проведенной рекогносцировочной разведки ожидается угроза прорыва значительного объема подземных вод, приходится ограждать пройденные участки водонепроницаемыми перемычками. Там, где ожидается пересечение зоны неустойчивых, водоносных пород, которая помимо громадного расхода воды может принести в выработки и разжиженный грунт, прибегают к устройству фильтрующих перемычек. Водонепроницаемые перемычки могут быть устроены как глухими, так и с дверями. Системы перемычек с дверями применяются в тех случаях, когда опасность прорыва воды или плывунных грунтов весьма неопределенна.

Таким образом, приходится ставить ряд перемычек с дверями, назначением которых является ограждение уже сооруженного тоннеля от внезапного затопления. В период производства работ эти двери остаются открытыми; при обнаружении прорыва забоя, которого нельзя предотвратить имеющимися техническими средствами, рабочие стремительно удаляются из забоя и закрывают за собой двери. Последние должны быть рассчитаны на предполагаемое гидростатическое давление и давление неустойчивых пород. Двери должны быть так сконструированы, чтобы обеспечить герметическое закрытие. Конструкция перемычки в зависимости от местных условий может содержать ряд труб с кранами, через которые регулируется выпуск воды из забоя. Удалением воды снижается гидростатическое давление на перемычку. В зависимости от величины гидростатического давления, конструкции перемычек по роду материала могут быть металлическими, кирпичными, бетонными. Особое внимание должно быть обращено на заделку шпор перемычек непосредственно в породу. Применением соответствующего нагнетания раствора у пят перемычек должна быть устранена возможность прорыва вод в обход перемычки. В случаях, когда перемычка ставится в слабых грунтах, приходится предварительно прибегнуть к устройству бетонной обделки, так что сама обделка и перемычка представляют собой неразрывную конструкцию. Помимо заделки специальной трубы (с вентилем для спуска воды и снятия гидростатического напора), в перемычку замуро-

вывается труба с манометром для определения величины гидростатического давления на перемычку.

Перемычки могут быть как сферической, цилиндрической, так и плоской формы, в зависимости от величины гидростатического напора. Сферическая или цилиндрическая перемычка применяется главным образом при больших величинах напора подземных вод. При очень высоком напоре вод устраивается бетонная перемычка с закладкой нескольких, иногда до пяти врубов.

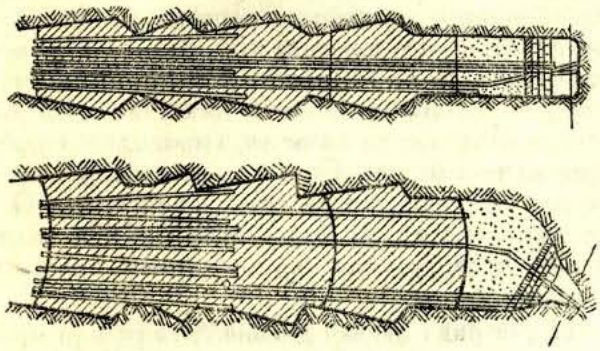


Рис. 707. Перемычка, укрепленная химическим методом (для большого гидростатического напора)

Для укрепления неустойчивых пород в перемычку закладывается ряд буровых скважин, через которые ведут цементацию или силикатизацию этих пород (рис. 707, 708). В некоторых случаях большой эффект может дать химическое закрепление неустойчивых пород за перемычкой. Нагнетание раствора может производиться под давлением от 10 до 150 *ат*. В последнем случае следует прибегать к особой конструкции перемычек, в виде армированной железобетонной конструкции. При пересечении неустойчивых пород приходится главным образом иметь дело с так называемыми фильтрующими перемычками для того, чтобы не пропускать песчаных и илистых грунтов, которые несут с собой прорвавшиеся подземные воды.

В отдельных случаях с успехом могут быть применены и деревянные перемычки, забитые сеном, соломой или мешками с песком и цементом. Можно устраивать также парные перемычки, установленные на взаимном расстоянии 3—5 *м* и заполненные в промежутке породой.

В условиях мягких грунтов, когда есть опасение, что подземная вода обойдет устроенную фильтрующую перемычку, прибегают к устройству бетонной или кирпичной обоймы, глубоко заделанной в породу и включающей в себя конструкцию самофильтрующей перемычки. В тех случаях, когда приходится прибегать к осмотру значительных затопленных участков, которые по определенным причинам не представляется возможным откачать, прибегают иногда к применению водолазных аппаратов, что дает возможность подойти, например, к насосам затопленной насосной камеры, заделать место прорыва и т. д.

Тоннельная практика богата примерами тоннельных аварий и катастроф, первопричинами которых в большинстве случаев являлись неправильные методы ведения работ.

Чтобы предотвратить катастрофические явления и не повторять имевших место в практике тоннельного строительства роковых ошибок, стоивших жизни людям, огромных непроизводительных капиталовложений, всегда приводивших к значительному удлинению, а иногда и к срыву срока окончания тоннельного предприятия, необходимо изучение мирового тоннельного опыта.

Приводим ряд примеров из мировой практики тоннельного строительства.

Катастрофа при сооружении тоннеля Дебрей. Тоннель-канал Дебрей протяжением в 2,36 *км* на глубине 122 *м* от поверхности пройден в мелкозернистом песке с выклиниванием глины и суглинков. Проходка тоннеля в таких слабых грунтах, насыщенных водой, была проведена с помощью сжатого воздуха. В готовой части тоннеля был устроен шлюз из двух стен при взаимном расстоянии между последними в 10 *м*. Работы производились под давлением в 1,4 *ат*.

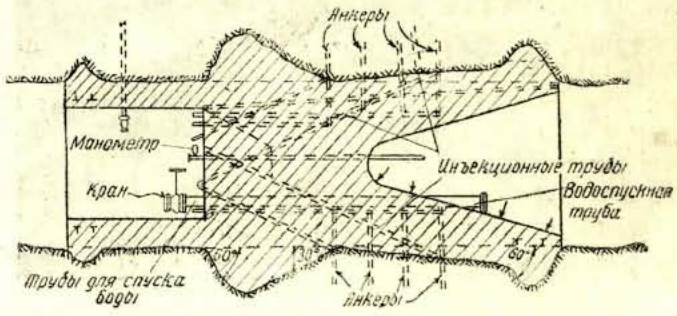


Рис. 708. Бетонная водонепроницаемая перемычка при большом гидростатическом напоре

Во время производства работ под сжатым воздухом в тоннеле (рис. 709) произошел пожар, который образовался при пересечении пласта, содержавшего сернистый магний. Пожар возник в зоне сжатого воздуха. При по-

жаре погибло 17 рабочих. Немедленно пришлось прекратить подачу сжатого воздуха и затопить тоннель.

Несмотря на мероприятия по удалению через ряд буровых скважин газа, вызвавшего пожар, горение пласта продолжалось даже через 6 месяцев, и вода, просачивавшаяся через свод тоннеля, имела температуру порядка 30° С. Впоследствии работы возобновились. Устроили новую перемычку, и проходка тоннеля, проходящего в слабых грунтах на протяжении 150 *м*, была закончена повторным применением сжатого воздуха.

Проходка тоннеля Кристина. Этот тоннель проложен на определенном участке в неустойчивых глинистых грунтах. В процессе работ выявилось исключительное пучение глин и увеличение объема их, так что приходилось для разработки определенной кубатуры выработки немедленно выбирать грунт, наплывавший в забой. Это привело к необходимости вынимать в два с половиной раза больше породы, чем это было предусмотрено проектным профилем. Явление пучения («дутья») сопровождалось значительным проявлением местного горного давления, которое требовало постановки дополнительного усиленного временного крепления. На некоторых участках насыщенность крепежным лесоматериалом достигала порядка 65% объема вынимаемого профиля. Выложенные тоннельные обделки по ранее намеченным проектным размерам деформировались и даже разрушались. Пришлось с назначенной толщины обделки в 1,5 *м* перейти на толщину свода в замке в 2,5 *м*. Вначале вели разработку калоттного профиля с немедленной кладкой свода по бельгийской системе. Но при этом еще до начала выработки штроссы своды ломались пополам в замковом сечении. Пяты свода получили осадку и значительное перемещение. Это произошло еще в момент нахождения свода на кружалах, до выемки штроссного ядра. Примененный затем австрийский способ также не дал удовлетворительных результатов в связи с появлением горного давления, направленного вдоль оси тоннеля, приводившего к перемещению и к поломке деревянных креплений. Аварийные явления при австрийском методе работ были вызваны чрезмерной величиной раскрытого профиля и давлением, направленным вдоль оси тоннеля, опрокидывающим тоннельные фермы. Стены тоннеля опрокидывались еще до момента возведения свода. Отсутствие обратного свода приводило к сближению стен тоннеля под влиянием бокового давления.



Рис. 709. Пожар в тоннеле

После ряда неудач дальнейшая работа производилась следующим порядком. В нижней части профиля была пройдена небольшого сечения штольня, которая постепенно расширялась по размерам штроссного профиля ниже пят свода. После тщательного раскрепления профиля производилась кладка обратного свода и стен с заполнением пустот временной, каменной кладкой без раствора. Затем разрабатывалась верхняя калоттная часть профиля, с опиранием штендеров крепления непосредственно на опорное ядро из временной кладки. Свод укладывался на готовые стены. Никаких деформаций в постоянной каменной кладке при этом методе производства работ не было обнаружено.

Проходка тоннеля Сент-Жасинто. При проходке тоннеля Сент-Жасинто в забой передовой штольни, который был удален на расстоянии 5 *км* от шахты, внезапно стремительно прорвалась подземная вода и затопила шахту на 190 *м*. Работы по сооружению тоннеля были прекращены на 7 месяцев. Дебит вод выразился в 13 500 *л/мин*. Интенсивными методами в течение семи месяцев была произведена откачка воды и приступлено к устройству специальной перемычки толщиной 2,5 *м*, сложенной из мешков с песком и закрепленной деревянной диафрагмой. Эти мешки были сложены таким образом, что пропускали дренажные трубы диаметром 150 *мм*, регулируемые при помощи кранов, рассчитанных на возможность пропуска воды под давлением около 10 *ат*. Через эту перемычку было произведено нагнетание цементного раствора под давлением в течение восьми часов. Подпор воды впереди перемычки регулировался при помощи имевшихся кранов. Производилось нагнетание цементного рас-

твора из быстросхватывающегося цемента с добавкой опилок. Одновременно нагнетался цементный раствор и в окружающую зону разрыхленных пород. После этого дебит вод значительно уменьшился. Укрепление грунтового массива было распространено на протяжении порядка 10 *м*. Потом перемычку разобрали и забой продвинули вперед. Впоследствии была установлена вторая перемычка из мешков с песком и опять проводили укрепление грунта нагнетанием цементного раствора. Повторением этих мероприятий по установке перемычки и последовательному нагнетанию удалось пройти зону нарушенного массива и возобновить нормальные работы по проходке тоннеля.

Сооружение Медонского тоннеля. Медонский железнодорожный тоннель между Версалем и Парижем имеет протяжение 3,5 *км*.

По геологическим и гидрогеологическим данным тоннель, заложенный на глубине около 80 *м* от поверхности, должен был пересекать массив коренных мергелистых пород (известняков и гипсов); дебит вод определили незначительным.

Фронт работ был открыт из двух порталов Парижа и Версаля на сбойку.

Вначале условия разработки полностью совпадали с предположениями геологов. Работы шли в слаботрещиноватых известняках, но затем строители врезались в слой песка естественной влажности. Работы производились обычным бельгийским способом на временном деревянном креплении, с опиранием свода непосредственно на грунт. Часть штроссного профиля выбиралась несимметрично. В подошве калотты был установлен кран, поднимавший вагонетки с материалами для работы в верхнем горизонте. Порода подавалась сверху из опрокидных вагонеток на платформы, циркулировавшие по нижнему горизонту. Так при незначительных притоках вод было пройдено до 1 300 *м*. В дальнейшем на протяжении около 300 *м* через большие трещины известняков в выработки поступали водоносные, среднезернистые пески. Горное давление начало нарастать, и поэтому пришлось усилить систему деревянных креплений. Откосы штроссного профиля начали сползать.

Работы со стороны Версаля производились при помощи щита системы Фужроль-Фрер. Щит этот, замкнутого контура, со значительно развитым аванбеком, продвигался вперед гидравлическими домкратами, которые опирались не в выведенную обделку, а через систему металлических креплений на металлические кружала, поддерживающие возводимую тоннельную каменную обделку.

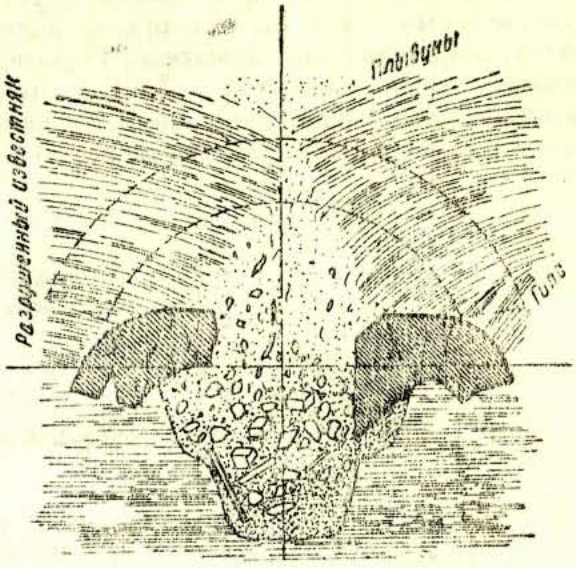


Рис. 710. Характер обрушения свода тоннеля и устремление слабых пород в выработки

В процессе работ корпус щита сильно деформировался, и после проходки 765 *м* его пришлось остановить. Все оборудование щита было снято, а оболочка похоронена под выложенной постоянной обделкой прокладываемого тоннеля. Дальнейшую проходку вели бельгийским способом на деревянном креплении.

Работа осложнялась тем, что велась под уклон 8‰ с мокрым забоем, несмотря на интенсивный искусственный водоотлив. При проходке участков гипсовых отложений пришлось преодолевать усиленное давление пород.

Деревянные крепи временного характера и каменные обделки потребовалось ставить значительно более усиленных сечений. Однако своды на большом протяжении участка удалось выложить с опиранием на породу.

В дальнейшем было приступлено к выборке штроссы и подводке стен в шахматном порядке.

Во время работ ближайший к забою участок с выложенными сводами на протяжении 40 *м* начал значительно оседать. В аварийном порядке стали устанавливать усиленные деревянные крепления. Однако горное давление возрастало до таких размеров, что не удалось удержать катастрофическое движение сводов внутрь выработки. Деформации продолжались около 2 часов. В конце концов своды

обрушились вследствие значительного давления плывуна, прорвавшегося и устремившегося в выработки (рис. 710).

Немедленно было приступлено к устройству перемычек для ограждения от дальнейшего распространения плывунов. Первую перемычку сделали высотой в 3—4 *м*. Вторая перемычка, толщиной в 4 *м*, была сложена из бутового камня на тощем растворе. В перемычке оставили проход, который в случае необходимости можно быстро заделать (рис. 711).

Для соединения обоих порталов в обход места обвала была пройдена параллельно оси тоннеля специальная штольня.

В дальнейшем решили изменить принятый метод работ и перейти к предварительному возведению стен тоннеля и промежуточных стен-опор в штольнях, на которые можно было бы опирать кружала свода (рис. 712).

Разработку верхней части профиля предполагали производить в условиях нарушенных плывунных грунтов и обломков нарушенного свода и креплений. Это представляло большие строительные трудности, так как пришлось прибегнуть к чрезвычайно сложным методам работ на деревянном креплении.

Работы велись исключительно малыми частями при разработке в один прием до 1 $м^3$ грунта комбинированной системой шпунтова-

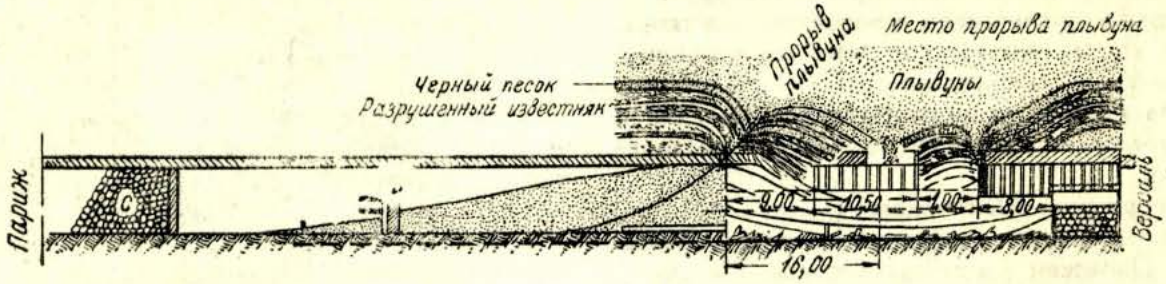


Рис. 711. Продольный разрез по оси тоннеля у места обвала при строительной катастрофе; установлены: первая защитная перемычка *B* на половину сечения и вторая *C* — на полное сечение тоннеля

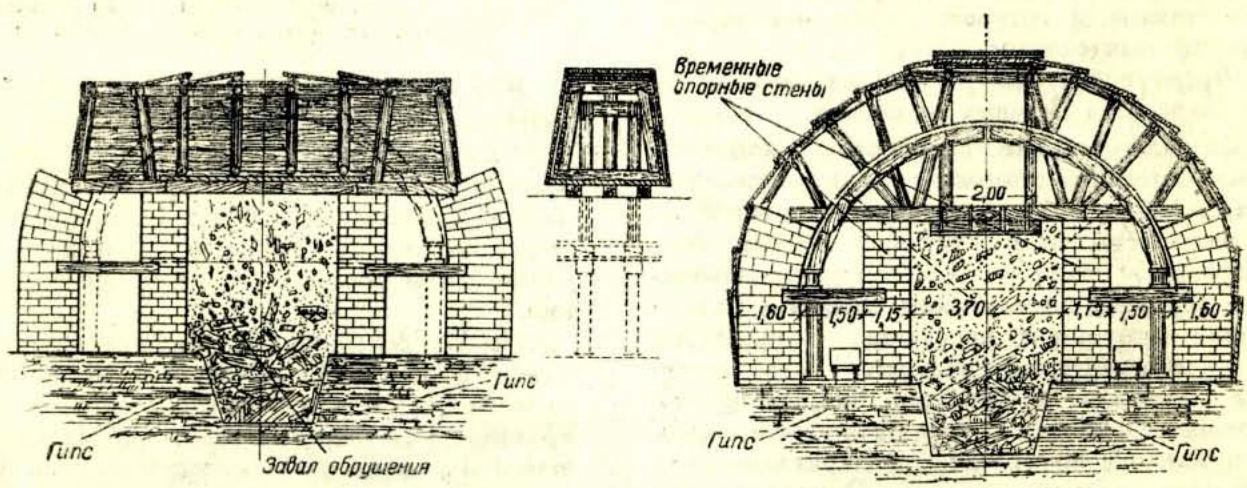


Рис. 712. Устройство временных средних опорных стен и проходка калоттной части тоннеля в месте обвала

ния крепи и разбивки забоя на ряд мелких ячеек. Выемка грунта производилась малыми частями. Снималось по одной шандорной доске во избежание заплыва забоя.

Подобная работа по креплению и выемке породы являлась чрезвычайно сложной, медленной и кропотливой. Так, для разработки одной камеры объемом 1 $м^3$ требовалась вначале целая неделя.

Работы производились при наличии защитной переборки на случай внезапного прорыва плывуна и опасности заполнения существующих выработок.

Проходка забоя со стороны Парижа велась при помощи металлических марчеван по деревянным рамам, продвигаемым в породу при зашитом лбе забоя домкратами, развивавшими усилия от 30 до 70 *т* (рис. 713 а). Металлические марчеваны коробчатого сечения 15 × 15 *см*, склепанные из листов и уголков, задвигались одна под другую, образуя шпунтованную поверхность, выжимали гильзу грунта или, наоборот, затыкались пробкой. Таким порядком раскрывалась калотта в месте примыкания к существующему своду.

Со стороны Версаля атака нарушенного забоя начиналась из поперечной штольни с выходом на центральную штольню; штендеры последней должны были бы опираться на существующий свод тоннельной обделки. Забой сечением 1,6 × 1,6 *м* продвигался при помощи домкратов и коробчатых металлических балок сечением 20 × 20 *см*, длиной 1,2 *м* по всему периметру, при сплошь зашитом лбе.

Толщина свода в замке была назначена в 1,5 *м*. Для обеспечения полной водонепроницаемости обделки внутреннюю поверхность покрыли слоем цемента и уложили листы оцинкованного железа в 1 *мм*, поддерживаемые заанкеренной внутренней железобетонной оболочкой толщиной 30—35 *см*. При этом между последней и внутренней поверхностью обделки нагнетали цементный раствор, который образовывал слой толщиной в 4 *см*.

Прорыв при проходке тоннеля Босрук. В процессе проходки однопутного тоннеля Босрук протяжением 4,7 *км*, заложенного в горном массиве на глубине до 1250 *м* от поверхности, пересекли водообильные доломиты и доломитизированные известняки.

Наличие выклиниваний глинистых сланцев с включением магнезиальных прослойков повышало температуру в тоннеле, доходившую до 21°С. Однако после продвижения забоя на 520 *м* от Южного портала температура начала заметно снижаться. Вошли в зону сильно трещиноватых известняков. Дебит подземных вод доходил до 1100 *л/сек* вследствие прошедших дождей и таяния снегов.

Внезапно произошел большой прорыв воды и измельченной, раздробленной породы в забой, разрушивший временные крепления и приостановивший производство тоннельных работ.

Ликвидация прорыва, занявшая семь месяцев, заключалась в проходке деривационных штолен для отвода вод и в раскреплении и заполнении огромной пещеры, имевшей размеры по высоте, считая от подошвы тоннеля, 22 *м*.

Для производства работ была пройдена наклонная, под углом 30°, штольня длиной 25 *м* от шелыги свода до кровли «купола» вывала. Последний имел объем в 600 $м^3$.

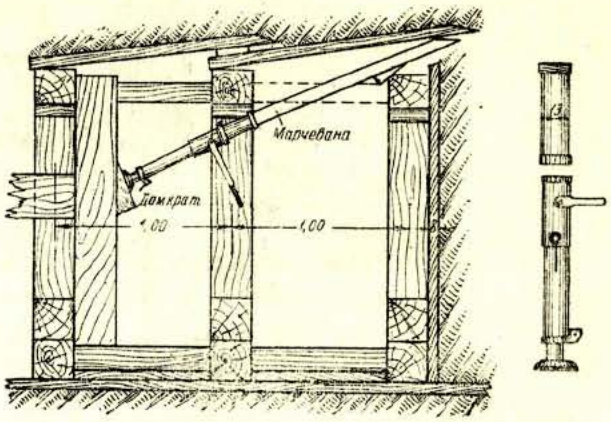


Рис. 713а. Задавливание марчеван при помощи домкрата

«Купол» был тщательно раскреплен усиленным деревянным креплением и засыпан песком с гравием.

Для равномерного распределения давления по высоте «купола» были уложены три горизонтальные, бетонной конструкции плиты толщиною по 60 *см*.

Фазы произведенных в месте вывала специальных работ показаны на рис. 713 б.

Обвал в тоннеле Монмеди. Этот железнодорожный тоннель пробит через горный массив известняков и мергелей. Тоннель, протяжением 800 *м*, проложен двухпутным. Сооружение его началось из порталов и из двух промежуточных рабочих шахт. При прокладке тоннеля пришлось бороться с подземными водами. Для этой цели была пробита боковая дренажная галлерея. На некоторых участках этой галлереи обнаружились настолько сильные подвижки породы, что пришлось ее заложить камнем.

Для перехвата и отвода подземных вод, осложняющих разработку основного тоннеля, была пробита целая система дренажных штолен. При помощи этих штолен работы по прокладке тоннеля были значительно облегчены. Вместе с тем на некоторых участках готового тоннеля обнаружились деформации готовой части обделки и интенсивное проса-

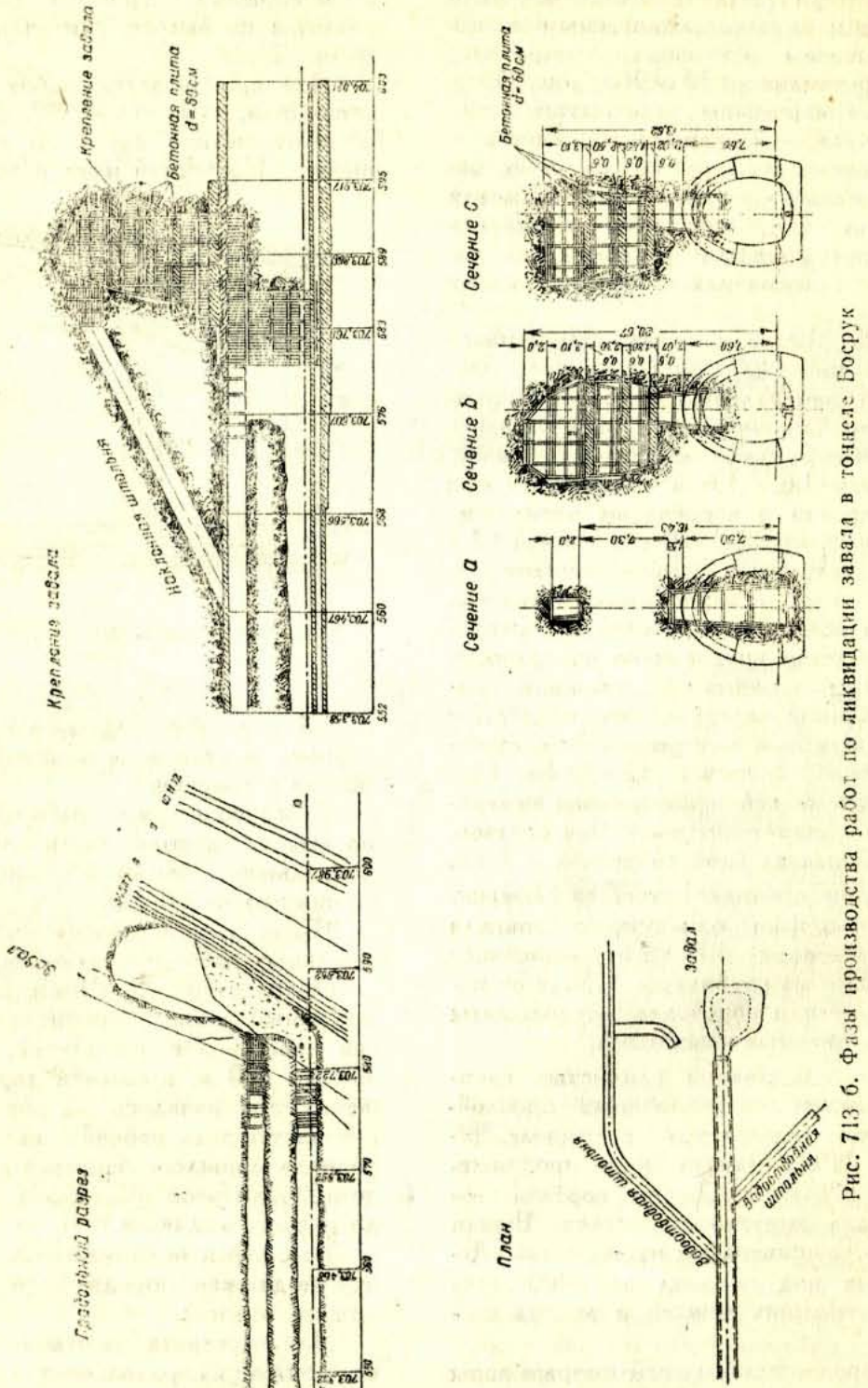


Рис. 713 б. Фазы производства работ по ликвидации завала в тоннеле Босрук

чивание подземных вод. Немедленно были взяты под наблюдение места, где можно было ожидать значительного прорыва напорных подземных вод.

Однако имевший место обвал свода тоннеля на протяжении 12 *м* произошел не в том месте, где это ожидалось, а там, где сама каменная кладка тоннельной обделки была совершенно сухой.

Обвал произошел так. Вначале вывалилось несколько мелких камней из замка свода; вслед небольшое количество мергелистой породы устремилось через образовавшееся в замке свода отверстие, затем внезапным прорывом произошел обвал, заполнивший тоннель на протяжении 28 *м*. Выяснилось, что образовался купол в известняках. Немедленно были приняты меры для установки временного деревянного крепления с целью заполнения образовавшихся пустот, чтобы предотвратить дальнейшее развитие обвала. Системой прочных кружал и крепей была взята на временное крепление кровля породы в месте обвала с расчетом предотвращения его распространения на соседние кольца тоннельной обделки. Однако, несмотря на принятые меры, неожиданным прорывом воды произошел размыв тронутой грунтовой массы, обвал установленных креплений и заполнение породой рельсового пути в тоннеле на протяжении 39 *м*. Обвал при этом распространился до дневной поверхности.

Железнодорожное движение приостановили и приступили к форсированному восстановлению тоннеля специальными методами. Работы в нарушенном обвалом грунтовом массиве производились на сбойку с двух сторон применением мощных деревянных щитов, под защитой которых велась малыми частями выемка обвалившейся тронутой породы. Под влиянием воды слабые слои мергеля превратились в грязь, и работы в ячейках щита приходилось вести с большой осторожностью во избежание выплывов породы и распространения тем самым зоны обвала. Работы осложнялись наличием грунтов с резко отличающимися коэфициентами крепости, а именно: наряду с текучим грунтом имелись включения крепкой, скалистой породы, требующей применения взрывчатых веществ.

Штольни были сбиты через 47 дней после обвала тоннеля. Раскрытие профиля произвели обычным порядком, причем конструкция тоннельной обделки была назначена усиленного типа, из расчета толщины свода в замке 1,5 *м*.

Образовавшиеся в породе за обделкой пустоты тщательно заполнялись, причем после окончания возведения всего контура тоннельной обделки производилась засыпка поверхности. Железнодорожное движение по тоннелю было восстановлено через 50 дней после обвала.

Обвал не прошел бесследно и для соседних колец обделки. В последних обнаружили значительные трещины в сводах, но при тщательном обследовании не было установлено каких-либо опасных симптомов, которые могли бы вызвать беспокойство за устойчивость колец обделки в остальной части тоннеля.

Однако дальнейшее тщательное наблюдение выявило следующее очень характерное явление: на расстоянии около 120 *м* от места обвала, в совершенно надежном месте тоннельной обделки, обнаружили ряд непрерывно раскрывавшихся трещин. Немедленно было прекращено железнодорожное движение.

Причина этого явления следующая. В месте обвала были выложены новые кольца тоннельной обделки из хорошего камня, качеством лучше, чем в соседних кольцах, не подвергавшихся влиянию обвала. При этом выявились обычные условия, при которых трещины появляются в соседних кольцах, не поврежденных до обвала, в тот момент, когда в месте обвала сооружаются более мощные тоннельные конструкции. В этом случае давление породы, которое не в состоянии воздействовать на мощные, вновь возведенные методом реконструкции кольца, распространяет свое усиленное влияние на соседние, более податливые кольца. Последние являются опорами под свод, образуемый над обрушенной частью обделки. При этом происходит явление усиленного давления, нажима на соседние кольца.

Эти обстоятельства заставили провести реконструкцию тоннеля на протяжении 620 *м*. При этом запроектированная ранее толщина ключа в своде 70—80 *см* доводилась до 1,2 *м*.

Прокладкой тоннеля горный массив был значительно нарушен. Пробитые в разных направлениях дренажные галлереи в большой степени изменили режим подземных вод. Мергели, ранее сухие, под влиянием изменения режима вод вспучивались и проявляли

значительное горное давление, на которое тоннельные обделки не были рассчитаны, в результате чего и произошел обвал тоннеля.

В процессе производства работ по реконструкции тоннеля были приняты различные меры, а именно: производилось тщательное наблюдение за каменной кладкой тоннеля, в отношении деформации его, появления трещин и перемещения отдельных элементов обделки; по направлению вдоль стены тоннеля был сооружен круглого сечения штольневый ход, рассчитанный на случай обвала свода тоннеля, — имевшиеся шахты могли служить для выхода на поверхность рабочих в случае аварий; в период эксплоатации был установлен ряд сигналов, пилотаж и т. п. Устроили вращающиеся габариты, отмечавшие положение грузов на железнодорожных вагонах, с целью предотвратить смещение установленных креплений кружал в период движения поездов. Было произведено усиленное освещение всего тоннеля.

В период первого обвала железнодорожное движение было полностью прекращено на 54 дня. В период второго обвала движение прекращено было лишь по одному пути.

Сооружение тоннеля Мон-д'Ор. Тоннель Мон-д'Ор, общим протяжением 6 090 *м*, проходит по территории Швейцарии на протяжении 990 *м*, а по территории Франции на 5 100 *м*.

По геологическому прогнозу, составленному по пересекаемому тоннелем горному массиву, выявлен следующий характер напластований пород. Вначале, от портала Вальроб, тоннель пересекает скалу, переходящую в мергель, включающий напластования известняков. Этот мергель под действием воды обладает способностью разбухать, размягчаться и превращаться в жидкую массу. Напластования мергеля предполагались на протяжении 450 *м*. В действительности же они распространялись по тоннельному ходу на протяжении до 2 300 *м*. Этот мергель имел относительно большое количество включений гипсов. Кроме того, тоннель пересекал на протяжении 270 *м* трещиноватые известняки и на протяжении 820 *м* меловые отложения.

После тщательного изучения геотехнических условий со стороны французского портала был принят одноштольневый бельгийский метод работ, а со стороны Швейцарии — двухштольневый бельгийский способ.

Применением этого обычного метода работ удалось в приведенных условиях развить темпы строительства, характеризующиеся показателем средней скорости 200 *м* готового тоннеля в месяц.

В условиях скалистых пород был применен нормальный тип обделки при толщине свода в ключе от 40 до 60 *см*. Там, где тоннель входил в относительно разрушенный мергель, марганцовистые пески, толщина свода обделки увеличивалась до 80 *см*. В последнем случае тоннельная обделка устраивалась замкнутого контура, с обратным сводом толщиной 65 *см*. В слабом мергеле толщина свода в замке была доведена до 90 *см* при толщине в пятах до 1,25 *м*. В местах с обильным дебитом подземных вод, при значительном гидростатическом давлении, профиль в свету при горизонтальном диаметре обделки 8,6 *м* доводился до 9 *м*, с расчетом на необходимость укладки внутренней оболочки из сболченных между собой чугунных тюбингов.

Усиленные типы обделки применялись также в припортальных участках и в местах, насыщенных водой с включением гипса, где ожидалось вымывание его. Там, где ожидалось давление воды снизу, устраивался обратный свод, рассчитанный на гидростатическое давление. Приток воды начал расти по мере более глубокого пересечения штольней напластований трещиноватых слоев известняков и песков. В нормальное время дебит вод был порядка 30—40 *л/сек*, доходя до 50 *л/сек*. В период таяния снегов и дождей дебит вод доходил до 60 *л/сек*. По мере раскрытия калоттного профиля дебит вод выработки возрастал. Подземные воды приносили большие затруднения в разработке со стороны швейцарского портала, так как при уклоне 13‰ работы велись в мокром забое, несмотря на применение углубленных канав и устройство зумпфов с соответствующей перекачкой.

По мере возведения тоннельной обделки в местах, где имелось довольно сильное действие подземных вод, велось интенсивное нагнетание цементного раствора за обделку. Этим в значительной степени восстанавливался вымытый водой раствор, заполнялись пространства естественных трещин окружающей тоннель породы, а равно полых мест, получившихся в процессе производства работ. Нагнетанием укреплялась и конструкция об-

делки. Следует отметить, что нагнетание дало очень хорошие результаты и заполнило трещины и пустоты в окружающей скале. Нагнетание производилось через отверстия, оставленные заранее в виде отдельных трубок в обделке, или через специальные бурки, заложенные впоследствии. Количество этих скважин было порядка 5—7 на 1 *пог. м*. Дозировка — 50 *кг* цемента при 40 *л* воды. Нагнетание вели от нижних отверстий к верхним, к замку, и неоднократно (2—3 раза). При нагнетании было израсходовано до 12 500 *т* цемента; в среднем 2,06 *т/пог. м* тоннеля.

Со стороны французского портала встречались источники, которые удавалось заглушать без значительных усилий. В местах контактов появлялись источники значительной мощности, вызвавшие ряд осложнений. На расстоянии 4 366 *м* от швейцарского портала была пересечена каверна, заполненная жидкой породой. В момент, когда со стороны Франции было пройдено 1 199 *м* и оставалось до полного окончания тоннеля еще 525 *м* проходки, произошло затопление тоннельных работ. Вначале дебит вод со стороны швейцарского портала был около 12—15 *л/сек*. Когда нижняя штольня со стороны Швейцарии из синего мергеля перешла в трещиноватые известняки, через 150 *м* штольня пересекла трещину шириной от 0,5 до 0,8 *м*, заполненную желтой размокшей глиной. Последняя начала интенсивно подаваться вперед в забой, и через несколько часов в тоннель устремился огромный поток подземных вод, с дебитом до 3 000 *л/сек*. Вследствие нераспорядительности администрации поднялась паника: пустили под уклон рабочий поезд, который столкнулся с поднимавшимся поездом вверх, в результате чего четыре вагона были разбиты. Через день прошли сильные ливни, причем расход воды в тоннеле дошел до 5 000 *л/сек*. Вода устремилась в забое по сечению тоннеля, увлекая за собой до 17 000 $м^3$ вынутой породы, сокрушая на пути все временные сооружения. Через несколько дней дебит вод начал заметно снижаться.

Следует отметить, что в данном случае гидрогеологический прогноз, высказанный геологами, об ожидаемом притоке подземных вод в процессе проходки от 486 до 969 *л/сек*, оказался весьма заниженным. Проложенный водосток размерами 60 × 60 *см* при уклоне 10‰ был рассчитан на расход лишь в 1 000 *л/сек*.

Ближайшая задача заключалась в том, чтобы скорее локализовать действовавший источник подземных вод. Приступили к сооружению каменной перемычки (толщиной в 8 *м*) с замурованными в ней двумя трубами. Вода пропускалась через эти трубы, которые были снабжены специальными кранами. Этим мероприятием устранилась опасность размыва водой грунта основания тоннеля и отпала необходимость в усилении временного крепления. Наличие перемычки предоставило возможность возобновить тоннельные работы между третьим и четвертым километром со стороны швейцарского портала.

Когда были полностью закончены работы по устройству перемычки и вода ограждена от готовой части тоннеля, по показаниям манометра можно было судить о подпоре подземных вод до перемычки. В течение нескольких дней наблюдения давали показания о притоке вод в 350 *л/сек* (1 260 $м^3$/*час*). Перемычка была установлена на расстоянии 106 *м* от контакта синего мергеля и трещиноватых известняков. Сзади перемычки не наблюдалось никакого проникновения воды. Это обстоятельство свидетельствовало о водонепроницаемости окружающей породы. Но одно несомненно — что тоннельным ходом был пересечен ряд каверн, подземных резервуаров и каналов, заполненных водой (рис. 714).

В дальнейшем проводились работы по отводу вод подземного источника № 1. С этой целью была проложена водосточная труба диаметром 80 *см* для отвода воды в реку Ордр. Сзади перемычки были замкнуты тоннельные обделки. Затем был открыт кран трубы, замурованной в перемычке, и вода устремилась по уложенной в тоннеле трубе к реке.

Справившись с этими работами и успешно проводя борьбу с подземными водами у источника № 1, начали дальнейшее продвижение забоя. На расстоянии 4 407 *м* от швейцарского портала был перерезан новый подземный источник, дебит которого достиг огромной цифры в 10 000 *л/сек*. Такой расход считается крупнейшим из встреченных когда-либо при сооружении тоннелей. Он превышает дебит вод, встреченных при прокладке Симплонского тоннеля, в восемь раз. Продолжение работ при таких условиях становилось совершенно невозможным. У источника № 1 была вновь возведена каменная перемычка, которая имела по сече-

нию тоннеля нижнюю штольню, верхнюю штольню и специальную штольню для выпуска воды из 1-го источника. Наличие перемычки создавало значительный подпор подземных вод. Для удаления воды из источника № 2 была пройдена обходная деривационная галлерея, проложенная параллельно, на расстоянии 20 *м* от оси тоннеля. Проходкой этой штольни была разрезана идущая перпендикулярно к оси тоннеля подземная каверна, из которой вода выходила с дебитом 4 000—5 000 *л/сек*. Вода, устремившись по деривационной штольне, довольно быстро осушила окружающий массив.

Дальнейшее обследование горного массива выявило еще ряд трещин, идущих в разных направлениях, разной длины (до 30 *м*), при ширине от 30 до 40 *см*. Вода

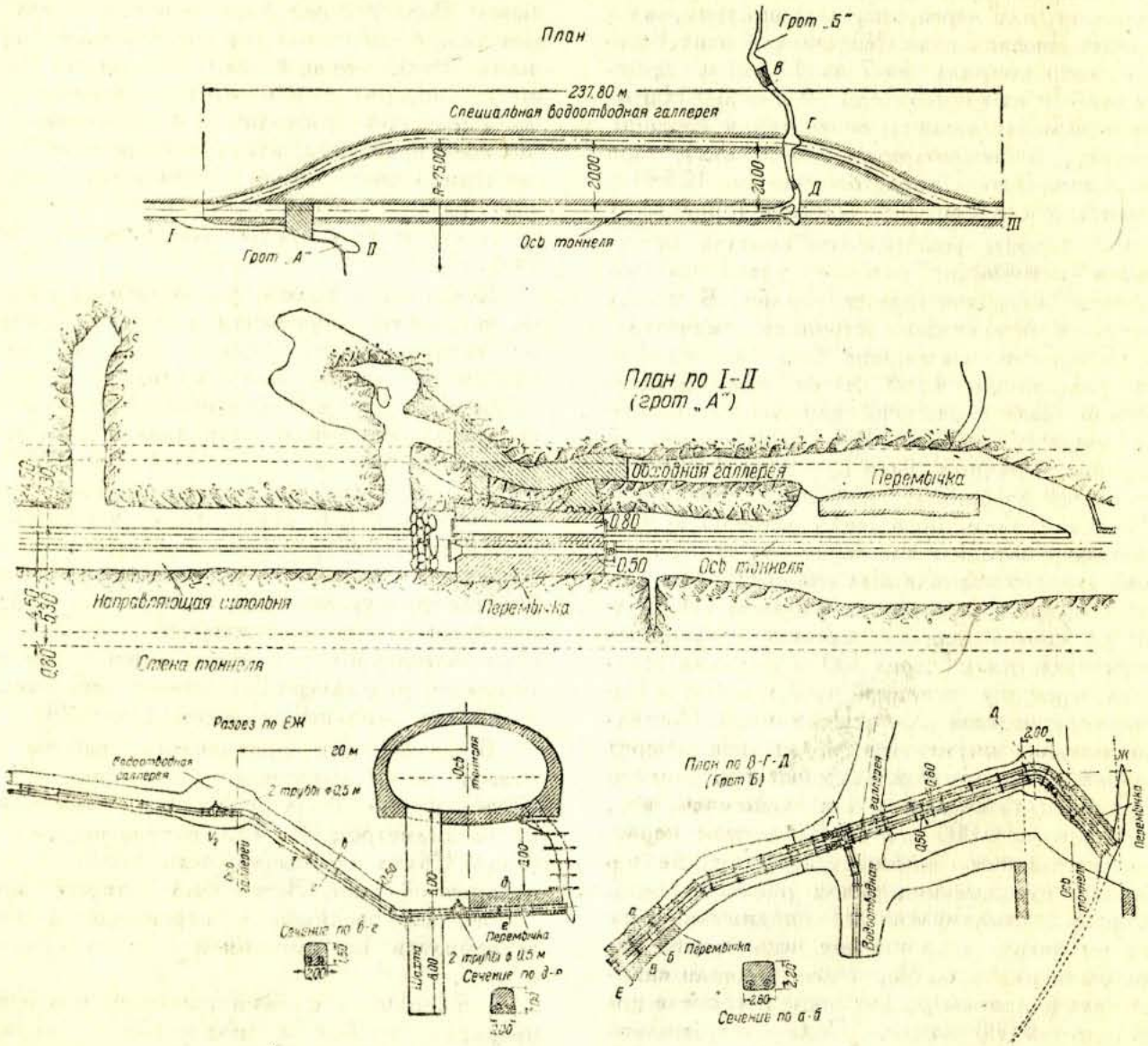


Рис. 714. Пересечение заполненных водой пещер при сооружении тоннеля Мон д'Ор

из них выходила под напором. При неправильной форме расположения каверны и узких трещинах не представлялось возможным произвести осушение массива. Пришлось пройти колодец на глубину 16 *м* ниже подошвы тоннеля и системой штолен и ходов соединить каверну и трещины, применив при этом маммут-насосы для откачки воды.

В некоторых местах трещины расширялись до размеров в рост человека.

Когда были возобновлены основные тоннельные работы по проектной трассе, у 1-го источника разобрали перемычку. На участках нарушенных пород были применены усиленного типа тоннельные обделки с расчетом укладки внутри чугунного тюба или железобетонной рубашки толщиной 20 *см*. Уже в период окончания тоннельных работ на некоторых участках обнаруживалась значительная течь через тоннельную обделку однако, значительные трещины, заполненные обломочным материалом и брекчиями. Местами трещины заполнялись насыщенными водой слабыми породами, обладающими значительной текучестью, с включениями обломочного материала и камней. Выклинивание слабых пород иногда доходило до больших размеров. Так, трасса тоннеля в одном месте пересекала зону протяжением в 43 *м*, заполненную разжиженным грунтом.

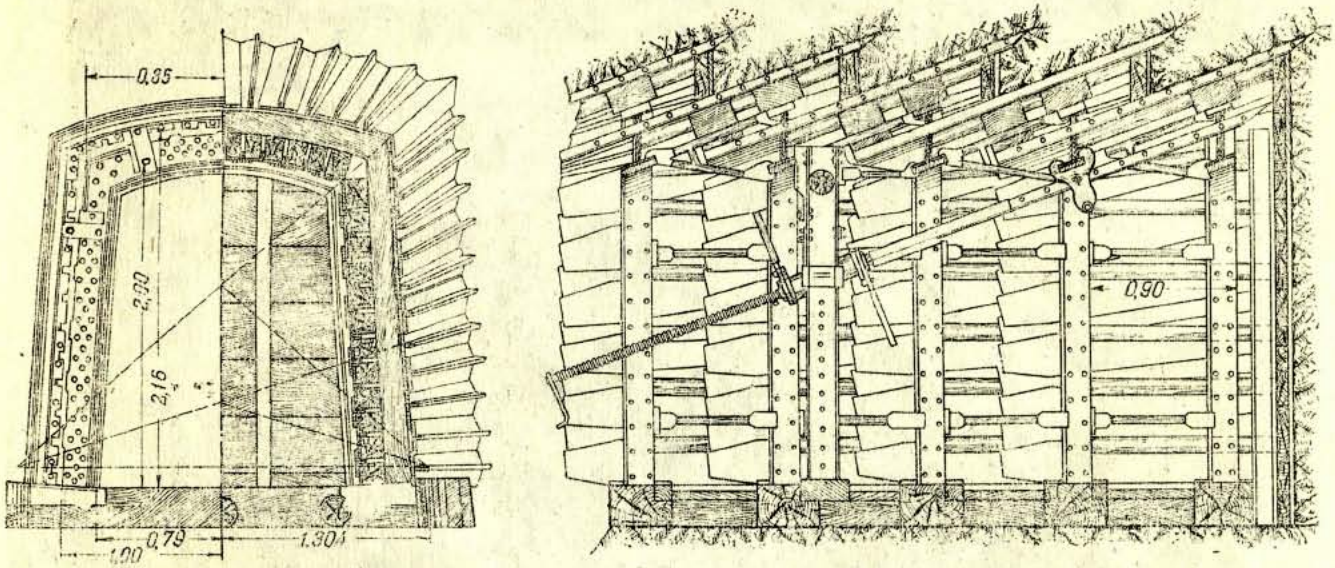


Рис. 715. Тоннель Детенд (металлическое крепление штолен при проходке тоннеля)

вплоть до мощных струй воды, устремившихся сквозь тело тоннеля. Это потребовало реконструкции тоннельной обделки. В одном месте пришлось произвести пробивку стен, причем обнаружилось, что тоннель прорезает каверну, имеющую соединение со вторым источником. После освобождения трещины от воды производилось заполнение ее бетоном и восстановление обделки.

В некоторых местах с водой успешно боролись нагнетанием цементного раствора. Особенных усилий потребовала борьба с напорной водой внизу лотка тоннеля.

Нагнетание цементного раствора производилось под давлением до 6 *ат*. Между обнаруженными источниками, 1-м и 2-м, нагнетали цементный раствор в следующем количестве: на свод было израсходовано 110 *т*, на стены 69 *т*, на лоток 56 *т*. За пределами источников на инъекцию израсходовано 245 *т* цемента.

Прокладка тоннеля Детенд. Этот тоннель был проложен в скалистых породах с большим коэфициентом крепости. Встречались,

Проходка указанного участка началась с пробивки направляющей галлереи. Устройством деревянного крепления все же не удалось достигнуть достаточной водонепроницаемости, и порода устремилась внутрь выработки, проявляя при этом значительное давление. Пришлось заменять деревянное крепление металлическим. Металлические рамы ставились на взаимном расстоянии 90 *см*. Марчеваны кровли, бортов и подошвы также были сделаны из металла. Металлические марчеваны были длиной 2,2 *м*. Каждая из марчеван состояла из двух скрепленных между собой неравнобоких уголков 65×120×14 *мм*. Продвижение марчеван в породу, при полностью затянутом лбе забоя, производилось при помощи винтовых домкратов (рис. 715). Для создания соответствующего упора домкрата при продвижении марчеваны применялись приспособления из металлических стержней, обеспечивающих взаимную связь и поддерживающих верхняки промежуточных рам. Предварительно производилось укрепление лба забоя проходимой штольни,

затем забивались марчеваны кровли, причем каждый раз для пропуска марчеваны через затянутый лоб забоя сверлились отверстия. Затем после устройства затяжки кровли забивались марчеваны бортов штольни. Возникали отдельные затруднения, когда металличе-

Авария на месте разработок тоннелей у станции Сан-Огюстан (Франция). Тоннели, подходящие к станции Парижского метрополитена Сан-Огюстан, были трассированы вдоль подземного коллектора общесплавной канализации. В условиях суглинистых грун-

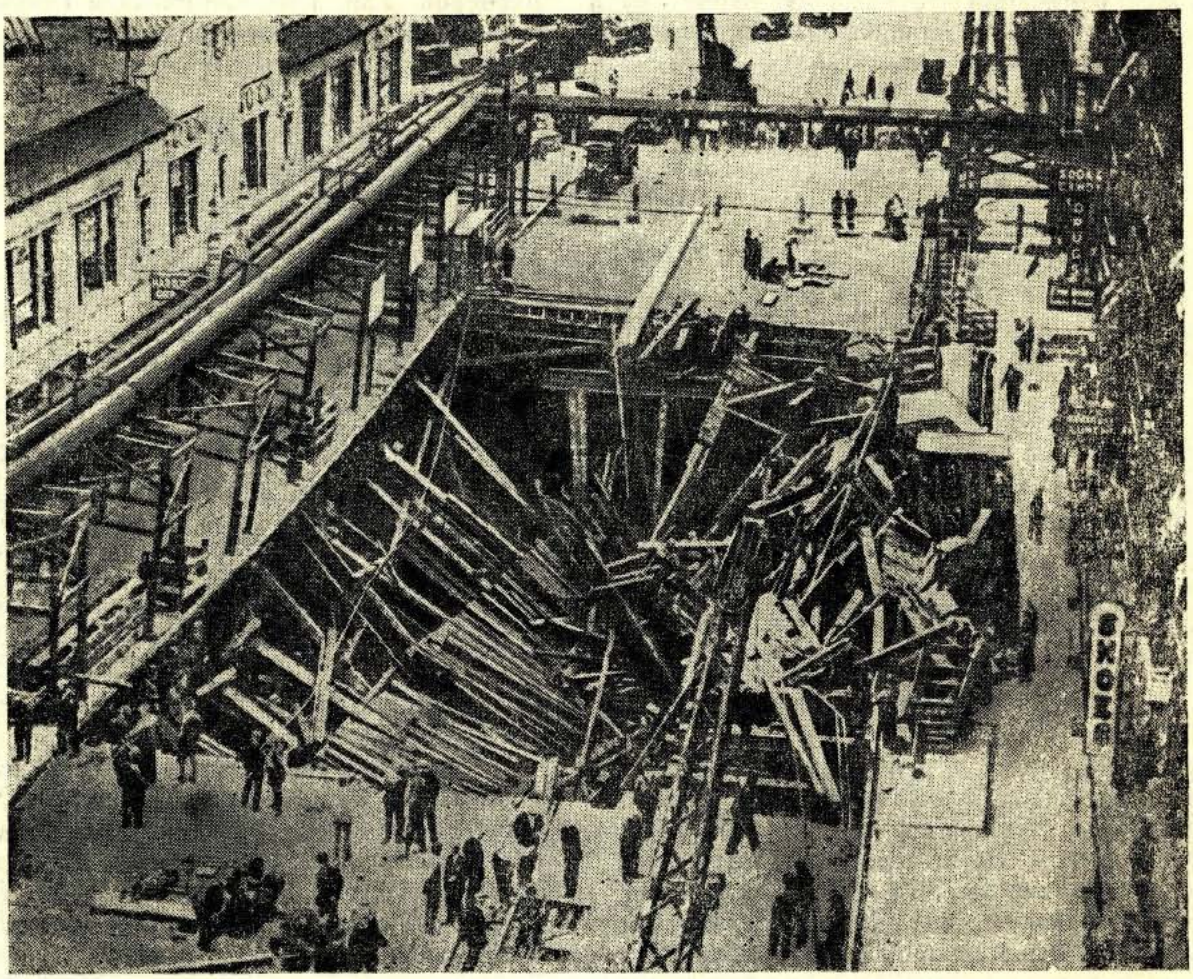


Рис. 716. Вид провала проезжей части мостовой при сооружении тоннеля метрополитена (США)

ская марчевана встречала на своем пути значительной величины камни. Разработку забоя вели небольшими участками, вырезая отверстия в забое 20 × 20 *см*. Немедленно после выборки грунта отверстие это закреплялось со всех сторон. Раскрытие калотты производилось кольцами шириной 1,8 и редко 3,6 *м*.

Тоннельные работы в указанных выше исключительно трудных геологических условиях проводились весьма медленно: средняя скорость проходки тоннеля на этих коротких участках составляла лишь 9 *см* в сутки.

тов была проведена верхняя штольня и приступлено к разработке тоннеля.

Окончание тоннельных работ по раскрытию кольца калоттного профиля совпало с периодом сильного ливня. При огромном расходе ливневых вод коллектор быстро начал работать полным сечением, под напором. Кладка коллектора с одной стороны была лишена пассивного отпора грунта, ввиду наличия раскрытой калотты. Коллектор разрушился, и вода под напором устремилась в тоннельные выработки, расстраивая все крепление и увлекая грунт с боков и сверху.

Однако корка бетонной мостовой держалась, не давая «просадок» и никаких аварийных признаков на поверхности. Но стоило по этому месту пронестись автомобилю — и мостовая, не выдержав веса последнего, провалилась.



Рис. 717. Метрополитен Парижа (укрепление многоэтажных домов на улице Бельвиль при проходке под ними тоннеля метрополитена)

Автомобиль устремился по вертикали и, застряв в калоттной выработке, похоронил своих пассажиров.

Провал проезжей части мостовой имел место также и в американской практике при сооружении тоннеля открытым способом (рис. 716).

Аварии с домами в Париже при проходке возле них тоннелей метрополитена. При проведении тоннелей новой линии Парижского метрополитена от станции Репюблик к станции Лефат очень сильно пострадали дома, с которыми недостаточно считались в процессе ведения тоннельных работ.

Работы велись на глубине 12—15 *м* от поверхности земли в меловых и гипсовых отложениях с выклиниванием суглинков и водоносных песков. При проходке грунт взрывали большими зарядами и мало обращали внимания на дома, имевшие слабые фундаменты.

В результате старые дома на улице Вибург претерпели большие деформации, и их фасады потребовалось значительно усилить системой деревянных контрфорсов. Последние представляют собой ряд подкосов, основанных на пакетах из металлических балок, заделанных в бетонные фундаменты. Подкосы упираются по фасаду в местах междуэтажных перекрытий.

Наиболее сильно пострадали от тоннельных работ дома по улице Бельвиль (рис. 717). Здесь, по наблюдениям автора, около

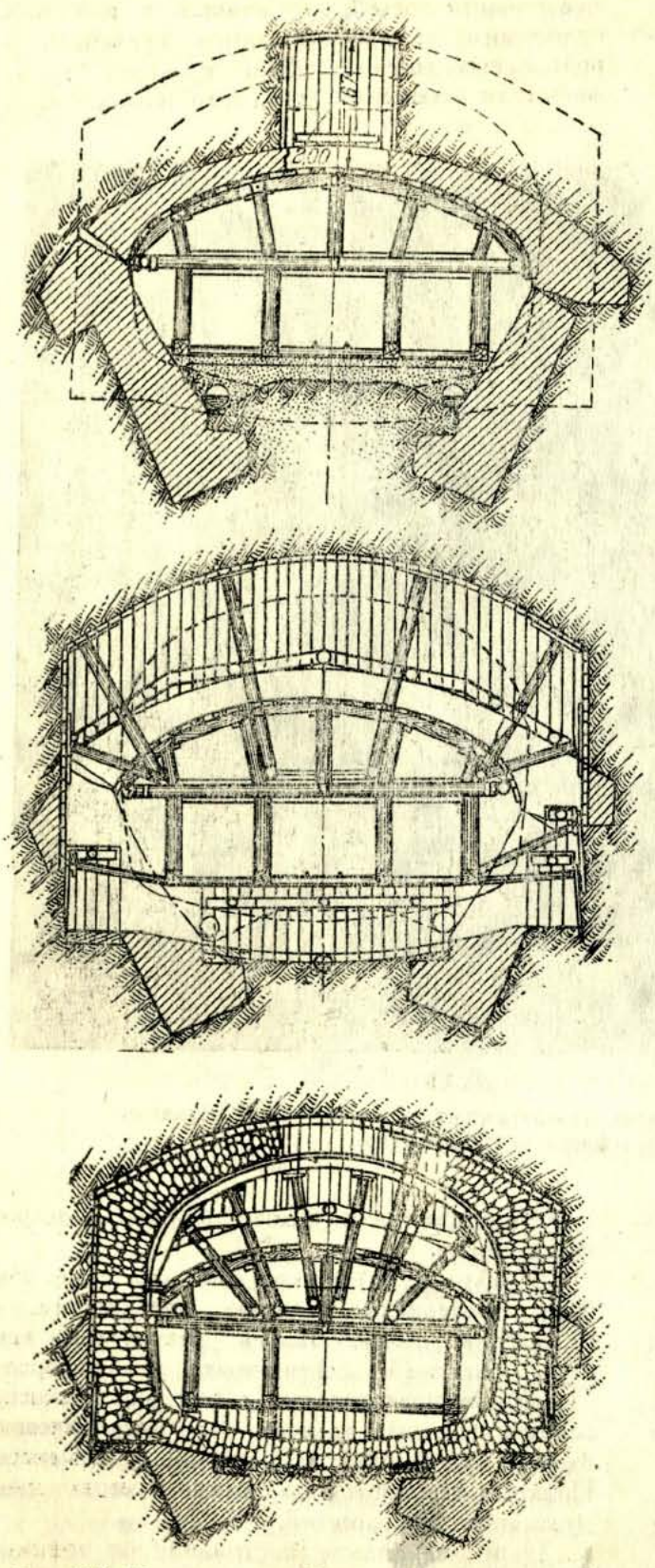


Рис. 718. Метрополитен Парижа (фазы восстановления разрушенного тоннеля под Авеню Марсе)

десяти пяти-шестиэтажных домов усиленным деревянным креплением буквально удерживались от развала; эти дома были освобождены от жильцов и предназначены к сносу.

Оконные отверстия были взяты в досчатые оклады и раскреплены зигзагообразно. Каждый простенок укреплялся деревянными контрфорсами. Особенно тщательно раскреплены были углы зданий. Вопрос осложнялся тем, что сама поверхность улицы, вдоль которой проводились тоннельные работы, имела уклон порядка 25°.

Все дома, как бы находясь на косогоре, проявляли усиленную тенденцию к сползанию.

Производитель работ, бравируя своим долголетним опытом, погнался за экономией в части необходимых технических мероприятий по укреплению фундаментов.

Условия тоннельных работ в городе требуют исключительно внимательного изучения, надлежащей оценки всех городских факторов и принятия необходимых технических мер еще до начала основных работ.

Авария при сооружении тоннеля под Авеню Марсе. При сооружении тоннелей Парижского метрополитена под Авеню Марсе имел место катастрофический случай разрушения выведенной каменной обделки. Проходка тоннеля велась в песчаных грунтах, насыщенных водой в нижней части профиля. Калотта раскрывалась по бельгийской системе, и, по причине относительно слабой водоносности грунта, свод устраивался с расширенными пятами. Подводка стен производилась обычным порядком. В дальнейшем тоннельные работы были прекращены примерно на год, и тоннель оставался без лотка.

Работы возобновили выборкой грунта под обратный свод участками по 3 *м*. В процессе раскрытия второго участка лотка проявилось усиленное движение стен внутрь сечения тоннелей. Стены тоннеля повернулись, кладка в пятах раскрылась и свод осел, увлекая за собой вышележащую породу. В результате на поверхности мостовой образовалась воронка глубиной в 1,6 *м* и в плане 10 × 12 *м*.

Строительная катастрофа распространилась на тоннельный участок протяжением 38,5 *м*.

Немедленно были развернуты работы по ликвидации дальнейших деформаций. По подошве выработки было уложено временное железобетонное основание, на которое установили усиленную систему деревянных креплений для поддержания свода.

Крепление состояло из ряда лежней, на которые были установлены стойки, поддерживающие большой швеллер-тиранту, воспринимавшую через штендеры давление разрушенного свода (рис. 718).

В дальнейшем был назначен усиленный тип тоннельной обделки при толщине замка свода 1,07 *м*. Производство работ началось с пробивки верхней центральной штольни по новому калоттному профилю. Раскрытие тоннеля производилось на полное сечение при длине кольца в 1,6 *м*. Устройство обделки велось последовательно от кладки лотка к стенам и своду, от пят к замку.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ

ТЕОРИЯ ДАВЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В СВЯЗИ С РАСЧЕТОМ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ

Горное давление, проявляемое на тоннельную крепь, находится в такой разнообразной связи и сложной взаимозависимости от множества природных факторов, что при современном состоянии наших познаний невозможно получить практически безукоризненную теоретическую формулировку этого явления. Однако установление правильного, необходимого для строительных целей прогноза о характере, величине и направлении горного давления — задача практически вполне одолимая. Основываясь на экспериментальных данных мировой тоннельной практики и материалах опытной проходки местных направляющих галлерей, представляется возможность сделать практические выводы, служащие руководящей ориентировкой проектировщику и производственнику.

При пересечении подземной выработкой грунтового массива проявляется горное давление, непосредственно действующее на крепление. Вопросы характера, направления и величины этого давления, однако, еще настолько не разработаны, что строителям приходится довольствоваться лишь примерной оценкой, устанавливаемой геотехническим прогнозом.

Статика сооружений дает возможность математически рассчитать конструкцию обделки в том случае, когда известны величины и направление действия внешних сил. Но в условиях тоннельного режима характер внешних сил, первооснова статического расчета, до сих пор чрезвычайно слабо изучен, вследствие чего нельзя получить исчерпывающих данных о действительных напряжениях, возникающих в элементах обделки под влиянием окружающей породы.

Представление о сущности горного давления сложилось на основании практики, систематических исследований, наблюдений за строящимися и эксплоатируемыми тоннелями, рудниками и путем экспериментальных, лабораторных и теоретических работ.

При проходке тоннелей метрополитенов и подводных тоннелей на небольших относительно глубинах вопрос о давлении пород на обделку разрешается обычно учетом полного веса всей налегающей земляной толщи до поверхности.

Вопрос о характере и величине давления на обделки горных тоннелей еще не получил своего полного разрешения. В результате научных работ последнего двадцатипятилетия сложились следующие гипотезы.

Теория пластических деформаций гидростатического давления пород проф. Гейма (Цюрих) утверждает, что на определенных глубинах не существует ярко выраженной разницы между жидкими и твердыми породами.

Гейм считает, что порода остается в твердом состоянии, пока она подвержена действию одностороннего давления. Как только обнаруживается всестороннее давление, превосходящее по величине прочность породы, в последней возникают пластические деформации. Далее Гейм утверждает, что порода на определенной глубине воспринимает вес вышележащих пород. А отсюда следствие: кровля тоннеля подвергается полному давлению всей налегающей толщи горного массива. Предполагается, таким образом, что на больших глубинах, при значительном давлении, горные породы могут находиться в пластическом состоянии. Примерно такого же взгляда придерживаются Адамс, Ван-Хейз, Поскинс и Грубенман.

Теория пластических деформаций пород Гейма, однако, не подтверждается на практике в глубоко заложенных тоннелях.

Инженер Брандау доказывает неправильность геймовской теории следующим практическим соображением: несущему своду Сен-Готардского тоннеля, залегающего на глубине около 1,5 *км* от поверхности и рассчитанному, по теории Гейма, на поддержание всего вышележащего грунта, необходимо назначить толщину в замке около 5,5 *м*, а существующий свод размером в замке 65 *см* должен был несомненно обрушиться. В действительности же этот свод прекрасно работает.

По другой теории давления пород на обделки, при пробивке тоннельного хода образуется *естественный свод*, защищающий кровлю от давления всей вышележащей толщи. Однако породы, заключающиеся внутри естественного свода, имеют тенденцию к движению. Образуется зона обрушения, в которой сила тяжести породы превалирует над силами сцепления. вследствие чего порода производит давление на тоннельную крепь.

Приведенная концепция признана сейчас большинством практиков тоннельного дела, но трактуется многими из них своеобразно.

С целью выявления характера распределения и величин давления грунтов в большом масштабе производились исследования, наблюдения и эксперименты. Ставились опыты по искусственному сжатию пород, выявлялись направления силовых линий и разрабатывались диаграммы напряжений вокруг полости тоннельного отверстия.

Сделан ряд исключительно интересных математических исследований, основанных на теории упругости. Но все они все же не дают ключа к практическому разрешению вопроса о горном давлении.

Особенно ценными являются работы проф. Протодьяконова и проф. Ржиха, которые утверждают, что на тоннельную крепь давит лишь часть грунта, находящаяся ниже границы естественного свода. Выше последнего частицы грунтового массива находятся в равновесии и не испытывают дополнительных напряжений.

Очертания и размеры этого естественного свода зависят от физико-механических свойств пересекаемых пород, характера строения грунтового массива и напластования пород, водоносности, пролета и форм выработки, качества крепления и времени нахождения выработки в естественном состоянии без крепления.

Из числа приведенных факторов Ржиха считает доминирующими физико-механические свойства пересекаемых пород. Последние он подразделяет на четыре категории:

1) гомогенные, твердые породы;

2) пластичные породы (глинистые);

3) сыпучие сухие грунты (гравий, пески, галька);

4) породы плывунного характера (водоносные пески).

При проходке тоннеля в твердых породах в кровле образуется:

а) *сфера стремительного обрушения*, в пределах которой нарушенные частицы породы производят непосредственное давление на тоннельную крепь;

б) *сфера замедленного обрушения*, в пределах которой нарушенные частицы породы также проявляют давление на крепь;

в) *сфера пластичного состояния породы*, в пределах которой частицы устремляются в выработку в случае разрушения тоннельных креплений под давлением пород в пределах зоны обрушения;

г) *сфера статического равновесия пород*, не оказывающая непосредственного влияния на крепление выработки.

Значительное горное давление и в частности местное явление пучения обнаруживается в мягких породах: в глинах, подвергшихся действию выветривания, мергелях, сланцах, гнейсах и других горных породах, теряющих свою связность при обнажении поверхности пласта. Особенно обнаруживается это явление под влиянием времени, а главное — воды. Последняя способна воздействовать на некоторые породы и химически, делая их размягченными и даже плывучими, что осложняет процесс ведения тоннельных работ.

Практика строительства ряда тоннелей в Советском Союзе, Англии, Америке, Японии и других странах богата замечательными примерами появления значительного горного давления в мягких, пучащихся, «дующих» грунтах. Силы пучения не только деформируют, ломают весьма солидное временное крепление, но затрудняют подземные работы и приводят иногда к обрушению уже возведенных с большим трудом тоннельных обделок.

При проходке в условиях выветренных пород последние под действием воды могут иногда терять свою связность и, превращаясь в плывучий глинистый материал, начинают вытекать через щели обшивки временного крепления, образуя пустоты. Нарастающее

горное давление может привести к обрушению крепи, если во-время не принять соответствующих мер.

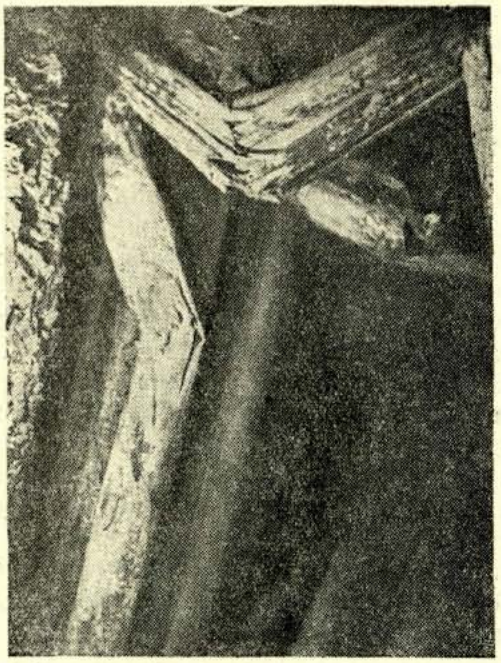


Рис. 719 а. Хаунштейнский тоннель (деформация элементов крепления штольни)

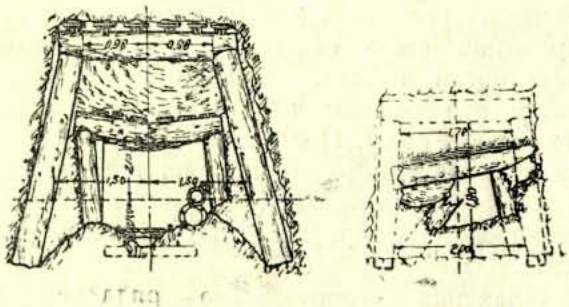


Рис. 719 б. Поломка штольневого крепления Караванкенского тоннеля

При проходке в глинистых грунтах, в условиях воздействия воды, неизбежно пучение грунта. В этом случае глина начинает «дышать» и проявляет усиленное давление на крепи (рис. 719 а, б).

Известны случаи, когда для беспрепятственного расширения глины между породой и крепью оставлялся промежуток около 18—20 *см*. Но все же давление было настолько значительным, что сплошные штольневые оклады из дубового лесоматериала, диаметром до 40 *см*, деформировались и обрушались. Такие явления наблюдались при постройке лондонских подземных железных дорог до применения щита, в ряде тоннелей Японии (Кодмару, Курэку) [1], при сооружении тоннеля Аспен (рис. 720), а также при строительстве тоннелей Московского метрополитена (рис. 721).

В других случаях при пересечении глинистых грунтов горное давление вначале почти отсутствовало. Впоследствии же глина проявляла усиленное, все нараставшее давление на крепи. Успех проходки в глинистых породах может быть достигнут только при немедленном (вслед за временным деревянным креплением) возведении постоянной крепи, т. е. выработка берется в постоянную обделку. В противном случае неизбежны деформации крепей, осадки и т. п.

* * *

Если проблема горного давления, как содержащая много неопределенных факторов, до сих пор полностью не разрешена, то применительно к сыпучим, сухим породам имеются данные, дающие возможность получить практические цифры, мало разнящиеся от данных действительных природных условий.

Проведенные эксперименты и богатейшая практика тоннельных работ указывают, что при малейшей осадке крепей начинает зна-

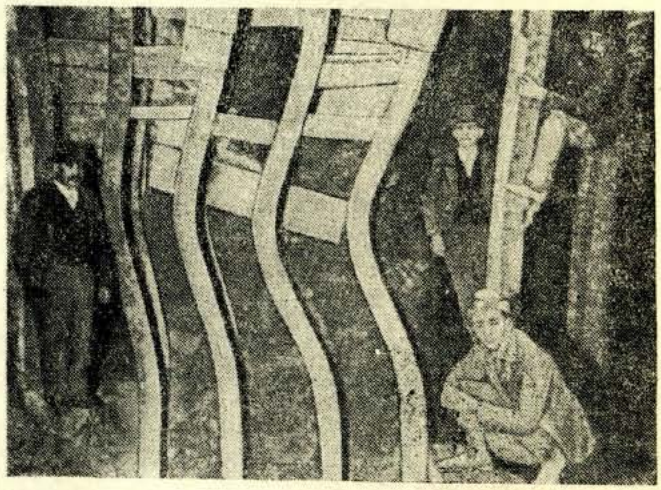


Рис. 720. Тоннель Аспен (деформация металлического крепления)

чительно сказываться действие горного давления.

Наличие внутреннего трения между частицами имеет известное разгружающее

[1] Sacuro, Tunneling work. Tokyo. 1926.

влияние, в результате чего происходит неполное давление всей вышележащей над кровлей выработки толщи, иначе говоря — происходит разгрузка крепи при разряжении напряжений в окружающем массиве. В данном случае, конечно, не имеются в виду тоннели мелкого заложения.

На основании ряда опытов Энгессера, Риттера, Бирбаумера и в особенности Форхгеймера, в соответствии с законами равновесия сил внутреннего трения и объемного веса грунта, найдены зависимости, облеченные в теоретические формулы, которыми определяется количественная сторона горного давления в сухих, неустойчивых породах.

Ключ к уяснению природы горного давления в сухих, сыпучих породах могут в известной степени дать результаты экспериментальных работ Прантэ, Энгессера, Янсена, Плейснера, производивших научные наблюдения над характером загрузки и распределения давления зерна в силосах элеваторов. Установлено образование разгружающего свода в зависимости от размеров давления, объемного веса зерна и степени подвижности его.

Максимальное горизонтальное давление зерна T_{max} и максимальное вертикальное давление зерна P_{max}, находящегося в силосе на глубине h, по Янсену выражаются следующими формулами:

$$T_{max} = \frac{\gamma S}{\operatorname{tg}\rho \cdot N}, \quad P_{max} = \frac{\gamma S}{\operatorname{tg}\rho k \cdot N},$$

где γ — объемный вес зерна, S — квадратура поперечного сечения силоса, N — периметр силоса, $\operatorname{tg}\rho$ — значение коэфициента трения зерна по стенке силоса.

Величина коэфициента k берется, по Каннену, в зависимости от угла естественного откоса зерна:

$$k = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right).$$

Угол ψ, определяющий направление действия силы давления зерна на стенки силоса, выражается формулой:

$$\operatorname{tg}\psi = \sqrt{\frac{T}{2p}},$$

где T — величина горизонтального давления, а p — удельное вертикальное давление зерна на глубине h.

Энгессер в результате постановки ряда опытов с песчаными грунтами в лабораторных условиях вывел главенствующую роль силы сцепления грунтов и пришел к следующим формулам, по которым исчисляется так называемое критическое давление P, с появлением которого происходит процесс нарушения породы на величину h:

$$P = 4\gamma l^2 \left[\frac{h\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{2h\operatorname{tg}\varphi + l\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)} + \frac{\operatorname{tg}\varphi}{6}\right]$$

где φ — угол естественного откоса сыпучего грунта, γ — объемный вес грунта,

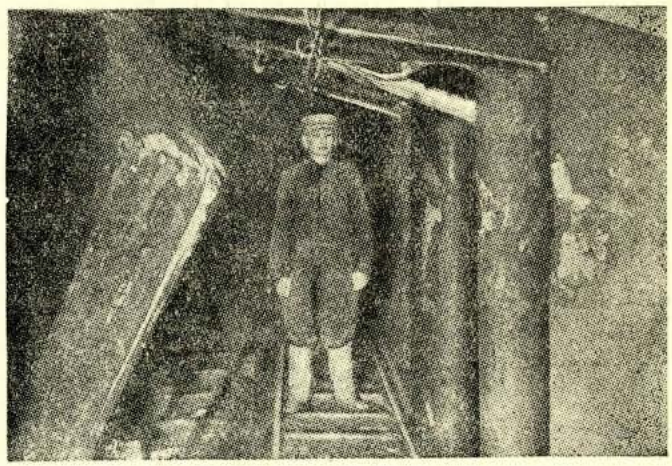


Рис. 721. Московский метрополитен (деформация крепи от вертикального и бокового давления в штольне)

l — полупролет выработки и h — глубина заложения выработки от поверхности.

Следует констатировать, что ряд проверок формул Энгессера на практике выявил расхождение в полученных им результатах порядка 30—60%. Последующие опыты Прантэ и Люфта подтвердили, однако, возможность пользования формулами Энгессера при соответствующих коррективах.

Большие исследовательские работы по сыпучим грунтам проведены Бирбаумером и Форхгеймером. Эти авторы в результате исследований пришли к выводу, что давление породы на крепь находится в пропорциональной зависимости от объемного веса вышележащей породы, угла внутреннего трения и пролета тоннельной выработки.

По Бирбаумеру, в песчаных грунтах образуются вертикальные плоскости скольжения, по которым устремляется в выработку нарушенная порода. При этом величина давления

породы уменьшается за счет трения по образуемым плоскостям (рис. 722).

Вес давящего грунта, по Бирбаумеру [1],

$$G = \theta \cdot \gamma \cdot b \cdot H,$$

где $\theta < 1$ — коэфициент, зависящий от угла внутреннего трения грунта, γ — объемный вес грунта, b — ширина выработки и H — заглубление шелыги свода.

Величина коэфициента θ определяется максимальным значением, полученным при определении его из следующих двух формул:

$$\theta = \left[1 - \frac{\lambda \cdot H}{b + 2h\xi}\right]\xi^2$$

и

$$\theta = \left[1 - \frac{\lambda \cdot H}{\frac{\lambda H + b}{2} + \sqrt{\left(\frac{\lambda \cdot H + b}{2}\right)^2 + Hh\xi^4}}\right]$$

где h — высота тоннельной выработки

$$\xi = \operatorname{tg}\left(45° - \frac{\rho}{2}\right) \text{ и } \lambda = \xi^2 \operatorname{tg}\rho.$$

Минимальное значение:

$$\theta_{min} = \operatorname{tg}^4\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) = \xi^4,$$

где ρ — угол внутреннего трения.

Максимальное горное давление песчаной призмы обрушения установлено следующей формулой Форхгеймера:

$$p = \gamma \frac{1 + 2\operatorname{tg}^2\rho}{\operatorname{tg}\rho} \cdot \frac{b}{2}.$$

При исследовании вопроса о горном давлении в насыщенных водой, в частности песчаных грунтах необходимо учесть следующее обстоятельство, связанное с производственными мероприятиями. Если по условиям физико-механических свойств этих грунтов имеется возможность произвести осушение их при помощи дренажа, искусственного водопонижения или сжатого воздуха, то задача сводится к рассмотренным выше теориям горного давления в сыпучих, сухих породах. В случае применения тампонажа, силикатизации, замораживания, закрепляющих слабый грунт, в зависимости от степени распространения искусственного закрепления следует рассматривать вопрос уже в соответствии с теориями горного давления в связных грунтах, с учетом упругих напряжений. Если же предполагается вести работы в плывунных грунтах на данном отрезке, без применения приведенных специальных приемов, при тщательном плотном креплении методом пикотажа, итальянским способом, то приходится считаться со свойствами текучести грунта, его подвижностью и напором. При оценке давления на тоннельные выработки в слабых грунтах плывунного характера Терцаги считает возможным пользоваться формулой Форхгеймера, до минимума снижая, в зависимости от тонкости зерна песка, значение угла внутреннего трения ρ. При этом соответственно увеличивается величина горного давления.

В виде примера Терцаги указывает, что при снижении параметра ρ в формуле Форхгеймера от $\operatorname{tg} 33° = 0{,}65$ до величины 0,1, характеризующего расплывающийся грунт, не держащий откоса, величина горного давления на крепи соответственно возрастает с 9,1 до 17,3 и даже до 32,6 $т/м^2$. Таким образом, Терцаги считает, что практически величину горного давления в плывунных породах можно определять и по формуле Форхгеймера, при условии правильности определения коэфициента трения для данных грунтов.

В плывунных грунтах наблюдается значительное уменьшение величины коэфициента внутреннего трения и давление приближается к гидростатическому.

Помимо вертикального давления, являющегося главенствующим, в выработках наблюдается и боковое давление. Последнее обнаруживается по характеру деформаций крепей и тоннельных обделок, элементы которых испытывают действие сдвига в сторону от продольной оси тоннельного сооружения.

На строительстве Чикагского метрополитена в 1940 г. проф. Терцаги исследовал горное давление при проходке тоннеля диаметром 8,5 $м$ щитовым способом, в мощном пласте пластичной голубой глины, на глубине 12 $м$ от поверхности. В основании тоннеля выявлено давление грунта на сжатие 10 $т/м^2$, а над шелыгой свода 5 $т/м^2$. Произвели измерения горизонтального и вертикального диаметров обделки, в конструкции последней были заложены приборы для измерения возникающих напряжений от давления окружающих грунтов.

[1] Birbaumer, Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerks. Leipzig — Berlin, 1913.

Показания приборов в течение $1^1/_2$ месяцев снимались через 3 часа после замыкания тоннельного кольца.

Давление на обделку нарастало постепенно и на 14-й день стабилизовалось. В условиях чикагских глин установлено, что боковое давление составляет 60—80% от вертикального.

Аналогичные экспериментальные наблюдения проведены Скептоном на тоннелях Лондонского метрополитена и Хаузелом в тоннеле под Центральной авеню в Детройте. Хаузел наблюдал за работой тоннельной обделки в течение десятилетнего периода (1931—1941). При этом было выявлено, что полная стабилизация грунта вокруг тоннеля ($D = 2{,}85$ *м*), залегающего в голубой глине, наступила только через пять лет после проходки. Тангенциальное давление на обделку составило 66% от вертикального давления.

Таким образом, величина этого тангенциального давления определяется примерно в 20—80% от вертикального горного давления.

Зависит она от рода напластований и дислокаций затрагиваемых пород и от склонности пластов к перемещению. В частности, имеются в виду оползневые явления. Боковое давление проявляется особенно в подвижных грунтах.

В некоторых случаях, когда ожидаются значительные сдвиги (случай проходки тоннеля по косогору), прибегают к устройству несимметричных обделок с обратным сводом. Иначе неизбежны деформации крепления и изменения внутренней конфигурации облицовки.

* * *

В основу своей теории горного давления Риттер кладет действие силы тяжести естественного свода грунта, образующегося над тоннельной выработкой. Одновременно учитываются силы сопротивления отрыву свода от всей налегающей земляной массы (рис. 723).

Таким образом, величину давления T на крепи тоннельного профиля Риттер приравнивает к весу параболоида грунта Q, за вычетом силы сцепления его S по контуру отрыва:

$$T = Q - S = a\gamma\left(\frac{a^2}{48\,S} - S\right),$$

где T — давление породы в *кг*, Q — вес параболоида грунта в *кг*, S — сопротивление породы на разрыв в *кг*, a — пролет выработки и γ — вес 1 $м^3$ грунта в *кг*.

Высота параболы обрушения по Риттеру в *м*:

$$h = \frac{a^2}{16\,S}.$$

Не имея данных величины S сопротивления пород на разрыв, Риттер предложил

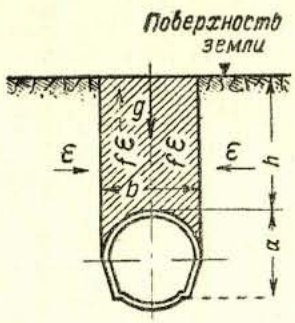


Рис. 722

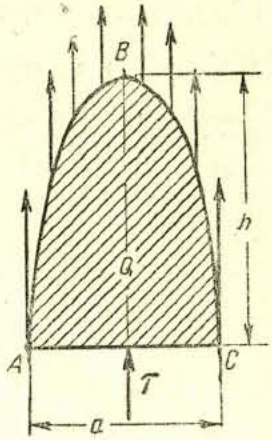


Рис. 723

оперировать величиной γS, приравняв ее силе сцепления грунтов между собой γC.

Величина C для плотных глин установлена около 0,25—0,45. Однако в водоносных, песчаных грунтах формула Риттера дает результаты, не совпадающие с данными практики. Так, например, для песчаных и гравелистых грунтов, обладающих силой сцепления $C = 0$, высота параболы по формуле Риттера превращается в ∞, что расходится с действительными условиями работы тоннельных обделок, заложенных в сыпучих грунтах.

Давление на тоннельную облицовку снизу вверх встречается на практике довольно редко, главным образом при сооружении подводных тоннелей.

Давление, направленное вдоль оси тоннеля, в случае своего проявления приводит к разрушению портальных колец, если они не обеспечены надлежащей устойчивостью.

Особое внимание следует обратить на так называемое местное давление породы, которое в меньшей степени зависит от характера и свойств пересекаемых напластований, а главным образом вытекает из выбранного метода и качества выполнения тоннельных работ.

Продолжительное пребывание выработки на временном креплении меняет структуру грунта, нарастает усиленное давление, крепи деформируются, и дело доходит до обвалов.

Поэтому тоннельные работы должны вестись быстрыми темпами. Нагнетание раствора за тоннельную облицовку должно восстанавливать нормальный режим, обеспечивающий статическую работу обделки.

Проф. Терцаги на основании своих экспериментов и математических выкладок, основанных на теории упругости, выявил характер распределения напряжения у полости тоннельного отверстия. Считая, что величина давления распространяется равномерно в радиальном направлении, Терцаги дает диаграмму напряжений по лучу, проходящему через центр тоннельного отверстия (рис. 724).

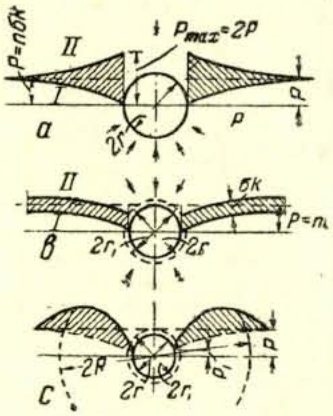


Рис. 724

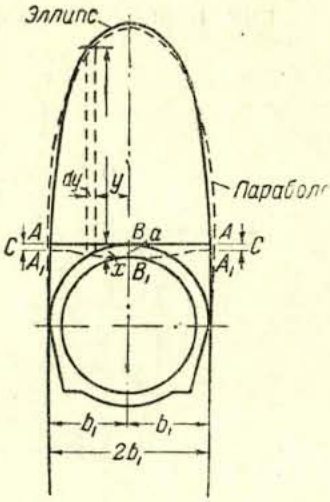


Рис. 725

Для твердой породы кривая I идет от нуля у точки пересечения кривой с горизонтальным диаметром, где отсутствуют напряжения в радиальном направлении, и постепенно возрастает до величины действующего давления p. Кривая II, отражающая тангенциальные напряжения, имеет вначале максимальную ординату $p_{max}=2p$ и снижается до величины действующего давления p. Обвал незакрепленной тоннельной выработки происходит, по Терцаги, в случаях, когда величина максимального касательного напряжения $p_{max}=2\ p$ превосходит величину временного сопротивления породы, пересекаемой тоннелем.

Для грунтов, могущих подвергаться пластическим деформациям, Терцаги дает диаграмму напряжений, изображенную на рис. 724, с.

Математические теории горного давления, принимающие в основе горный массив, прорезаемый тоннелем как упругое изотропное тело, базирующиеся на упругих константах грунтов, при всей строгости математического анализа, в конкретных условиях приводят к выводам, которые не могут пока быть приняты для практических целей.

В действительности условия разнородности напластования грунтов и их резко отличающихся физико-механических свойств при современном состоянии науки в этой области не дают возможности принять теорию горного давления, базирующуюся на математической теории упругости, учитывающей напряженное состояние и деформации *однородного упругого горного массива* до и после прокладки в нем тоннельного сооружения.

В этом направлении необходимо вести дальнейшую научно-исследовательскую и экспериментальную работу, развивая математические теории горного давления, намеченные Шмидтом, Терцаги, Ленком и др.

В настоящее время все эти математические гипотезы не могут еще служить практическим целям тоннельного строительства. Их можно рассматривать лишь как попытку математического освещения вопросов, связанных с установлением закона горного давления. Вместе с тем следует отметить исключительную ценность работ акад. А. Н. Динника (АН УССР) и его учеников при решении задач распределения напряжений вокруг подземных выработок (вырезы разной формы в упругой изотропной пластине) [1].

* * *

Одной из весьма распространенных и математически развитых теорий расчета тоннельных обделок, учитывающих как активные, так и пассивные силы окружающего грунта, является теория проф. Отто Коммереля [2].

Коммерель полагает, что нарушенная в кровле порода частью отрывается от основного земляного массива по поверхности свода естественного равновесия. Эту поверхность Коммерель считает параболической, но для упрощения расчета без особой погрешности принимает эллиптической. Таким образом, расчет вертикального давления на крепь Коммерель ведет на вес так называемого *эллипса обрушения*, вернее — полуэллипса.

---

[1] Труды Совещания по управлению горным давлением, под редакцией акад. А. А. Скочинского. М., 1938.

[2] Otto Kommerel, Statische Berechnung von Tunnelmauerwerk. Berlin 1912.

К оценке количественной стороны горного давления на обделку Коммерель подошел следующими рассуждениями.

Горизонтально проведенная касательная к шелыге свода ABC, равная ширине выработки, под действием проявляющегося горного давления претерпевает деформацию, принимая вид линии $A_1B_1C_1$. Перемещение точек A, B и C фиксируется соответствующими величинами (рис. 725).

Коммерель характеризует кривую $A_1B_1C_1$ как параболу с уравнением:

$$y^2 = 2\,p\cdot(a-x);$$

принимая начала координат в точке B при:

$y = b_1$ — полупролет выработки,
$x = c$ — осадка в точке A, имеем:

$$2p = \frac{b_1^2}{a-c},$$

откуда

$$y^2 = \frac{b_1^2}{a-c}(a-x)$$

или

$$x = a - \frac{(a-c)}{b_1^2}\,y^2.$$

Дифференциальное приращение объема породы при ширине и глубине $1\ м = 1\cdot x\cdot dx$, а при высоте z:

$$Q_z = 1\cdot z\cdot dy.$$

Принимая коэфициент остаточного разрыхления грунта ρ в процентах, получаем величину разрыхления объема перемещающегося грунта:

$$\frac{p}{100}\,Q_z = \frac{p}{100}\,z dy.$$

Кроме того, диференциальное увеличение объема породы:

$$1\cdot x\cdot dy = \frac{p}{100}\,z dy.$$

Следовательно:

$$z = \frac{100}{p}\left(a - \frac{a-c}{b_1^2}\,y^2\right).$$

Имеем уравнение параболы, у которой величина $+\frac{100a}{p}$ определяет расстояние от точки B — шелыги свода:

$$\text{при } y = 0 —: z_0 = \frac{100a}{p},$$

$$\text{при } y = b_1 —: z_{b_1} = \frac{100c}{p}.$$

С целью упрощения дальнейших выводов Коммерель без большой погрешности заменяет параболу эллипсом с уравнением:

$$\frac{y^2}{b_1^2} + \frac{z^2}{h^2} = 1,$$

где h — высота эллипса обрушения, $z_0 = \frac{100a}{p}$, а b_1 — полупролет выработки.

Таким образом, величина полуэллипса обрушения определяется Коммерелем в зависимости от величины a — осадки кровли в центре выработки.

Величина a определяется в натуре по осадкам верхняков, наблюдаемым в процессе проходки разведывательной штольни.

Коммерель дает таблицу величин ρ на основании практических наблюдений (см. табл. 49).

Таблица 49

Горная порода	p в % (коэфициент разрыхления)
Песок, гравий	1—1,5
Суглинистые грунты	2—4
Песчаники, мергели	4—5
Плотные грунты	6—7
Скальные породы	8—15

В случае проявления, кроме вертикального давления, также активного тангенциального давления, полная величина давления на тоннельную обделку определяется по грузовой эпюре, строящейся следующим порядком: на отрезке горизонтальной касательной к шелыге свода, между точками пересечения с линиями углов обрушения, очерчивается эллипс обрушения. Плоскость обрушения ведется по биссектрисе угла между линией угла естественного откоса и вертикалью (рис. 726).

При величине полупролета выработки b_1 и угле естественного откоса φ малая полуось эллипса обрушения определяется по формуле:

$$d_1 = b_1 + h\,\mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right).$$

Расчет тоннельной обделки, проведенной при учете действия только активных сил, приводит к большим напряжениям, а отсюда к преувеличенным размерам обделок, не

соответствующим размерам, принятым в практике строительства тоннелей.

Для ликвидации этого разрыва Коммерель сделал попытку математически обосно-

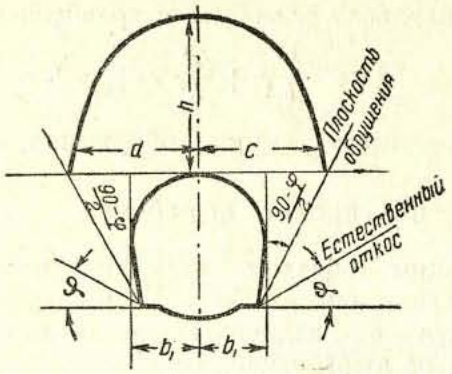


Рис. 726

вать практические размеры обделок, вводя в расчет пассивные силы, возникающие при работе обделки в окружающем грунте.

Особенность приема Коммереля в расчете тоннельных обделок заключается в том, что он отказывается от ведения расчета всей конструкции законченного контура обделки, а расчленяет расчет по отдельным элементам: своду, стенам тоннеля, обратному своду. Принятый Коммерелем принцип расчета по элементам конструкций в действительности соответствует постепенным фазам производ-

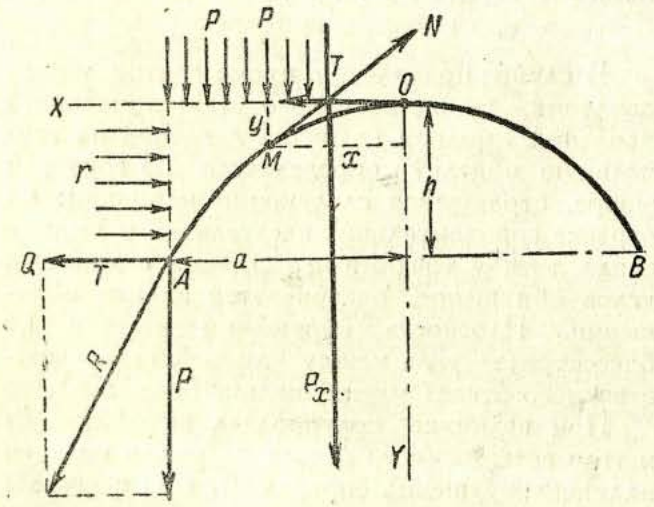


Рис. 727

ства работ при проходке тоннелей на временном деревянном креплении.

Вопрос о расчете обделок глубоко заложенных тоннельных сооружений не имеет до сих пор своего полного разрешения главным образом в силу неопределенности величины и характера давления окружающих пород. Поэтому при назначении размеров и очертания обделок обычно пользуются примерами уже построенных и эксплоатируемых в аналогичных условиях тоннелей.

* * *

Наиболее простой, дающей возможность ориентировочно определить вертикальные активные силы, действующие на кровлю выработки, является широко применяемая в тоннельной и горной практике Советского Союза теория проф. М. М. Протодьяконова [1].

Сущность этой теории заключается в следующем.

При проходке выработки над кровлей ее образуется параболический свод, разгружаю-

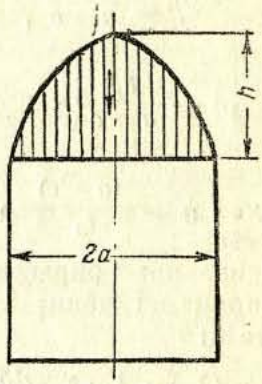


Рис. 728

щий крепь от вышележащих пород. Таким образом, расчет давления пород на тоннель проф. Протодьяконов ведет на вес параболоида грунта, содержащегося внутри контура естественного свода (рис. 727, 728).

В пяте земляного свода обрушения A частица грунта находится под влиянием вертикальной силы P и тангенциальной силы T. Для обеспечения устойчивости частицы земляного свода необходимо, чтобы было соблюдено условие:

$$T < fP,$$

где $P = pa$.

Уравнение, учитывающее запас горизонтальных сил τ на единицу вертикальной проекции свода:

$$T + \tau h = fpa.$$

[1] Проф. М. М. Протодьяконов, Давление горных пород и рудничное крепление. М., 1933.

Уравнение моментов для точки опоры A, исходя из выражения момента сил относительно точки M:

$$\frac{Px^2}{2} = Ty;$$

$$\frac{pa^2}{2h} + \tau h = fpa \quad \text{и}$$

$$\tau = pa \cdot \frac{2fh - a}{2h^2}.$$

Для получения выражения, характеризующего максимальную устойчивость земляного свода, приравниваем первую производную нулю, и тогда:

$$\frac{d\tau}{dh} = pa\frac{a - hf}{h^3} = 0,$$

откуда получаем широко известную в тоннельно-строительной практике, популярную формулу проф. Протодьяконова:

$$h = \frac{a}{f},$$

где h — высота параболы обрушения, a — размер полупролета выработки и f — коэфициент крепости породы, пересекаемой тоннелем, дается в пределах 0,3 для грунтов плывунного характера и до 20 — для скальных пород.

Таблица коэфициентов крепости (по проф. М. М. Протодьяконову)

Категория	Степень крепости	Горные породы	Вес 1 $м^3$ в массиве в $кг$	Раздробляющее усилие в $кг/см^2$	Коэфициент крепости
I	В высшей степени крепкие породы	Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты и базальты. Исключительные по крепости другие породы	2 800—3 000	2 000	20
II	Очень крепкие породы	Очень крепкие гранитовые породы, кварцевый порфир, очень крепкий гранит, кремнистый сланец, кварциты. Самые крепкие песчаники и известняки	2 600—2 700	1 500	15
III	Крепкие породы	Гранит (плотный) и гранитовые породы, очень крепкие песчаники и известняки. Кварцевые рудные жилы. Крепкий конгломерат. Очень крепкие железные руды	2 500—2 600	1 000	10
IIIa	»	Известняки (крепкие) Некрепкий гранит. Крепкие песчаники, крепкий мрамор, доломит. Колчеданы	2 500	800	8
IV	Довольно крепкие породы	Обыкновенный песчаник. Железные руды	2 400	600	6
IVa	То же	Песчанистые сланцы. Сланцеватые песчаники	2 300	500	5
V	Средние породы	Крепкий глинистый сланец. Некрепкий песчаник и известняк. Мягкий конгломерат	2 400—2 800	400	4
Va	»	Разнообразные сланцы (некрепкие). Плотный мергель	2 400—2 600	300	3
VI	Довольно мягкие породы	Мягкий сланец, очень мягкий известняк, мел, каменная соль, гипс, мерзлый грунт. Разрушенный песчаник, сцементированная галька и хрящ. Каменистый грунт	2 200—2 600	от 200 до 150	2
VIa	То же	Щебенистый грунт. Разрушенный сланец, слежавшаяся галька и щебень, отвердевшая глина	2 200—2 400	—	1,5
VII	Мягкие породы	Глина (плотная). Глинистый грунт	2 000—2 200	—	1,0
VIIa	»	Легкая песчанистая глина, лёсс, гравий	1 800—2 000	—	0,8
VIII	Землистые породы	Растительная земля. Торф, мягкий суглинок, сырой песок	1 600—1 800	—	0,6
IX	Сыпучие породы	Песок, осыпи, мелкий гравий, насыпная земля. Добытый уголь	1 400—1 600	—	0,5
X	Плывучие породы	Плывуны, болотистый грунт, разжиженный лёсс и другие разжиженные грунты	—	—	0,3

Коэфициент крепости пород, выдерживающих испытание на сжатие, определяется как сотая часть временного сопротивления раздроблению R кг/см²:

$$f = \frac{R}{100}.$$

Давление на 1 пог. м. тоннельной выработки, исходя из площади параболического свода породы и объемного веса последней, составит:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot 2a \cdot h\gamma = \frac{4}{3}\frac{\gamma a^2}{f}.$$

В грунтах разжиженных, где f приближается к нулю, расчет ведется на полное давление вышележащего грунта.

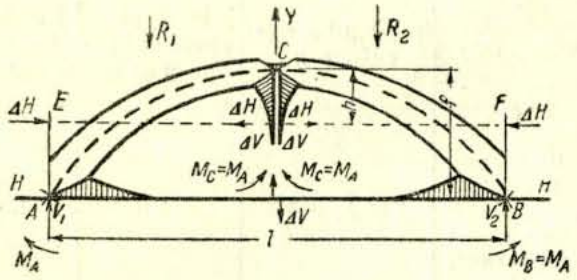


Рис. 729

В условиях очень твердых пород величина h получается практически незначительной и указывает, что надобность в обделке, воспринимающей давление породы, не вызывается особой необходимостью, если не учитывать факторов выветривания и возможных местных вывалов породы, требующих в зависимости от назначения данного тоннельного сооружения устройства облицовки.

Применительно к выработкам небольших пролетов формула проф. Протодьяконова дает довольно близкие к практике результаты. Однако для тоннелей больших пролетов, а равно для тоннелей в условиях слабых пород она приводит к преуменьшенным величинам действительного горного давления.

* * *

Расчет свода как элемента тоннельной обделки, являющегося статически неопределимой конструкцией, представляется приемлемым вести по Кривошеину.

К тем же результатам приводит расчет свода по Мершу, который исходит из первоначального рассмотрения условий работы бруса с одним заделанным концом.

Кривошеин рассчитывает основную статически определимую систему—трехшарнирный свод (рис. 729), вводя дополнительные величины в виде [1]:

дополнительного распора ΔH,

дополнительной вертикальной реакции ΔV и опорного момента M_A.

Получаемые при расчете этой системы напряжения подходят к величинам напряжений, возникающих в статически неопределимом своде с заделанными пятами.

При расчете свода пяты берутся по шву перелома под углом 30° к горизонту, по нормали к оси свода. Расчет свода ведется на следующие нагрузки:

а) собственный вес свода;

б) вес грунта, заключенного между сводом и горизонтальной касательной к шелыге свода (забутка);

в) загрузку одной половины свода весом грунта в 1 т/м³;

г) то же при полном загружении свода.

Свод делится на четное число клиньев.

При вертикальном загружении исчисляются изгибающие моменты для простой балки M.

Далее определяется распор в трехшарнирном своде:

$$H = \frac{M}{f},$$

где f — стрела подъема свода.

Изгибающие моменты в швах трехшарнирного свода определяются по формуле:

$$M_0 = M - Hy.$$

При горизонтальном загружении:

$$M_0 = M - H_A \cdot y - V_B \cdot X_B,$$

где H_A — горизонтальная опорная реакция A, V_B — вертикальная опорная реакция B.

Далее вычисляются *«упругие грузы»*

$$\frac{ds}{I},$$

где I — момент инерции рассматриваемого сечения, ds — длина элемента свода.

Упругий центр определяется по формуле:

$$y_0 = \frac{\int \frac{ys}{I} ds}{\int \frac{ds}{I}}.$$

В упругом центре полусвода прикладываются дополнительные реакции ΔH и

[1] Г. Г. Кривошеин, Расчеты сводов. Часть II. Расчет упругого свода. Петроград, 1918.

ΔV — разности между опорными реакциями свода с заделанными пятами и трехшарнирным сводом.

Затем прикладываются те же реакции ΔH и ΔV к опорам, но с обратным знаком.

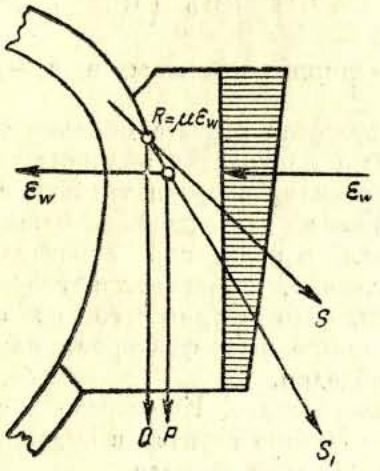


Рис. 730

Моменты M_C, M_A и M_B прикладываются к замку и пятам свода. Таким образом имеем трехшарнирный свод, который в сочетании с приложенными реакциями работает как бесшарнирный, с заделанными пятами.

По Кривошеину:

$$\Delta H = \frac{\int \frac{M_0}{I}\,ds - \int \frac{H}{F}\,ds}{\int \frac{y_0^2}{I}\,ds + \int \frac{ds}{F}};$$

$$\Delta V = \frac{\int \frac{M_1 x}{I}\,ds}{\int \frac{x^2}{I}\,ds};\quad M = \frac{\int \frac{M_0}{I}\,ds}{\int \frac{ds}{I}}.$$

Эти величины исчисляются по элементам, суммируются по Симпсону и приводятся в соответствующие таблицы.

Действительные величины реакций сводов с заделанными пятами определяются следующими формулами:

горизонтальный распор $H_n = H + \Delta H$;
вертикальная реакция в пятах $V_n = V + \Delta V$;
момент в замке $M_3 = M - \Delta H_0 y$;
момент в пятах $M_n = M - \Delta H(f - y_0) \pm \Delta V \frac{l}{2}$;
при симметричной нагрузке $\Delta V = 0$.

$$M_n^{прав.} = M_n^{лев.} = M - \Delta H\,(f - y_0).$$

Далее обычным порядком определяются напряжения и эксцентриситеты в пятах и замке свода.

РАСЧЕТ СТЕНЫ ТОННЕЛЬНОЙ ОБДЕЛКИ

Активная равнодействующая сила давления в пяте свода S и сила собственного веса стены тоннеля Q уравновешиваются, по Коммерелю, пассивным отпором породы E_w и силой трения между породой и кладкой, направленной снизу вверх и равной:

$$R = \mu E_w,$$

где $\mu = 0{,}2—0{,}3$[1].

Пассивный отпор равен по величине и противоположен по направлению распору свода, направленному горизонтально, вследствие чего равнодействующая, проходящая через подошву стены тоннеля, имеет вертикальное направление (рис. 730).

Точка приложения равнодействующей по подошве и ширина последней определяются, сообразуясь с допускаемыми напряжениями на кладку и грунт.

Распределение пассивного сопротивления по стене тоннельной обделки Коммерель ведет

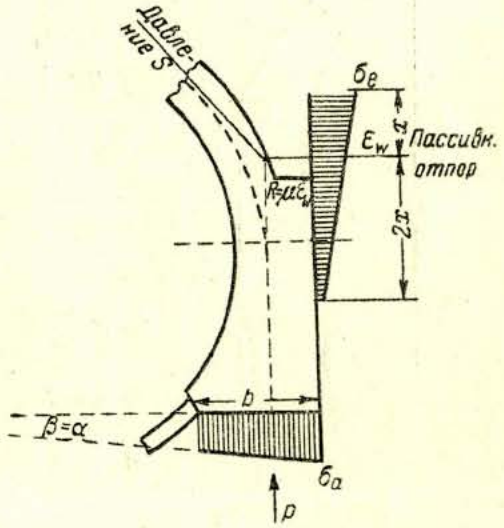


Рис. 731

по треугольнику на отрезке, равном $3x$, принимая, что под действием активных сил подошва и стена тоннеля повернутся на один и тот же угол (рис. 731).

Это явление связано с местным уплотнением грунта, обусловливаемым, по Коммерелю,

[1] Lucas, Der Tunnel, B. I. Berlin, 1920.

зависимостью между напряжением грунта и уплотнением его:

$$\frac{\sigma_e}{3x} = \frac{\sigma_a - \sigma_i}{b}.$$

Грузовой треугольник пассивного отпора имеет уравнение:

$$\sigma_e = \frac{2E_w}{3x\ 100}.$$

Подстановка:

$$\frac{2E_w}{900x^2} = \frac{\sigma_a - \sigma_i}{b},$$

откуда величина

$$x = \frac{1}{30} + \sqrt{\frac{2E_w \cdot b}{\sigma_a - \sigma_i}}.$$

Чем равномернее распределяется давление, тем больше x. Величина x достигает своего максимума при осуществлении полного соприкасания обделки с породой.

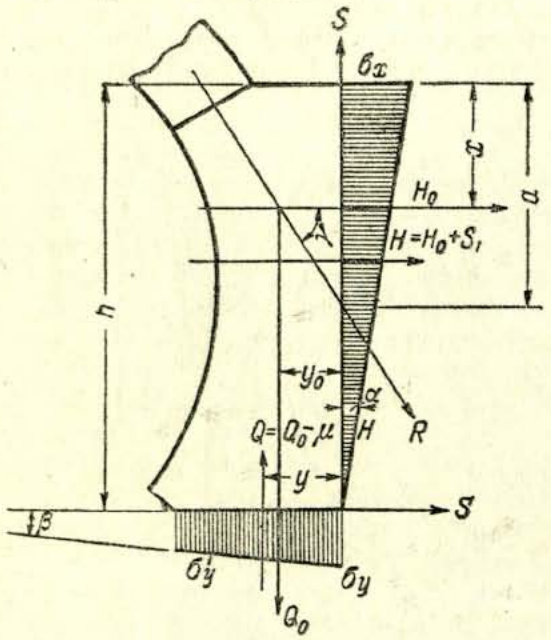


Рис. 732

Практически это достигается плотной забуткой к породе в процессе производства кладки, с последующим нагнетанием раствора под давлением за тоннельную обделку для заполнения всех пустот[1].

[1] Проф. А. Н. Пассек, Тоннели горного типа. 1930.

При расчете необходимо проверить вызываемые распором свода напряжения на грунт.

Краевые напряжения в подошве и в швах обделки определяются по обычной формуле.

$$\sigma_{a,i} = \frac{P}{100\ b}\left(1 \pm \frac{6e}{b}\right),$$

где b — ширина подошвы, а e — эксцентриситет.

В результате расчета обделки тоннеля по Коммерелю приходится излишне увеличивать стенки тоннеля, вопреки требованиям практики. Такое расхождение между теорией Коммереля и практикой строительства тоннелей, конечно, объясняется главным образом тем, что теория его не охватывает многих природных факторов, влияющих на работу обделки.

В частности, Коммерель совершенно упустил реакцию грунта в виде силы трения по подошве стены тоннеля.

Этот пробел восполнен проф. С. Н. Розановым, который проделал блестящую научную работу, отражающую дальнейшее развитие теории пассивных сил Коммереля (рис. 732).

Ниже приводится распределение напряжений по стене тоннеля по теории Розанова.

При перемещении стены тоннеля под действием активных сил в окружающих обделку породах возникают следующие реактивные силы.

1. Сила трения внешней стороны кладки стены о грунт, направленная снизу вверх:

$$S = \mu H_o,$$

где H_o — горизонтальная реакция активных сил.

2. Сила трения по подошве фундамента стены обделки S_1, неизвестная как по величине, так и по направлению.

3. Пассивное сопротивление породы на внешнюю грань стены тоннеля

$$H = H_o \pm S_1.$$

(Знак принимается в зависимости от направления действия силы S_1.)

4. Вертикальная реакция грунта $Q = Q_o - S$, точку приложения которой следует определить.

Учетом силы S_1 (пункт 2) проф. Розанов совершенно видоизменяет значение реактивных сил, под действием которых возникают

напряжения в грунте, распределяемые по внешней грани и по подошве стены.

Напряжения и уплотнения грунта находятся в определенной пропорциональной зависимости:

$$\frac{\sigma_x}{h} = \frac{\sigma_y - \sigma'_y}{b}. \qquad (1)$$

Из треугольника пассивного отпора имеем:

$$y = (a - x)\operatorname{ctg}\gamma = (a-x)\frac{H_o}{Q_o}. \qquad (2)$$

Центр тяжести эпюры по подошве определяется расстоянием:

$$y = \frac{b}{3}\left(1 + \frac{\sigma'_y}{\sigma_y + \sigma'_y}\right). \qquad (3)$$

Далее, пользуясь уравнениями статики, имеем:

$$\frac{1}{2}\sigma_x h \cdot 100 = H_o + S_1 = H; \qquad (4)$$

$$\frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma'_y) b \cdot 100 = Q_o - S_1 = Q; \qquad (5)$$

$$y_o = \frac{Q}{Q_o}. \qquad (6)$$

Из уравнения (3) и (6) имеем:

$$y_o = \frac{b}{3} \cdot \frac{Q}{Q_o}\left(1 + \frac{\sigma'_y}{\sigma_y + \sigma'_y}\right); \qquad (7)$$

$$S_1 \cdot \frac{2h}{3} = H_o\left(\frac{h}{3} - x\right), \qquad (8)$$

откуда:

$$x = \frac{h\left[2h^2(2H_o\, a - Q_в) + b^3 H\right]}{H_o\,(4h^3 + b^3)} \qquad (9)$$

Решая шесть уравнений с шестью неизвестными, определяем величины напряжений, которые не должны превосходить допускаемых.

* * *

Применительно к расчетам тоннельных обделок для метрополитенов проф. Розанов обращает внимание на теорию французского инженера Сюкэ (Suquet), которая получила подтверждение при постройке тоннелей Парижского метрополитена.

Инженер Сюкэ [1] работал над вопросами раскрытия неопределенности направления и величин давления пород на тоннельные обделки в условиях метростроения.

На строящихся тоннелях им был поставлен целый ряд опытов и испытаний, которые пролили свет на чрезвычайно неясную игру внешних сил, воздействующих на обделку тоннеля.

Вначале, когда опыты велись приборами, охватывавшими небольшую зону влияния давления, получились местные разгружающие сводики, препятствовавшие выявлению истинной характеристики давления на данный профиль, так что в итоге полученные результаты становились весьма сомнительными. Это привело к тому, что пришлось отказаться от приборов, снимающих давление с небольших площадей.

В дальнейшем опыты производились при помощи разгружающих домкратов на постройке станции Одеон пролетом в 18 *м* и в тоннелях под Сен-Жермен. Марчевана пролетом 1,5 *м* между верхняками штольневых рам поддерживалась через филату штендером на гидравлическом домкрате. Поджимая марчеваны на 1 *мм* вверх выше ее нормального положения, удавалось снимать давление кровли при ширине ее в 1,10 *м*.

Беря момент вокруг точки у филаты, определяли силу E:

$$E \cdot 0{,}802 = \frac{P}{2}\left[(1{,}5 - 0{,}23)^2 - 0{,}11^2\right] \cdot 1{,}10.$$

Из этого выражения вычислялась интенсивность искомой нагрузки.

Данные определялись при колебаниях величин давлений домкрата от 1,5 до 4 *т* при кровле над шелыгой свода в 1,6—2 *м* в культурном слое. Интенсивное уличное движение на мостовой, которое производило лишь динамическое влияние на крепления, практически не отражалось на домкратах, служивших для нахождения величин давления грунта при его статическом состоянии.

Ряд испытаний был произведен при сооружении линий № 8 и 9 и станции Ришелье Друа Парижского метрополитена. Результаты испытаний сведены Сюкэ в специальную таблицу.

---

[1] Annales des Ponts et Chaussess. Suquet, 1927.

№ п/п	Название участка	I. Давление на $м^2$ по данным испытаний	II. Вес кровли вышележащего грунта на $м^2$	Отношение $\frac{II}{I}$	Длина кольца в $м$	Пролет выработки в $м$	Примечание
1	Бульвар Сен-Жермен (линия 10)	1,173	2,400	2,05	3,20	8,00	Насыпной слой 1 — 1,9 $м$ над шелыгой
2	„	3,226	4,8 0	1,49	3,20	18,00	Кровля над шелыгой
3	Ришелье Друа (линия 9)	4,200	6,570	1,56	4,80	4,50	4,2 — 4,5 $м$
4	Ришелье Друа (линия 8)	0,742	6,300	8,49	3,20	14 00	Около 3,8 $м$ насыпного грунта и от 0,4 — 0,7 $м$ мелкозернистые пески
5	„	0,742	6,3 0	8 49	3,20	14,00	
6	„	2,598	6,0 0	2,31	3,20	11,00	
7	„	1,245	6,000	4,82	3,20	8,00	
8	„	1,192	6,750	5,66	3,20	20,50	

Из таблицы Сюкэ выделяет соотношение давлений в связи с пролетами выработок.

№ 2 пролет 18,00 $м$ соотношение давлений . . . 1.49
№ 6 „ 11,00 „ „ . . . 2,31
№ 1 „ 8,00 „ „ . . . 2,05
№ 7 „ 8,00 „ „ . . . 4,82

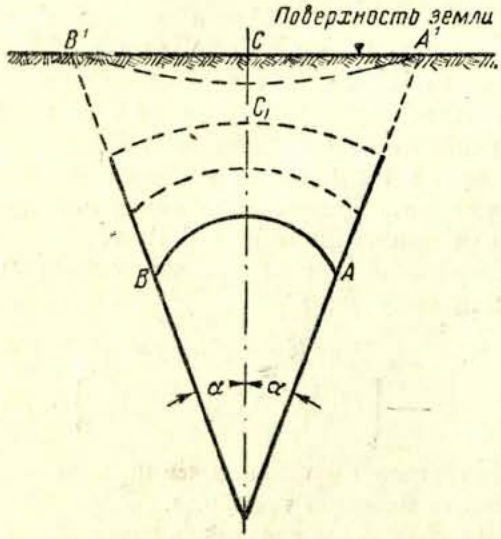


Рис. 733

Сюкэ указывает, что при пролетах обычных перегонных тоннелей действительное давление на своды составляет от $^1/_3$ до $^1/_2$ веса слоя вышележащих пород; при больших станционных пролетах расчетное давление составляет более $^2/_3$ веса вышележащих грунтов.

Для определения направления давления Сюкэ ставил ряд опытов в раскрытых выработках калоттного профиля установкой системы специальных штендеров под лонгарины в разных направлениях.

Для выявления направления кривой давлений в сооружаемом своде Сюкэ построил ряд кривых. На основании своих опытов он считает весьма полезным давать пяте свода расширенное основание. Это указание реализуется на Парижском метрополитене при опирании свода на слабых грунтах.

Сюкэ оговаривается, что его выводы основаны на весьма ограниченных материалах испытаний и требуют дальнейшего подтверждения.

При разработке тоннелей на деревянном креплении образуются осадки породы, которые иногда распространяются до поверхности. Распространение осадок происходит по плоскостям, которые, по Сюкэ, сходятся под углом осадки.

При бельгийском способе производства работ плоскости осадок проходят через пяты свода. Тело $AA'BB'$ представляет собой, по

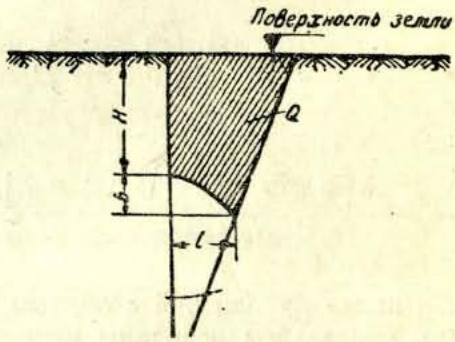


Рис. 734

Сюкэ, грунтовый свод с пятами $AA'BB'$ (рис. 733 и 734).

Далее, в вопросе о давлении пород на свод Сюкэ полагает, что при определенной плотности грунта D грунтовой массив $AA'BB'$ может работать независимо, не проявляя

давления на свод обделки тоннеля. Избыток плотности породы проявляется в виде давления грунта на тоннельную обделку.

Максимальное напряжение в своде Сюкэ принимает:

$$P = \frac{2Q}{H \operatorname{tg} \alpha},$$

где Q — вес грунта, давящего на половину свода, H — заглубление шелыги свода.

Принимая полукалотту равной $^2/_3\ ih$, имеем:

$$P = \frac{2D}{H}\left[l\left(\frac{H+\frac{h}{3}}{\operatorname{tg}\alpha}\right) + \frac{(H+h)^2}{2}\right].$$

При большом заглублении можно пренебречь стрелой h, и тогда

$$P = 2Dl\left(\frac{l}{\operatorname{tg}\alpha} + \frac{H}{2}\right).$$

Таким образом, для расчета обделки необходимо знать величины:

D — плотность грунта,

α — угол осадки и

r — сопротивление грунта сжатию.

Получить все эти данные можно лишь в процессе проходки тоннеля, когда имеется возможность полностью выявить характеристику пересекаемых тоннелем пород. Но обычно требуется провести предварительный расчет обделки на основании данных гидрогеологического прогноза до проходки направляющей штольни. Для этой цели ориентировочно можно принять величины:

D — в пределах веса грунта от 1 600 до 2 100 *кг/м*^{3},

$r = kd$, где d — допускаемое давление на грунт, а k — коэфициент от 1,00 до 4,00,

α — угол осадки — принимается равным

$$\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right),$$

где φ — угол естественного откоса.

При встрече напластований грунтов с отличающимися физико-механическими свойствами вычисляются требуемые величины среднего порядка.

Сюкэ поставил также еще ряд наблюдений над давлением пород на тоннельные обделки Парижского метрополитена, имеющие заглубление шелыги свода около 5 *м*. В результате опытов он пришел к заключению, что при нормальных пролетах однопутных и двухпутных тоннелей действительное давление меньше веса вышележащей породы, а при больших станционных пролетах до 18 *м* давление породы соответствует всей массе налегающей толщи.

Основываясь на своих опытах, Сюкэ построил кривую, характеризующую отношение теоретического давления, соответствующего полному весу грунта над тоннелем, к действительному (рис. 735).

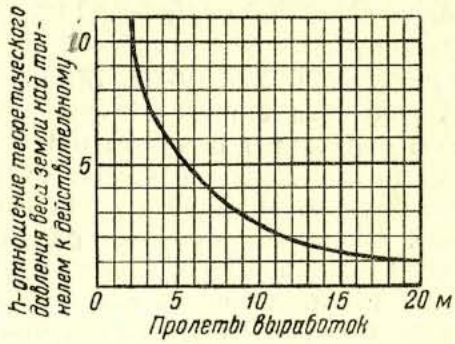


Рис. 735

* * *

Определение количественной стороны давления пород на тоннельные обделки получило свое реальное выражение в электроакустическом методе проф. Н. Н. Давиденкова.

Величины давления на элементы штольневых рам определяются путем натяжения стальных струн по нижнему волокну верхняка и на штендера.

Струна настраивается на определенный тон. В зависимости от нагрузки или разгрузки крепежной рамы устанавливается изменение строя числа собственных колебаний.

Высота строя улавливается по методу резонанса, при помощи электромагнита с генератором переменного тока, так как в момент совпадения числа собственных колебаний стальной струны и частоты тока струна начинает звучать. Этот момент улавливается микрофоном.

Определение частоты колебаний производится при помощи градуированных кривых и конденсатора, входящего в систему колебательного контура.

Напряжения в элементах штольневых рам по числу колебаний определяются по формуле с точностью до 3 *кг/см*^{2}.

Изменения напряжений $\Delta\sigma$ в струне в зависимости от изменения строя N_1 и N_2 находим по формуле:

$$\Delta\sigma = 4(N_1 + N_2) \cdot (N_1 - N_2) l^2 \rho,$$

где l — длина струны, ρ — плотность струны.

Принимая без ущерба для точности, что величины относительного удлинения струны и ближайшего волокна дерева равны, имеем:

$$\Delta\sigma_0 = (N_1 + N_2) \cdot (N_1 - N_2)\, 4l_\rho^2 \frac{E_\partial}{E_c},$$

где E_∂ — модуль упругости дерева, E_c — модуль упругости стали.

Далее определяем обычным путем общую нагрузку и, задаваясь характером ее распределения, определяем интенсивность нагрузки.

Проф. Давиденков произвел ряд испытаний на строящихся деривационных и железнодорожных тоннелях Союза, а также на шахтах и в штольнях Московского метрополитена.

Давление грунта на свод определяется электроакустическим методом, натяжением струн на штендера из тонкостенных труб, являющихся элементами калоттной фермы.

Боковое давление на стены тоннеля определяется при помощи специальных бетонных блоков со струнами. Блоки заранее, в процессе возведения кладки, заделываются в ниши с внешней грани обделки, со стороны породы.

Определение напряжений, возникающих в своде, электроакустическим способом осуществляется при помощи тензометров, закладываемых в свод при его устройстве.

Величины напряжений определяются экстенсометрами по деформациям при данном модуле упругости кладки, который, однако, имеет большой диапазон.

Сейчас советскими инженерами создаются конструкции специальных жестких мессдоз, позволяющих измерять непосредственное давление породы на тоннель, а впоследствии переходить к напряжениям, возникающим в обделке.

Для исследования напряжений в конструкциях тоннельных обделок научно-исследовательский сектор Метростроя в настоящее время использует электрические тензометры проволочного сопротивления («датчики»), применяемые в машиностроительной промышленности Советского Союза.

Витки металлической проволоки (изменяющие свое сопротивление при сжатии и растяжении) наклеиваются на бумагу, которая, в свою очередь, наклеивается на поверхность элемента конструкции тоннельной обделки, подвергаемой испытанию, следуя за характером деформации.

Целая серия тензометров, включенная в общую измерительную сеть, закладывается в обделку в период строительства, и далее проводятся систематические наблюдения в течение длительного периода с целью выявления количественной и качественной характеристики действительных напряжений, возникающих в элементах несущей конструкции тоннельной обделки.

Одной из попыток получить данные о величинах непосредственного давления грунта и характера распределения его на конструкцию тоннеля являются наблюдения и испытания, организованные управлением Нью-Йоркского порта в период сооружения Мидтаунского подводного тоннеля под р. Гудсон. Тоннель сооружался щитовым способом под сжатым воздухом.

В конструкции подводной части тоннеля (диаметром 9,4 *м*) из чугунных тюбингов ($L = 1600$ *м*), прорезающего илистые наносы р. Гудсон, было заложено 42 специальных прибора для измерения нормального и тангенциального давлений.

Каждый из приборов представлял собой цилиндр с свободно двигающимся в нем поршнем, передававшим давление на пластинку в период их взаимного соприкасания. Показания снимались измерительным прибором механического действия с точностью $\pm 0{,}0001$ дюйма. В процессе измерения были установлены наибольшие давления грунта на обделку при проходке под сжатым воздухом 29 *т/м*^{2} при эллиптичности в 4,5 *см*. В условиях проходки под нормальным атмосферным давлением величина давления грунта на обделку составляла 25 *т/м*^{2} при эллиптичности 1,5 *см*.

Следует отметить изменение величин давления окружающих тоннель грунтов во время отлива и прилива. Так, при колебании горизонтов воды в реке на 1,5 *м* давление грунта на обделку изменялось от 1,9 до 2,2 фунта на 1 *дм*^{2}.

Показания приборов снимались в течение года. При этом были сделаны обобщения, позволившие, с учетом физико-механических свойств грунтов, дать заключение о характере давления грунтов на тоннель в местных условиях.

На основании анализа горного давления при проходке ряда тоннелей в разнообразнейших геологических условиях проф. Терцаги составил таблицу, дающую ориентировочную характеристику количественной стороны горного давления (см. табл. 50).

Таблица 50

Характеристика горного давления (по Терцаги)

Характер горных пород	Давление на кровлю		Крепление тоннеля		Примечания
	во время производства горных работ	в течение последующего времени	род крепления	характер давления	
	т/м²				
Скала более или менее хрупкая . .	0	8—12	Редкое и легкое	Отсутствует или незначительное	Незначительное давление
Связный гравий, очень хрупкая скала. Мягкие породы, незначительной мощности.	10	35	Редкое и легкое	Незначительное	Действие давления, незаметное во время производства горных работ
Окатанный гравий, очень хрупкая скала (обрушения кровли)	20—25	35	Частое и сильное	Не чрезмерное	Довольно сильное действие давления, заметное во время производства горных работ
Мягкие породы; довольно значительный покров; наблюдается давление (плывучесть)	35	50	Очень частое и сильное	Значительное	—
Мягкие породы; значительный покров, очень сильное давление . . .	50	120	Возможно более частое и сильное	Вплоть до обрушения	—

Вопрос горного давления пород становится чрезвычайно неопределенным, когда встречаются не предусмотренные гидрогеологическим прогнозом крупные линзы и включения слабых, водоносных грунтов, которые могут проявить большой напор и исключительное по размерам горное давление. Пересечение слабых, илистых, плывунных грунтов часто встречается при подводном тоннелировании. Подводные тоннели под рр. Темзой, Гудсон, Ист-Ривер, Шельдой и др. были проложены под руслами, которые представлены исключительно слабыми грунтами.

При расчете обделок подводных тоннелей, помимо давления слабых грунтов, следует предусмотреть гидростатическое давление воды в реке, влияние прилива и отлива. Помимо учета влияния динамики и вибрации от движения поездов по тоннелю, производится поверка обделки на максимальный вес затонувшего судна.

Наиболее известными методами расчета являются формулы Штейнера, Хьюита и метод расчета Шельдского тоннеля.

При расчете тоннелей в слабых грунтах необходима, кроме того, проверка на всплытие тоннельной конструкции. При этом обычно в практике расчетов не учитывается трение по плоскостям, проходящим по концам горизонтального диаметра тюба.

Попыткой обосновать расчетом круглые металлические обделки тоннелей (*тюбы*) является теория Штейнера[1]. Этот автор считает, что в работе обделки не принимают участия силы пассивного, горизонтального отпора грунта, а действуют лишь вертикальные силы, стремящиеся сплюснуть тоннельную обделку. В результате наблюдений Штейнер пришел к заключению, что максимальные напряжения возникают в концах вертикального и горизонтального диаметров. Это подтверждается опытом при действии на круглую обделку равномерно распределенной нагрузки или сосредоточенных сил (рис. 736).

Момент-максимум возникает в нижней точке обделки. В шелыге свода и в подошве возникают положительные, а в боках отрицательные моменты.

Далее, на основании своих исследований Штейнер пришел к формуле, определяющей

[1] Steiner, Beitrag zur Theorie der Röhrentunnel Kreisförmigen Querschnitts, Öster Wochenschrift für der öffentlichen Baudienst, Heft 26.

величину изгибающего момента в требуемой точке обделки:

$$M = r^2\left(g - \frac{r\gamma}{2}\right)F_0 + \gamma_1 r^3\left(\frac{h+r}{2}F_1 + F_2\right),$$

где γ — удельный вес воды, γ_2 — удельный вес грунта, γ_1 — превышение удельного веса грунта над водой, g—собственный вес трубы.

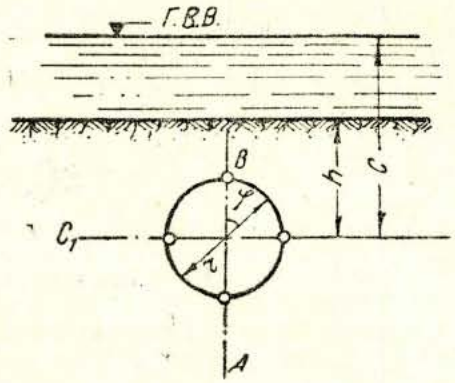


Рис. 736

F_0, F_1 и F_2 представляют, по Штейнеру, величины переменного порядка, зависящие от угла, определяющего данное сечение.

а) Для угла φ в пределах

$$\left(0 - \frac{\pi}{2}\right)$$

верхней половины круга:

$$F_0 = \left[\frac{3\pi}{8} - \frac{5}{6}\cos\varphi - \varphi\sin\varphi\right];$$

$$F_1 = \left[0{,}25 - \frac{1}{2}\sin^2\varphi\right];$$

$$F_2 = \left[\frac{1}{2}\varphi\sin\varphi - 0{,}5782 + \frac{1}{6}\sin^2\varphi\cos\varphi + \frac{17}{48}\cos\varphi\right].$$

б) Для угла φ в пределах

$$\left(\frac{\pi}{2} - \pi\right)$$

нижней половины круга:

$$F_0 = \left[(\pi - \varphi)\sin\varphi - \frac{5}{8}\pi + \frac{\pi}{2}\cos^2\varphi - \frac{5}{6}\cos\varphi\right];$$

$$F_1 = \left[0{,}25 - \frac{1}{2}\sin^2\varphi\right];$$

$$F_2 = \left[\frac{\pi}{8}\sin^2\varphi - 0{,}1855 + \frac{1}{48}\cos\varphi\right].$$

При ориентировочных расчетах Штейнер считает возможным принять $\gamma = \gamma_1$, а величиной g пренебречь по сравнению с общей массой вышележащих грунтов, и тогда

$$M = r^3\gamma\left(\frac{h+r}{r}F_1 + F_2 - \frac{F_0}{2}\right).$$

На рис. 737 построены величины, пропорциональные изгибающим моментам при

$$\frac{h+r}{r} = 4.$$

Величины F_0, F_1 и F_2 для углов

$$\frac{\pi}{4},\ \frac{\pi}{2}\ \text{и}\ \pi$$

определяются по следующей таблице:

φ	$0°$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	π
F_0	+0,3448	+0,0335	−0,3927	+0,4406
F_1	+0,2500	+0,0000	−0,2500	+0,2500
F_2	+0,2238	+0,0091	+0,2072	−0,2063

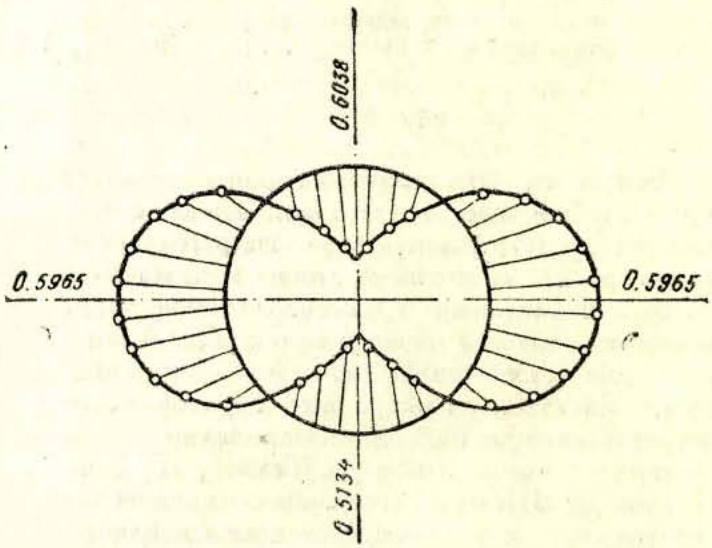


Рис. 737

Штейнер определяет величины осевых сил по следующим формулам:

$$P = \frac{gr}{6}(6\varphi\sin\varphi - \cos\varphi) + \gamma r C + \gamma r^2\left[1 - \frac{5}{12}\cos\varphi - \frac{1}{2}\varphi\sin\varphi + \gamma_1 r(h+r)\sin^2\varphi\right] - \gamma r^2\left(\frac{1}{2}\varphi\sin\varphi + \frac{1}{2}\sin^2\varphi\cdot\cos\varphi + \frac{1}{48}\cos\varphi\right) - pr,$$

где p означает величины избыточного внутреннего давления над нормальным.

Величина осевых сил:
в шелыге свода B при $\varphi = 0$.

$$p_B = -\frac{gr}{6} - pr + \gamma r(c + 0{,}5833) - \gamma r^2 \cdot 0{,}0208;$$

в подошве тоннеля A при $\varphi = \pi$

$$p_A = \frac{gr}{6} pr + \gamma r(c + 1{,}4166r) - \gamma r^2 \cdot 0{,}0208;$$

в боковой точке обделки C при $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

$$p_C = \frac{gr\pi}{2} - pr + \gamma r(c + 0{,}2146\, r) - \gamma_1 r^2 \left(\frac{h+r}{r} - \frac{\pi}{4}\right).$$

Определив величины изгибающих моментов и нормальных сил по приведенным формулам, можно определить значение полного напряжения в требуемой точке тоннельной обделки:

$$\sigma = \frac{M}{W} \pm \frac{P}{F},$$

где W —момент сопротивления участка трубы относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести.

При устройстве подводных тоннелей в целях придания обделке продольной жесткости для сопротивления давлению, направленному снизу вверх, и для увеличения инерции против динамических влияний при движении поездов внутри металлической обделки следует укладывать бетонную или железобетонную рубашку.

Распределение изгибающих моментов между обделками двух указанных разнородных материалов, например металла и камня, производится по следующим формулам:

$$M_1 = \frac{E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} M; \quad M_2 = \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} M,$$

где E — модуль упругости и I — момент инерции материала соответствующей обделки.

Американцы пользуются рядом эмпирических формул, выведенных на основании опыта построенных тоннелей. Они определяют толщину чугунной обделки тюбов из следующих двух уравнений:

$$\sigma_1 = \frac{R}{t} + \frac{pb^2}{2t^2} \text{ и } \sigma_2 = \frac{pb^2}{2t^2},$$

где t — толщина чугунной обделки, R — давление в *кг/пог. см* обделки по окружности, p — давление породы в *кг/см*, b — расстояние между ребрами в сегменте, σ_1 — допускаемое напряжение на сжатие, σ_2 — допускаемое напряжение на растяжение.

За последнее время в американской практике применяется расчет круглой обделки по Хьюиту (Hewett)[1]. Этот расчет, однако, основан на произвольном допущении, что при сооружении тоннеля пассивный горизонтальный отпор достигает такой величины, при которой изгибающие моменты обделки обращаются в нуль, что резко расходится с теорией Штейнера.

Хьюит на основании своих опытов и исследований приходит к следующим формулам, определяющим величины изгибающих моментов и нормальных сил в сечениях, соответствующих концевым точкам вертикального и горизонтального диаметров:

$$M = Ka_1(n_1 W_2 a^2 + n W_2 h_2 a) + n_1 W_1 a_1 a^2 + n_2 [W_1 \cdot (h_1 + h_2) - Q]^2 a a_1 + n_3 (W_1 + W_2) a_1 a^2 + n_4 W a_1 + n_5 (P - Q) a_1 a;$$

$$N_1 = bW_1(0{,}67\, b + h_1 + h_2) - KbW_2(0{,}67\, b + h_2) + Qb;$$

$$N_2 = -Pa - 0{,}22(W_1 + W_2) ab - 0{,}25 W \cdot + Qa;$$

$$N_3 = -bW_1 (1{,}33\, b + h_1 + h_2) - KbW_2 (1{,}33\, b + h_2) Qb,$$

где:

$M(M_1, M_2$ и $M_3)$ — изгибающие моменты в сечении шелыги, боков и подошвы тюба;

N_1, N_2 и N_3 — нормальные силы в указанных сечениях;

P — вертикальная нагрузка над шелыгой свода в фунт/*дм*^{2};

Q — противодавление в тоннелях при проходе с пневматикой;

W — собственный вес тоннельной обделки в фунтах на погонный фут;

W_1 — вес воды в фунт/фт^3;

W_2 — вес грунта в фунт/фт^3;

a — горизонтальная внешняя полуось эллипса в футах (радиус круга);

a_1 — горизонтальный радиус нейтральной оси;

[1] Hewett and Iohannessen, Shield and Compressed air tunneling. N. J., 1922.

b — вертикальная внешняя полуось эллипса в футах (радиус круга);
h_1 — высота воды над поверхностью земли в футах;
h_2 — высота стояния воды над шелыгой свода в футах;
K — коэфициент, определяемый в зависимости от пассивного сопротивления породы;
n_1, n_2 — величины переменного порядка, берутся по таблице № IV из работы Hewett and Iohannessen соответственно изгибающим моментам.

Принципы расчета обделки Шельдского тоннеля[1]. Чрезвычайный интерес представляет

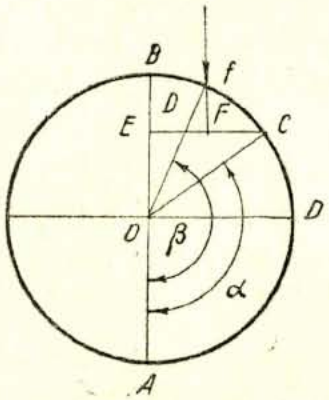


Рис. 738

принцип, заключенный в расчете тюба подхода к подводной части тоннеля под р. Шельдой. При расчете учитывались местные условия грунтовых напластований и возможность подвижки грунтов в верхней части профиля тюба в случае производства в будущем строительных работ вблизи прокладываемого тоннеля. Принималось, что при работе тюба оказывает влияние лишь грунт в нижней части профиля.

I. *Влияние собственного веса.*

1) Величина изгибающего момента.

Учитывая, что точка B после проявления деформации остается на вертикальном диаметре, а касательная к этой точке будет горизонтальной, тогда имеем следующие уравнения:

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} M d\alpha = 0; \qquad (1)$$

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} M \cos\alpha \, d\alpha = 0 \qquad (2)$$

Примем следующие обозначения:

m — изгибающий момент, Q — нормальная сила, R — радиус, q — собственный вес кольца на 1 *пог. м* по периметру.

Для точки C, при которой $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$, имеем следующие выражения (рис. 738):

$$M_c = Q.BE + m + \int_c^B fCF;$$

$$BE = R\,(1 + \cos\alpha); \quad CF = R\,(\sin\alpha - \sin\beta);$$

$$f = qds = qR\,d\beta;$$

$$M_c = QR\,(1 + \cos\alpha) + m + qR^2\,[(\pi - \alpha)\sin\alpha - \cos\alpha - 1)].$$

Произведя подстановку в уравнения (1) и (2), имеем:

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} M d\alpha = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} QR\,(1 + \cos\alpha)\,d\alpha + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} m d\alpha +$$

$$+ qR^2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} [(\pi - \alpha)\sin\alpha - \cos\alpha - 1]\,d\alpha = 0;$$

$$QR\left(\frac{\pi}{2} - 1\right) + m\,\frac{\pi}{2} + qR^2\left(2 - \frac{\pi}{2}\right) = 0;$$

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} M \cos\alpha\, d\alpha = QR \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} (1 + \cos\alpha)\cos\, d\alpha +$$

$$+ m \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \cos\alpha\, d\alpha + qR^2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} [(\pi - \alpha)\sin\alpha -$$

$$- \cos\alpha - 1]\cos\alpha\, d\alpha = 0;$$

$$QR\left(\frac{\pi}{4} - 1\right) - m - qR^2\left(\frac{3\pi}{8} - 1\right) = 0.$$

[1] Extrait de „La Technique de Travaux", 1933, Paris.

Таким образом, получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$QR\left(\frac{\pi}{2}-1\right)+m\frac{\pi}{2}+qR^2\left(2-\frac{\pi}{2}\right)=0;$$

$$QR\left(\frac{\pi}{4}-1\right)-m-qR^2\left(\frac{3\pi}{8}-1\right)=0;$$

$$Q=-q\frac{R}{2}\cdot\frac{32-3\pi^2}{\pi^2-8};$$

$$m=-q\frac{R^2}{2}\cdot\frac{\pi^2+2\pi-16}{\pi^2-8}.$$

Момент в точке, находящейся между D и B, выражается:

$$M=-q\frac{R^2}{2}\cdot\frac{32-3\pi^2}{\pi^2-8}\left(1+\cos\alpha\right)-$$

$$-qR^2\frac{\pi^2+2\pi-16}{\pi^2-8}+qR^2\left[(\pi-\alpha)\sin\alpha-\right.$$

$$\left.-\cos\alpha-1\right]=\frac{-qR^2}{2(\pi^2-8)}\left[2\pi+(16-\pi^2)\cos\alpha-\right.$$

$$\left.-2(\pi^2-8)(\pi-\alpha)\sin\alpha\right].$$

Таблица 1

α	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3}{4}\pi$	π
M	$\longleftarrow\longrightarrow$ $M=\frac{q-R^2}{\pi^2-8}\left(8-6\pi-\frac{\pi^3}{2}\right)$	$-0{,}1223\ qR^2$	$+0{,}0333\ qR^2$	$-0{,}0376\ qR^2$

2. Величина нормальной силы

$$N=-Q\cos\alpha+\int_{\beta=\alpha}^{\beta=\pi}f\sin\alpha;$$

$$Q=-q\frac{R}{2}\frac{32-3\pi^2}{\pi^2-8};\quad f=qRd\beta;$$

$$N=q\frac{R}{2}\cdot\frac{32-3\pi^2}{\pi^2-8}\cos\alpha+qR(\pi-\alpha)\sin\alpha.$$

Таблица 2

α	0	$60^\circ 30'$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$	π
N	$0{,}65\ qR$	$2{,}14\ qR$	$+1{,}5707\ qR$	$+1{,}0145\ qR$	$0{,}650\ qR$

II. *Влияние налегающего над тюбом слоя грунта.* Нагрузка грунта делится на два элемента:

а) нагрузка P на $м^2$ является равномерной для всех точек тюба и равна весу грунта, расположенного над горизонтальной касательной к шелыге свода;

б) нагрузка P на $м^2$ изменяется в каждой точке и равна весу грунта, заключенного между верхней горизонтальной касательной и наружной поверхностью обделки тоннеля.

1) Влияние равномерной нагрузки P (рис. 739).

Величина изгибающего момента

$$dx=ds\cos(\pi-\beta)=-ds\cos\beta;$$

$$ds=Rd\beta;$$

$$dx=-R\cos\beta d\beta;$$

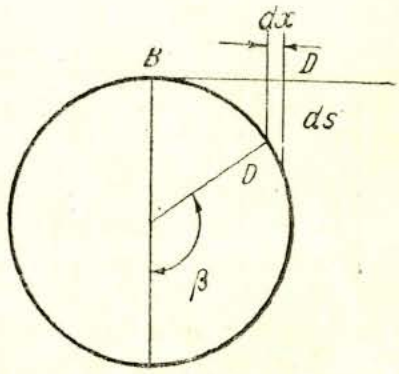


Рис. 739

$$f=dP=Pdx=-PR\cos\beta d\beta;$$

$$M=QR(1+\cos\alpha)+m+$$

$$+\int_{\beta=\alpha}^{\beta=\pi}\cdot fR(\sin\alpha-\sin\beta);$$

$$M = QR\,(1+\cos\alpha)+m-$$

$$-\int_{\beta=-\alpha}^{\beta=\pi} PR^2\,(\sin\alpha-\sin\beta)\cos\beta d\beta.$$

Момент в точке C, при которой $\frac{\pi}{2}<\alpha<\pi$, имеем:

$$M = QR\,(1+\cos\alpha)+m+$$
$$+PR^2\,\frac{\sin\alpha}{2}.$$

Производя подстановку в уравнения (1) и (2):

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} Md\alpha = QR\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}(1+\cos\alpha)\,d\alpha+$$
$$+m\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}d\alpha+\frac{PR^2}{2}\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}\sin^2\alpha d\alpha=$$
$$=QR\left(\frac{\pi}{2}-1\right)+m\frac{\pi}{2}+$$
$$+PR^2\,\frac{\pi}{8}=0;$$

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} M\cos\alpha\,d\alpha = QR\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}(1+\cos\alpha)\,\cos\alpha d\alpha+$$
$$+m\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}\cos\alpha\,d\alpha+\frac{PR^2}{2}\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}\sin^2\alpha\cos\alpha\,d\alpha=$$
$$=QR\left(\frac{\pi}{4}-1\right)-m\frac{PR^2}{6}=0,$$

откуда имеем систему двух уравнений:

$$QR\left(\frac{\pi}{2}-1\right)+m\frac{\pi}{2}+$$
$$+PR^2\,\frac{\pi}{8}=0;$$

$$QR\left(\frac{\pi}{4}-1\right)-m-\frac{PR^2}{6}=0;$$

$$Q=-\frac{PR\pi}{3\,(\pi^2-8)};$$

$$m=\frac{-PR^2}{3\,(\pi^2-8)}\left(\frac{3\pi^2}{4}-\pi-4\right).$$

Таким образом, момент в данной точке выражается:

$$M=\frac{-PR^2\pi}{3\,(\pi^2-8)}\left(1+\cos\alpha\right)-$$
$$-\frac{PR^2}{3\,(\pi^2-8)}\left(\frac{3\pi^2}{4}-\pi-4\right)+$$
$$+\frac{PR^2}{2}\,\sin^2\alpha=$$
$$=\frac{-PR^2}{3\,(\pi^2-8)}\left[-4+\frac{3\pi^2}{4}+\pi\,\cos\,\alpha-\right.$$
$$\left.-\frac{3}{2}\left(\pi^2-8\right)\sin^2\alpha\right].$$

Таблица 3

α	0	$\frac{\pi}{2}$	$\arccos\frac{-\pi}{3\,(\pi^2-8)}$ $124°30'$	π
M		$-0{,}1084\,PR^2$	$\overset{max}{+0{,}0511\,PR^2}$	$-0{,}0454\,PR^2$

2) Величина нормальной силы.

Для точки C, при которой $\frac{\pi}{2}<\alpha<\pi$, имеем:

$$N=-Q\cos\alpha+\int_{\beta=\alpha}^{\beta=\pi} f\sin\alpha;$$

$$Q=-\frac{PR\pi}{3\,(\pi^2-8)}$$

$$N=\frac{PR\pi}{3\,(\pi^2-8)}\cos\alpha-PR\sin\alpha\int_{\beta=\alpha}^{\beta=\pi}\cos\beta\,d\beta=$$
$$=\frac{PR\pi}{3\,(\pi^2-8)}\cos\alpha+PR\sin^2\alpha=$$
$$=PR\left[\frac{\pi}{3\,(\pi^2-8)}\cos\alpha+\sin^2\alpha\right].$$

Для точки C, при которой $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$, имеем:

$$N = Q\cos\alpha + \int_{\beta=\frac{\pi}{2}}^{\beta=\pi} f\sin\alpha;$$

$$N = \frac{PR\pi}{3(\pi^2-8)}\cos\alpha + PR\sin\alpha =$$

$$= PR\left[\frac{\pi}{3(\pi^2-8)}\cos\alpha + \sin\alpha\right].$$

Таблица 4

α	0	$\frac{\pi}{4}$	60°30′	$\frac{\pi}{2}$	119° 30′ arctg 0,564	$\frac{3\pi}{4}$	π
N	$\frac{PR\pi}{3(\pi^2-8)}$ 0,562 PR	1,104 PR	1,148 PR *max*	PR	0	−0,310 PR	$\frac{-PR\pi}{3(\pi^2-8)}$

б) Влияние переменной нагрузки ρ.

1) Величина изгибающего момента.

Для объемного веса грунта γ меняющаяся нагрузка ρ на $м^2$ имеет значение:

$$p = \gamma DD' = \gamma R(1+\cos\beta).$$

Для элемента ds

$$f = pdx = -\gamma R^2(1+\cos\beta)\cos\beta\, d\beta;$$

$$M = QR(1+\cos\alpha) + m + \int_{\beta=\alpha}^{\beta=\pi} fR(\sin\alpha - \sin\beta);$$

$$M_{\beta=\pi} = QR(1+\cos\alpha) + m - \gamma R^3\int_{\beta=\alpha}^{\pi}(1+\cos\beta)(\sin\alpha - \sin\beta)\cos d\beta.$$

Момент в точке C, при которой $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$,

$$M = QR(1+\cos\alpha) + m - \gamma R^3\left[\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\alpha}{2}\right)\sin\alpha - \frac{\sin^2\alpha}{2} - \frac{\sin^2\alpha\cos\alpha}{2} - \frac{\cos^3\alpha}{3} - \frac{1}{3}\right].$$

Производя подстановку, имеем:

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} Md\alpha = QR\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}(1+\cos\alpha)\,d\alpha + m\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}d\alpha - \gamma R^3\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}\left[\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\alpha}{2}\right)\sin\alpha - \frac{\sin^2\alpha}{2} - \frac{\sin^2\alpha\cos\alpha}{2} - \frac{\cos^3\alpha}{3} - \frac{1}{3}\right]d\alpha = 0$$

$$QR\left(\frac{\pi}{2}-1\right) + m\frac{\pi}{2} - \gamma R^3\left(\frac{8}{9}-\frac{7\pi}{24}\right) = 0;$$

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} M\cos\alpha\, d\alpha =$$

$$= QR\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}(1+\cos\alpha)\cdot\cos\alpha\, d\alpha + m\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}\cos\alpha\, d\alpha -$$

$$-\gamma R^3\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}\left[\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\alpha}{2}\right)\sin\alpha - \frac{\sin^2\alpha}{2} - \frac{\sin^2\alpha\cos\alpha}{2} - \frac{\cos^3\alpha}{3} - \frac{1}{3}\right]\cos\alpha\, d\alpha = 0;$$

$$QR\left(\frac{\pi}{4}-1\right) - m - \gamma R^3\left(\frac{1}{2}-\frac{5\pi}{32}\right) = 0.$$

Получаем два уравнения с двумя неизвестными:

$$QR\left(\frac{\pi}{2}-1\right) + m\frac{\pi}{2} - \gamma R^3\left(\frac{8}{9}-\frac{7\pi}{24}\right) = 0;$$

$$QR\left(\frac{\pi}{4}-1\right) - m - \gamma R^3\left(\frac{1}{2}-\frac{5\pi}{32}\right) = 0;$$

$$Q = \frac{\gamma R^3}{\pi^2-8}\left(\frac{64}{9} - \frac{\pi}{3} - \frac{5\pi^2}{8}\right);$$

$$m = \frac{\gamma R^3}{\pi^2-8}\left(\frac{\pi^2}{24} + \frac{31}{36}\pi - \frac{28}{9}\right).$$

Таким образом, момент в данной точке:

$$M = \frac{\gamma R^3}{\pi^2 - 8}\left(\frac{64}{9} - \frac{\pi}{3} - \frac{5\pi^2}{8}\right)\left(1 + \cos\alpha\right) +$$
$$+ \frac{\gamma R^3}{\pi^2 - 8}\left(\frac{\pi^2}{24} + \frac{31}{36}\pi - \frac{28}{9}\right) -$$
$$- \gamma R^3\left[\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)\sin\alpha - \frac{\sin^2\alpha}{2} - \right.$$
$$\left. - \frac{\sin^2\alpha\cos\alpha}{2} - \frac{\cos^3\alpha}{3} - \frac{1}{3}\right] =$$
$$= \frac{\gamma R^3}{\pi^2 - 8}\left[\frac{4}{3} + \frac{19}{36}\pi - \frac{\pi^2}{4}\right] +$$
$$+ \frac{\gamma R^3}{\pi^2 - 8}\left(\frac{64}{9} - \frac{\pi}{3} - \frac{5\pi^2}{8}\right)\cos\alpha -$$
$$- d R^3\left[\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}\right)\sin\alpha - \sin^2\alpha - \right.$$
$$\left. - \frac{\sin^2\alpha\cos\alpha}{2} \cdot \frac{\cos^3\alpha}{3}\right].$$

Таблица 5

α	0	$\frac{3\pi}{4}$	π
M	$-0{,}008\,\gamma R^3$	$-0{,}0006\,\gamma R^3$	$+0{,}059\,\gamma R^3$

2) Величина нормальной силы.

Для точки C, при которой $\frac{\pi}{2} \cdot < \alpha < \pi$, имеем:

$$N = -Q\cos\alpha + \int_{\beta=\alpha}^{\beta=\pi} f\sin\alpha;$$

$$Q = \frac{5R^2}{\pi^2 - 8}\left(\frac{64}{9} - \frac{\pi}{3} - \frac{5\pi^2}{8}\right);$$

$$N = \frac{5R^2}{\pi^2 - 8}\left(\frac{64}{9} - \frac{\pi}{3} - \frac{5\pi^2}{8}\right)\cos\alpha -$$
$$- 5R^2\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} - \sin\alpha - \frac{\sin\alpha\cos\alpha}{2}\right).$$

Для точки, при которой $O < \alpha < \pi$, имеем:

$$N = -Q\cos\alpha + \int_{p=\frac{\pi}{2}}^{\beta=\pi} \sin\alpha;$$

$$N = \frac{5R^2}{\pi^2 - 8}\left(\frac{64}{9} - \frac{\pi}{3} - \frac{5\pi^2}{8}\right)\cos\alpha -$$
$$- 5R^2\left(\frac{\pi}{4} - 1\right)\sin\alpha.$$

Таблица 6

α	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$	π
N	$+0{,}053 \cdot 5R^2$	$+0{,}215 \cdot 5R^2$	$+0{,}1145 \cdot 5R^2$	$-0{,}053 \cdot 5R^2$

Поверка на возможность всплытия тоннеля не представляет затруднений. Собственный вес конструкции Шельдского тоннеля составлял 69 *т*, поперечное сечение тоннеля — 69,36 *м*^{2}. Приняв в расчет, кроме того, величину трения обделки тоннеля в окружающем грунте, выявилась невозможность в данном случае доминирующего действия подъемной силы всплытия.

Необходимо отметить, что приведенный расчет далеко не претендует на прикладное значение. Поэтому проектировщику следует осторожно пользоваться им, считаясь больше с практическими данными.

* * *

Произведенный анализ существующих в практике и мировой литературе методов определения горного давления и расчетов тоннельных обделок указывает на исключительную неопределенность и неточность их.

Вместе с тем представляется возможным для определенных тоннельных сооружений в зависимости от пролета и конфигурации обделки, от геологических и гидрогеологических условий, на современном этапе развития техники, с достаточной для практических целей точностью решить задачу.

В этом отношении, имея значительный опыт, приобретенный при проектировании и постройке тоннелей разнообразнейших сечений, заложенных в сложных геотехнических условиях при сооружении Московского метрополитена, и считаясь с приведенным выше подразделением пород на категории по физико-механическим свойствам, можно рекомендовать в порядке ориентировки применение для местных условий определенной теории давления горных пород в связи с расчетом тоннельных обделок.

Нельзя не отметить, что вопросы давления в условиях песчаных грунтов имеют до некоторой степени более определенный характер, чем в породах, обладающих соответствующей крепостью.

При оценке давления в слабых грунтах плывунного характера возможно пользоваться формулой Форхгеймера, снижая значение угла внутреннего трения ρ в соответствии с физико-механическими свойствами грунтов.

В плывунных грунтах при практически незначительном коэфициенте внутреннего трения ($\operatorname{tg}\rho < 0{,}1$) давление приближается к гидростатическому, и, таким образом, в расчет принимается полный вес налегающей на обделку плывунной толщи.

В условиях наличия сыпучих песчаных грунтов при определении давления на тоннельную обделку целесообразно, как это и рекомендуется Терцаги, применять формулы Бирбаумера или Форхгеймера, обращая при этом особое внимание на правильность установления значения величины угла внутреннего трения ρ, опираясь на данные, полученные в процессе проходки опытной штольни, отмечая ряд сопутствующих этой проходке явлений и деталей. Полученные при этом результаты могут удовлетворить проектные и производственные запросы тоннельного строителя.

В твердых гомогенных породах для тоннелей малых пролетов (до 6 *м*) удовлетворительные результаты при расчете дает формула проф. М. М. Протодьяконова, широко применяемая в советской практике тоннелестроения.

Для тоннелей пролетом более 6 *м* применительно к тоннелям метрополитена, заложенным на глубинах до 30—50 *м*, возможно пользоваться теорией Сюкэ, а для горных тоннелей вполне удовлетворительные результаты может дать теория Коммереля.

При этом для расчета конструкции тоннельной обделки пока можно пользоваться формулами Коммереля-Розанова. Все эти формулы хотя, как и указывалось выше, не являются совершенными, но ими можно пользоваться для поверочных расчетов конструкции обделок. При наличии смешанных пород с резко отличающимися коэфициентами крепости задача осложняется и требует сугубо индивидуального решения. Рекомендуется при этом постановка экспериментальных исследований в разведывательной штольне по методу проф. Н. Н. Давиденкова.

* * *

Для расчета тоннельных конструкций круглого сечения можно рекомендовать примененные на Метрострое новые методы расчета обделок в упругой среде.

МЕТОД РАСЧЕТА ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК С УЧЕТОМ УПРУГОГО ОТПОРА ПОРОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЙ НА СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

При сооружении тоннелей Московского метрополитена советские инженеры в результате ряда исследований пришли к заключению о возможности выявления характера распределения усилий в конструкции кольцевой тоннельной обделки, учитывая упругий отпор окружающей породы, несмотря на исключительную сложность решения задачи.

Принимая во внимание неоднородность геологических условий по трассе тоннеля, расчет обделки в общем виде может быть произведен как пространственной конструкции. Однако для случаев, когда тоннель залегает в однородной среде, задача решается, принимая работу обделки как плоской конструкции.

Активные силы, действующие на тоннельную обделку, являются неуравновешенными, имея в виду нагрузку от породы, подземных вод и собственный вес.

Для того чтобы уравновесить систему внешних сил, необходимо ввести реактивные усилия, зависящие от сопротивлений, оказываемых окружающей обделку породой деформациям и перемещениям конструкции. При этом учитывается наличие сплошного упругого отпора породы вокруг обделки, который практически достигается нагнетанием раствора за обделку, заполняющим пустоты в период сооружения тоннеля. Упругий отпор значительно снижает величины изгибающих

моментов в сечениях обделки по сравнению с конструкцией, деформируемой свободно. Именно наличие упругого отпора увеличивает прочность конструкции. Отдел типового проектирования Метропроекта, базируясь на методах расчета статически неопределимых систем, используя канонические уравнения упругости и уравнения Моора, создал *«Приближенный практический метод расчета кольца в упругой среде»*, позволяющий приблизиться к реальным условиям работы обделки, рассчитать последнюю на прочность и найти экономическое решение конструкции тоннеля глубокого заложения.

Этот метод расчета был одобрен Правительственной Экспертной Комиссией и принят при расчете ряда конструкций обделок тоннелей по трассе Московского метрополитена (Бюллетень Метропроекта, № 19 и 29).

Для выявления характера распределения усилий в тоннельной обделке необходимо совместно учитывать деформации конструкции и окружающих пород. Решение этой сложной, статически неопределимой задачи находится, таким образом, в неотъемлемой зависимости от упругой характеристики окружающей среды — от «коэфициента постели».

Приближенный метод расчета Метропроекта, в котором криволинейное кольцо обделки заменяется многоугольником на упругих опорах, исключает необходимость решения сложных систем диференциальных уравнений.

Нельзя не отметить, что точность решений при весьма осложненных конечных формулах, чрезвычайно трудных для пользования, не вызывается прямой необходимостью для практических целей.

Решение задачи проводится в следующем порядке:

а) криволинейное очертание тоннельной обделки заменяется многоугольником, приведя к основной системе шарнирной цепи;

б) выявляются усилия в основной системе;

в) составляются и решаются системы уравнений упругости относительно изгибающих моментов;

г) определяются упругие реакции и нормальные силы с учетом деформации системы;

д) производится уточнение границы растягивающих усилий упругой среды.

Окружающая тоннельную обделку порода, нагружая конструкцию, вместе с тем является для нее основанием. Порода, сопротивляясь деформациям круговой тоннельной обделки, вызывает пассивный отпор. Поэтому статистический расчет тоннельной обделки может быть правильно произведен лишь при учете совместной работы обделки и основания. так как радиальные перемещения кольца обделки и реакция основания взаимно связаны.

Порода оказывает реактивное сопротивление сжатию. Кольцо обделки частично находится на упругом основании, и реакция сжатия возникает лишь на части контура кольца.

Характеристикой упругих свойств породы, как основания, принимается величина коэфициента постели K — величина постоянная на всем участке упругого отпора. Метропроектом разработано два метода расчета кольцевой тоннельной обделки в упругой среде: а) метод расчета кольца в упругой среде рядами Фурье и б) приближенный практический метод с заменой кольца многоугольником, что значительно облегчает решение сложной задачи.

I. ОСНОВЫ РАСЧЕТА КОЛЬЦА В УПРУГОЙ СРЕДЕ РЯДАМИ ФУРЬЕ

Под влиянием воздействия внешних сил любая точка кольца A получает перемещение, которое может быть разложено на радиальное U и касательное t (рис. 740).

При симметричных относительно вертикальной оси нагрузках, а следовательно, и симметричных деформациях радиальные перемещения замкнутого кругового кольца могут быть заданы в виде следующего бесконечного ряда:

$$U = \sum_{m=0}^{\infty} a_m \cos m\theta,$$

a_m — неизвестные пока параметры.

Не учитывая влияния нормальных сил при деформации кольца, параметр a_0 в самом общем случае будет равен нулю, а следовательно, уравнение радиальных перемещений будет иметь вид:

$$U = \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos m\theta.$$

Касательные перемещения

$$t = \int U d\theta = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} a_m \sin m\theta.$$

[1] Подробно см. Бюллетень Метропроекта, № 19 и 29.

Так как потенциальная энергия всей системы

$$T = A - V_1 - V_2,$$

где A — работа внешних сил, равная

$$A = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} P_r U d\theta + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} P_t t d\theta,$$

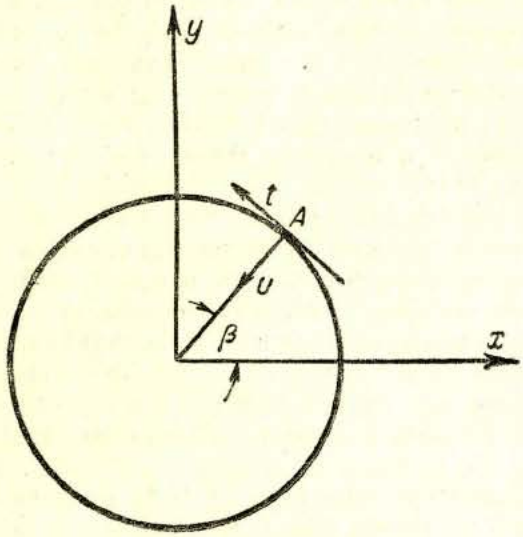


Рис. 740

V_1 — упругая энергия кольца, равная

$$V_1 = \frac{EI}{2r^3} \cdot \int_0^{2\pi} \left(\frac{d^2U}{d\theta^2} + U \right)^2 d\theta,$$

V_2 — упругая энергия основания, равная

$$V_2 = \frac{Kr}{2} \cdot \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} U^2 d\theta,$$

получаем:

$$T = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} P_r \left[\sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos m\theta \right] d\theta +$$

$$+ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} P_t \left[\sum_{m=1}^{\infty} a_m \frac{1}{m} \sin m\theta \right] d\theta -$$

$$- \frac{\pi EI}{2r^3} \sum_{m=1}^{\infty} (m^2 - 1)^2 a_m^2 -$$

$$- \frac{K r^3}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \int a_m \cos m\theta \, d\theta.$$

На основании начала возможных перемещений решением задачи будут те значения параметров a_m, которые обращают в минимум выражение потенциальной энергии.

Таким образом, производные от потенциальной энергии T по коэфициенту a_m должны обращаться в нуль, т. е.

$$\frac{\partial T}{\partial a_m} = 0.$$

Задаваясь определенным числом членов ряда и составляя систему линейных уравнений относительно параметров A, можно определить числовые значения a_m, а следовательно, определить и значения внутренних усилий M и N по следующим формулам:

Изгибающий момент:

$$M = \frac{EI}{r^2} \left(\frac{d^2U}{d\theta^2} + U \right) =$$

$$= \frac{EI}{r^2} \sum_{m=1}^{\infty} [(1 - m^2) \cdot a_m \cos m\theta].$$

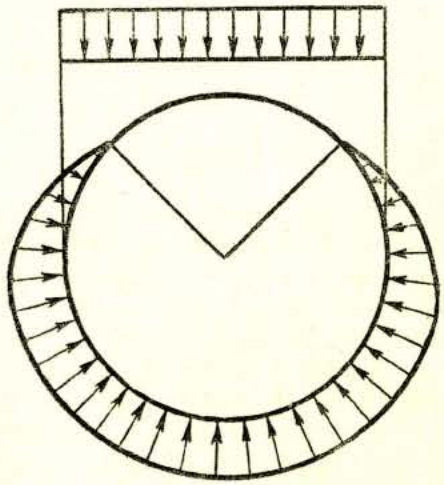


Рис. 741

Нормальная сила:

$$N = q_r r + \frac{EI}{r^3} \sum_{m=1}^{\infty} [m^2 (1 - m^2) a_m \cos m\theta].$$

Упругую энергию постели необходимо вычислить не по всему периметру кольца, а только по тому участку, на котором отпор является сжимающим.

Так как границы участков заранее неизвестны, то определение их производится методом последовательных приближений.

II. ПРИБЛИЖЕННЫЙ ПРАКТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОЛЬЦА В УПРУГОЙ СРЕДЕ

Заменяя в приближенном решении криволинейное очертание кольца многоугольником, а действующие внешние нагрузки и упругие

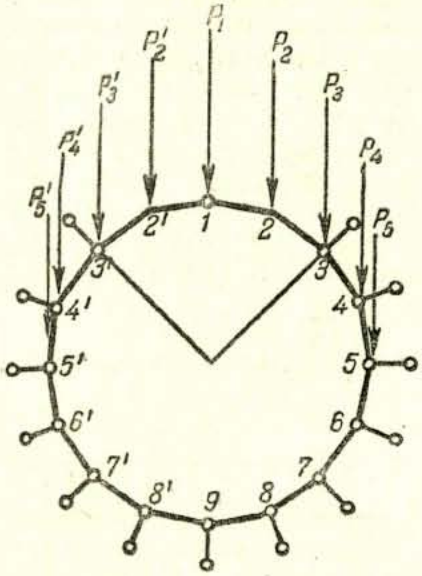


Рис. 742

реакции — сосредоточенными в вершинах многоугольника внешними силами и упругими опорами, задача теории упругости сводится к более простой, статически неопределимой задаче строительной механики.

Таким образом, основной системой будет шарнирная цепь на упругих опорах в пределах пассивного отпора грунта с опирающейся на цепь трехшарнирной аркой, которая получается на участке, в пределах которого упругая среда не оказывает сопротивления сжатию при деформации системы.

Вначале приводим решение задачи для случая, когда упругая среда оказывает сопротивление по периметру всей окружности тоннельного кольца, переходя затем к расчету указанной выше схемы (рис. 741, 742), когда для нагрузки сверху растягивающие реакции упругого отпора исключаются. Последний случай расчета дает практически важные результаты, освещающие действительную работу обделки тоннеля глубокого заложения.

1. УПРУГАЯ СРЕДА ПО ПЕРИМЕТРУ ВСЕЙ ОКРУЖНОСТИ

Произведя замену кольца правильным многоугольником с числом сторон n, прикладываем к его вершинам радиально направленные упругие реакции N_1. Эти реакции пересекаются в одной точке, в центре кольца, вокруг которого система может вращаться, обладая одной степенью свободы, для уничтожения которой необходимо ввести еще одно закрепление в виде горизонтального стержня, например в нижней точке многоугольника (рис. 743).

При симметричной системе и нагрузке усилие в добавочном горизонтальном стержне равно нулю и надобность в нем отпадает.

За основную систему принимается шарнирная цепь, система однажды статически неопределимая, причем в каждом шарнире имеется два нормальных усилия в примыкающих стержнях и одна опорная реакция при двух условиях равновесия. Общее число стержней системы $m = 2n + 1$, а число шарниров n. Таким образом, в основной системе имеется n опорных реакций и n нормальных усилий.

За статически неопределимые величины приняты изгибающие моменты, для определения которых необходимо составить n уравнений упругости.

Исследуем состояние основной системы под влиянием сосредоточенной радиально направленной силы $P = 1$, действующей в n-ом шарнире.

За неизвестную величину принимается усилие в опорном стержне в шарнире системы «1».

Уравнение упругости будет:

$$\delta_{11} X_1 + \delta_1 P = 0.$$

В системе «1» нормальные усилия в стержнях постоянны и определяются разложением силы $X_1 = 1$ в сечении «1» на направление двух примыкающих стержней.

$$\bar{S}_i = \frac{1}{2 \sin \frac{\varphi}{2}}.$$

Из рассмотрения равновесия любого узла системы «1» имеем:

$$\bar{N}_i = 2 \bar{S}_i \sin \frac{\varphi}{2} = 1.$$

[1] Подробно см. Бюллетень Метропроекта, № 24, часть 2-я.

Усилие $P = 1$, действующее в шарнире n второго состояния, в системе никаких усилий не вызывает и воспринимается полностью опорным стержнем в том же шарнире:

$$\bar{S}_i^p = 0;\ \bar{N}_n^p = 1 \quad \text{и} \quad \bar{N}_i^p = 0.$$

Таким образом:

$$D\,\delta_{11} = \sum \bar{N}_i^2 = 1 \cdot n = n \text{ и } D\,\delta_1 p = 1'.$$

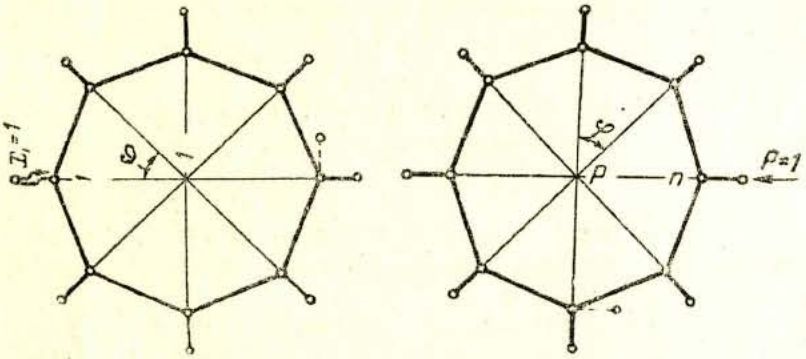


Рис. 743

Следовательно:

$$X = -\frac{1}{n}.$$

Далее можно определить усилия N и S в основной системе от внешних нагрузок.

Из рассмотрения равновесия n-го узла имеем (рис. 744).

Сумма проекции на радиальное направление в точке n:

$$-\bar{N}_n - P_n \cos n\varphi + \sin\frac{\varphi}{2}\,(\bar{S}_n + S_{n+1}) = 0. \qquad (1)$$

Сумма проекций на нормаль к радиусу в точке n:

$$P_n \sin n\varphi + \cos\frac{\varphi}{2}\cdot(\bar{S}_n - \bar{S}_{n+1}) = 0. \qquad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) имеем:

$$\bar{S}_n + S_{n+1} = N_n \frac{1}{\sin\frac{\varphi}{2}} + P_n \frac{\cos n\varphi}{\sin\frac{\varphi}{2}}, \qquad (3a)$$

$$\bar{S}_n - \bar{S}_{n+1} = -P_n \frac{\sin n\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}}, \qquad (3b)$$

откуда получаем:

$$\bar{S}_n = \bar{N}_n \frac{1}{2\sin\frac{\varphi}{2}} + P_n \frac{\cos\left(n\varphi + \frac{\varphi}{2}\right)}{\sin\varphi}, \qquad (4a)$$

$$\bar{S}_{n+1} = \bar{N}_n \frac{1}{2\sin\frac{\varphi}{2}} + P_n \frac{\cos\left(n\varphi - \frac{\varphi}{2}\right)}{\sin\varphi} \qquad (4b)$$

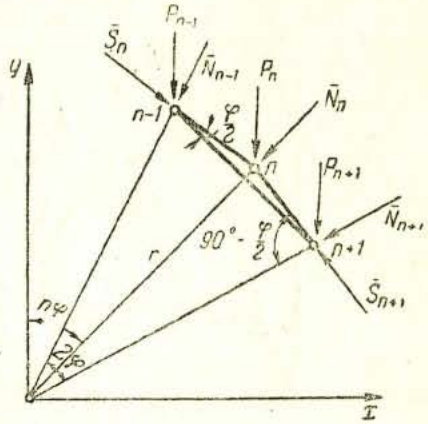


Рис. 744

Величина опорной реакции из уравнения (1):

$$\bar{N}_n = (\bar{S}_n + \bar{S}_{n+1})\sin\frac{\varphi}{2} - P_n \cos n\varphi. \qquad (5)$$

Как усматривается из приведенных формул, в общем случае необходимо определить одну из опорных реакций по схеме (рис. 743) от влияния внешней нагрузки. В частном случае, для кольца с симметричной или кососимметричной нагрузкой, из рассмотрения деформации системы можно установить дополнительные условия и использовать их при определении опорных реакций и нормальных усилий в основной системе, например в случае симметричной равномерно распределенной нагрузки в сечении $n\varphi = 45°$ опорная реакция $N = 0$.

Влияние единичных опорных моментов в статически определимой основной системе можно получить из рассмотрения шарнирной цепи как системы однопролетных балок на свободных опорах (рис. 745).

$$\bar{R}'_{n+1} = \bar{R}'_{n-1} = -\frac{1}{S\cos\frac{\varphi}{2}} = -\frac{1}{r\sin\varphi}, \qquad (6a)$$

[1] Значение коэфициента D см. формулу (10) на стр. 734.

$$\bar{R}'_n = -2\bar{R}'_{n+1}\cos\varphi = \frac{2\cos\varphi}{r\sin\varphi}, \quad (6b)$$

где $\bar{R}'_n$ — упругие реакции в статически определимом многоугольнике, R_n — в статически неопределимом многоугольнике.

Влияние статической неопределимости на опорные реакции можно выразить формулой

$$\bar{X} = -\frac{\sum \bar{R}' R_1}{\sum R_1^2} = -\frac{1}{n}\left[\frac{2\cos\varphi}{r\sin\varphi} - \frac{2}{r\sin\varphi}\right] = \frac{2}{n\,r\sin\varphi}\left[1-\cos\varphi\right]. \quad (7)$$

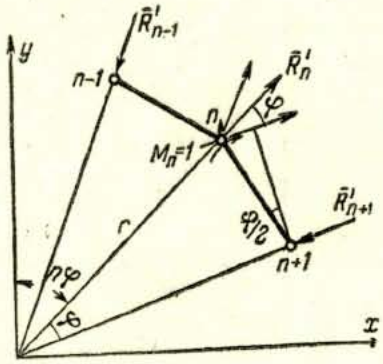


Рис. 745

Полные опорные реакции от $M = 1$, приложенного в точке n:

$$\bar{R}_n = \bar{R}'_n + \bar{X} = \frac{2\cos\varphi}{r\sin\varphi} + \frac{2}{n\,r\sin\varphi}\left[1-\cos\varphi\right] = \frac{2}{n\,r\sin\varphi}\left[1+\cos\varphi(n-1)\right]; \quad (8a)$$

$$R_{n-1} = \bar{R}_{n+1} = \bar{R}'_{n+1} + X = -\frac{1}{r\sin\varphi} + \frac{2}{n\,r\sin\varphi}\left[1-\cos\varphi\right] = \frac{1}{n\,r\sin\varphi}\left[2(1-\cos\varphi)-n\right]; \quad (8b)$$

$$R_i = \bar{X} = \frac{2}{n\,r\sin\varphi}\left[1-\cos\varphi\right]. \quad (8c)$$

В величины опорных реакций и нормальных усилий, определенных от внешней нагрузки в основной системе, после определения опорных моментов необходимо внести поправки от деформации системы.

Уравнение работы в общем виде будет

$$\delta_{ik} = \sum \frac{\bar{N}_i\bar{N}_k}{D} + \int \frac{M_i M_k}{EI}\,ds;$$

или заменяя интеграл суммой при I переменном

$$\delta_{ik} = -\frac{1}{D}\sum \bar{N}_i\bar{N}_k + \frac{1}{EI}\sum M_i M_k \frac{I_o}{I}\Delta s, \quad (9)$$

где $\frac{1}{D}\cdot\bar{N}_i\bar{N}_k$ — упругая осадка опоры, $\frac{1}{EI}\cdot M_i M_k$ — поворот элемента многоугольника, как балки на свободных опорах.

Коэфициент упругости D можно определить из условия, что осадка прямо пропорциональна внешним усилиям и обратно пропорциональна коэфициенту упругости:

$$\partial = \frac{P}{D} = \frac{psb}{D}.$$

По Шведлеру $\rho = \partial k$; подставляя это значение ρ, получим:

$$\partial = \frac{\partial k \cdot s \cdot b}{D}, \text{ откуда } D = ksb, \quad (10)$$

где k — коэфициент постели в $т/м^3$, s — длина стороны многоугольника в $м$, b — ширина кольца в $м$.

Уравнения упругости относительно неизвестных изгибающих моментов M_n должны составляться на основании работы реакций на упругих перемещениях опор и работы моментов на поворотах стержней.

Рассмотрим состояния основной системы от единичных моментов и внешней нагрузки.

Единичный момент, приложенный в любой опоре однажды статически неопределимой шарнирной цепи, вызывает упругие реакции на всех опорах (формулы 8a, b, c). На рис. 746 даны опорные реакции и эпюры изгибающих моментов от $M = 1$, приложенного последовательно в трех опорах, и опорные реакции от внешней нагрузки, вычисление которых производится по формуле (5).

При наличии правильного многоугольника, постоянной жесткости кольца EI и упругого коэфициента D по формуле (9) получим:

$$\left.\begin{aligned}
\delta_{nn} &= \frac{1}{D}\left[R_n^2 + 2R_{n-1}^2 + (n-3)R_i^2\right] + \frac{1}{EI}\cdot\frac{2}{3}s \\
\delta_{n(n-1)} &= \delta_{n(n+1)} = \frac{1}{D}\left[2R_nR_{n-1} + 2R_{n-1}R_i + (n-4)R_i^2\right] + \frac{1}{EI}\cdot\frac{1}{6}s \\
\delta_{n(n-2)} &= \delta_{n(n+2)} = \frac{1}{D}\left[R_{n-1}^2 + 2R_nR_i + 2R_{n-1}R_i + (n-5)R_i^2\right]
\end{aligned}\right\} \quad (11)$$

Работа внешней нагрузки в данном случае возможна только на упругих перемещениях опор:

$$\delta_{np} = \frac{1}{D}\left[N_n R_n + R_{n-1}(N_{n-1} + N_{n+1}) + R_i \sum_{n-3} N_i\right]. \qquad (12)$$

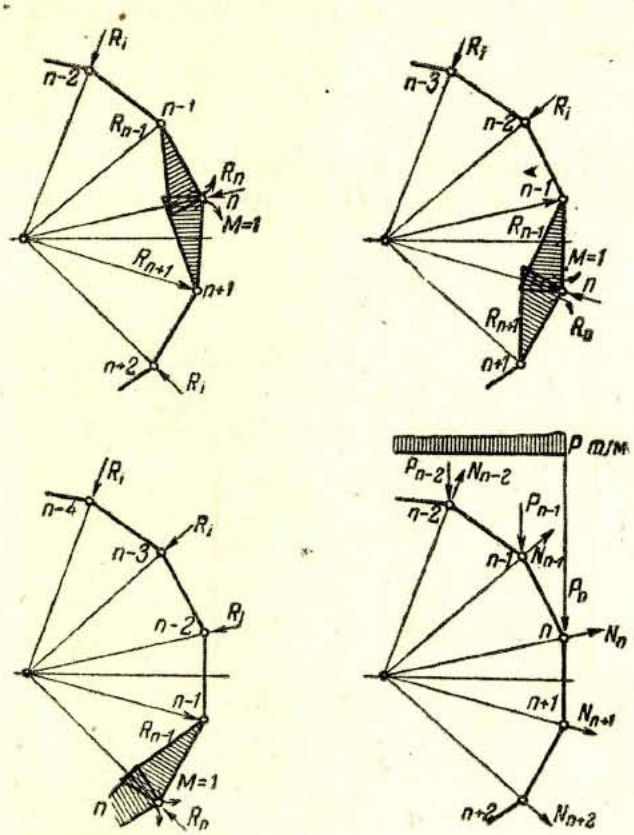


Рис. 746

Уравнение упругости для точки n:

$$M_{n-2}\delta_{n(n-2)} + M_{n-1}\delta_{n(n-1)} + M_n\delta_{nn} + M_{n+1}\delta_{n(n+1)} + M_{n+2}\delta_{n(n+2)} + \delta_{np} = 0. \qquad (13)$$

Число этих уравнений в общем случае должно соответствовать числу неизвестных моментов, т. е. равняться n. Для симметричных и кососимметричных нагрузок число уравнений системы может быть уменьшено.

После определения изгибающих моментов в упругие реакции и нормальные усилия, определенные по формулам (3a), (3b), (4a), (4b) и (5), необходимо внести поправки по формулам (6a) и (6b).

Из рассмотрения чертежа 744 поправки на упругие реакции от влияния моментов в точке n будут:

$$\Delta R_n = 2\frac{\cos\varphi}{r\sin\varphi}\cdot M_n + \frac{1}{r\sin\varphi}\left[M_{n-1} + M_{n+1}\right] = \frac{1}{r\sin\varphi}\left[2M_n\cos\varphi + M_{n-1} + M_{n+1}\right] \qquad (14)$$

и действительная упругая реакция:

$$N_n = N_n \pm \Delta R_n.$$

В общем случае окончательные упругие реакции можно получить путем алгебраического суммирования реакций основной системы для каждого неизвестного момента.

2. УПРУГАЯ СРЕДА НА ЧАСТИ ПЕРИМЕТРА ОКРУЖНОСТИ

а) Решение системы с выделением участка, в пределах которого упругая среда отсутствует.

В этом случае на участке, соответствующем центральному углу $2\varphi = 2\pi\varphi$, упругая среда имеет коэфициент постели $k = 0$.

При этом основная система будет статически определима.

Участок, в пределах которого упругая среда отсутствует, представляет собой в основной системе трехшарнирную арку, усилия в которой от приходящейся на нее внешней нагрузки можно определить независимо от всей системы и опорные реакции в виде активных сил передать на статически определимую систему, находящуюся в упругой среде (рис. 747).

Сплошную нагрузку заменяем сосредоточенными силами P_i, действующими на каждый узел (рис. 748):

$$V = 0{,}5\sum P_i;$$

$$H = \frac{1}{f}\left[Vl - \sum P_i(l-\xi)\right],$$

где $l = r\sin n\varphi$,

$f = r(1-\cos n\varphi)$.

Изгибающий момент в любом сечении:

$$M_\xi = M_{o\xi} - H\eta$$

где $M_{o\xi}$ — изгибающий момент для простой балки.

Полученные опорные реакции V и H в виде активных сил с учетом сосредоточенной нагрузки, действующей на опорный узел по закону силового многоугольника, разлагаем на направление двух стержней в точке A, на направление опорного стержня и стержня AB (рис. 747).

На рис. 749 произведено указанное разложение усилий. В зависимости от угла $n\varphi$ составляем постоянные формулы:

$$\alpha = 90° - n\varphi;\ \beta = 90° - \frac{\varphi}{2};$$

$$\gamma = n\varphi + \frac{\varphi}{2};$$

$$\alpha_1 = 45° - \frac{\varphi}{2};\ \beta_1 = n\varphi;\ \gamma_1 = 90° + \frac{\varphi}{2};$$

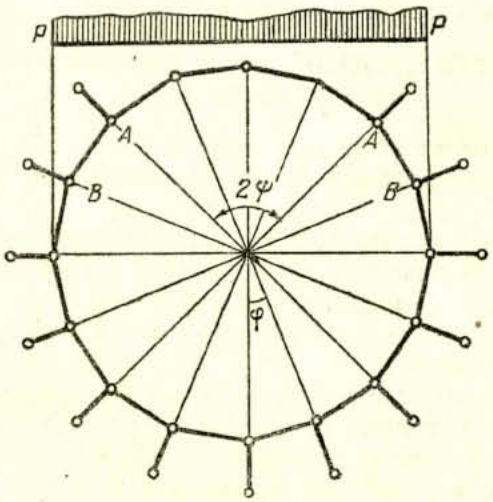


Рис. 747

$$\bar{N}_A = -H\frac{\sin\left(n\varphi+\frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\frac{\varphi}{2}} + (V+P_A)\cdot\frac{\sin\left(45°-\frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\frac{\varphi}{2}}; \qquad (14a)$$

$$\bar{S}_A = -H\frac{\cos n\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}} - (V+P_A)\frac{\sin n\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}}. \qquad (14b)$$

Последующие нормальные усилия S_i и опорные реакции N_i определяются по формулам (3b) и (5).

Влияние опорных моментов рассматриваем отдельно для нескольких точек.

Момент $M = 1$, приложенный в верхнем шарнире арки в точках $A - A$, вызывает распор:

$$H = \frac{1}{f} = \frac{1}{r(1-\cos n\varphi)}. \qquad (15)$$

Изгибающий момент в любом сечении арки:

$$M_\xi = H_C\eta.$$

Так же как и в предыдущем случае, опорная реакция H_C раскладывается на

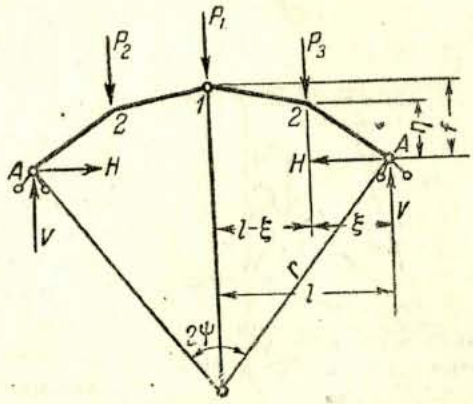


Рис. 748

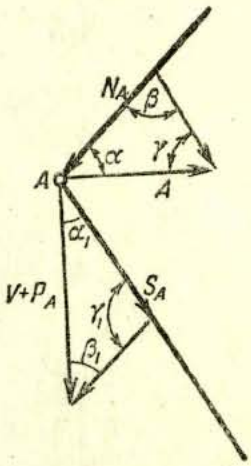


Рис. 749

направление опорного стержня в точке A и на стержень AB:

$$R_A = H_C\frac{\sin\left(n\varphi+\frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\frac{\varphi}{2}} \text{ и } S_A = H_C\frac{\cos n\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}}. \qquad (16a \text{ и } 16b)$$

По формулам (3b) и (5) все последующие нормальные усилия и опорные реакции равны между собой:

$$S_i = S_A = \text{const и } R_i = 2S_A\sin\frac{\varphi}{2} = \text{const}.$$

Усилия, возникающие в основной системе от $M = 1$, приложенного в верхнем шарнире арки, показаны на рис. 750.

Момент $M = 1$, приложенный в точке A трехшарнирной арки, вызывает опорные реакции.

$$V_A = \pm \frac{1}{2r \sin n\varphi}; \qquad (17a)$$

$$H_A = \frac{1}{2r(1 - \cos n\varphi)} \qquad (17b)$$

и в стержне AB по формуле (6a)

$$R_B^1 = \pm \frac{1}{r \sin \varphi}.$$

В точке A^n имеем две опорные реакции: V_A, H_A и в точке A_n — три опорные реакции: V_A H_A и R_B (рис. 751).

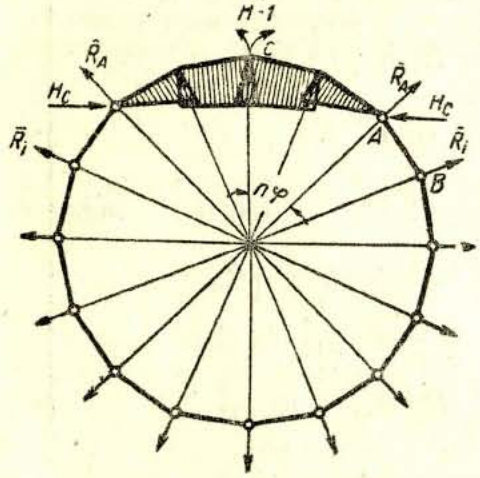


Рис. 750

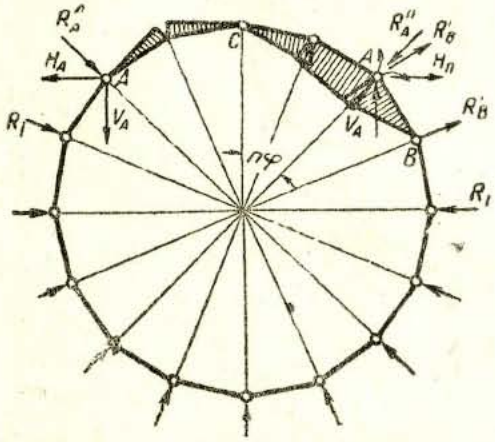


Рис. 751

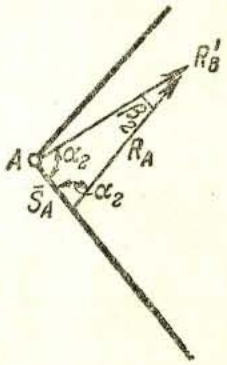


Рис. 752

Раскладывая их на два направления, согласно рис. 749 и 752, получим:

$$\alpha_2 = 90° - \frac{\varphi}{2}; \quad \beta_2 = \varphi;$$

$$R_A^n = +H_A \frac{\sin\left(n\varphi + \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\frac{\varphi}{2}} -$$

$$-V_A \frac{\cos\varphi\left(n - \frac{1}{2}\right)}{\cos\frac{\varphi}{2}} - R_B'; \qquad (18a)$$

$$\bar{S}_A^n = -H_A \frac{\cos n\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}} + V_A \frac{\sin n\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}} - R_B' \frac{\sin\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}};$$

$$S_A^n = \bar{S}_A^n + R_B'\left(\sin\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}}\right) \qquad (18b);$$

$$R_A^1 = -H_A \frac{\sin\left(n\varphi + \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\frac{\varphi}{2}} +$$

$$+V_A \frac{\cos\varphi\left(n - \frac{1}{2}\right)}{\cos\frac{\varphi}{2}}. \qquad (18c)$$

Все последующие нормальные усилия определяются по формуле (3b):

$$S_i = S_A^n = \text{const} \qquad (19)$$

и опорные реакции, кроме точки B, по формуле (5):

$$R_i = -2S_A^n \sin\frac{\varphi}{2} = \text{const}, \qquad (20)$$

а в точке B имеем:

$$R_B = R_B' - R_i = \frac{1}{r \sin\varphi} - 2S_A \sin\frac{\varphi}{2}. \qquad (21)$$

Единичные моменты, приложенные во всех остальных точках, вызовут опорные реакции, определяемые по формулам (6a) и (6b).

Далее переходим к вычислению перемещений в основной системе, для чего рассматриваем следующие состояния (рис. 753).

Состояние n соответствует состоянию 3 и 5 и поэтому отдельно здесь не приведено.

В данном случае в точке 3 длина постели S будет в два раза меньше, чем

в остальных точках; следовательно, по формуле (10) коэффициент упругости будет:

$$D_2 = 0{,}5\ D_1 \text{ и } \frac{1}{D_2} = 2\,\frac{1}{D_1}.$$

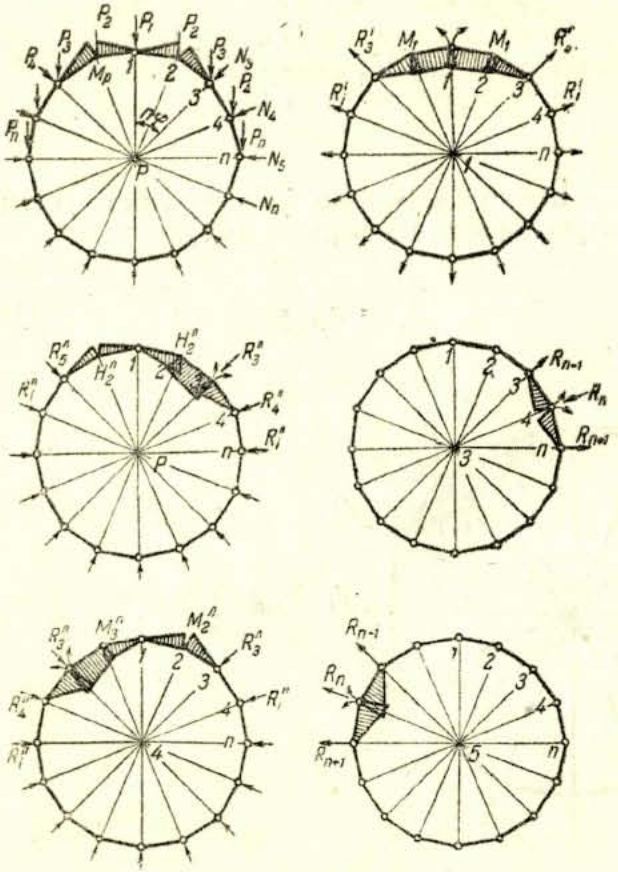


Рис. 753

Перемещения выразятся следующими формулами:

$$\left.\begin{aligned}
\delta_{11} &= \frac{1}{D_3}\,2R_3'^2 + \frac{1}{D_1}\sum R_i'^2 + \frac{1}{EI}\,\delta_{11}^{M},\\
&\text{где } \delta_{11}^{M} = \int M^2 ds;\\
\delta_{22} &= \frac{1}{D_3}\left[R_3''^2 + R_3'^2\right] +\\
&\quad + \frac{1}{D_1}\left[R_4''^2 + \sum R_i''^2\right] + \frac{1}{EI}\,\delta_{22}^{M};\\
\delta_{33} &= \frac{1}{D_3}R_{n-1}^2 + \frac{1}{D_1}\left[R_n^2 +\right.\\
&\quad \left. R_{n+1}^2\right] + \delta_{33}^{M};\\
\delta_{44} &= \delta_{22};\\
\delta_{55} &= \delta_{33};
\end{aligned}\right\} \quad (22)$$

$$\left.\begin{aligned}
\delta_{nn} &= \frac{1}{D_1}\left[R_n^2 + 2R_{n-1}^2\right] + \delta_{nn}^{M};\\
\delta_{12} &= \frac{1}{D_3}R_3'\left[-R_3^{п} - R_3^{л}\right] +\\
&\quad + \frac{1}{D_1}R_i'\left[R_4'' - \sum R_i''\right] + \delta_{12}^{M};\\
\delta_{13} &= \frac{1}{D_3}R_3' R_{n-1} +\\
&\quad + \frac{1}{D}R_i'\left[-R_n + R_{n+1}\right]\\
\delta_{14} &= \delta_{12};\\
\delta_{15} &= \delta_{13};\\
\delta_{1n} &= \frac{1}{D_1}R_i'\left[-R_n + 2R_{n-1}\right];\\
\delta_{23} &= \frac{1}{D_3}R_3'' R_{n-1} + \frac{1}{D_1}\left[-R_4'' R_n +\right.\\
&\quad \left. + R_i'' R_{n+1}\right] + \delta_{23}^{M};\\
\delta_{24} &= \frac{1}{D_3}\,2\,R_3^{п} R_3^{л} +\\
&\quad + \frac{1}{D_1}\left[-2\,R_4'' R_i'' + \sum R_i'^{2}\right] + \delta_{24}^{M};\\
\delta_{25} &= \frac{1}{D_3}R_3^{л} R_{n-1} + \frac{1}{D_1}\left[R_n +\right.\\
&\quad \left. + R_{n+1}\right] R_i;\\
\delta_{2n} &= \frac{1}{D_1}R_i''\left[R_n + 2R_{n-1}\right];\\
\delta_{34} &= \delta_{25}.
\end{aligned}\right\} \quad (22)$$

Перемещения от нагрузки могут быть выражены по формуле (22) или (11):

$$\left.\begin{aligned}
\delta_{1p} &= \frac{1}{D_3}R_3' N_3 + \frac{1}{D_1}R'\sum N_i + \delta_{1p}^{M};\\
\delta_{2p} &= \frac{1}{D_3}N_3\left[R_3^{п} + R_3^{л}\right] +\\
&+ \frac{1}{D_1}\left[-R_4'' N_4 + R_i''\sum N_i\right] + \delta_{2p}^{M};\\
\delta_{3p} &= -\frac{1}{D_3}N_3 R_{n-1} +\\
&\quad + \frac{1}{D_1}\left[N_4 R_n + N_5 R_{n+1}\right];\\
\delta_{4p} &= \delta_{2p};\\
\delta_{5p} &= \delta_{3p};\\
\delta_{np} &= \frac{1}{D_1}\left[-R_{n-1}\left(N_{n+1} + N_{n-1}\right) +\right.\\
&\quad \left. + R_n N_n\right].
\end{aligned}\right\} \quad (23)$$

Уравнения упругости в данном случае будут многочисленными симметричными и составляются по типу:

$$\delta_{nn} M_n + \delta_{n,n+1} M_{n+1} + \\ + \delta_{n,n+2} M_{n+2} + \ldots + \delta_{np} = 0. \quad (24)$$

Практически влиянием членов R_i', R_i'' можно в некоторых случаях пренебречь, при этом уравнения упругости будут пятичленными.

При симметричной системе и нагрузке относительно вертикальной оси удобнее при определении перемещений брать парные симметричные моменты.

Два симметричных момента $M = 1$, приложенных в симметричных точках A, вызывают в арке усилия (рис. 754):

$$H_A = \frac{1}{r(1-\cos n\varphi)} \quad (25)$$

и в опорном стержне AB по формуле (6а) — опорные реакции:

$$R_B' = \pm \frac{1}{r \sin \varphi}.$$

Раскладывая эти опорные реакции на два направления согласно рис. 749 и 752, получим:

$$R_A = -H_A \frac{\sin\left(n\varphi + \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\frac{\varphi}{2}} - R_B'; \quad (26a)$$

$$\bar{S}_A = -H_A \frac{\cos n\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}} - R_B' \frac{\sin\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}};$$

$$S_A = -H_A \frac{\cos n\varphi}{\cos\frac{\varphi}{2}} - R_B' \sin\frac{\varphi}{2}. \quad (26b)$$

Далее по формулам (3b) и (5) имеем:

$$S_i = \bar{S}_A = \text{const}; R_i = 2\bar{S}_A \sin\frac{\varphi}{2} = \text{const}.$$

В точках B опорные реакции:

$$R_B = -R_B' + R_i = -\frac{1}{r\sin\varphi} + 2\bar{S}_A \sin\frac{\varphi}{2}. \quad (27)$$

Для вычисления перемещений рассмотрим следующие состояния (рис. 755).

Упругий коэфициент в точке 2 отличается от остальных коэфициентов:

$$\frac{1}{D_2} = \frac{1}{D}\alpha.$$

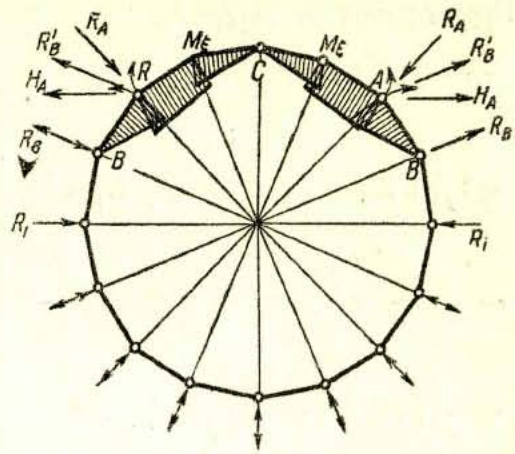


Рис. 754

Уравнения упругости:

$$\left.\begin{aligned}
\delta_{11} &= \frac{1}{D}\left[2\alpha R_2'^2 + \sum R_i'^2\right] + \delta_{11}^{м};\\
\delta_{22} &= \frac{1}{D}\left(2\alpha R_2''^2 + 2R_3''^2 + \sum R_i^2\right) + \\
&\quad + \delta_{22}^{м};\\
\delta_{33} &= \frac{1}{D}\left[2\left(\alpha R_{n-1}^2 + R_n^2 + \right.\right.\\
&\quad \left.\left. + R_{n+1}^2\right)\right] + \delta_{33}^{м};\\
\delta_{nn} &= \frac{1}{D} 2\left(2R_{n-1}^2 + R_n^2\right) + \delta_{nn}^{м};\\
\delta_{12} &= \frac{1}{D}\left[2\left(-R_2' R_2''\alpha + R_i' R_3''\right) + \right.\\
&\quad \left. + \sum R_i' R_i''\right] + \delta_{12}^{м};\\
\delta_{13} &= \frac{2}{D}\left[\alpha R_2' R_{n-1} + R_i''\left(R_{n+1} - \right.\right.\\
&\quad \left.\left. - R_n\right)\right];\\
\delta_{1n} &= \frac{2}{D} R_i\left(2R_{n-1} - R_n\right);\\
\delta_{1n_0} &= 0{,}5\,\delta_{1n};\\
\delta_{23} &= \frac{2}{D}\left(-\alpha R_2'' R_{n-1} + R_3'' R_n - \right.\\
&\quad \left. - R_i R_{n+1}\right) + \delta_{23}^{м};\\
\delta_{2n} &= \frac{2}{D}\left[R_3'' R_{n-1} + R_1''\left(R_n - \right.\right.\\
&\quad \left.\left. - R_{n+1}\right)\right];\\
\delta_{2n} &= \frac{1}{D} R_i\left(R_n - 2R_{n-1}\right);\\
\delta_{34} &= -\frac{4}{D} R_n R_{n-1} + \delta_{34}^{м} = \delta_{n(n+1)};\\
\delta_{n(n+2)} &= \frac{2}{D} R_{n-1}^2.
\end{aligned}\right\} \quad (28)$$

Перемещения от нагрузки:

$$\left.\begin{aligned}
\delta_{1p} &= \frac{1}{D}\left[2\left(\alpha R_2' N_2\right)+R_i^1\sum N_i\right]+\\
&\quad+\delta_{1p}^{M};\\
\delta_{2p} &= \frac{1}{D}\left[2\left(-R_3'' N_3+R_2'' N_2\,\alpha\right)+\right.\\
&\quad\left.+R_i''\sum N_i\right]+\delta_{2p}^{M};\\
\delta_{3p} &= \frac{2}{D}\left(-\alpha N_2 R_{n-1}+R_n N_3-\right.\\
&\quad\left.-R_{n+1}N_{n-1}\right);\\
\delta_{np} &= \frac{2}{D}\left[R_n N_n-R_{n-1}\left(N_{n-1}+\right.\right.\\
&\quad\left.\left.+N_{n+1}\right)\right].
\end{aligned}\right\}\quad(29)$$

Имеем систему I с полным количеством упругих опор и постоянным коэфициентом D, загруженную единичными силами, и систему II — искомую (рис. 756).

Чтобы от системы I (P_1) перейти к решению системы II (P_2), нужно найти такую дополнительную нагрузку системы I, чтобы деформации и усилия в кольце обеих систем были одинаковыми. Упругие реакции в точках 1 и 2 системы II равны нулю. При этом суммарные опорные реакции и единичные усилия в тех же точках системы I должны быть также равны нулю.

Это условие дает столько уравнений, сколько имеется нулевых опорных реакций в системе II.

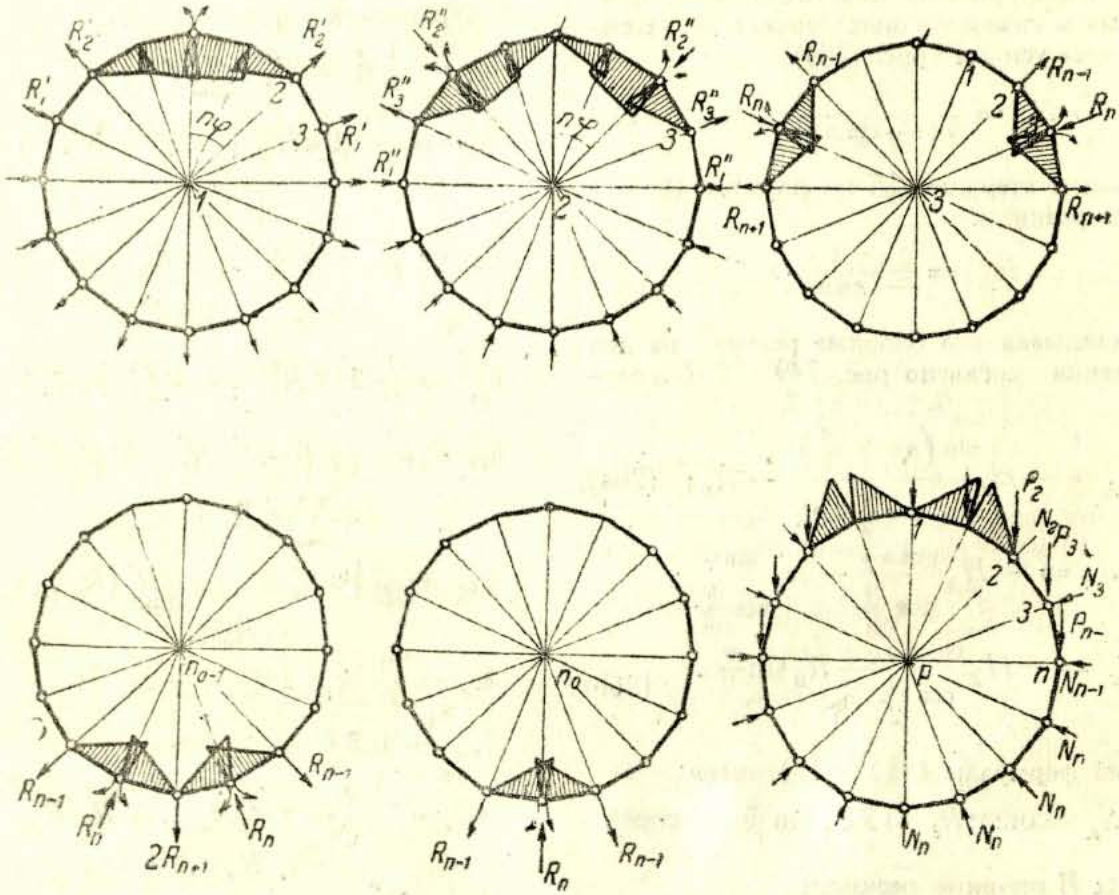


Рис. 755

В общем виде уравнения упругости выразятся по формуле (24).

б) Решение той же системы (при частичном упругом отпоре по длине периметра окружности) с использованием выводов, сделанных для системы с отпором по всему контуру.

Обозначая для системы I:

N_n — величину опорных реакций в соответствующих точках для случая нагрузки P_1, N_{na}, N_{nb}, N_{nc} — то же для единичных нагрузок в системах a, b и c, получим уравнения для точек 1 и 2:

$$N_1+(N_{1a}-1)\alpha+N_{1b}\beta+N_{1c}\gamma=0; \quad (30\,a)$$

$$N_2+N_{2a}\alpha+\beta(N_{2b}-1)+N_{2c}\gamma=0 \ldots . (30\,b)$$

и т. д. в зависимости от числа опор с растягивающими усилиями. Последнее уравнение составится из условия, что радиальные деформации точки 3 обеих систем равны:

$$\delta_3' = \delta_3'' \text{ или } \frac{\overline{N}_3'}{D} = m\frac{\overline{N}_3''}{D} \text{ и } \overline{N}_3' = m\overline{N}_3'', \quad (31)$$

где

$$m=\frac{D_i}{D_3}.$$

(D_3 — коэфициент упругости опоры, подлежащей уточнению, D_i — то же для всех остальных опор.)

Суммарная упругая реакция точки 3 системы I

$$\overline{N}_3'=N_3\pm N_{3a}\alpha\pm N_{3b}\beta\pm N_{3c}\gamma;$$

но в точке 3 системы II, кроме внешней нагрузки, нет дополнительных усилий; следовательно:

$$\overline{N}_3''=N_3+N_{3a}\alpha+N_{3b}\beta+\gamma(N_{3c}-1).$$

На основании равенства (31) имеем:

$$N_3+N_{3a}\alpha+N_{3b}\beta+N_{3c}\gamma = m[N_3+N_{3a}\alpha+N_{3b}\beta+(N_{3c}-1)\gamma],$$

или после преобразования:

$$[N_{3a}\alpha+N_{3b}\beta+N_3)\cdot(1-m)+ +\gamma[N_{3c}+m(1-N_{3c})]=0. \quad (30c)$$

Решив систему выведенных дополнительных уравнений (30a), (30b) и (30c), определим коэфициенты α, β и γ, а усилия системы II, как алгебраическую сумму для соответствующих точек системы I:

$$M_n''=M_n'+M_{na}'\alpha+M_{nb}'\beta+M_{nc}'\gamma. \quad (32)$$

Применением изложенных выше методов расчета тоннельных обделок: метода тригонометрических рядов Фурье и приближенного метода строительной механики, можно обеспечить практически необходимую степень точности определения усилий в обделке. Увеличивая число членов ряда или число сторон многоугольника, мы приближаемся к наиболее точному решению.

При расчете тоннельной обделки путевого тоннеля Московского метрополитена $\varnothing = 6{,}00$ *м*, при коэфициенте

$$\frac{EI_0}{KS_b}=0{,}02461,$$

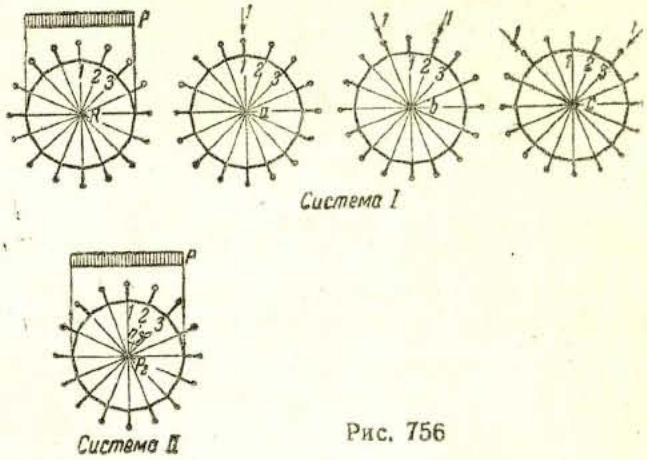


Рис. 756

Метропроектом были получены следующие результаты:

Метод расчета		$+M_{макс.}$	$-M_{макс}$
Приближенный метод строительной механики (замена кольца многоугольником)	$\varphi=\frac{\pi}{8}$	0,15664	0,11780
	$\varphi=\frac{\pi}{16}$	0,14863	0,10798
Метод тригонометрических рядов Фурье		0,13796	0,10224

Как видно из приведенной таблицы, при расчете приближенным методом расчетные изгибающие моменты получаются несколько преувеличенными, причем увеличение числа сторон многоугольника увеличивает точность расчета.

При этом эпюры изгибающих моментов, упругих реакций и нормальных усилий имеют совершенно одинаковый характер (рис. 757).

В заключение следует указать, что сейчас в нашем распоряжении накопился богатейший материал практических, лабораторных, экспериментальных и теоретических исследований горного давления, который еще недостаточно

систематизирован и научно обработан. Для изучения проблемы горного давления следует широко использовать весь этот материал.

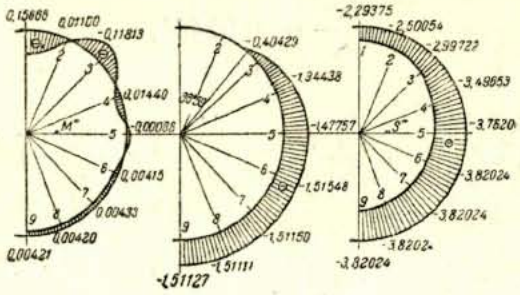


Рис. 757

Советские инженеры и ученые проводят в этом направлении крупные работы. Достаточно привести исследования акад. Левинсона-Лессинга, акад. Динника, проф. Протодьяконова, проф. Розанова, проф. Ливеровского, проф. Пассека, проф. Давиденкова, проф. Николаи и других, которые внесли ценный вклад в эту труднейшую область инженерного дела.

На приобретение недостающих нам знаний и необходимо направить советскую инженерную мысль. Нет сомнения в том, что при правильной, широкой постановке опытов на строительстве Московского, Ленинградского и Киевского метрополитенов нам в известной степени удастся восполнить этот пробел и раскрыть существующую неопределенность при установлении характера и величины горного давления, а отсюда определить размеры элементов тоннельных обделок.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВТОРАЯ

АНАЛИЗ И УСТАНОВЛЕНИЕ АВТОРОМ МЕТОДОВ СООРУЖЕНИЯ ТОННЕЛЕЙ В НЕУСТОЙЧИВЫХ ПОРОДАХ

Строго установленных, руководящих правил проходки и выбора наиболее эффективного метода сооружения тоннеля нет. Во всяком случае огромные средства, вкладываемые в тоннельное строительство, требуют применения таких методов производства работ, которые дали бы возможность быстро и успешно вести проходку тоннеля независимо от природных трудностей. При прокладке больших тоннелей необходимо провести разведывательную штольню, которая должна предупреждать до раскрытия профиля о грозящей опасности и о возможных расхождениях прогноза геологов с действительными условиями.

Как основной принцип прокладки тоннелей в слабых грунтах постоянная обделка должна как можно скорее следовать за временным креплением. Тоннельная выработка, во избежание нарастания горного давления, должна оставаться на деревянном креплении возможно короткий срок.

Несмотря на большой труд по изучению вопроса давления грунта на тоннельные обделки, на опыты и теоретические исследования, до сих пор нет еще полного решения этого вопроса, содержащего весьма много неопределенного и зависящего от огромного числа природных факторов.

Почти в каждом тоннеле условия напластования грунтов весьма разнообразны. Известен ряд случаев обрушения тоннельной обделки вследствие чрезмерного горного давления и неравномерного распределения последнего, что не было и не могло быть учтено при проектировании тоннеля. Определенного мнения о характере давления горных пород до сих пор не установлено. Замечено, что при заложении тоннелей в слабых грунтах наблюдается большое давление в своде обделки, в боковых стенах, а иногда и в лотке в зависимости от условий напластований пород и от характера залегания.

Правильный анализ и оценка геотехнических условий, особенно физико-механических констант-грунтов, прорезаемых тоннелем, оберегают строителя от совершения ряда ошибок. Учитывая всю сложность вопроса о горном давлении, имеющем решающее значение при проектировании тоннеля, его неопределенность, следует, однако, отметить, что при проведении тоннельных работ в несвязных, неустойчивых, в частности песчаных грунтах вопрос может быть разрешен хотя и ориентировочно, но с достаточной степенью достоверности. В условиях неустойчивых пород, пользуясь существующими эмпирическими формулами (Форхгеймер, Бирбаумер и др.), опираясь на данные практики, полученные в процессе проходки опытной штольни, отмечая ряд сопутствующих этой проходке явлений и деталей, можно несомненно получить результаты (хотя теоретически и не безукоризненные), могущие удовлетворить проектным и производственным запросам тоннельного строителя.

Указанными эмпирическими путями имеется возможность относительно правильно дать оценку природным факторам, отличающимся исключительным разнообразием, определяющим количественную и качественную сторону горного давления в условиях неустойчивого грунтового массива. При этом должны быть устранены элементы произвольных рассуждений. При составлении проекта тоннеля и установлении метода производства работ в неустойчивых породах надо считаться с самыми неблагоприятными моментами, которые могут возникнуть, если они даже не подтверждены предварительными данными гидрогеологического прогноза.

Исключительно сложным представляется

вопрос проведения напорных тоннелей в неустойчивых породах. В отличие от тоннелей транспортных, которые преимущественно рассчитываются на внешнее горное давление, при напорных тоннелях приходится проводить сложный расчет на внутреннее давление с учетом упругой работы окружающих пород, солидарно работающих с конструкцией тоннельной обделки. Если расчеты Мюльгофера, Шмидта и Буэхи дают удовлетворительные результаты при закладке тоннелей в коренных устойчивых породах, то при пересечении слабых пород на их упругий отпор следует рассчитывать с особой осторожностью. При испытании напряжений в напорном тоннеле Ахензее приборами проф. Джойса (из Фрейбурга) выявлено, что тоннельная обделка воспринимает 35% давления, а 65% воспринимается породой. В условиях слабых пород усилия от внутреннего давления должны быть восприняты конструкцией обделки при устройстве внутренних железобетонных или металлических оболочек. Научно-практические исследования вопроса о горном давлении, которые для горного массива являются строго индивидуальными, имеют, как указывалось выше, регулятивное значение при проектировании и строительстве данного тоннеля. Величина, направление и характер горного давления: вертикального, тангенциального, направленного снизу вверх и вдоль оси тоннеля, в зависимости от общего строения и физико-механических свойств пород и условий их напластований могут изменяться по мере продвижения забоя. Эти изменения обнаруживаются особенно резко при пересечении тоннелем контактных зон.

Не всегда факторы, от которых зависит характер проявления горного давления, поддаются точному учету. Основная задача заключается в том, чтобы в процессе проходки опытной галлереи суметь даже иногда по едва заметным признакам появления горного давления установить правильный прогноз величины, характера и направления сил горного давления, их деформирующего и, возможно, разрушающего действия.

На основании глубокого изучения и анализа примеров тоннельного опыта можно приобрести поучительные навыки, применение коих на практике даст весьма ценные и плодотворные результаты, обеспечивающие успешное и правильное проведение в жизнь выбранного метода производства работ.

Как указывалось выше, решение проблемы горного давления ведется до настоящего времени разными путями теоретиками и практиками тоннельного дела. Ставятся наблюдения и ведутся исследования на новостроящихся и существующих тоннельных сооружениях. Проводятся лабораторные и экспериментальные исследования, а равно делаются попытки теоретического освещения вопроса горного давления. К сожалению, приходится констатировать, что до настоящего времени ни одному ученому или практику тоннельного дела не удалось дать исчерпывающего, теоретически обоснованного, правильного решения вопроса. Однако при глубоком анализе в каждом отдельном случае геотехнического режима и при критическом подходе к использованию данных теоретических и экспериментальных исследований имеется полная возможность с достаточной для практических строительных целей точностью правильно разрешить поставленную задачу. Современное состояние строительной механики не позволяет строго математически произвести расчет тоннельной обделки ввиду отсутствия величин действующих внешних сил горного давления. Этим и определяются подчас непреодолимые затруднения, которые встречает проектировщик при попытке осуществить строгий теоретический расчет, который является обычным делом в условиях проектирования надземного искусственного сооружения. Пока приходится проектировщику считаться с очертаниями и размерами обделок существующих тоннелей с учетом местных природных условий, в которых пройдет проектируемый тоннель. Неточности, которые вкрадываются в производимые расчеты, должны немедленно корректироваться по мере получения данных, установленных при прокладке разведывательной штольни. Эти данные получаются в процессе наблюдения за характером изгиба и смятия элементов деревянных креплений. При этом по возможности надо уловить и направление воспринимаемого давления. Однако следует быть осторожным, поскольку под влиянием местного давления и неправильного ведения крепежных работ картина деформации может ввести в заблуждение по поводу действительного характера горного давления. Окончательное заключение должно даваться после повторных исследований и тщательных наблюдений. Более полную картину можно получить в процессе раскрытия калоттной части и особенно полного профиля. В этом случае по поведению элементов крепей можно

судить о действующем горном давлении и сделать соответствующие коррективы в расчете и размерах толщины запроектированной тоннельной обделки до устройства последней; особое внимание надлежит обратить на состояние тоннельной конструкции в контактных зонах, где соприкасающиеся пласты, обладая отличающимися физико-механическими свойствами, проявляют разную степень податливости. Это связано с оседанием конструкций и деформацией. Здесь приходится итти по пути усиления жесткости конструкций, способных воспринимать возникающие изгибающие моменты и срезывающие усилия, или предусмотреть устройство осадочных швов.

В условиях слабых грунтов временное крепление следует возводить быстро, предупреждая нарастание горного давления, выпучивание и возможное повреждение элементов деревянных креплений. Это особенно выявляется при наличии источников подземных вод, бьющих обычно под большим напором. Во всяком случае работа в таких условиях требует специального подхода, опыта и знаний, а равно принятия серьезных мер.

Работая в условиях неустойчивых пород и закрывая выход подземным водам, необходимо считаться с тем обстоятельством, что вода может найти себе другой выход и затопить уже сооруженный участок тоннеля.

При возникновении подпора воды в окружающей породе может произойти размыв некоторых напластований, окружающих тоннель. Вода может найти себе новое русло и, расширяя его механическим или химическим путем, повлечь за собой образование в породе полых пространств. Последнее может вредно отразиться на обделке тоннеля не только в период строительства, но и во время эксплоатации его.

Проходка тоннелей в слабых грунтах относится к наиболее сложным и дорогостоящим работам по временному креплению и устройству обделки и содержит элементы многочисленных неожиданностей. Слабые породы встречаются как при проходке тоннелей мелкого заложения в городских условиях, так и при сооружении глубоко заложенных тоннелей, проходящих в массиве, содержащем местные выклинивания напластований неустойчивых пород.

Пересекая тоннелем массив, включающий зону неустойчивых пород, следует стремиться (если это не вызовет затруднений для трассировки и будущей эксплоатации прокладываемого тоннеля) запроектировать заложение тоннеля таким образом, чтобы он проходил в устойчивых коренных породах. При этом над шелыгой свода необходимо оставлять достаточно мощный слой, отделяющий зону разработки от вышележащей толщи неустойчивых пород. Защитная кровля должна быть рассчитана таким образом, чтобы исключить возможность прорыва вышележащего слабого грунта в разработки. Там, где по условиям геологического и гидрогеологического прогноза ожидается значительное скопление воды или газов, необходимо предварительно бурить (разведывательные) передовые рекогносцировочные буровые скважины длиной не менее 25 *м* и диаметром не больше 35 *мм* с целью выявления положения и принятия во-время необходимых мер.

Приближаясь к участку слабых грунтов, где ожидается значительный дебит воды, необходимо по возможности уменьшить сечение направляющего хода. Кроме того, передовые буровые скважины следует вести с надлежащими мерами предосторожности и иметь наготове пробки для закрытия этих скважин. На случай внезапного прорыва воды следует быть подготовленным для установки перемычки с дверями, открывающимися в сторону ожидаемого притока воды. Двери должны удерживаться соответствующими приспособлениями, обеспечивающими их от внезапного закрытия под влиянием прорыва воды или водоносных пород. Только последний рабочий, удаляющийся из забоя, должен иметь возможность полностью закрыть двери. В тех случаях, когда ведется одновременно ряд тоннельных разработок, необходимо принять все меры, чтобы внезапный прорыв в одном забое не привел к катастрофическому затоплению остальных выработок.

Особые методы крепления тоннельных выработок приходится применять в породах, которые проявляют пучение — «*поддувание*». Несмотря на тщательность крепления, действие сил пучения подчас сильно деформирует систему крепей и приводит к необходимости постоянного перекрепления их с целью поддержания определенного поперечного сечения данной выработки. В практике тоннельных работ имели место случаи, когда силы пучения были настолько значительны, что замена деревянного крепления металлическим или каменным не давала положительных результатов. Усиленное крепление дефор-

мировалось, ломалось, и в результате сечение выработок значительно суживалось. Иногда «дующая» порода уничтожает пройденный и закрепленный профиль выработки так, что подошва выработки приближается к кровле ее. В некоторых случаях при пересечении такой зоны представляется более выгодным закрыть данную выработку и изменить направление трассы тоннеля. Явление пучения пород наблюдается преимущественно в глинистых грунтах и проявляется как в кровле, в подошве, так и в боках выработки.

Тоннельная практика выработала ряд методов для проведения основного процесса тоннелирования в неустойчивых породах. В сочетании с искусственным укреплением грунтов приемами замораживания, сжатого воздуха, химического закрепления, тампонажа и т. д. применяется один из следующих методов: кельнский метод тоннелирования, пилот-система, метод иглы, итальянский метод, щитовой метод работ и т. д. В установлении и правильном применении наиболее целесоответствующего для данных условий метода и заключается сущность задачи, которая ставится перед тоннельщиками.

Слабые, неустойчивые породы, в особенности породы, обладающие большой подвижностью, плывунного характера, создают особо неблагоприятные подземные условия для производства процесса тоннельных работ, в то время как скальные породы представляют трудности лишь по степени своей разработки (имеется в виду высокий коэфициент крепости породы), не вызывая осложнений в креплении, так как нет опасений выплывов, осадок и т. д. Если слабые, неустойчивые породы в сухих условиях (имеются в виду условия естественной влажности) не вызывают значительных затруднений и все сводится к выбору надлежащих методов выемки и крепления в зависимости от профиля выработки, то в присутствии воды и при выклинивании грунтов, обладающих большой водоудерживающей способностью, нарушение их сопряжено с выплывами, появлением значительных давлений, подвижностью грунта и т. п. Все эти явления, значительно осложняющие проходку, требуют применения особых методов тоннелирования.

При пересечении сильно водоносных массивов приходится прибегать к специальным дренажным работам подземного характера еще до начала основных тоннельных работ. В зависимости от условий напластований водоносных пород и градиента подземных вод приходится пробивать систему дренажных галлерей, которые иногда заполняются камнем. Создавая ряд дренажных трактов в массиве, удается перехватить подземные воды и вести основные тоннельные работы по трассе без значительного притока вод. Лучше всего (если это представляется возможным в местных условиях) не закладывать камнем дренажные галлереи, так как они со временем затягиваются илистыми частицами и не дают впоследствии требуемого дренажного эффекта. При неглубоком заложении тоннелей, в особенности в городских условиях, для осушения грунтов прибегают к применению искусственного понижения грунтовых вод, главным образом в крупнозернистых песках, легко отдающих воду.

Помимо борьбы с подземными водами, которую приходится вести во время проходки тоннелей, надо учитывать их влияние на конструкцию и изоляцию самой тоннельной обделки в период эксплоатации. Применением материалов в виде чугуна, стали, бетона, кирпича и т. д. и соответственной изоляции в виде свинца, раста, битуминозных веществ и т. д. решается вопрос о водонепроницаемости тела самой обделки.

В то время как при сооружении городских тоннелей, например метрополитенов, выявляется необходимость в полной изоляции тоннеля и недопущения ни в коем случае воды в тоннель, в практике сооружения горных тоннелей очень часто встречаются конструкции каменных тоннельных обделок с дренажными окнами. При последней системе вода непрерывно поступает из окружающего массива непосредственно в тоннель и удаляется преимущественно по лотку или водоотливными установками. В зависимости от характера окружающих пород подобное дренирование как будто бы не вызывает особых осложнений. Однако практика изучения повреждений ряда эксплоатируемых горных тоннелей выявила, что вода, проходя через дренажные окна, все же нарушает окружающий горный массив. При этом в горном массиве происходит непрерывный процесс перемещений, изменяющий режим горного давления. В некоторых случаях подземная вода в процессе своего тока в тоннель может вызывать нарушения пород и привести к образованию больших пустот (куполов) над тоннелем. При этом возможно проявление динамических ударов вследствие обрушения пород над конструкци-

ей тоннеля, на что обделка не рассчитана. Повреждения тоннельной обделки, вплоть до обвала ее, могут привести к полному прекращению эксплоатации данного тоннельного сооружения. В связи с этим в настоящее время как рядом специалистов в Советском Союзе, так и за границей отрицается применение конструкций с дренажными окнами и указывается на необходимость применения герметических, замкнутого контура тоннельных обделок, не допускающих проникновения воды непосредственно в тоннель. Исключение представляют те места, которые пересекают большие подземные потоки, требующие специального отвода с целью снятия гидростатического напора с конструкции тоннельной обделки, которая вместе с тем не должна быть подвергнута работе в виде подземной плотины.

Практика проходки тоннелей в водоносных грунтах доказала, что ни в коем случае не следует полностью преграждать пути воде, так как, задержанная в одном месте, она неминуемо прорвется в другом. В тех случаях, когда за креплением образуются пустоты в связи с выносами грунта, несмотря на принятые меры, пустоты должны быть плотно забучены. При возрастании горного давления, деформирующего крепи, должно быть немедленно произведено соответствующее усиление их постановкой дополнительного усиленного крепления (постановка унтерцугов). Помимо этого, слабые грунты могут, как указывалось выше, быть закреплены применением искусственных мероприятий в виде химического укрепления, тампонажа с целью уменьшения текучести самого грунта и консолидации его. Особая осторожность требуется при подходе к местам, содержащим подземные карсты, где возможен местный, внезапный, большой прорыв подземных вод под напором. Приходится также опасаться и больших каменных глыб, которые могут в связи с нарушением равновесия неустойчивых пород перемещаться и оказывать значительное сосредоточенное местное давление на конструкцию тоннельной крепости. После появления обвала следует немедленно тщательно оградить место катастрофы и принять самые срочные меры против возможного распространения зоны обрушения путем усиления соответствующих тоннельных креплений, постановкой ряда перемычек, подпорных стен, столбов и т. д., вплоть до полного заполнения сечения тоннельной обделки каменной кладкой или кострами.

Там, где обвал распространяется до поверхности, необходимо также принять ряд мероприятий по заполнению этих воронок.

Дальнейшее восстановление тоннеля ведется по особо разработанному плану, исключительно малыми частями, специальными приемами, с принятием необходимых мер предосторожности.

Обвалы и деформации тоннельных обделок могут произойти по причинам изменения режима горного массива, в котором заложен тоннель. Тоннельная обделка низкого качества может при внешних агрессивных факторах являться со временем причиной многих деформаций и повреждений. В тех случаях, когда приток подземных вод, дренируемый тоннелем, может выносить и выщелачивать окружающую породу, неминуемо образование пустот за тоннельной обделкой и общий сдвиг грунтовых масс. Под влиянием неравномерного горного давления может произойти значительная деформация тоннельной обделки. Весьма часто под действием установившегося тока подземных вод окружающие тоннель ранее твердые породы могут превратиться в разжиженные, проявляющие усиленное горное давление, на которое обделка не рассчитана. Так, например, в тоннельной практике имели место случаи, когда порфиры и сланцы под влиянием вод превращались в мягкую массу.

Повреждения тоннельной обделки очень часто возникают и под влиянием агрессивного воздействия вод, разъедающих цементный раствор в кладке и значительно ослабляющих тело тоннельной обделки.

Решение задач по реконструкции тоннелей неразрывно связано во многих случаях с вопросами влияния подземных вод на тоннель.

В существующих тоннельных обделках обычно применялись дренажи, забутка из сухого камня и дренажные трубы. Но эти дренажи, как указывалось, спустя некоторое время засоряются песком, грунтом. В результате вода, не находя определенного выхода, производит гидростатическое давление на каменную обделку и, просачиваясь через нее, вымывает раствор каменной кладки обделки. Выщелачивание раствора водой значительно ослабляет несущую способность тоннельной обделки. В результате интенсивного действия подземных вод образуются значительные пустоты и полые пространства за тоннельной обделкой, приводящие к обвалам.

Для оздоровления тела кладки тоннельной

обделки применяется каптаж подземных вод и отвод их по трубам, уложенным в стенах тоннеля, при прокладке специальных галлерей позади стен тоннельной обделки, доступных для осмотра. Однако этот способ требует дорогостоящих работ и не всегда оправдывает себя на практике.

Указанное мероприятие по прокладке дренажных галлерей может носить временный характер. По мере засорения, закупорки дренажной системы вода находит себе совершенно другой выход, новые тракты и минует, таким образом, дренажные сооружения, на которые произведены определенные капитальные затраты, ничем, следовательно, не оправданные. Прокладка дренажных галлерей может иногда привести и к отрицательным результатам. Так, продольная галлерея, проложенная в тоннеле Кантей на линии Париж — Страсбург, с внешней стороны свода тоннеля каптировала воды из вышележащих источников и горного массива. В результате пробивки этой новой дренажной галлереи значительно увеличился приток поступавшей в тоннель воды по сравнению с дебитом воды, поступавшей в тоннель до прибивки дренажной галлереи.

Одним из верных мероприятий в некоторых случаях бывает устройство поверхностного дренажа, расположенного непосредственно над тоннелем. Это достигает цели в том случае, когда имеется непосредственная гидравлическая связь поверхностных вод с подземными.

Наиболее эффективным техническим мероприятием, принятым в последнее время в Советском Союзе и за границей, является полная изоляция тоннеля от воды путем нагнетания (инъекции) цементного раствора за обделку. Нагнетанием цемента в значительной степени укрепляется тело самой тоннельной обделки, в особенности когда качество каменной обделки является неудовлетворительным.

* * *

Глубины заложения тоннелей метрополитена, ограниченные величинами 50—70 м, по условиям эксплоатации находятся в зоне, которая с точки зрения существующей классификации в учении об оседании земной поверхности, в связи с подземными разработками, не являются «безопасными глубинами». Это значит, что процесс городского тоннелирования протекает в условиях, при которых неправильный учет природных и производственных факторов неминуемо приведет к осадкам на поверхности, деформациям сооружений, а иногда и к катастрофическим результатам. На протяжении ряда лет учеными и инженерами велись наблюдения и строились гипотезы о характере распространения осадок и причинах, их вызывающих.

Большую работу в этом направлении проделали русские ученые проф. Леонтовский, Бахурин, Слесарев, Цимбаревич, а также заграницей Леман, Гальдрайх, Эккард, Файол, Падур и другие. Однако местные обстоятельства в каждом отдельном случае настолько пестры и различны, что дать обобщающие выводы по вопросу осадок не представляется возможным. Вместе с тем огромное количество факторов, составляющих элементы первопричин осадок, до некоторой степени выявилось. На характер и величину осадок поверхности и сооружений влияют следующие доминирующие обстоятельства.

1. Условия напластований пересекающих тоннель пород, их физико-механические свойства и глубина заложения тоннеля.
2. Режим и направление движения потока подземных вод.
3. Система производства тоннельных работ.
4. Размеры обнажения поверхностей разработок и квадратура сечения сооружаемого тоннеля.
5. Продолжительность стояния выработок на временном креплении и степень подверженности породы агрессивному влиянию факторов воды и воздуха.
6. Крепление лба забоя и процент отношения действительной выдачи породы к проектному объему.
7. Система водоотлива и надежность фильтрующих мероприятий против выноса частиц и выклинивания слабых пород, не предусмотренных гидрогеологическим прогнозом.
8. Качество заполнения пустот, забутка за креплением и обеспечение пассивного отпора породы. Качество инъекционных работ и отставание момента их производства от основных работ по экскавации забоя.
9. Темпы ведения тоннельных работ.

Перечень этих далеко еще не исчерпывающих факторов говорит о том, насколько сложен вопрос об осадках и как трудно на практике установить действительную первопричину их образования в каждом отдельном случае.

Основная задача заключается в том, чтобы в местных геотехнических и городских

условиях установить наиболее целесообразный метод тоннельных работ, организовать и провести его практически без осадок или в крайнем случае свести их к минимуму, не угрожая сооружениям на поверхности.

В соответствии с требованиями эксплоатации метрополитена, которые должны быть поставлены во главу угла, в зависимости от проектного профиля, надлежит стремиться к закладке тоннелей в устойчивые коренные породы. При этом необходимо шелыгу и подошву тоннеля обеспечить по мере возможности защитными (над кровлей и под подошвой выработки) слоями устойчивых пород. Тогда работы можно ориентировать на проходку под нормальным воздушным давлением с водоотливом. При наличии же в кровле слабых грунтов приходится во избежание осадок ориентироваться на специальные методы работ в виде сжатого воздуха, замораживания, силикатизации и т. п.

При выявлении в период геологических и гидрогеологических изысканий режима грунтовых вод, а главное, направления движения их надлежит по возможности (если это не вызывает осложнений эксплоатационного порядка) прокладывать ось тоннеля параллельно направлению движения потока грунтовых вод. В этом случае следует ожидать значительно меньшего дебита вод в разработки в период строительства. Кроме того, тело тоннеля избавляется от действия подпора вод, обычно проявляющегося при прокладке трассы перпендикулярно к направлению потока, когда тоннель играет роль подземной плотины.

Система производства тоннельных работ должна быть установлена в соответствии с местными условиями и профилем прокладываемого тоннеля. Размеры осадок находятся в непосредственной зависимости от размеров раскрываемого профиля. Чем он больше, тем опасность распространения осадок более вероятна и значительна. Особенно это положение относится к станционным профилям. При разработке тоннелей в городских условиях горными методами надлежит раскрывать калотты таких размеров, чтобы полуэллипс давления вдоль оси тоннеля был меньше полуэллипса в поперечном направлении. Как правило, эти работы должны вестись небольшими частями, что в меньшей степени приводит в движение грунтовой массив. Необходимо стремиться к такой системе работ, при которой в первую очередь раскрывается калоттная часть, ибо в случае предварительной проходки нижней части верхняя часть грунта уже приводится в движение. В дальнейшем наиболее трудную, калоттную часть приходится осваивать в относительно тронутых породах, что также влияет на распространение осадок. Сама система временных деревянных креплений по своей сущности связана с перекреплением, что неминуемо приводит к осадкам. В особых случаях рекомендуется оставлять крепление в виде лонгарин за постоянной обделкой, лишь бы не приводить породу в движение. Забивку толстых деревянных марчеван приходится вести с подбором, что также связано с выпуском грунта и с осадками. В этом отношении удачным является кельнский метод, при котором данный объем грунта берется в металлические марчеваны еще в плотном теле, так что в дальнейшем никаких подвижек грунта уже не происходит.

Проявление осадок в значительной степени сказывается при сооружении подземных станций метрополитена, при ширине выработок до 34 *м* и высоте 13 *м*, при глубине заложения до 50 *м*. В этом случае эллипс давления не замыкается и выходит на поверхность; при этом вовлекается в движение не только налегающая земляная толща, ограниченная по вертикали, но и грунт за пределами призмы обрушения.

В практике тоннельных работ установлено, что продолжительное стояние выработок на временном креплении приводит к возрастанию горного давления, деформации и поломке крепей и к осадкам грунтового массива на поверхности. Особенно это сказывается в глинистых грунтах, которые сначала в процессе проходки даже не проявляют давления. Но в дальнейшем влияние факторов воды приводит к пучению глины. Последняя начинает «дышать» и проявляет усиленно нарастающее давление на крепи. Это наблюдалось на тоннелях Лондонского метрополитена, японских тоннелях Курэку и тоннелях Московского метрополитена.

Во избежание подобных явлений необходимо так организовать систему работ, чтобы вслед за временным креплением вести постоянную тоннельную обделку. Это, как правило, относится к любым тоннельным работам.

Особое внимание должно быть обращено на крепление лба забоя. При этом необходимо строго следить, чтобы процент действительной выдачи грунта не превышал проектного

объема. При проходке выклиниваний слабых пород иногда происходят совершенно незаметно выплывы забоя, даже при самой тщательной работе, а это приводит к осадкам поверхности. В таком случае необходимо провести технические мероприятия по искусственному закреплению слабого прослойка специальными приемами.

Одной из частых причин проявления осадок на поверхности при ведении подземных работ является водоотлив. Это относится главным образом к проходке в неустойчивых породах.

При хороших фильтрах, чего можно достигнуть при искусственном водопонижении, удаление воды из песчаных грунтов обычно не сказывается на изменении объема, а следовательно, осадки не проявляются. Особенно отрицательно сказывается водоотлив при выносе илистых частиц грунта. При этом происходит «усушка», уменьшение объема грунта, и неминуема осадка поверхности.

Во избежание этих явлений лучше в слабых грунтах переходить на специальные методы осушения и закрепления грунтов. В зависимости от характера выклиниваний и включений линз водоносных грунтов осадки при выносе частиц во время водоотлива могут появиться на участках, даже далеко отстоящих от места тоннельных выработок.

В процессе проходки между креплением и породой неизбежно образуются пустоты. Это в свою очередь связано с подвижкой пород, стремящихся заполнить пустоты, что вызывает в зависимости от характера и мощности налегающей толщи осадки на поверхности.

Распространение осадок на поверхности находится в соответствии с фактором времени.

Производя во-время заполнение пустот за обделкой, возможно полностью приостановить процесс распространения осадок. В тоннельной практике принято заполнение пустот производить нагнетанием под давлением известкового, цементного или глинистого раствора. Известковый раствор применяется в английской и французской практике, преимущественно при щитовой проходке, так как обладает медленным схватыванием.

В практике Советского Союза, а равно в США, заполнение пустот за обделкой при щитовой проходке осуществляется более совершенным средством, а именно: предварительным нагнетанием гравия или крупнозернистого песка, с последующей инъекцией цемента.

Вместе с тем расход цементного раствора на нагнетание при городском тоннелировании довольно значителен.

Нагнетание раствора за обделку является одним из признанных мероприятий в тоннельной практике, приостанавливающих дальнейшие осадки, а главное, обеспечивающих пассивный отпор обделки, восстанавливая при этом нормальный режим грунтового массива, который существовал до нарушения последнего тоннельным ходом. Однако при пересечении глинистых пород, проявляющих пучение в присутствии влаги, нагнетание раствора становится до некоторой степени вредным для обделки самого тоннеля. Размытая глина начинает проявлять местное давление пучения на тоннель, на которое обделка не рассчитана; при этом не исключена возможность деформации тоннеля. В этих случаях лучше всего производить нагнетание сухого материала в виде крупного песка или гравия под давлением.

Процесс нагнетания за обделку должен производиться под давлением в пределах до 3—5 *ат*; превышение этих величин приводит к повреждению тоннельной обделки.

Нагнетание раствора может дать тем больший эффект, чем меньше отрезок времени между моментом разработки профиля и процессом нагнетания. Нагнетание через большой промежуток времени становится бесполезным, так как порода уже успевает сильно обжать кровлю закрепленной выработки. В это же самое время процесс распространения осадок до поверхности продолжается. Высококачественное и своевременное производство нагнетания за обделку при городских тоннельных работах является вопросом исключительной важности.

Весьма существенными при ведении тоннельных работ являются темпы производства работ. Само существо и характер ведения тоннельных работ, вызывающих нарушение земляного массива, требуют быстроты операции. Чем скорее будет раскрыта калотта и забетонирован свод, тем менее вероятно появление осадок и развитие местного давления, величина которого в некоторых случаях может превысить ожидаемое основное горное давление. Тоннельные работы должны производиться непрерывным циклом, остановку забоев необходимо сводить к минимуму.

Приведенные выше дробные факторы являются лишь элементами этой далеко не изученной, сложной проблемы осадок. Но их

следует принять во внимание при производстве городских тоннельных работ, а в особенности при проходке под искусственными сооружениями и при устройстве тоннельных пересечений.

Вопросы осадок и обеспечения непрерывности работ затрагиваемых сооружений требуют в каждом отдельном случае своего специального технического решения.

* * *

При сооружении тоннелей в слабых, неустойчивых породах можно установить следующие взаимовлияющие положения.

1. Пересекаемые слабые породы должны быть подвергнуты искусственному укреплению с целью облегчения производства тоннельных работ.

2. Самый метод производства работ должен быть выбран в соответствии со свойствами пересекаемых неустойчивых пород и приемами искусственного укрепления последних.

На практике, следовательно, приходится разрешать задачи тоннелирования в неустойчивых породах комбинированным порядком. Это значит, что окончательно принятое решение должно неразрывно отражать указанные два положения, а именно: метод работ и прием искусственного укрепления пересекаемых неустойчивых пород.

Богатейшая практика сооружения тоннелей разнообразного назначения и профилей в разнородных геотехнических условиях выработала многочисленный ряд всевозможных методов тоннелирования. Если при проходке устойчивых, крепких пород решающим фактором является выбор системы организации взрывных работ, погрузки и транспорта (при последующей механизации работ по устройству обделки тоннеля), то при проходке в неустойчивых породах обстановка работ всегда представляется более осложненной.

Проходка тоннелей в неустойчивой среде требует специальных мероприятий как в отношении искусственного укрепления грунтов (сжатый воздух, замораживание, силикатизация, химическое укрепление и т. д.), так и в отношении применения особых методов производства работ.

При прокладке тоннелей в слабых грунтах надлежит, помимо обычных методов расчетов тоннельных конструкций на горное и гидростатическое давление, учитывать работу тоннельного сооружения в период его эксплоатации. Опыт сооружения подводных тоннелей в неустойчивых породах выявил, что под влиянием вибрации от движения поездов обычные тюбы претерпевают значительные осадки и деформации.

Для ликвидации указанных явлений приходится прибегать к увеличению жесткости тоннельных конструкций и искусственному фундированию их. Иногда осложненный режим пересекаемых неустойчивых пород приводит к необходимости создания конструкций в виде тоннелей-мостов.

Помимо проведения приемов искусственного укрепления пересекаемых тоннелем неустойчивых пород, приходится ориентироваться на ряд специальных методов производства предпринимаемых работ. В условиях проходки участков небольшого протяжения с значительным горным давлением нарушенных пород применим итальянский метод работ.

Эксцентричная и концентричная пилот-система при разработке крупных профилей может оказаться высокоэффективной.

Метод кессонов-тоннелей для решения вопроса сооружения тоннельного участка в неустойчивых, водоносных породах в зависимости от местных условий, глубины заложения и гидростатического напора может оказаться весьма целесоответствующим. При этом должно быть обращено особое внимание на процесс стыкования отдельных тоннельных секций.

Щитовой прием тоннелирования в неустойчивых породах является на современном этапе развития тоннельной техники наиболее передовым. Опыт щитовой проходки подводных тоннелей в неустойчивых породах под рр. Гудсон, Ист-Ривер, Мерси, Темзой, Шельдой и др. доказал, что системы и конструкции щитов не являются совершенными и требуют своего дальнейшего усовершенствования и оснащения. Щиты, в основном являясь пока мощной инертной крепью, еще не разрешают вопроса механической экскавации породы. Надо еще учесть направление проектно-творческой технической мысли в отношении создания новых механизированных, в особенности герметических щитов для проходки тоннелей в осложненном режиме неустойчивых пород, при значительном горном давлении и большом гидростатическом напоре.

В этом направлении исключительно важными являются новые герметические приемы щитовой проходки. Герметические приемы щитовой проходки системы автора (см.

главу VIII) позволяют по-новому сооружать тоннели различных сечений, от малых коллекторов до станционных профилей, в условиях неустойчивых, водоносных пород. Имеется в виду пересечение подземных староречий, заполненных аллювиальными отложениями, и особенно процесс подводного тоннелирования на больших глубинах ($H > 35$ *м*), где применение приемов сжатого воздуха становится физически невозможным.

Таким образом, задача прокладки подводных тоннелей в Советском Союзе под руслами глубоких рек, больших озер, морских заливов и т. д. может быть решена только применением герметических щитов, ибо другие приемы тоннелирования на современном этапе развития техники для указанных условий еще пока не разрешают задачи.

Изучение имевших место за границей тоннельных катастроф представляется исключительно ценным для наших техников. Анализируя тоннельно-строительные катастрофы Мадонского тоннеля, парижских тоннелей и других, можно установить, насколько важен учет геотехнических условий, рекогносцировочная разведка впереди забоя до раскрытия профиля с целью проверки данных геологического и гидрогеологического прогноза. Своевременная подготовка для срочного принятия соответствующих технических мер и для переключения принятого метода работ на новый, вызываемый природными условиями, является решающим фактором. Приемы мировой тоннельной практики по ликвидации тоннельно-строительных катастроф должны быть также изучены нашими техниками.

При прокладке тоннелей на линиях 1-й, 2-й, 3-й и 4-й очередей Московского метрополитена советские строители встретили большие трудности проходки в неустойчивых, водоносных породах.

Потребовались специальные приемы временного деревянного крепления под сжатым воздухом и замораживания при проходке тоннелей под путепроводами, железнодорожными путями и т. п.

Проходка в неустойчивых породах отдельными фазами в условиях усиленного горного давления велась при сооружении станций Площадь Дзержинского, Библиотека Ленина, Динамо и другие.

Исключительно богатый опыт тоннелирования в слабых породах был достигнут щитовой проходкой под сжатым воздухом при пересечении подземных староречий и глубоких размывов. Особо следует отметить опыт подводного тоннелирования под р. Москвой.

Разносторонний мировой тоннельный опыт указывает, что в условиях неустойчивых пород требуется особо строгий подход при установлении соответствующего метода тоннелирования, так как для инженера-тоннельщика выбор правильного метода работ в неустойчивых породах обусловливает успех предприятия.

Тоннельная практика в неустойчивых породах богата примерами аварий и тоннельно-строительных катастроф, первопричинами которых являлся главным образом неправильный выбор метода тоннелирования. Чтобы предотвратить катастрофы и не повторять имевших место роковых ошибок, стоивших жизни многим людям, и избежать огромных непроизводительных капиталовложений, необходимо всестороннее и критическое изучение мирового тоннельного опыта.

Автором настоящего труда сделана попытка создать *таблицы методов тоннелирования в неустойчивых породах*. Приходится считаться с тем обстоятельством, что разнообразие природных условий не позволяет дать исчерпывающего решения вопроса, но для практических целей предлагаемые таблицы методов работ, надо надеяться, дадут определенную ориентировку в установлении целесоответствующего метода тоннелирования.

Эти таблицы, безусловно, имеют недостатки, неизбежно связанные с первой попыткой. В дальнейшем, по мере развития и прогресса тоннельной техники и нарождения более совершенных методов работ, жизнь несомненно внесет свои коррективы. Цель данных таблиц — ориентировать тоннельных инженеров в деле овладения существующими тонтельными приемами применительно к проходке в неустойчивых породах.

Материалы по этому вопросу сведены автором в две таблицы: таблица важнейших факторов, влияющих на установление метода тоннельных работ в неустойчивых породах (см. табл. 51), и таблица целесоответствующих методов тоннельных работ и искусственного укрепления неустойчивых пород (см. табл. 52).

При этом следует отметить, что пестрота и разнообразие природных условий не дают возможности перечислить все факторы, но приведенные являются основными, и они должны быть приняты во внимание при установлении метода тоннельных работ в неустойчивой среде.

Таблица 50

Таблица методов тоннельных работ и искусственного укрепления неустойчивых пород (по В. Л. Маковскому)

№ п/п	Характеристика пород	Методы искусственного укрепления пород: водоотлив	водопонижение	тампонаж	сжатый воздух	химическое закрепление	замораживание	цементация	комбинирование сжатого воздуха и водопонижения	комбинирование химического закрепления и сжатого воздуха	Методы производства тоннельных работ: метод опорного ядра	австрийский	итальянский	кельнский	пилот-система	метод иглы	кессоны — тоннели	полигональная рамная система	щит с открытой грудью	щит с закрытой грудью	Герметические щиты спецсистем	Система Фрэсса
1	Разрушенные, трещиноватые породы с большим притоком вод	●	●	●	○	○	○	○	○	○	●	●	○	○	⊙	○	○	⊙	○	○	○	○
		В зависимости от дебита вод																				
2	Глинистые породы (явления пучения)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	○	○	●	○	○	○
3	Сыпучие породы (сухие)	○	○	●	○	●	○	○	○	○	●	○	○	●	⊙	●	○	●	⊙	○	●	○
4	Слабые, водоносные грунты: а) Водоносные песчаные грунты	○	●	●	●	●	●	○	●	●	●	○	○	⊙	⊙	⊙	●	⊙	⊙	●	●	●
	б) Ярко выраженные плывуны	○	○	○	●	○	●	●	○	○	⊙	○	●	⊙	⊙	○	●	○	○	⊙	●	●

Условные обозначения: ○ — метод нецелесообразен. ● — метод применим. ⊙ — целесообразность сочетания метода тоннелирования и искусственного укрепления пород.

Таблица 51

Таблица важнейших факторов, влияющих на установление метода тоннельных работ в неустойчивых породах (по В. Л. Маковскому)

№ п/п.	Элементы основной и геотехнической характеристики тоннельного сооружения	Ожидаемые природные затруднения в период тоннельного строительства	Технические мероприятия для преодоления строительных трудностей	Влияние условий эксплоатации тоннеля	Влияние экономических факторов	Установление метода работ
1	2	3	4	5	6	7
1	Назначение тоннеля. Размеры и очертания поперечного сечения		При щитовой проходке рекомендуется ориентироваться на круглое сечение. При сооружении крупных, станционных профилей горным способом ориентироваться на методы последовательного раскрытия малыми частями. В условиях слабых пород чем прочнее и качественнее материал тоннельной обделки, тем меньше размеры ее, а следовательно, и самого поперечного сечения. Это обусловливает при минимальных размерах и минимум величины горного давления для габаритов данного сечения	В слабых породах, если по условиям эксплоатации не встречается препятствий, необходимо стремиться к дробным профилям. Так, в определенных случаях два однопутных тоннеля могут оказаться выгоднее одного двухпутного.		
2	Глубина заложения тоннеля	При сооружении тоннелей метрополитенов мелкого заложения в верхних слоях, в условиях слабых, неустойчивых пород, при высоком горизонте грунтовых вод, неизбежна борьба с плывунами, осадками строений и подземных сооружений.		При мелком заложении метрополитена упрощается схема входов и выходов станции		

Продолжение

№ п/п.	Элементы основной и геотехнической характеристики тоннельного сооружения	Ожидаемые природные затруднения в период тоннельного строительства	Технические мероприятия для преодоления строительных трудностей	Влияние условий эксплоатации тоннеля	Влияние экономических факторов	Установление метода работ
1	2	3	4	5	6	7
		При глубоком заложении метрополитенов тоннели закладывают в коренные, устойчивые породы. При глубоком заложении тоннелей метрополитена обычно минимально стесняется жизнь города в период строительства. Глубина заложения при постройке горных тоннелей определяется после сопоставления и исследования характеристики ожидаемых природных трудностей при прокладке базисного тоннеля с затруднениями эксплоатации вершинного тоннеля.		При глубоком заложении этот вопрос разрешается применением системы эскалаторов и лифтов. Для городских железных дорог глубина заложения может быть доведена до 60—120 *м* (последняя глубина — для глубоких вводов железных дорог). Условия эксплоатации вершинных горных тоннелей значительно хуже, чем базисных.	Надлежит учитывать расходы по содержанию припортальных выемок в связи с оползнями и снежными обвалами	
3	Протяжение тоннеля	При длинных горных тоннелях (в большинстве случаев) открытие фронта работ ограничивается двумя порталами. Отсутствие промежуточных шахт вызывает затруднения в вопросе безопасности работ и особенно до момента сбойки встречных штольневых забоев				
4	Характеристика пересекаемых пород:	При пересечении выклиниваний слабых пород вопрос об ограждении уже сооруженных участков длинного тоннеля становится первостепенным				

Продолжение

№ п/п.	Элементы основной и геотехнической характеристики тоннельного сооружения	Ожидаемые природные затруднения в период тоннельного строительства	Технические мероприятия для преодоления строительных трудностей	Влияние условий эксплоатации тоннеля	Влияние экономических факторов	Установление метода работ
1	2	3	4	5	6	7
	А. Разрушенные, трещиноватые породы с большим притоком вод	При незначительной толще кровли устойчивых пород над выработкой и незначительного защитного пласта в подошве ее, можно ожидать прорыва слабого грунта с водой в забой тоннельной выработки	В забое надлежит тщательно вести рекогносцировочное бурение. С целью снижения дебита подземных вод в некоторых случаях следует прибегнуть к тампонажу. При угрозе внезапных прорывов подземных вод надлежит вводить ограждение в виде специальных перемычек. Расчет водоотливных средств, резерв агрегатов и энергии должен соответствовать максимальному дебиту подземных вод			В соответствии с профилем создаваемого тоннеля: метод опорного ядра, полигональная рамная система, пилот-система и австрийский метод работ
	Б. Глинистые породы (явления пучения)	При проявлении пучения происходит поломка крепи, сечение выработки уменьшается, и представляется весьма затруднительным восстанавливать проектный профиль перекреплением; при этом возможны осадки	Немедленно вслед за разработкой устраивать постоянную обделку тоннеля. При наличии контактных водоносных слоев устраивать соответствующие отводы, обеспечивающие минимальное соприкасание поверхностей выработок в глине с водой			Применимы: щит с открытой грудью и с тоннельным экскаватором австрийский, итальянский, кельнский, пилот-система, метод иглы и опорного ядра
	В. Сыпучие породы (сухие)	При наличии тонкозернистого „песка-ползуна" возможны выпуски через неплотности штольневого крепления и осадки	Сухие пески целесообразно искусственно увлажнять до состояния естественной влажности. Применять шпунтованную и марчеванную крепь, бумагу, солому, сено. Приемлемо химическое закрепление грунтов			Применимы: опорное ядро, кельнский, пилот система, щиты с шандорами и герметические щиты, метод иглы
	Г. Слабые, водоносные грунты: 1). Водоносные песчаные грунты	При обычном водоотливе не исключена возможность увлечения песка с водой, образование пустот. При городском тоннелировании это связано с осадками, разрушениями на поверхности при возможном неравномерном давлении на элементы тоннельного крепления	Применимы: искусственное водопонижение, тампонаж, химическое укрепление или замораживание грунта, сжатый воздух			Применимы: опорное ядро, кельнский, пилот-система, система Фресса, обычные и герметические щиты.

Продолжение

№ п/п.	Элементы основной и геотехнической характеристики тоннельного сооружения	Ожидаемые природные затруднения в период тоннельного строительства	Технические мероприятия для преодоления строительных трудностей	Влияние условий эксплоатации тоннеля	Влияние экономических факторов	Установление метода работ
1	2	3	4	5	6	7
	2). Ярко выраженные плывуны	При применении ненадежных мероприятий, не соответствующих мощности плывуна, при неправильном ведении самого процесса тоннелирования не исключена возможность выплывов значительных масс плывуна, аварийное затопление выработок, вплоть до строительной катастрофы	В зависимости от мощности плывуна применим сжатый воздух или замораживание грунтов. При гидростатическом давлении $P > 3{,}5$ *ат* возможно применение сжатого воздуха комбинированным порядком с водопонижением, химическим закреплением, снимающим часть напора. Но это зависит от физико-механических свойств грунтов, перекрывающих или выклинивающихся в толще плывуна. Для проходки через плывунные участки при $H > 35$ *м* применима герметическая щитовая проходка системы автора	Условия эксплоатации городских тоннелей в водоносных грунтах требуют надежной гидро- и электроизоляции материалов обделки. При горных тоннелях обделки должны быть затампонированы, не оставляя дренажных окон и галлерей. Последние, дренируя горный массив, в период эксплоатации влияют на равновесие грунтовых масс и режим подземных вод	Метод замораживания грунтов для определенных условий может оказаться экономически более выгодным, чем сжатый воздух при гидростатическом напоре даже при $H < 35$ *м* Имеется в виду проходка вертикальных наклонных выработок и короткие участки тоннелей	Применены: метод опорного ядра, кельнский метод, пилот-система, кессоны-тоннели, система Фрэсса, итальянский метод, щит с закрытой грудью, герметические щиты
5	Горное давление	Деформация, поломка крепи от чрезмерного или неравномерного горного давления, вплоть до обрушения. Образование „купола" со всеми вытекающими последствиями	Тщательные наблюдения за поведением и жизнью элементов тоннельного крепления. Своевременное усиление постановкой дополнительной крепи по сравнению с проектными данными. Перемена материала крепи, переход с дерева на камень, бетон, металл и т. д. При ярко выраженном боковом давлении, при оползневых явлениях устройство несимметричной тоннельной обделки, стрела свода которой направлена по линии действия превалирующего горного давления			

Продолжение

№ п/п.	Элементы основной и геотехнической характеристики тоннельного сооружения	Ожидаемые природные затруднения в период тоннельного строительства	Технические мероприятия для преодоления строительных трудностей	Влияние условий эксплоатации тоннеля	Влияние экономических факторов	Установление метода работ
1	2	3	4	5	6	7
6	Устойчивость тоннельной конструкции	Деформация и разрушение тоннеля при слабом основании. Повреждение тоннельной конструкции при наличии под ней подземных выработок, карьеров, карстов и т. п. Вредное влияние на обделку прилива и отлива при подводных тоннелях. Влияние сейсмики на тоннель при землетрясениях. Влияние динамики и вибрации от движения поездов в период эксплоатации тоннеля	Устройство искусственного основания тоннеля из свай, колодцев и т. д. Увеличение жесткости и инерции обделки: укладкой балки жесткости и устройством внутренней оболочки или мостовой конструкции в тоннеле	Условия нормальной эксплоатации при движении поездов и правильного взаимодействия пути и подвижного состава требуют усиления основания и обеспечения надлежащей мощности тоннельной конструкции		Устройство искусственного основания, в зависимости от геотехнических условий, производится до или после проходки тоннеля Применение кессонов-тоннелей или заводных секций
7	Приток подземных вод	При внезапном прорыве вод—затопление тоннельных работ, подвижка породы, расстройство крепления, размыв породы, вплоть до обвала	Интенсивный водоотлив (с фильтрами) при соответствующем резерве. Тампонаж, сжатый воздух (в зависимости от гидростатического давления). Установка перемычек			
8	Агрессивность подземных вод	Выщелачивание окружающей тоннель породы, разрушение материала тоннельной обделки (коррозия), что может привести к обвалу тоннеля	Выбор и применение в дело материалов обделки и изоляции, устойчивых в отношении вредного воздействия агрессивных вод. Выполнение мероприятий по уменьшению скорости подземного тока агрессивных вод			
9	Газы	Отравление рабочего и технического персонала в забое. Взрыв, пожар и обвал тоннельных участков	Постановка исследования проб воздуха. Вентиляция. Специальные меры борьбы с газом. Канализация газа			
10	Темпы работ и характер ведения тоннельного процесса		Быстрые темпы ведения работ. Стахановская организация работ в забое и всего тоннельного процесса в целом. Немедленное устройство постоянной тоннельной обделки вслед за временным креплением			
11	Безопасность тоннельных работ		В проекте количество фронтов работ и ходов должно быть строго увязано с безопасностью всех работающих в забоях тоннеля.			

Продолжение

№ п/п.	Элементы основной и геотехнической характеристики тоннельного сооружения	Ожидаемые природные затруднения в период тоннельного строительства	Технические мероприятия для преодоления строительных трудностей	Влияние условий эксплоатации тоннеля	Влияние экономических факторов	Установление метода работ
1	2	3	4	5	6	7
			Постановка тщательных наблюдений за надежностью крепления. Соответствующая подготовка необходимых аварийных запасов материалов и оборудования для возможности преодоления природных трудностей и для ограждения от внезапных прорывов, не предусмотренных геотехническим прогнозом			
12	Материалы тоннельных обделок	Применение в дело недоброкачественных материалов для несущей конструкции обделки приводит к обрушению тоннеля при эксплоатации и даже в период строительства	Материалы обделок должны обеспечить: а) долговечность тоннеля; б) прочность, (воспринимаемое горное давление и гидростатический напор); в) водонепроницаемость обделки; г) удобоисполнимость при производстве работ; д) экономичность			
13	Процесс нагнетания за обделку	При отсутствии нагнетания за обделку остаются пустоты, которые приводят к подвижкам грунта и осадкам, могущим распространиться до поверхности. Подвижка грунта может проявить неравномерное давление на обделку, деформировать и даже разрушить последнюю		Вдувание под давлением 3—5 *ат* мелкого гравия, а вслед нагнетание цементного раствора. Заполнение крупных трещин и карстов может быть произведено глинизацией		
14	Осадки поверхности	При выпуске грунта, а равно и при откачке воды, увлекающей частицы грунта, неминуемо образование пустот и подвижек в грунтовом массиве. Возможно распространение осадок до поверхности и в городских условиях, повреждение строений и подземных сооружений, находящихся в зоне обрушения по трассе прокладываемого тоннеля	Тщательное крепление, постановка фильтров, зашивка бортов, кровли и подошвы выработок, переход на специальные методы работ и искусственное укрепление грунтов			

УКАЗАТЕЛЬ ГЛАВНЕЙШЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ,

использованной при составлении настоящего труда

I. СССР

Сборник пояснительных записок проектов сооружений Кругобайкальской жел. дор. (1900—1905 гг.). СПБ, 1907.

Ф. Ю. Левинсон-Лессинг. О значении геологии при проведении туннелей. СПБ, Труды 2-го Съезда геологов, 1912.

Эскизный проект тоннеля под р. Волгой у Н. Новгорода. М., 1915, стр. 593.

П. Д. Кандауров. Постройка туннеля на 521—522-й верстах Северо-Донецкой жел. дор. П-гр., 1917, стр. 82.

Б. Е. Веденеев, Гакичко. Опыты по цементированию известняков. „Бюллетень Волховстроя", № 3—5, 1924.

И. Штини и Д. И. Мушкетов. Техническая геология. Л.—М., 1925.

С. Н. Розанов. Определение внешних сил, действующих на свод тоннелей. „Коммунальное хозяйство", 1927, № 11/12, стр. 150—160.

М. И. Евдокимов-Рокотовский. Динамические явления в туннелях и в окружающих их грунтах. Томск, 1927.

В. Д. Слесарев. Давление горных пород на шахтную крепь. Л.—М., 1933.

Г. А. Ломов. Проходка шахты „Американка" „Вестник Донугля", 1928, № 30, стр. 13—14.

А. А. Скочинский. Американские способы механизации проходки штреков и штрекообразных выработок. „Уголь" 1928, № 49, стр. 29—41.

М. М. Протодьяконов. Давление горных пород и рудничное крепление, ч. I—II. М. — Л., 1930—33.

А. Н. Пассек. Тоннели горного типа. М. 1930.

Е. О. Форстер-Браун. Проходка вертикальных шахт. М., 1930.

А. Ф. Суханов. Пути рационализации бурения шпуров, ч. I—II. Новосибирск, 1931.

Н. Н. Давиденков. Измерение давления на тоннельные обделки акустическим методом „Строительная промышленность", 1931, № 6, стр. 284—286.

А. А. Скочинский. Рудничная атмосфера. М., 1933.

Н. В. Бобков. Инженерно-геологические исследования в связи с проектировкой различных инженерных сооружений. Л. — М., 1932.

К. Терцаги. Инженерная геология. Л. — М., 1935.

В. Л. Маковский. Сооружение метрополитена. „Строительство Москвы", 1932, № 1.

В. Н. Образцов. Железная дорога в городе. М. — Л., 1932.

П. М. Цимбаревич. Величина горного давления. „Горный журнал", 1933, № 3, стр. 27—34.

К. Терцаги. Строительная механика грунта на основе его физических свойств. М. — Л., 1932.

А. К. Пассек. Подводные тоннели. Москва, 1938, стр. 220.

В. Л. Маковский. Новая техника проходки тоннелей щитом. „Строительная промышленность", 1933, № 8, стр. 36—41.

В. Л. Маковский. Изоляции и материалы тоннельных обделок. „Метрострой", 1933.

В. Л. Маковский. Современное состояние теории давления горных пород в связи с расчетом тоннельной обделки. „Метрострой", 1934, № 3.

А. М. Терпигорев и М. М. Протодьяконов. Горные машины по выемке пластовых полезных ископаемых. М. — Л., 1935.

А. О. Спиваковский. Конвейерные установки, ч. I—IV Харьков, 1932—35.

В. Л. Маковский. Сооружение тоннелей метрополитенов. том I. „Европейская, тоннельная", М., 1935, стр. 425.

В. Л. Маковский. Сооружение тоннелей метрополитенов, Лекции, чит. на курсах повышения квалификации ИТР в 1934—1935 гг. (на правах рукописи), М., МИИТ, 1935.

В. А. Ржаницын. Закрепление грунтов химическим способом. М. — Л., 1935.

Н. Г. Трупак. Замораживание грунтов. „Метрострой", 1935, № и 8—9.

В. П. Волков. Тоннельный щит и работа с ним. М., 1934, стр. 62.

Г. И. Маньковский. Проходка вертикальных шахт. М. — Л., 1935.

С. К. Шаншиев. Расчет облицовки напорных штолен на горное давление. Тифлис, 1935.

П. М. Цимбаревич. Курс рудничного крепления. М. — Л., 1936.

С. С. Давыдов. Расчет несущих конструкций подземных и маскированных сооружений. М., 1936.

К. Марчелло. Высоконапорные трубопроводы. М. — Л., 1936.

С. Р. Таубкин. Опыт стахановской организации труда при проходке штолен. „Горный журнал", 1936, № 5—6.

А. М. Терпигорев и А. И. Милованов. Рудничный транспорт. М. — Л., 1932.

Л. Д. Шевяков. Рудничный водоотлив, 2-е изд. Харьков, 1936.

Т. П. Демидюк. Действие взрыва в среде (Справочник по взрывному делу), 1 т. М., 1936.
Я. Г. Галкин. Об определении горного давления при расчете тоннельной обделки (Труды МИИТ, выпуск 52, М, 1937).
С. С. Герчиков. Стахановские методы работ в каменноугольной промышленности, М. — Л., 1937.
В. Л. Маковский. Проходка тоннелей под сооружениями. „Метрострой", 1936, № 4, стр. 17—21.
В. Л. Маковский. Сооружение тоннелей под сжатым воздухом. „Строитель", 1936, № 5, стр. 35—38.
В. Л. Маковский. Прокладка тоннелей Московского метрополитена. „Фронт науки и техники", 1936, № 11, стр. 72—78.
А. М. Мазур и Б. М. Любченко. Гидротехнические тоннели. М. — Л., 1937.
Н. М. Покровский. Проведение горизонтальных и наклонных выработок. М. — Л., 1937, стр. 348.
А. В. Горинов. Изыскания и проектирование железных дорог, ч. I—II. М., 1941.
Д. И. Шор. Элементы и конструкции подземных сооружений. М., 1937, стр. 207.
Применение твердых сплавов в горной и нефтяной промышленности (сборник статей). М. — Л., 1937, стр. 98.
В. Л. Маковский. Новейшая тоннельная техника Европы и Америки. „Фронт науки и техники", 1937, № 6, стр. 47—52.
В. Л. Николаи. Двухъярусный тоннель в Сан-Франциско. „Метрострой", 1936, № 2, стр. 46—47.
К. А. Вахуркин. Расчет обделки обеспеченного подземного сооружения. М., 1937, стр. 83.
Д. А. Слободчиков. Геодезическо-маркшейдерские работы при строительстве метрополитена. 1938.
Г. В. Арбузов. Вентиляция и санитарная техника метрополитенов, М., 1938, стр. 231.
В. Л. Маковский. Элементы механизации тоннельных работ Метростроя. „Гидротехническое строительство", 1938, № 4, стр. 20—27.
Труды Совещания по управлению горным давлением, под редакцией акад. А. А. Скочинского, М., 1938.
М. И. Дандуров. Тоннели на путях сообщения. М., 1939.
Ф. П. Саваренский. Инженерная геология, изд. 2-е. М, — Л., 1939.
В. Ф. Мильнер. Геологические условия строительства Московского метрополитена им. Л. М. Кагановича (В сборн. „Геология в реконструкции Москвы", изд. Академии Наук СССР, 1938).
В. Л. Маковский. Тоннельно-строительные катастрофы. „Советский метрополитен", 1939, № 10, 11 и 12.
В. Л. Маковский. Скоростное строительство тоннелей. „Советская наука", 1939, № 9—10, стр. 122—30.
Стахановские методы работы в Кривбассе. Харьков, 1935, стр. 46.
Т. Т. Абакумов и Г. И. Маньковский. Временная инструкция по скоростному строительству шахт. Харьков, 1940.
Г. Г. Зурабов и О. Е. Бугаева. Безнапорные гидротехнические туннели. Л. — М., 1940.
В. Л. Маковский. Коррозия материалов тоннелей. „Сов. метрополитен", 1940, № 9, стр. 3—6.
В. Л. Маковский. Первый подводный тоннель под Москва-рекой. „Гидротехническое строительство". 1940, № 7, стр. 9—12.
А. Ф. Суханов. Буримость и взрываемость горных пород. М. — Л., 1940, стр. 176.
В. Л. Маковский. Конструкции и строительные работы метро. „Архитектура метро", М., 1941.
В. Л. Маковский. Практические задачи тоннелестроения в условиях военного времени, 1942.
Н. С. Поляков и А. О. Спиваковский. Курс рудничного транспорта. М. — Л., 1944, стр. 488
В. Л. Маковский. Сооружение новых линий Московского метрополитена в условиях Великой Отечественной войны. Изд-во Академии Архитектуры (подготовлено к печати).
Н. М. Покровский. Проведение горных выработок. М., 1945.
Я. И. Балбачан. О мероприятиях, повышающих эффективность буровзрывных работ по породе (Сборник по механизации угледобычи) М., 1945.
М. И. Дандуров. Восстановление тоннелей. М., 1945.
А. И. Барышников, Краткое руководство по проектированию и постройке железнодорожных тоннелей, М., 1946..
В. Л. Маковский. Строительство тоннелей в дни войны („Гидротехническое строительство", 1946, № 11, стр. 3—6)

II. США

Prelini. Tunneling. N-Y, 1907.
Ch. P. Berkey. Geology of the New-York City aqueduct. N-Y, 1911.
A. Busse. Recommendations and general plans for a comprehensive passenger subway system for the City of Chicago. Chicago, 1911.
G. Gilbert, L. Wightman and Saunders. The subways and tunnels of New-York. N.-Y., 1912.
L. White. The Catskill water supply of New-York. City. N.-Y., 1913.
H. Ries and T. Watson. Engineering geology of New-York. N.-Y., 1915.
E. Lauchli. Tunneling. N-Y., 1915.
J. Davis. The Astoria tunnel under the East River for gas distribution in New-York City. N.-Y., 1916.
I. Ross. Waterproofing Engineering. N.-Y., 1919.
D. Stauffer. Modern tunneling practice. N.-Y., 1922.
B. H. Hewett and S. Iohannessen. Shield. and compressed air tunneling. N.-Y., 1922.
D. Brunton and J. Davies. Modern Tunneling N.-Y., 1922.
Report of the New-York Interstate bridge and tunnel commission.
M. Merriman (editor). American civil engineers handbook. N.-Y. 1930.
D. I. Kerr. Preliminary studies and results of improving cascade crossing. N.-Y., 1931.
Rock tunnel Methods. N.-Y., 1931.
R. Sh. Kirby and P. G. Laurson. The early years of modern civil engineering. Oxford. 1932.
The story of the Hoover Dam. N.-Y., 1932.
Proceedings of the First International conference of soil Mechanics. Cambridge, 1936.

A. Black. The story o Tunnels. N.-Y., 1937.
B. Mindlin. Stress distributions around a tunnel. „Proceedings of American Society of civil Engineers", 1939.
K. Terzaghi, Theoretical soil Mechanics. N. Y, 1944.
E. A. Drechsler. Operation and maintenance of rock drills. N. Y., 1940.
Design of Chicago Initial, system of subways. „Journal of the American Concrete Institute", № 4, 1941.
Shield tunneling of Chicago subways. „Engineering News Record", 1941, № 5.
Tunnel lining practice of Delaware aqueduct. „Journal of American Concrete Institutes", 1941, № 4.
H. W. Richardson and R. S. Mayo. Practical tunnel driving. N.-Y., 1941.
The Chicago River subway Crossing. „Civil Engineering", № 9, 1942.
Liner Plate Tunnels of Chicago subway, „Proceedings of Amer. Society of civil Eng's", № 6, 1942.
Tunnel linings with special referenge to a new form of reinforced concrete lining. „Journal of the Institution of civil Engineers", № 5, 1943.

III. АНГЛИЯ

Kinnear Clark. Practical tunneling. London, 1902.
R. F. Sorsbie. Geology of engineers. London, 1911.
Copperthwaits. Tunnelshields and the use of compressed air subaqueous works. London, 1912.
G. M. Halden. Setting out of tube railways. London, 1914.
B. Henslowe. Underground London. „Railway Mag.", 1911, V.28.
I. P. Thomas. Handling Londons underground traffic. London, 1928.
The Central London Railway. „British architect.", Sept. 2, 1928.
London Subway reconstruction. „Tramway World", № 69, 1930.
Shipping and the Thames tunnel. „Shipbuilding", Vol. 35, 1930.
News Metropolitain Ry branch to Stanmore. „Engineering". Vol. 134, 1932.
Piccadilly extension. „Modern Transport", July 29, 1933.
Escalator tunnel construction at Knightbridge tube station. „Engineer", № 3540, 1933.
New methods of excavating quicksands. „Engineer", Vol. 25, 1933.
Mersey tunnel. „Civil Engineer", London, № 287, 1933.
Modern London tube stations. „Railway Gazzete", Vol. 59, 1933. A London Underground Power Station. „The Engineer" February 1—1946.

IV. ФРАНЦИЯ

R. Legouez. Emploi du bouclier dans la construction de Souterrains. Paris, 1897.
Rene Phillippe. Le bouclier et les methodes nouvelles de percement des souterrains. Paris, 1900
A. Dumas. Le chemin de fer Metropolitain. Beranger, 1901.
M. Hervies. Le chemin de fer metropolitain. Paris, 1903—1908.
I. B. Thiery. Etude sur le metropolitain de Paris, 1907.
Simonin. Les grandes percées des Alpes, 1908.
Perfecture de la Seine, traversée de la Seine. Projet., l'execution types des ouvrages courants.
Résal Jean, La Poussée de Terres. Deuxieme Partie: Theorie des Terres choherantes, Paris, Beranger, 1910.
P. Stephani. Les tunnells des Alpes. Paris, 1919.
Mathieu. Note sur l'execution du Souterrain du Rove „Annales des Ponts et Chaussées", 1923.
M. Leon Brun. Canal de Marseille au Rhone. Marsseille, 1927.
Biette. Les chemins de fer urbains parisiens. Paris, 1928.
M. Suquet. Pression exercée par les terres sur les voutes des souterrains. Paris, 1928.
L. Martel. La Technique du Mineur Paris, 1929.
I. Virgitte. Les installations du chemin de fer Metropolitain de Paris. Paris, 1933.
P. Hauwaert. Les tunnels sons l'escaut a'Anvers. Paris, 1933.
I. Allégre. Travaux d'amengement des chutes d'eau, 1938.

V. ГЕРМАНИЯ

F. Rziha. Lehrbuch der Gesamten Tunnelbaukunst. Berlin, 1872.
W. Ritter. Statik des Tunnelgewölbe. Berlin, 1879.
K. Esserborn. Lehrbuch des Tiefbaues. Leipzig, 1908.
H. Wegele. Tunnelbau. Leipzig, 1910.
Koenigsberger. Über Messungen der geotermischen Tiefenstufe. Stuttgart, 1911.
A. Nowak. Tunnelbau. Berlin, 1912.
Otto Kommerel. Statische Berechnung für Tunnelmauerwerk. Berlin, 1910.
B. Hallinger. Tunnelbau mit Vorchildbau. Hamburg, 1912.
E. Willmann. Die Instandsetzung alter Eisenbahntunnel. Leipzig, 1913.
A. Macholl. Die Profilgestaltung der Untergrundbahnen. München, 1914.
E. Giese. Die in Betrieb und Bau befindlichen Schnellbahnen in GrossBerlin. Berlin, 1915.
H. E. Emperger. Handbuch für Eisenbetonbau der Tunnelbau. Berlin, 1915.
A. Haag. Grundzüge der Unterwassertunnebaues, der Tunnelbau, Berlin, 1916.
F. Heise und F. Herbst. Bergbaukunde. Berlin, 1919.
Birbaumer. Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerks Leipzig.-Berlin, 1920.
K. Brandau, E. Imhof, E. Mackensen. Handbuch per Ingenierwissenschaften. I Teil, Der Tunnelbau. Leipzig, 1920.
A. Birk. Erdbau, Stollen und Tunnelbau. Berlin, 1920.
Dolezalek. Tunnelbau der Eisenbahnen. Berlin, 1921.
A. Birk. Der Wegbau, III Teil, Der Tunnelbau. Leipzig, 1922.
P. Witig. Die Architektur der Hoch- u. Untergrundbahnen in Berlin. Berlin, 1923.
Randzio. Neuere Stollenbauten. „Bautechnik", 1925.
I. Schmidt. Statische Probleme des Tunnel- und Druckstollenbaues. Berlin, 1926.
O. Walch. Die Auskleidung von Drückstollen und Drückschachten. Berlin, 1926.
C. Andreae. Der Bau langer tiefliegender Gebirgs tunnele. Berlin, 1926.
G. Lucas. Der Tunnel. Berlin, 1926.
A. Schröter. Neuere Untergrundbahnenbauten in Berlin. „Bauingenieur", Nr. 2, 1927.

Die Untergrundbahn Gesundbrünnen, Neu Kölnn. Berlin, 1930.
K. Lenk. Der Ausgleich des Gebirgsdruckes in grossen Tiefen beim Tunnelbau. Berlin, 1931.
Der Bau des Alstertunnels der Untergrunbahnlinie Killinghausenstrasse — Jungsfenstieg im Hamburg. „Bautechnik", Nr. 54, 1933.
H. Vegele. Tunnelbau. Berlin, 1935.

VI. ИТАЛИЯ, ШВЕЙЦАРИЯ, ИСПАНИЯ, ЯПОНИЯ

Lanino. Galleria della travesata della Appenino della liniea Foggia—Nappoli, Roma, 1875.
Heim. Mechanismus der Gebirgsbildung. Basel, 1878.
Girard Raffael. Frakersata dinna faglja galleria del Colle de Tende. Roma, 1897.
C. Biadego. J grandi trafori alpini Frejus, San Sotardo, Sempione. Milano, 1906.
E. Wiesmann. Der Bau des Hauenstein — Basistunnels. Bern, 1917.
E. Wiesmann. Künstliche Lüftung, Stollen und Tunnelbau. Zürich, 1919.
M. Otamendo. Metropolitano. Madrid, 1921—1924.
G. Fantoli. Sul problema delle Galleria e dei pezzi scavati in roccia per condotte forsate d'acqua. „Annali del Consiglio Superiore delle Acque", 1923.
Sacuro. Tunneling work. Tokyo, 1926.
Pedro Jevenois. El tunel submarino del Estrecho de Gibraltar. Madrid, 1937.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3
Введение 4

Часть первая

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОННЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Глава I. **Исторический обзор тоннелестроения** . 11

Горные тоннели 14
Подводные тоннели 27
Тоннели метрополитенов и глубокие вводы железных дорог 32
Гидротехнические тоннели 77
Судоходные тоннели 80
Коммунальные тоннели 81
Тоннели специального назначения 83
Тоннели комплексного назначения 85

Глава II. **Элементы геотехники в связи с проходкой тоннелей** 89

Геотермическое состояние пород в зоне заложения тоннеля 97
Подземные воды 99

Глава III. **Проектирование тоннелей в плане и профиле** 105

Глава IV. **Элементы геодезическо-маркшейдерских работ при постройке тоннелей** 119

Глава V. **Конструкции тоннельных сооружений** 126

Назначение, материалы и изоляция тоннельных обделок . . . . . —
Обделки тоннелей горного типа 134
Обделки судоходных тоннелей 145
Обделки подводных тоннелей 146
Обделки тоннельных сооружений метрополитенов 160
Обделки гидротехнических тоннелей 186
Обделки коммунальных тоннелей 190

Часть вторая

ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕХАНИЗАЦИЯ ТОННЕЛЬНЫХ РАБОТ

Стр.

Глава VI. **Открытие фронта тоннельных работ** 197

Общие данные . . . . . —
Проходка шахт 200
Обычные методы проходки шахты стволов в устойчивых породах 203
1. Проходка шахт на деревянном креплении —
2. Проходка шахт круглого сечения при постоянном креплении ствола бетоном . 204
3. Обычный способ проходки при тюбинговом креплении 211
Специальные методы проходки шахт
а) Проходка опускным колодцем 215
б) Проходка шахтных стволов под сжатым воздухом 217
в) Проходка шахт методом замораживания грунтов 223
г) Проходка шахтных стволов тампонажем 229
д) Проходка при химическом укреплении пород 231
е) Проходка шахт при искусственном водопонижении 232
ж) Проходка шахтных стволов вертикальным щитом ВЛМ-2 системы инж. В. Л. Маковского 233
з) Проходка шахтных стволов методом бурения 235
и) Метод проходки шахты вибрационной крепью 242
Околоствольные выработки 243
Оборудование шахтной поверхности в условиях метростроения 247

Глава VII. **Горная техника сооружения тоннелей** 249

Общие принципы тоннелестроения . . . . . —
Проходка и крепление элементов тоннельных выработок 251
Методы и производство тоннельных работ . . 266
Бельгийский метод тоннельных работ . . . . —
Австрийский метод тоннельных работ 280

Стр.

Английский метод тоннельных работ 283
Метод подсводного разреза 287
Метод опорного ядра 289
Итальянский метод тоннельных работ 301
Американские методы производства тоннельных работ 307
Кельнский метод тоннельных работ 316
Горный способ сооружения тоннеля эректором 323

Глава VIII. **Щитовая техника сооружения тоннелей**

1. Щиты и производство щитового тоннелирования 325
2. Щиты специальных систем 341
   а) Система Халингера . . . . . —
   б) Герметический щит ВЛМ-I системы инж. В. Л. Маковского 343
   в) Система инж. Олитша 345
   г) Система инж. Гаага 346
   д) Система инж. Ханта 350
   е) Система облегченного типа щита с горизонтальным металлическим шпунтом . . 350
3. Полущиты незамкнутого контура 352
4. Эскалаторные щиты 357
5. Щитовая проходка тоннелей малых сечений 359
6. Механизированные щиты 363
7. Щитовая техника в метростроении 379
8. Основные положения по организации и механизации работ в условиях метростроения 398

Глава IX. **Сооружение тоннелей крупных профилей** 401

а) Сооружение тоннелей специального назначения 402
б) Сооружение станций метрополитена глубокого заложения горными методами 403
в) Сооружение станции Московского метрополитена глубокого заложения щитовым методом 404
г) Двухярусные тоннели 411
д) Сооружение станции Нотр Дам Парижского метрополитена 415
е) Сооружение Ровского тоннеля-канала . . . 415
д) Сооружение крупных тоннелей 417
з) Сооружение подземной станции Плятцо Нью-Йоркского метрополитена 420
и) Сооружение тоннелей Форт-ПЭК 424
к) Сооружение Балтиморского железнодорожного тоннеля 425

Глава X. **Сооружение тоннелей в неустойчивых породах специальными методами** 428

1. Тампонаж . . . . . —
2. Сжатый воздух 430

   Тоннели Московского метрополитена, пройденные в неустойчивых породах 435

3. Химическое закрепление грунтов 447
4. Искусственное понижение грунтовых вод . 448
5. Замораживание грунтов 453

Стр.

Глава XI. **Особые случаи производства городских тоннельных работ** 459

1. Сооружение наклонных эскалаторных тоннелей . . . . . —
2. Сооружение подземных станционных вестибюлей тоннельным способом 464
3. Опыт проходки тоннелями под искусственными сооружениями и устройство тоннельных пересечений 471

Глава XII. **Разработка горных пород в тоннельном забое** 479

Общие данные . . . . . —
Разработка скальных пород . . . . . —
Разработка мягких глинистых пород . . . 485
Разработка смешанных и плывунных грунтов 489
Производство буровзрывных работ при сооружении тоннелей
   а) Взрывчатые вещества 491
   б) Буровзрывные работы 496
Определение величины заряда . . . . . —
Количество шпуров в забое 497
Расположение шпуров в забое 500
Бурение шпуров и буровое оборудование . 503
Материал для буров 506
Бурозаправочная мастерская 509

Глава XIII. **Механизация погрузки породы в тоннельном забое** 512

Погрузочные машины 516

Глава XIV. **Внутритоннельный транспорт** . . 534

Откатка двигателями стационарного типа . . —
Транспорт двигателями подвижного типа . . 538
Воздуховозы 539
Безогневые локомотивы 542
Тепловозы 543
Электровозы 545
Элементы механизации тоннельного транспорта на строительстве Московского метрополитена 549
Рельсовый транспорт 550
Безрельсовый транспорт 553

Глава XV. **Элементы механизации тоннельных бетонных работ** 558

Система подвижных металлических форм . . —
Система вибраторов и первибраторов при производстве бетонных работ 570

Глава XVI. **Водоотлив при производстве тоннельных работ** 573

Глава XVII. **Вентиляция тоннелей** 579

Вентиляция тоннелей в период эксплоатации 579
Вентиляция тоннельных выработок в период производства работ 584

Стр.

Глава XVIII. **Сооружение подводных тоннелей** 593

Общие данные . . . . . —
Сооружение подводных тоннелей щитовым способом 597
Сооружение подводных тоннелей открытым способом 622
Сооружение подводных тоннелей опусканием кессонов-тоннелей 629
Сооружение подводных тоннелей опусканием заводных секций 634

Глава XIX. **Реконструкция и восстановление тоннелей** 644

Реконструкция тоннелей . . . . . —
1. Общие данные 644
2. Основные причины разрушения тоннелей . . . . . —
3. Главнейшие виды повреждений и деформации тоннелей 648
4. Методика обследования тоннельных обделок, подверженных воздействию разрушительных процессов, и установление мероприятий по их ликвидации 650

Стр.

5. Борьба с водообильностью и наледями в тоннелях 651
6. Работа инъекционного подъезда 654
Новые методы реконструкции тоннелей . . . 661
Примеры реконструкции тоннелей из мировой практики тоннелестроения 674
Восстановление тоннелей 680

Глава XX. **Уроки тоннельно-строительных катастроф** 688

Глава XXI. **Теория давления горных пород в связи с расчетом обделок тоннелей** 704

Метод расчета тоннельных обделок с учетом упругого отпора породы, применяемый на строительстве Московского метрополитена . . 729

Глава XXII. **Анализ и установление автором методов сооружения тоннелей в неустойчивых породах** 743

Указатель главнейшей литературы 760

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ АРХИТЕКТУРЫ СССР

Редактор *Н. П. Ракицкий*
Технический редактор *Е. А. Чебышева*
Корректор *С. Д. Локшина*

Сдано в набор 10|XII-45 г.
Подписано к печати 2|IV-47г. А 02455.
Печ. л. 96. Уч.-изд. 95. Формат 82 × 108 1|8 д. л.
Изд. № 111. Тираж 3000 экз. Заказ № 3395.

Цена 80 руб. в переплете

1-я типография Гизлегпрома, Ленинград, Садовая ул., 55|57

ПОПРАВКИ

Страница	*Столбец*	*Строка*	*Напечатано*	*Надо читать*
52	I	12 сверху в таблице	пути (в %)	пути (в ‰)
154	II	25 сверху	щитам	тоннелям
239	II	2 сверху	$D_1 = 5$ *м*	$D_4 = 6$ *м*
314	I	2 сверху	взрывается	вскрывается
354	II	Подпись под рисунком	Рис. 335. Домкрат полущита	Рис. 335. Демонтаж полущита
370	II	21 снизу	канала	тоннеля
396	I	3 сверху	000 *км*	900 *км*
484	I—II	Подпись под рисунком 450	сист. Ани	сист. Апп
522	II	Подпись под рисунком 507	сист. Юмеко	сист. Колодера
574	I	9 сверху	γ—удельный вес жидкости, ζ—коэфициент	ζ—удельный вес жидкости, η—коэфициент
604	II	24 снизу	отрытый	открытый
632	I	2 снизу	сток	стык
661	I	25 снизу	(рис. 67)	(рис. 675)
737	I	9 сверху	$A_п$	$A^п$
741	I	16 сверху, в формуле	$\pm$ (три раза)	+

ВОСЕМЬДЕСЯТ РУБЛЕЙ