

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет
Факультет транспортных коммуникаций
Кафедра «Мосты и тоннели»

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине «Проектирование тоннелей и подземных сооружений»
по теме: «Проектирование автодорожного тоннеля, сооружаемого горным
способом»

Исполнитель: студент ФТК, 4-й курс, гр. 11404114
Иванов Иван Иванович

Руководитель проекта: старший преподаватель
Яковлев Александр Александрович

Консультант проекта: к.т.н., доцент
Бойко Игорь Леонидович

Минск 2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет
Факультет транспортных коммуникаций
Кафедра «Мосты и тоннели»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к курсовому проекту

по дисциплине «Проектирование тоннелей и подземных сооружений»
по теме: «Проектирование автодорожного тоннеля, сооружаемого горным
способом»

Исполнитель: _____ студент ФТК, 4-й курс, гр. 11404114
Иванов Иван Иванович

Руководитель проекта: _____ ассистент
Яковлев Александр Александрович

Консультант проекта: _____ к.т.н., доцент
Бойко Игорь Леонидович

СОДЕРЖАНИЕ

1. ТРАССИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ	
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОННЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	
2.1. Габариты	
2.2. Материалы тоннельных конструкций	
2.3. Конструктивные формы тоннельных обделок.....	
2.5. Защита тоннелей от подземных вод.....	
2.6. Конструирование обделки	
2.7. Верхнее строение пути и проезжая часть	
2.8. Ниши, камеры и другие устройства безопасности	
2.9. Порталы транспортных тоннелей	
3. РАСЧЕТ ОБДЕЛКИ.....	
3.1. Горное давление на обделки, сооружаемые подземным способом	
3.2. Гидростатическое давление	
3.3. Определение расчетных значений нагрузок	
3.4. Схема нагрузок.....	
.....	I. Состояние «Р»
.....	II. Состояние «0»
.....	III. Состояние «1»
.....	IV. Состояние «2»
.....	V. Состояние «3»
.....	VI. Состояние «4»
3.7. Определение перемещений основной системы	
3.8. Проверка прочности сечений	
4. ПРОИЗВОДСТВО РАБОТ ПО СООРУЖЕНИЮ ТОННЕЛЯ	
4.1. Выбор способа производства работ	
4.2. Разработка грунта буровзрывным способом.....	
4.2.3. Бурение шпуров	
4.3. Погрузка и транспортирование грунта	
4.3.1. Транспортирование грунта	
4.3.2. Расчет продолжительности уборки грунта.....	
4.4. Назначение и типы временной крепи	
ЛИТЕРАТУРА	

1. ТРАССИРОВАНИЕ АВТОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ

Начинаем трассирование с точки А (отметка 400,00). Шаг напряженного хода a_n определяется по формуле (1.1)

$$a_n = \frac{h \cdot 10^5}{i_p - i_{\text{эк}}} \cdot M = \frac{20 \cdot 10^5}{15 - 0,6} \cdot \frac{1}{50000} = 2,78 \text{ см},$$

где $h = 20 \text{ м}$;

i_p = руководящий уклон;

$i_{\text{эк}}$ = смягчение уклона на возможных кривых, принимаем $i_{\text{эк}} = 0,5\%$;

При подъеме по склону раствором циркуля $a_n = 2,78$ см выявилась точка С, расположенная на отметке 460 м. Продление участка напряженного хода за пределы этой точки не сокращает длины тоннельного участка, а лишь приводит к удлинению линии; поэтому принимается трасса с поворотом на тоннельный участок в точке С.

В связи с тем, что высотная отметка точки D тоже 460 м, то тоннель будет запроектирован двухскатным.

В пределах хода ломаной линии трассы углы поворота прямолинейных участков должны быть не более $6...7^\circ$, поэтому целесообразно линию трассы на этом участке спрямить, приближая объем выемки грунта к объему насыпи. Сопряжение линейных участков, примыкающих к точкам С и D, осуществляется кривыми радиусом $R = 1200$ м. Угол поворота кривой в точке С $\alpha_c = 107^\circ$, в точке D $\alpha_d = 108^\circ$.

Длина кривой K_c при $R = 1200$ м равна:

$$K_c = \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha_c}{180} = \frac{3,14 \cdot 1200 \cdot 107}{180} = 2240 \text{ м},$$

$$K_D = \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha_d}{180} = \frac{3,14 \cdot 1200 \cdot 108}{180} = 2260 \text{ м}.$$

После выполнения выше указанных операций приступаем к построению продольного геологического разреза вдоль плавной линии трассы.

Место расположения портала определяется с помощью шаблона.

Таким образом, общая длина тоннеля составила $L_T = 4360$ м.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОННЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Тоннельная обделка - конструкция, предназначенная для постоянного закрепления контура тоннельной выработки (стабилизации деформаций контура), восприятия горного давления и предотвращения неорганизованного проникновения в тоннель подземных вод, а также для защиты примыкающего к тоннелю грунтового массива от выветривания. Обделки должны удовлетворять эксплуатационным, строительным и экономическим требованиям.

Эксплуатационные требования выражаются в необходимости соблюдения габаритных размеров внутреннего очертания тоннеля, чтобы за пределами габарита приближения строений разместилось

осветительное, регулировочное, сигнальное оборудование, вентиляционные каналы, водоотводные устройства, инженерные конструкции и т.д. Используемые строительные материалы должны обеспечивать долговечность эксплуатации тоннелей.

Строительные требования определяются технологичностью возведения обделки в разнообразных инженерно-геологических условиях, а также соображениями целесообразности формы поперечного сечения с точки зрения рациональной статической работы обделки. С этой целью внутреннее очертание и размеры монолитной обделки целесообразно сохранять неизменными по всей длине тоннеля, чтобы не менять горнопроходческое оборудование и комплект опалубки. Однако на участках резкого изменения устойчивости пород (тектонических нарушений) приходится изменять форму поперечного сечения и технологию ведения горнопроходческих работ. Целесообразна стандартизация поперечных сечений железнодорожных и автодорожных тоннелей. Необходимо также предусматривать мероприятия для исключения проникания подземных вод в тоннели, особенно агрессивных, вызывающих разрушение самого материала конструкции.

Экономические требования учитываются при выборе формы и размеров поперечного сечения тоннельной выработки, материала обделки и технологии строительства тоннеля. Необходимо, чтобы площадь пространства между габаритом приближения строений и внутренним контуром обделки была минимальной, однако обеспечивала возможность расположения в нем эксплуатационных устройств. При выборе конструктивно-технологических решений необходимо стремиться к тому, чтобы площадь сечения выработки и расход материалов на устройство обделки были минимальными. В связи с этим весьма экономичными являются многослойные конструкции обделок с применением набрызгбетона.

2.1. Габариты

Основой для построения внутреннего очертания тоннельной обделки является габарит приближения строений. Для железнодорожных горных тоннелей используется габарит С по ГОСТ 9238-83, принятый как основной на сети дорог колеи 1520 мм.

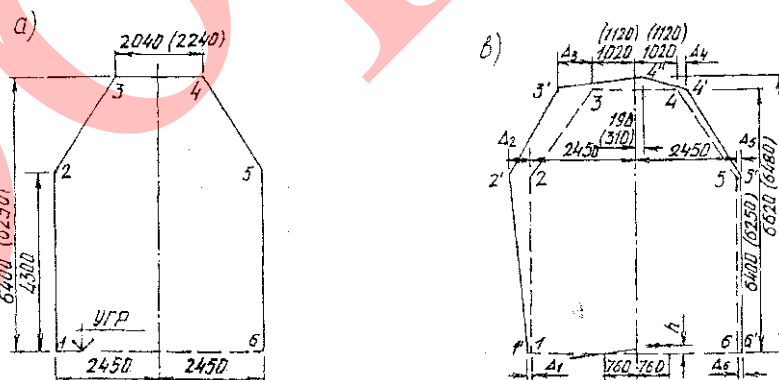


Рис. 2.1.1. Габарит приближения строений железнодорожных тоннелей по ГОСТ 9238-83 на прямой (а) и кривой $R=1200$ м (в)

R, м	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6
200-1500	60	470	810	170	60	60

На кривых участках пути габарит приближения строений однопутных тоннелей должен быть увеличен с учетом выноса концов и середины стандартного вагона с базой 1,7 м и длиной кузова 24 м от оси пути и его наклона, обусловленного возвышением наружного рельса. Величина этого возвышения h зависит от скорости движения, допускаемой на кривой данного радиуса:

$$h = \frac{12,5 \cdot V_{cp}^2}{R} \cdot K = \frac{12,5 \cdot 60^2}{1700} \cdot 1,2 = 31,76 \text{ , мм}$$

где – V_{cp} средневзвешенная скорость в месте расположения кривой, км/ч;

R – радиус круговой кривой, км

K – коэффициент учета смещения центра тяжести вагона.

2.2. Материалы тоннельных конструкций

Материалы для тоннельных обделок, порталов, внутренних конструкций и устройств должны отвечать требованиям долговечности, прочности, морозостойкости, стойкости против агрессивных воздействий внешней и внутренней среды, несгораемости, не выделять токсичных соединений в условиях строительства и эксплуатации при нормальных и аварийных температурных режимах.

В курсовом проекте приняты конструкции из монолитного бетона, железобетона и набрызгбетона. В соответствии с требованиями назначаются следующие классы по прочности на сжатие:

- для монолитных бетонных и железобетонных обделок – от В20 до В30;
- для покрытий из набрызгбетона - от В25 до В40;
- для сборных железобетонных обделок - не ниже В30;
- для порталов из монолитного бетона и железобетона - В25 или В30;
- для бетонного основания пути, для бетонных водоотводных и кабельных лотков – В7,5.

2.3. Конструктивные формы тоннельных обделок

В монолитных, неветривающихся, неразмываемых породах выработка транспортного тоннеля может быть оставлена без обделки; при необходимости кровлю выработки закрепляют стойкими против коррозии железобетонными анкерами.

В крепких, но выветривающихся скальных грунтах горное давление отсутствует, поэтому в таких случаях устраивают облицовку контура выработки для защиты грунтов от выветривания и сохранения их несущей способности. Облицовочная обделка в кровле выполняется из набрызгбетона толщиной до 10...15 см, нанесенного по стальной сетке, прикрепляемой к коротким анкерам временного типа. Бока выработки облицовываются слоем набрызгбетона толщиной 5...7 см. Входные участки тоннелей на длину не менее 6 м закрепляются несущей обделкой, способной воспринять также продольную составляющую горного давления, возникающую у порталов в выветренных грунтах.

Форме поперечного сечения обделок тоннелей, сооружаемых горным способом, придают подковообразное очертание в виде подъемистого свода, опирающегося на грунт или обратный свод. Такая обделка плавно огибает габарит приближения строений, а ее толщина, как правило, постепенно увеличивается от свода к пятам.

При отсутствии или небольшой величине бокового давления и отсутствии гидростатического давления стены обделки могут быть вертикальными с постоянной толщиной по высоте или с некоторым утолщением в нижней части для лучшего опирания на подошву выработки.

В мировой практике тоннелестроения широкое распространение получили облегченные обделки из набрызгбетона, особенно при строительстве транспортных тоннелей новоавстрийским методом (НАТМ) в трещиноватых скальных и нескальных – грунтах. Набрызг-бетонная обделка обычно состоит из двух слоев: первичной и вторичной обделок. Слоистость конструкции обусловлена специальной технологией строительства тоннелей.

Первичная обделка – податливое крепление контура выработки, состоящее из анкеров 3 или арок и слоя набрызгбетона 1 толщиной 10...20 см по стальной сетке, закрепленной на анкерах или арках. Способная деформироваться без обрушения за счет ползучести набрызгбетона замкнутая по контуру первичная обделка позволяет включить в работу окружающий горный массив, образуя совместно работающую систему «порода-крепь». Замечательная особенность нанесенного на поверхность выработки слоя набрызгбетона состоит в том, что он способен быстро набирать прочность и одновременно податливо сопротивляться перемещениям грунта внутрь выработки. Омоноличивая приконтурный слой трещиноватого грунта, армированный набрызгбетон способствует его упрочнению и препятствует образованию вывалов.

После затухания упругих деформаций приконтурного грунтового массива производят усиление первичной обделки путем нанесения последующих стабилизирующих слоев набрызгбетона или возведения стабилизирующей части обделки из монолитного бетона.

Вторичная, стабилизирующая обделка совместно с первичной образуют конструкцию, воспринимающую горное давление.

При разработке скальных грунтов способом гладкого взрывания или с помощью тоннелепроходческих комбайнов обеспечивается достаточно ровный, соответствующий проектному контуру выработки. В таких случаях при наличии индустриальной базы ЖБИ вблизи района строительства тоннелей имеется возможность применения сборных железобетонных или сборно-монолитных обделок различного очертания. Конструктивные формы сборных обделок такие же как и монолитных. В зависимости от свойств грунтов и способов строительства тоннеля обделки устраивают в виде пологого свода, опирающегося на породные стены, или подъемистого свода с плоским лотком. Пологий свод может опираться на монолитные бетонные или железобетонные стены с уширенной пятой, возведенные в предварительно пройденных опорных выработках малого поперечного сечения.

Конструкции и размеры блоков, типы стыков между ними, гидроизоляцию обделок принимают с учетом принципов проектирования сборных обделок кругового очертания, сооружаемых щитовым способом.

В слабых грунтах ($f < 3...4$), оказывающих наряду с вертикальным значительное горизонтальное давление на конструкцию, а также в грунтах, где проявляется давление набухания, направленное снизу вверх, обделка должна иметь обратный свод, исключая возможность сдвига стен внутрь выработки и воспринимающий возможное давление со стороны подошвы выработки. Обратный свод распределяет такие нагрузки с проезжей части на грунт. Вместо традиционного кругового более рациональна конструкция обратного свода с плоским очертанием со стороны подошвы выработки, которая хотя и приводит к некоторому перерасходу бетона, однако упрощает технологию ведения горных и бетонных работ.

2.5. Защита тоннелей от подземных вод

Для обеспечения нормальной и долговечной эксплуатации тоннелей необходима их защита от подземных вод. Фильтрация подземных и поверхностных вод через обделку приводит к выщелачиванию цементного камня, снижению прочности конструкции, коррозии закладных деталей и оборудования, утечке токов из контактной сети, увеличению блуждающих токов в элементах конструкции, образованию наледей на обделке и проезжей части в условиях с суровым климатом, что разрушает конструкцию и создает опасность для движения транспорта.

Защиту тоннелей от подземных и поверхностных вод можно осуществить двумя принципиально различными способами:

- ✓ осушением прилегающего к тоннелю обводненного горного массива;
- ✓ герметизацией обделки тоннеля.

Способы защиты тоннелей от обводненности приведены в таблице.

Мероприятия	Способ осуществления
Упорядочение стока поверхностных вод над тоннелем	Осушение части поверхности над тоннелем нагорными канавами и дренажами; увеличение водонепроницаемости ложа водотоков, пересекающих трассу тоннеля
Отвод грунтовых вод от обделки тоннеля	Заполнение трещин и искусственное упрочнение окружающих тоннель грунтов тампонажными растворами; отвод воды от тоннеля с помощью дренажных выработок
Организованный прием грунтовых вод внутрь тоннеля	Применение специальных устройств (дренажных поперечных прорезей в грунте за обделкой, дренажных камер и др.) по приему воды внутрь на коротких участках тоннеля в сочетании с усилением водонепроницаемости обделки по всей длине тоннеля
Усиление водонепроницаемости обделки тоннеля	Правильный подбор состава бетона обделки и растворов для нагнетания за обделку с применением специальных цементов и добавок; устройство рулонной полимерной изоляции по первичной (временной) крепи из набрызгбетона или черного бетона; устройство внутреннего торкрет-покрытия

Осушение поверхности над тоннелем выполняется для предупреждения инфильтрации в горный массив атмосферных осадков и вод ручьев и водотоков, расположенных в надтоннельной зоне. Осушение осуществляется организацией поверхностного водостока путем устройства нагорных канав и

отвода атмосферных вод в кюветы предпортальной выемки или по склону за пределы надтоннельной поверхности. В водопроницаемых грунтах ложе канав и водотоков над тоннелем облицовывают водонепроницаемым бетоном или асфальтобетоном.

Отвод подземных вод или понижение их уровня в зоне расположения тоннеля методом дренажа допускается в грунтах, не подверженных суффозии (в невыщелачиваемых, невымываемых и нерастворимых скальных и полускальных). Если такие грунты с коэффициентом фильтрации более 2 м/сут. окружают тоннельную выработку на протяжении нескольких сотен метров или по всей длине, для осушения тоннеля устраивают дренажные штольни. Для улучшения дренирующих свойств в обделке штольни оставляют открытые отверстия, а также бурят водоулавливающие шпуров длиной 1,5...3,5 м в кровле и стенах и нисходящие — в подошве штольни. Основание штольни располагают на такой глубине, чтобы расстояние от подошвы тоннеля до кривой депрессии было не менее 100 см. Дренажные штольни следует проходить на расстоянии 10...15 м от тоннеля, чтобы исключить возможность тампонирувания грунта цементным раствором контрольного нагнетания за обделку тоннеля.

В скальных неразмываемых грунтах при сосредоточенном притоке подземных вод осушение тоннеля можно выполнять путем устройства поперечных и продольных прорезей в грунтах непосредственно за обделкой, заполняемых бутовым камнем, щебнем или галькой в виде обратного фильтра с организованным отводом воды в водоотводные (дренажные) лотки тоннеля. Дренажные прорези устраивают в тоннелях с постоянной расчетной положительной температурой воздуха.

В местностях с суровым климатом для перехвата подземных вод на ограниченных участках тоннеля целесообразно устраивать камеры за пределами сезонного замерзания грунтов (в скальных грунтах - на расстоянии 4...6 м от обделки тоннеля), из которых бурят скважины диаметром 75...120 мм и длиной до 50 м, расположенные веером над тоннелем таким образом, чтобы они пересекали все водоносные пласты над тоннелем и находились вне зоны сезонного промерзания грунтов.

Вода из камер по перепускам стекает в дренажные лотки тоннеля. В таких условиях водоотводные лотки перепусков и тоннеля защищают от промерзания, а в перепусках устраивают утепленный тамбур.

Для предупреждения замерзания воды в водоотводных лотках тоннелей в суровых климатических условиях устраивают также систему автоматического подогрева воды, работающую только в зимний период.

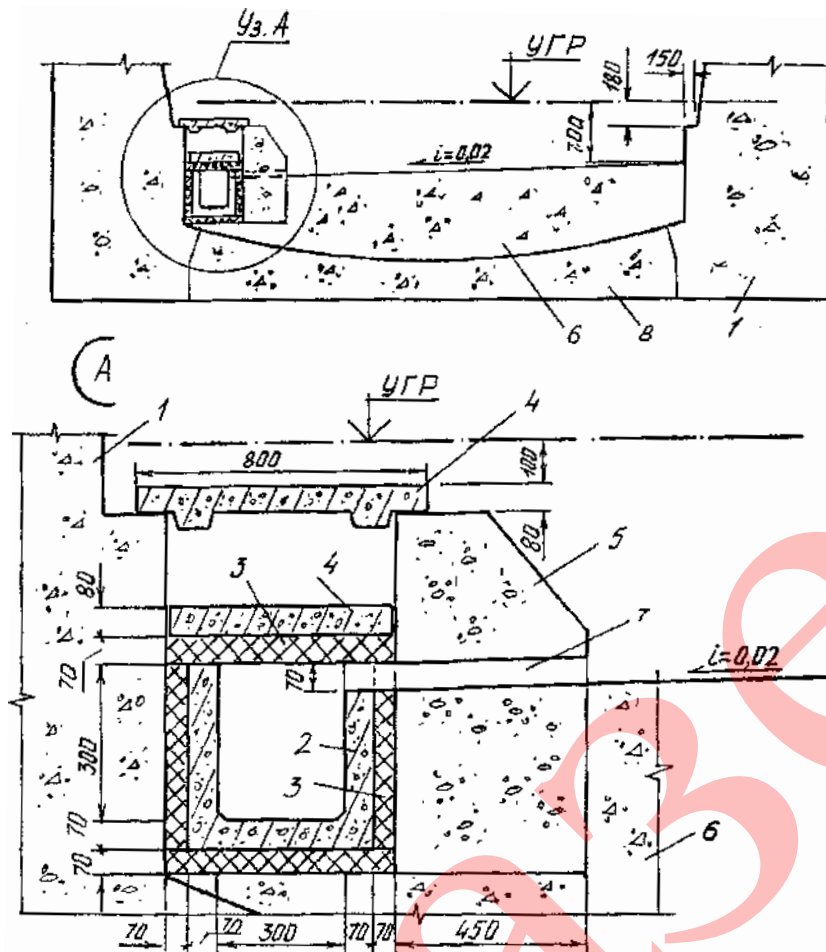


Рис. 2.5.1. Конструкция утепленного водоотводного лотка:

1 – обделка; 2 – лотковый блок; 3 – плиты пенопласта; 4 – железобетонные крышки; 5 – керамзитобетонный блок; 6 – бетонное основание; 7 – отверстие 200x70 мм; 8 – обратный свод.

Водоотводные лотки в тоннеле предназначены для отвода в сторону порталов попадающей в тоннель при его мытье воды, конденсирующейся на обделке или проникающей в тоннель. Лотки обычно собирают из железобетонных коробчатых элементов с боковыми прорезями размером 200x70 мм и перекрывают их железобетонными крышками. Вода стекает к лоткам по бетонному основанию с поперечным уклоном $i = 20\%$. Не реже чем через 40 м устраивают смотровые колодцы для чистки лотков. С целью исключения распространения нефтепродуктов по тоннелю смотровые колодцы должны иметь гидрозатворы (перепуски сифонного типа) с отстойниками, которые обычно устраивают в местах сброса воды в сервисную штольню.

В выщелачивающихся водоносных грунтах дренажное осушение не применяют во избежание выноса с грунтовой водой мелких частиц, разуплотнения грунта у тоннеля и ухудшения статической работы обделки. В таких случаях усиливают водонепроницаемость путем правильного подбора состава бетона обделки и раствора для нагнетания за нее с применением специальных цементов и добавок, устраивают рулонную полимерную изоляцию по временной крепи из набрызгбетона или чернового бетона, а также внутреннее торкретпокрытие. Однако предпочтение отдается усилению водонепроницаемости самой бетонной обделки.

Монолитные обделки тоннелей, заложенных в устойчивых скальных и полускальных грунтах при гидростатическом давлении более 0,5 МПа, защищают от воды наружной гибкой оклеечной или пленочной гидроизоляцией, которая устраивается по выравнивающей поверхности выработки торкретбетону слоем толщиной 8...10 см. После этого бетонируют обделку, воспринимающую горное и гидростатическое давление.

В слабых водонасыщенных грунтах, где монолитную бетонную обделку обычно возводят по частям и наружную гидроизоляцию выполнить невозможно, покрывают гидроизоляционным слоем внутреннюю поверхность обделки, возведенной на полный профиль с обратным сводом. В этих случаях при гидростатическом давлении более 0,5 МПа используют гибкую рулонную гидроизоляцию, поддерживаемую железобетонной рубашкой толщиной 150...200 мм, которая воспринимает только гидростатическое давление; горное давление передается на бетонную обделку. В этом случае увеличивается сечение выработки.

В монолитных скальных и полускальных грунтах, не вызывающих неравномерных осадков обделки, при гидростатическом давлении менее 0,5 МПа устраивают внутреннюю жесткую гидроизоляцию в виде слоя толщиной 30...40 мм из набрызгбетона с добавками.

При строительстве железнодорожных тоннелей целесообразно сочетание торкретирования внутренней поверхности обделки с мероприятиями по повышению водонепроницаемости бетона и нагнетанием за обделку цементного раствора с добавками.

2.6. Конструирование обделки

После обоснования типа обделки, соответствующей заданным инженерно-геологическим условиям на участке, приступают к построению ее внутреннего очертания. Контур внутреннего очертания сводчатой обделки следует проектировать в виде трех- или пятицентрковой кривой, описанной вокруг габарита приближения строений. При правильно построенном внутреннем очертании расстояние от критических (угловых) точек габарита до контура в сводчатой части должно составлять 100...150 мм. В области стен расстояние между габаритом и контуром внутренней поверхности обделки должно быть увеличено до 300...350 мм.

На кривых участках тоннеля внутреннее очертание обделки следует проектировать так, чтобы оно получилось из очертания обделки для прямого участка путем раздвижки его половин на величину уширения габарита и введения между ними прямой вставки в замке.

После нанесения на чертеже габарита приближения строений приступают к построению внутреннего очертания конструкции обделки. Построение контура очертания начинают с вычерчивания сводовой части радиусом R_1 от центра O . Величину радиуса R_1 и расположение точки O_1 назначают, используя имеющиеся образцы обделок.

При проектировании монолитной бетонной обделки однопутного железнодорожного тоннеля на прямом участке трассы центр O располагают на оси тоннеля на высоте 4650 мм над уровнем головки рельсов. Из центра O радиусом R_1 подобранном таким образом, чтобы зазор между верхней угловой точкой габарита и поверхностью обделки по вертикали составлял 100 мм, вычерчивают дугу с центральным углом 120° .

указанных сечениях откладывают с наружной стороны от вычерченного внутреннего контура в принятом масштабе.

Для вычерчивания наружного контура обделки выбирают положение центра O'_1 , который смещают вниз относительно точки O_1 на 200 мм при необходимости плавного увеличения жесткости обделки по направлению от замка к фундаменту. Затем выполняют такие же операции, как при вычерчивании внутреннего контура. В стенах дуги радиусов R'_2 на уровне центров O'_2 сопрягают с вертикальными прямыми, доводимыми до уровня подошвы фундамента.

Расстояние от УГР до подошвы фундамента определяется из условия размещения в нем верхнего строения пути, водоотводных устройств и бетонного основания минимальной толщины. Для обделок замкнутого очертания глубину подошвы назначают с учетом также толщины обратного свода.

Конструирование обделок однопутных железнодорожных тоннелей на кривых начинают с вычерчивания уширенного ГПС. При этом для кривых радиусом $R = 250...1500$ м ось тоннеля смещается в сторону центра кривой на 205 мм, а центры O_1 и O'_1 – на 265 мм в обе стороны от оси тоннеля. Последовательность конструирования обделок на кривых аналогична вышеизложенной.

2.7. Верхнее строение пути и проезжая часть

В соответствии с требованиями норм проектирования в железнодорожных тоннелях верхнее строение пути балластной конструкции должно выполняться с применением щебеночного балласта толщиной слоя под шпалами не менее 0,35 м. Верхнее строение пути укладывают на бетонное основание, имеющее односкатный или двускатный поперечный уклон в сторону водоотводных лотков не менее 0,02.

2.8. Ниши, камеры и другие устройства безопасности

Железнодорожные и автодорожные тоннели должны иметь камеры для размещения необходимого оборудования (в том числе пожарных постов), хранения ремонтных материалов и укрытия людей. Их устраивают с каждой стороны тоннеля через 300 м и располагают в шахматном порядке.

Для укрытия обслуживающего персонала при прохождении поезда в железнодорожных тоннелях устраивают ниши и располагают их между камерами в шахматном порядке через 60 м с каждой стороны. При длине тоннеля до 400 м устраивают одну камеру в середине тоннеля.

Для улучшения видимости мест укрытия наружные углы камер и ниш окрашивают люминесцентной краской светлого цвета на высоту 50 см от уровня головки рельсов.

Размеры камер и ниш для ж/д тоннелей приведены в таблице 2.8.1

Таблица 2.8.1 Размеры камер и ниш для ж/д тоннелей.

Устройства	Размеры, мм		
	Ширина	Высота	Глубина
Камеры	2000	2500	2500
Ниши	2000	2500	500

ОБРАЗВЕД

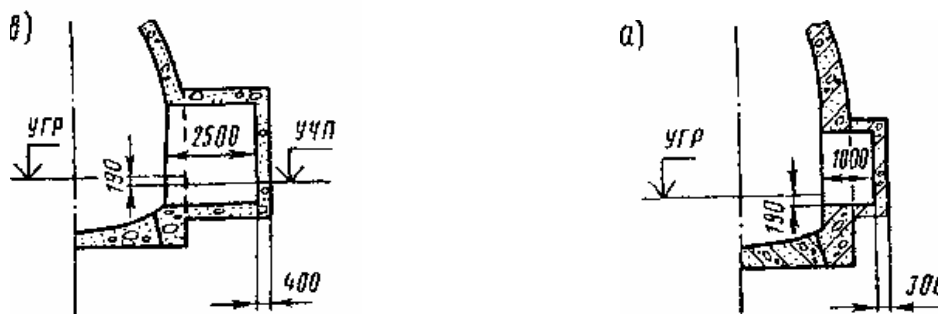


Рис. 2.8.1. Ниша (а) и камера (в) в железнодорожном тоннеле

Железнодорожные тоннели протяженностью более 3000 м и автодорожные более 1500 м должны иметь дополнительные эвакуационные выходы в рядом расположенные тоннели или штольню безопасности (сервисную штольню), имеющую выход на поверхность, либо камеры безопасности, оборудованные герметичными затворами и местной вентиляцией. Между тоннелем и сервисной штольней необходимо предусматривать сбойки через 250... 300 м.

2.9. Порталы транспортных тоннелей

В местах перехода железной дороги от открытой выемки к тоннелю возводят портал, предназначенный для обеспечения устойчивости лобового откоса выемки, отвода воды, стекающей по склону массива, защиты пути или проезжей части от скатывающихся по склону отдельных обломков породы, а также для архитектурного оформления входа в тоннель.

В зависимости от крутизны склонов горного массива и состояния грунтов на склонах устраивают порталы в виде наклонных оголовков, с врезной или выносной порталной стенкой.

Оголовок, представляющий собой выступающее из плоскости откоса усиленное армированием утолщенное кольцо тоннельной обделки с парапетом, устраивают в случае крепких скальных грунтов при склонах, имеющих значительную крутизну. Врезные прямые порталы применяют при сравнительно устойчивых склонах, когда переход к тоннелю осуществляется путем устройства предпортальной выемки. Глубину предпортальной выемки принимают исходя из минимальных нарушений естественного равновесия горных склонов. Опыт проектирования показывает, что в глинистых грунтах глубина выемки не должна превосходить 12...15 м, в скальных – 20 м.

При наличии неустойчивых оползневых склонов портал выносят за пределы оползневых участков, а склон и обделку покрывают грунтовой засыпкой, уполаживая лобовой откос выемки и укрепляя его мощением. Вынос порталного звена обделки за пределы лобового откоса предусматривают также в случае, когда порталное вентиляционное строение располагается под обделкой.

В состав портала входят: торцовая порталная стена, водоотводная поперечная канава за порталной стеной и первое кольцо обделки.

Портальная стена с проемом для пропуска транспорта связывается с первым кольцом обделки с помощью арматуры или отрезков из прокатных профилей, устанавливаемых по периметру обделки, и опирается на боковые откосы предпортальной выемки, в которые заделывается на глубину 0,8...1,0 м. В неустойчивых грунтах она опирается на боковые подпорные стены, закрепляющие боковые откосы выемки. Стена портала возвышается над грунтовой засыпкой первого кольца обделки на 1,1 м, называемое парапетом, которое предназначено для задержания камней, осыпающихся с лобового откоса.

Портальная стена и первое кольцо обделки в наибольшей степени подвергаются атмосферным воздействиям, поэтому их выполняют из железобетона. Толщина стены обычно — 0,8...1,2 м.

Для сбора осыпающихся с откоса камней и грунта за парапетом предусматривается горизонтальная площадка длиной не менее 2,5 м из плотной грунтовой засыпки, в которой устраивается поперечный водоотводный лоток с уклоном 3% в обе стороны для отвода воды в продольные канавы на боковых откосах. Толщина грунтовой засыпки за парапетом должна быть не менее 1,5 м до низа водоотводного лотка, чтобы обеспечить амортизацию возможных ударов скалывающихся камней. Откосы и дно водоотводного лотка защищают от разрыва бетонным покрытием.

При совмещении портала с порталным вентиляционным зданием предусматривают вынос первого (портального) звена обделки за пределы лобового откоса и портальной стены.

В устойчивых неветриваемых скальных грунтах лобовой и боковые откосы оставляют без крепления.

В случае устойчивых, но трещиноватых и ветриваемых грунтов, откосы защищают облицовочным покрытием из набрызгбетона толщиной 8...10 см. Облицовочные стены не являются несущими конструкциями.

Предпортальную выемку обычно разрабатывают с откосами, крутизна которых приведена в таблице 2.9.1.

Таблица 2.9.1. Крутизна откосов предпортальной выемки

Вид откоса	Крутизна откосов при значении коэффициента крепости грунта f				
	1,0	1,5	2,0	3,0	≥ 4
боковой	1:1,5	1:1,0	1:0,8	1:0,5	1:0,3
лобовой	1:1,75	1:1,5	1:1,0	1:0,8	1:0,5

В слабоустойчивых и трещиноватых скальных, а также мягких грунтах для закрепления боковых откосов применяют подпорные стены, которые могут выполняться массивными из бетона или естественного камня. Эффективными являются тонкостенные подпорные конструкции из монолитного или сборного железобетона постоянной или переменной по высоте толщины. Тонкоэлементные подпорные стены состоят из подпорной и фундаментной плит, жестко соединенных между собой. Устойчивость подпорных стен этого типа зависит, в основном, от веса грунта, находящегося над фундаментной плитой, ширину которой развивают в сторону грунта. При высоте стены более 6...8 м устраивают поперечные ребра жесткости – контрфорсы или горизонтальные разгрузочные площадки.

Припортальные подпорные стены следует разделять по длине сквозными вертикальными швами на секции длиной не более 15 м, а в районах сейсмичностью 8-9 баллов - до 10 м. Их располагают так, чтобы подошва каждой секции опиралась на однородный грунт.

В мягких грунтах боковые откосы предпортальной выемки могут быть закреплены нагельной крепью.

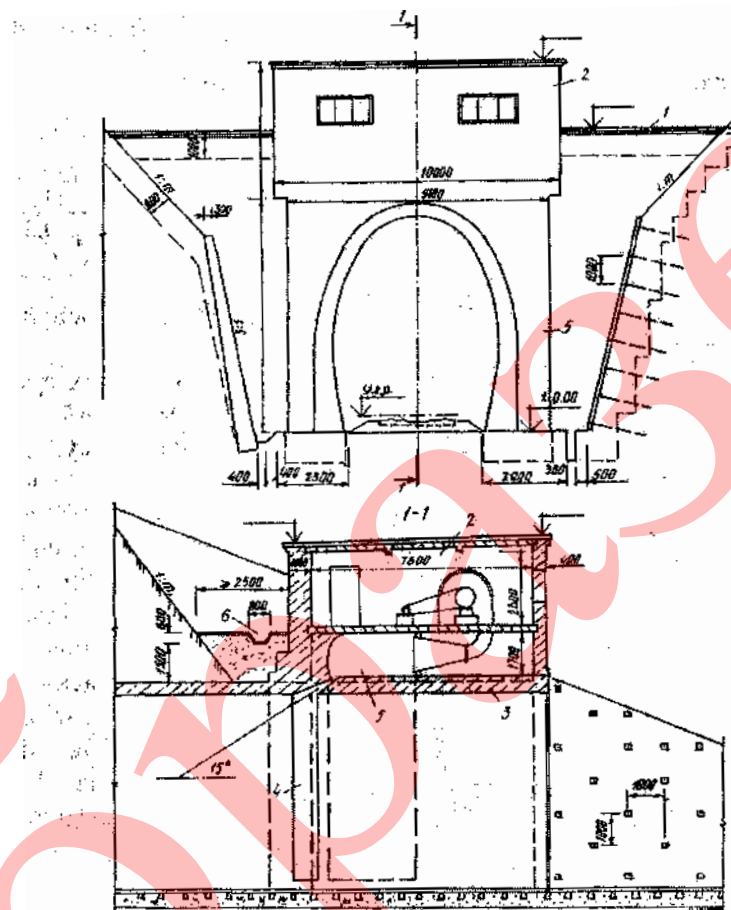


Рис. 2.9.1. Портал железнодорожного тоннеля с вентиляционным зданием

- 1 – порталная стена с парапетом;
- 2 – надпортальное вентиляционное помещение на два вентилятора;
- 3 – входное звено обделки;
- 4 – щель по внутреннему контуру обделки;
- 5 – камера длиной 2,5 и шириной 1,0 м, охватывающая по периметру входное звено обделки;
- 6 – водоотводный лоток.

3. РАСЧЕТ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК НА ЗАДАННЫЕ НАГРУЗКИ

После обоснования формы поперечного сечения тоннеля и конструирования обделки произведем расчет обделок с целью исключить наступление предельных состояний конструкции, недопустимых при эксплуатации подземных сооружений.

Различают две группы предельных состояний:

- 1) по несущей способности;
- 2) по деформациям и трещиностойкости.

Предельным состоянием конструкции по несущей способности считается такое, при котором в одном или нескольких ее поперечных сечениях усилия (нормальная сила N , изгибающий момент M) достигают предельных значений по прочности, по местным разрушениям стыков между сборными элементами. Нагрузка, вызывающая такое состояние, а в некоторых случаях — потерю устойчивости формы или положения конструкции, называется предельной по несущей способности.

Предельным состоянием по деформациям является такое состояние, при котором деформации конструкции (прогибы, смещения, осадки опорных частей) достигают предельно допустимых значений; предельным состоянием по трещиностойкости или по раскрытию трещин является такое, при котором возникают трещины в конструкции или возникшие трещины раскрываются сверх нормативных значений. Нагрузка, вызывающая хотя бы одно из указанных состояний, является предельной по деформациям.

Необходимо, чтобы значения расчетных нагрузок не превышали предельных значений.

Все тоннельные конструкции рассчитывают по несущей способности от воздействия основных и особых сочетаний расчетных значений нагрузок с применением коэффициентов условий работы конструкции и расчетных сопротивлений ее материалов.

По предельным состояниям второй группы расчеты должны производиться на основное сочетание нормативных нагрузок с применением нормативных характеристик материалов конструкции.

В основные сочетания включают постоянные нагрузки и временные от транспортных средств, а также временные строительные и эксплуатационные нагрузки.

Особые сочетания складываются из постоянных и некоторых временных нагрузок основного сочетания и особых воздействий.

К постоянным нагрузкам относятся горное давление, давление от засыпки грунта, собственный вес тоннельных конструкций, гидростатическое давление, давление грунта от веса наземных и подземных сооружений, усилия предварительного напряжения конструкций.

К временным нагрузкам относятся вес транспорта в тоннеле (если проезжая часть расположена не на бетонном или ином сплошном основании), нагрузки от наземного транспорта, строительномонтажные нагрузки (давление щитовых домкратов, подъемно-транспортного оборудования, нагнетаемого за обделку раствора и воздуха при кессонных работах).

К особым нагрузкам относятся сейсмические и взрывные воздействия, а также неравномерные деформации оснований.

Нагрузки делят на: нормативные и расчетные. Нормативные нагрузки определяют в соответствии с указаниями СНиП II-40-80 и СНиП 2.05.03-84.

При курсовом проектировании тоннелей глубокого заложения, сооружаемых горным и щитовым способами, в сейсмически неактивных районах или при расчетной сейсмичности тоннелей менее 7 баллов можно ограничиться расчетом на основное сочетание нагрузок, включающих горное давление, собственный вес обделки и при необходимости – гидростатическое давление.

Основная предпосылка этого метода расчета состоит в том, что после возведения конструкции и нагнетания цементно-песчаного раствора за обделку достигается плотный контакт ее с грунтом. Тоннельная обделка становится конструкцией распорного типа, работающей совместно с окружающим грунтом.

Под действием внешних активных нагрузок обделка деформируется. В верхней части на участке так называемого "отлипания" она свободно перемещается в сторону выработки и характеризуется возникновением значительных изгибающих моментов. На остальной части контура, называемой отпорными участками, обделка перемещается в сторону массива, встречая противодействие грунта — упругий отпор, ограничивающий деформации конструкции и возникающие в ней изгибающие моменты. Чем больше упругий отпор, т.е. чем больше значение модуля деформации грунта, тем меньше будут изгибающие моменты в тоннельной конструкции.

Взаимодействие обделки с грунтом в статических расчетах учитывается зависимостью между напряжениями и деформациями грунта, аналитическое выражение которой соответствует принятой расчетной модели грунта. Имеется несколько моделей грунта:

1. упругая (модель линейно деформируемой среды);
2. пластические;
3. реологические и др.

В практике проектирования применяют достаточно простой инженерный метод статического расчета обделок на заданные нагрузки с использованием модели местных деформаций, основанной на предложенной Винклером гипотезе о прямой пропорциональности между давлением и местным перемещением грунта. При расчетах по этому методу вначале определяют все действующие на обделку нагрузки, а затем рассчитывают ее на эти нагрузки как стержневую систему методом сил или перемещений строительной механики.

Статический расчет обделок методом сил получил название метода Метропроекта. Он достаточно универсален и позволяет рассчитывать как монолитные, так и сборные обделки постоянной и переменной по контуру жесткости в грунтах, обладающих упругими свойствами.

3. РАСЧЕТ ОБДЕЛКИ

3.1. Горное давление на обделки, сооружаемые подземным способом

Способ определения горного давления на обделки тоннелей, сооружаемых горным и щитовым способами, зависит от возможности сводообразования в грунте над горной выработкой. Поэтому сначала необходимо вычертить возможный контур обрушения в соответствии с гипотезой сводообразования профессора М.М. Протодяконова.

Исходные данные:

№ грунта – 15;

Наименование породы – доломиты выветрившиеся;

Нормативный коэффициент крепости f_n – 4,2;

Удельный вес грунта γ – 26 кН/м³;

Расстояние между трещинами B_T – 0,25 м;

Коэффициент пастели породы $K \cdot 10^{-5}$ – 4 кН/м³;

Кажущийся угол внутреннего трения породы φ – 62 град;

Уровень грунтовых вод выше ВПЧ h_w – 16 м.

Коэффициент фильтрации k_ϕ – 0,2...2,0 м/сут.

Коэффициент трещинной пустотности ε – 2%

Высота свода обрушения грунта:

$$h_1 = \frac{B}{2 \cdot f} = \frac{17.94}{2 \cdot 0.672} = 13.35 \text{ м},$$

где B – пролет свода обрушения, м;

f – расчетный коэффициент крепости грунта. $f = f_n \cdot \alpha \cdot k = 4,2 \cdot 0,8 \cdot 0,2 = 0.672$

где f_n – нормативное значение коэффициента крепости;

α – коэффициент трещиноватости массива;

k – коэффициент учета водопритока, расположения трещин и способа проходки.

Пролет свода обрушения в случае выработок сводчатого очертания:

$$B = b + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 12.7 + 2 \cdot 10.5 \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{62}{2} \right) = 17.94 \text{ м},$$

где b, h — ширина и высота тоннельной выработки, м;

φ – значение кажущегося угла внутреннего трения грунта, град.

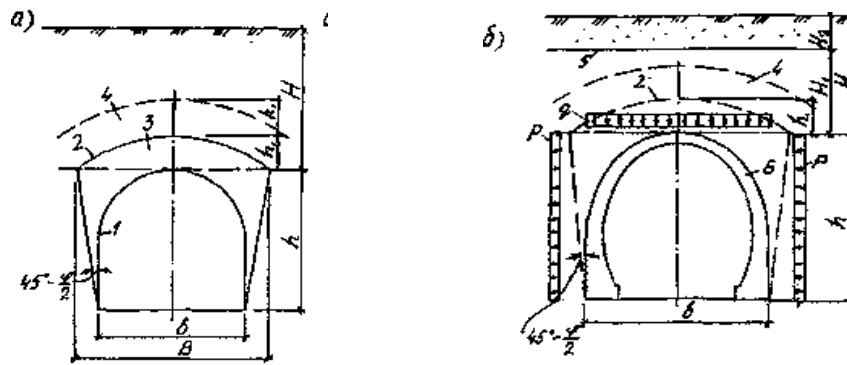


Рис. 3.1.1. Схемы для определения горного давления по гипотезе профессора М. М. Протоdjeяконова при сводообразовании:

- 1 – контур выработки; 2 – свод давления; 3 – свод обрушения; 4 – несущий свод;
5 – граница слоя слабого неустойчивого грунта; 6 – обделка тоннеля

Нормативная равномерно распределенная вертикальная нагрузка:

$$q_n = \gamma \cdot h_1 = 26 \cdot 13.35 = 347.1 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2},$$

где γ - удельный вес грунта, кН/м^3 .

Нормативная равномерно распределенная по высоте горизонтальная нагрузка:

$$p_n = \gamma \cdot (h_1 + 0,5 \cdot h) \cdot \xi_a = 26 \cdot (13.35 + 0,5 \cdot 10.5) \cdot 0,0622 = 30.06 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2},$$

где ξ_a – коэффициент активного бокового давления грунта:

$$\xi_a = \text{tg}^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) = \text{tg}^2 14^\circ = 0,0622$$

3.2. Гидростатическое давление

В данном курсовом проекте грунтовые условия в частности уровень грунтовых вод h_w и коэффициент фильтрации k_f позволяют не учитывать гидростатическое давление при статическом расчете обделки, при условии выполнения определенных мероприятий по понижению УГВ.

Для понижения УГВ в курсовом проекте предусмотрены две дренажные трубы диаметром ($d = 0,3$ м) расположенные по подошве обделки, но не включенные в ее состав. Трубы имеют перфорацию для приема грунтовых вод внутрь самих труб.

3.3. Определение расчетных значений нагрузок

При расчете тоннельных обделок по первой группе предельных состояний (на прочность и устойчивость обделки, и прочность стыков сборных обделок) расчетные нагрузки определяют путем умножения нормативных значений на коэффициенты надежности по нагрузке

$$q = q_n \cdot \gamma_f = 347.1 \cdot 1,6 = 555.36 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2},$$

$$p = p_n \cdot \gamma_f = 30.06 \cdot 0.7 = 21.04 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

где γ_f – коэффициент надежности по нагрузке.

3.4. Схема нагрузок

Тоннельное сооружение представляет собой конструкцию, длина которой значительно превышает размеры поперечного сечения, поэтому обычно для расчета выделяют плоскую систему длиной 1 м. Если тоннельная конструкция состоит из сборных элементов, длину выделяемой плоской системы принимают равной размеру типовой секции-кольца или ширине сборного элемента.

Схема нагрузок представляет собой сочетание конструктивной схемы и внешних нагрузок. Конструктивная схема изображается в виде контура нейтральной оси обделки с обозначенными на нем конструктивными или технологическими шарнирами и их координатами. На ней указывается вид заделки опорных элементов.

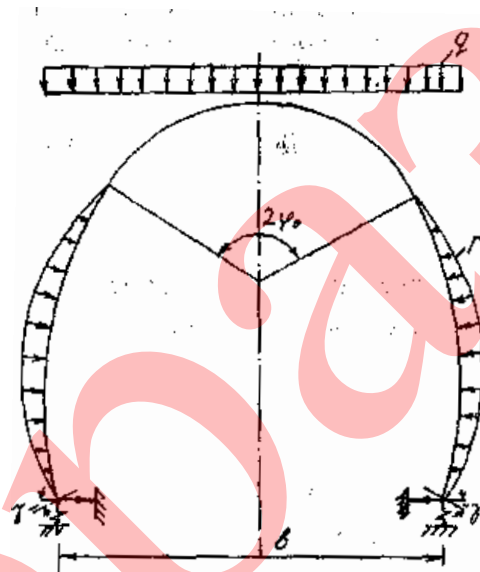


Рис.3.4.1. Схема нагрузок обделки подковообразного очертания

Величина угла $2\phi_0$ назначается в зависимости от коэффициента крепости грунта и жесткости обделки. Для монолитных бетонных обделок подковообразного очертания угол $2\phi_0$ равен $90^\circ \dots 150^\circ$ при коэффициенте крепости $f = 6 \dots 3$.

3.5. Расчетная схема и основная система

В грунтах, обладающих упругим отпором (коэффициент удельного упругого отпора $K_0 > 0,35 \cdot 10^5 \text{ кН/м}^3$), тоннельная обделка работает совместно с окружающим грунтом и представляет собой сложную многократно статически неопределимую конструкцию. Статический расчет такой конструкции методом заданных нагрузок целесообразно выполнять методом сил строительной механики, который дает наименьшее количество неизвестных. Расчетная схема служит для преобразования схемы нагрузок в стержневую систему путем принятия ряда допущений, обеспечивающих требуемый запас прочности.

Наиболее широко используемый способ расчета основан на введении следующих допущений:

1) плавное очертание обделки (конструктивной схемы) заменяется ломаным (вписанным многоугольником);

2) непрерывное изменение жесткости обделки заменяется ступенчатым, причем на длине каждой стороны многоугольника жесткость принимается постоянной;

3) распределенные активные нагрузки, действующие на обделку, заменяются сосредоточенными силами, приложенными в вершинах многоугольника;

4) сплошная упругая среда на отпорных участках заменяется отдельными упругими опорами, помещенными в вершинах многоугольника и направленными перпендикулярно наружной поверхности обделки; при учете сил трения между обделкой и грунтом опоры отклоняются вниз на угол трения.

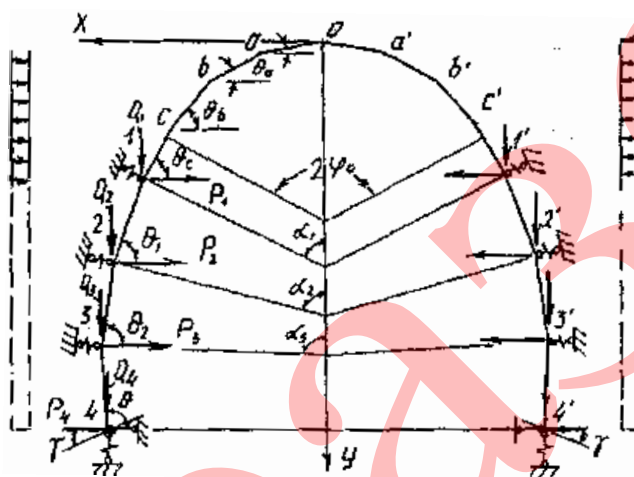


Рис. 3.5.1. Расчетная схема обделки подковообразного очертания

При обделках подковообразного очертания в скальных грунтах преобладающие вертикальные нагрузки вызывают силы трения в подошве обделки, обычно превышающие усилия, стремящиеся сместить стены в горизонтальном направлении. Невозможность этого смещения учитывается в расчетной схеме введением горизонтальной жесткой опоры в уровне подошвы пят. Учитывается упругий поворот пяты обделки относительно оси, проходящей через центр тяжести пяты, т.е. обделка в пятах имеет упругую заделку с горизонтальной жесткой опорой.

Преобразование схемы нагрузок в расчетную схему целесообразно выполнять в определенной последовательности.

Схема нагрузок обычно симметрична относительно вертикальной оси, поэтому выделяют расчетную схему половины обделки. Сначала вычерчивают конструкцию, затем — конструктивную схему обделки в масштабе 1:25, на которой выделяют безотпорную зону с центральным углом φ_0 . Для построения вписанного многоугольника эту зону графически делят на 3,5 части, начиная от пяты обделки, а безотпорную зону полусвода, включая дробную часть отпорной зоны, — на четыре равные части. Точки деления образуют вершины многоугольника.

Графически по чертежу, выполненному в масштабе 1:25, определяют координаты вершин многоугольника x_n и y_n толщину обделки h_n в средних точках сторон многоугольника и вычисляют основные геометрические характеристики расчетной схемы a_n , θ_n и S_n (при этом обозначения стержней соответствуют обозначению примыкающих сверху вершин многоугольника).

$$a_n = \sqrt{(\Delta x_n)^2 + (\Delta y_n)^2},$$

$$\theta_n = \arctg \frac{\Delta x_n}{\Delta y_n},$$

$$\Delta y_n = y_{n+1} - y_n,$$

$$\Delta x_n = x_{n+1} - x_n.$$

Результаты вычислений целесообразно представить в виде таблицы (табл.3.5.1.) геометрических характеристик расчетной схемы

Для дальнейшего расчета принимаются средние значения длин сторон для безотпорной a_0 и отпорной a_n зон обделки.

Сосредоточенные силы, заменяющие распределенную нагрузку на отпорной части обделки и приложенные в вершинах многоугольника, вычисляются как произведение интенсивности распределенной нагрузки на величины проекций на горизонтальную (для Q_n) и вертикальную (для P_n) координатные оси примыкающих к углу половин сторон многоугольника отпорной части расчетной схемы.

Таблица 3.5.1. Геометрические характеристики расчетной схемы

№	X_n	Y_n	№	Δx_n	Δy_n	Длины		$\frac{\Delta y_n}{\Delta x_n}$	θ_n	№	α_n
						a_n	a_{cp}				
0	0	0	0	1,43	0,08	1,43	1,433	0,06	3,2		
1	1,43	0,08	1	1,4	0,47	1,48		0,34	18,56		
2	2,83	0,55	2	1,05	0,95	1,42		0,9	42,14		
3	3,88	1,5	3	0,77	1,13	1,37		1,47	55,73		
4	4,65	2,63	4	0,53	1,21	1,32		2,28	66,35		
5	5,18	3,84	5	0,38	1,54	1,59		4,05	76,14		
6	5,56	5,38	6	0,13	1,60	1,61		12,31	85,35	6	80,75
7	5,69	6,98	7	-0,05	1,67	1,67	1,667	-33,4	91,71	7	88,53
8	5,64	8,65	8	-0,14	1,75	1,76		-12,5	94,57	8	93,14
9	5,5	10,4									

θ_n – угол наклона стержня к горизонтали;

α_n – угол наклона реакции к вертикали.

Равномерно-распределенные нагрузки заменяем сосредоточенными:

$$Q_6 = q \cdot \frac{x_7 - x_6}{2} = 347.1 \cdot \frac{5.69 - 5.56}{2} = 22.56 \text{ кН};$$

$$Q_7 = q \cdot \frac{x_7 - x_6}{2} = 347.1 \cdot \frac{5.69 - 5.56}{2} = 22.56 \text{ кН};$$

$$P_6 = p \cdot \frac{y_7 - y_6}{2} = 30.06 \cdot \frac{6.98 - 5.38}{2} = 19.5 \text{ кН};$$

$$P_7 = p \cdot \frac{y_8 - y_6}{2} = 30.06 \cdot \frac{8.65 - 5.38}{2} = 49.15 \text{ кН};$$

$$P_8 = p \cdot \frac{y_9 - y_7}{2} = 30.06 \cdot \frac{10.4 - 6.98}{2} = 51.4 \text{ кН};$$

$$P_9 = p \cdot \frac{y_9 - y_8}{2} = 30.06 \cdot \frac{10.4 - 8.65}{2} = 26.3 \text{ кН};$$

На участке 0 – 1 нагрузка остается равномерно распределенной. Нагрузка от собственного веса равна весу этого элемента распределенного на ширине равной $2X_1$.

$$q_{св} = \frac{G'}{X_1} = \frac{(h_6 + h_0) / 2 \cdot 6a_{cp} \cdot b \cdot \gamma_6}{X_6} = \frac{(0.9 + 1.1) / 2 \cdot 6 \cdot 1.433 \cdot 1 \cdot 24}{5.56} = 37.11 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

Нагрузки от собственного веса:

$$G_6 = \frac{h_6 + h_7}{2} \cdot \frac{a_{cp}}{2} \cdot b \cdot \gamma_6 = \frac{1.1 + 1.18}{2} \cdot \frac{1.667}{2} \cdot 1 \cdot 24 = 22.8 \text{ кН};$$

$$G_7 = h_7 \cdot a_{cp} \cdot b \cdot \gamma_6 = 1.18 \cdot 1.667 \cdot 1 \cdot 24 = 47.21 \text{ кН};$$

$$G_8 = h_8 \cdot a_{cp} \cdot b \cdot \gamma_6 = 1.31 \cdot 1.667 \cdot 1 \cdot 24 = 52.41 \text{ кН};$$

$$G_9 = \frac{h_8 + h_9}{2} \cdot \frac{a_{cp}}{2} \cdot b \cdot \gamma_6 = \frac{1.31 + 1.5}{2} \cdot \frac{1.667}{2} \cdot 1 \cdot 24 = 28.11 \text{ кН};$$

Все нагрузки сведем в таблицу (3.5.2.).

Таблица 3.5.2. Нагрузки

Нагрузки и воздействия	Нормативное значение	γ_f	Расчетное значение
1. Вертикальные			
а) горное давление			
q , кН/м ²	347,1	1,6	555,36
Q_6 кН	22,56	1,6	36,1
Q_7 кН	22,56	1,6	36,1
б) собственный вес			
$q_{св}$	37,11	1,2	44,53
G_6	22,8	1,2	27,36
G_7	47,21	1,2	56,65
G_8	52,41	1,2	62,89
G_9	28,11	1,2	33,73
Принимаем в расчете			
$q' = q + q_{св}$			599,89
$Q_6' = Q_6 + G_6$			63,46
$Q_7' = Q_7 + G_7$			92,75
$Q_8' = G_8$			62,89
$Q_9' = G_9$			33,73
Горизонтальная нагрузка			
p_1 кН/м ²	30,06	0,7	21,04
P_6	19,5	0,7	13,65
P_7	49,15	0,7	34,41
P_8	51,4	0,7	35,98
P_9	26,3	0,7	18,41

Выбираем основную систему

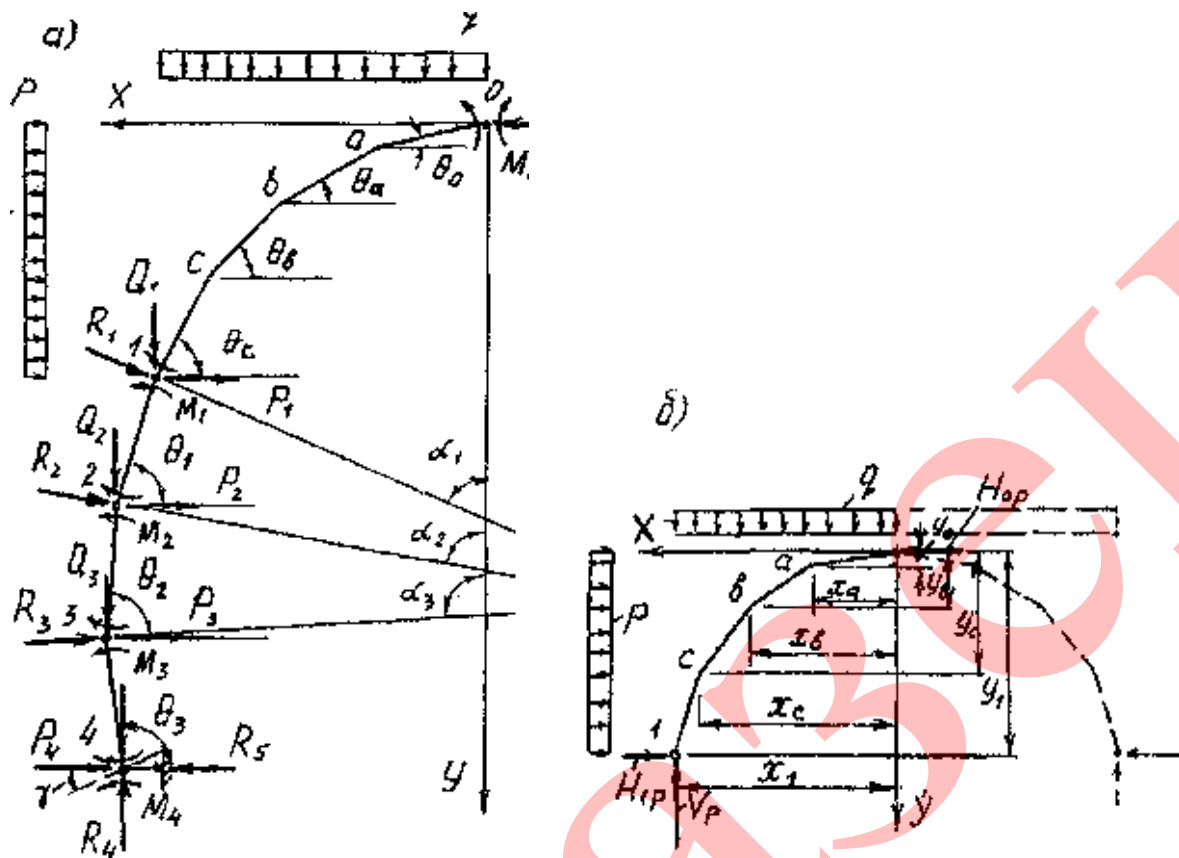


Рис. 3.5.2. Основная система симметричной обделки (а);
схема к определению усилий в основной системе от внешних нагрузок (б).

Основная система представляет собой трехшарнирную ломаную арку, опирающуюся на шарнирно-стержневую цепь на упругих опорах. Эту систему получают из расчетной схемы путем введения шарниров в вершинах с упругими опорами и в замковом сечении обделки и заменой нарушенных при этом связей парными изгибающими моментами, принимаемыми в качестве лишних неизвестных M_0, M_1, M_2, M_3, M_4 .

Составляем систему канонических уравнений:

$$\begin{aligned} M_{00} \cdot \delta_{00} + M_6 \cdot \delta_{06} + M_7 \cdot \delta_{07} + M_8 \cdot \delta_{08} + M_9 \cdot \delta_{09} + \Delta_{0p} &= 0; \\ M_0 \cdot \delta_{60} + M_6 \cdot \delta_{66} + M_7 \cdot \delta_{67} + M_8 \cdot \delta_{68} + M_9 \cdot \delta_{69} + \Delta_{6p} &= 0; \\ M_0 \cdot \delta_{70} + M_6 \cdot \delta_{76} + M_7 \cdot \delta_{77} + M_8 \cdot \delta_{78} + M_9 \cdot \delta_{79} + \Delta_{7p} &= 0; \\ M_0 \cdot \delta_{80} + M_6 \cdot \delta_{86} + M_7 \cdot \delta_{87} + M_8 \cdot \delta_{88} + M_9 \cdot \delta_{89} + \Delta_{8p} &= 0; \\ M_0 \cdot \delta_{90} + M_6 \cdot \delta_{96} + M_7 \cdot \delta_{97} + M_8 \cdot \delta_{98} + M_9 \cdot (\delta_{99} + \bar{\gamma}) + \Delta_{9p} &= 0. \end{aligned}$$

где δ_{ik} – единичное перемещение от действия единичных парных моментов;
 Δ_{ip} – грузовое перемещение в точке i от действия внешней нагрузки P ;

γ - единичное угловое перемещение пяты обделки.

3.6. Определение усилий в основной системе.

• I. Состояние «Р»

$$\begin{aligned}\sum M_6 &= H_{0p} \cdot 5.38 - q' \cdot 5.56 \cdot \frac{5.56}{2} - p \cdot 5.38 \cdot \frac{5.38}{2} = 0 \\ H_{0p} &= \frac{1}{5.38} \cdot (599.89 \cdot 5.56 \cdot \frac{5.56}{2} + 21.04 \cdot 5.38 \cdot \frac{5.38}{2}) = 1780.088 \text{ кН} \\ \sum X &= H_{0p} - H_{6p} - p \cdot 5.38 = 0 \\ H_{6p} &= 1780.088 - 21.04 \cdot 5.38 = 1666.893 \text{ кН} \\ \sum Y &= q' \cdot 5.56 - V = 0 \\ V &= 599.89 \cdot 5.56 = 3335.388 \text{ кН}\end{aligned}$$

Определяем значения моментов в каждой точке:

$$\begin{aligned}M_{1p} &= H_{0p} \cdot y_1 - q' \cdot \frac{x_1^2}{2} - p \cdot \frac{y_1^2}{2} = 1780.088 \cdot 0.08 - 599.89 \cdot \frac{1.43^2}{2} - 21.04 \cdot \frac{0.08^2}{2} = -471.018 \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ M_{2p} &= H_{0p} \cdot y_2 - q' \cdot \frac{x_2^2}{2} - p \cdot \frac{y_2^2}{2} = 1780.088 \cdot 0.55 - 599.89 \cdot \frac{2.83^2}{2} - 21.04 \cdot \frac{0.55^2}{2} = -1426.363 \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ M_{3p} &= H_{0p} \cdot y_3 - q' \cdot \frac{x_3^2}{2} - p \cdot \frac{y_3^2}{2} = 1780.088 \cdot 1.5 - 599.89 \cdot \frac{3.88^2}{2} - 21.04 \cdot \frac{1.5^2}{2} = -1869.03 \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ M_{4p} &= H_{0p} \cdot y_4 - q' \cdot \frac{x_4^2}{2} - p \cdot \frac{y_4^2}{2} = 1780.088 \cdot 2.63 - 599.89 \cdot \frac{4.65^2}{2} - 21.04 \cdot \frac{2.63^2}{2} = -1876.694 \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ M_{5p} &= H_{0p} \cdot y_5 - q' \cdot \frac{x_5^2}{2} - p \cdot \frac{y_5^2}{2} = 1780.088 \cdot 3.84 - 599.89 \cdot \frac{5.18^2}{2} - 21.04 \cdot \frac{3.84^2}{2} = -1367.829 \text{ кН} \cdot \text{м};\end{aligned}$$

Вычисляем сжимающие силы в каждом стержне:

$$\begin{aligned}N_{np} &= H_{0p} \cdot \cos \theta_n + q' \cdot \sin \theta_n \cdot x_{n+1} - p \cdot \cos \theta_n \cdot y_{n+1} \\ N_{0p} &= 1780.088 \cdot \cos(3.2) + 599.89 \cdot \sin(3.2) \cdot 1.43 - 21.04 \cdot \cos(3.2) \cdot 0.08 = 1823.5449 \text{ кН}; \\ N_{1p} &= 1780.088 \cdot \cos(18.56) + 599.89 \cdot \sin(18.56) \cdot 2.83 - 21.04 \cdot \cos(18.56) \cdot 0.55 = 2216.8643 \text{ кН}; \\ N_{2p} &= 1780.088 \cdot \cos(42.14) + 599.89 \cdot \sin(42.14) \cdot 3.88 - 21.04 \cdot \cos(42.14) \cdot 1.5 = 2858.1961 \text{ кН}; \\ N_{3p} &= 1780.088 \cdot \cos(55.73) + 599.89 \cdot \sin(55.73) \cdot 4.65 - 21.04 \cdot \cos(55.73) \cdot 2.63 = 3276.4087 \text{ кН}; \\ N_{4p} &= 1780.088 \cdot \cos(66.35) + 599.89 \cdot \sin(66.35) \cdot 5.18 - 21.04 \cdot \cos(66.35) \cdot 3.84 = 3528.1389 \text{ кН}; \\ N_{5p} &= 1780.088 \cdot \cos(76.14) + 599.89 \cdot \sin(76.14) \cdot 5.56 - 21.04 \cdot \cos(76.14) \cdot 5.38 = 3637.5945 \text{ кН};\end{aligned}$$

Определяем усилия в отпорной цепи. Их вычисляем путем вырезания узлов и составлением проекций на определенное направление:

Узел 6

$$N_{6p} = \frac{1}{\cos(\theta_6 - \alpha_6)} \cdot (-(P_6 - H_{6p}) \cdot \cos \alpha_6 + (V_{6p} + Q'_6) \cdot \sin \alpha_6) = \frac{1}{\cos(85.35 - 80.75)} \times$$

$$\times (-(13.65 - 1666.893) \cdot \cos(80.75) + (3335.388 + 63.46) \cdot \sin(80.75)) = 3632.1957$$

$$R_{6p} = \frac{1}{\cos(\theta_6 - \alpha_6)} \cdot (-(Q'_6 + V_{6p}) \cdot \cos \alpha_6 - (P_6 - H_{6p}) \cdot \sin \alpha_6) = \frac{1}{\cos(85.35 - 80.75)} \times$$

$$\times (-(63.46 + 3335.388) \cdot \cos(80.75) - (13.65 - 1666.893) \cdot \sin(80.75)) = 1377.0145$$

Узел 7

$$N_{7p} = \frac{1}{\cos(\theta_7 - \alpha_7)} \cdot [Q'_7 \cdot \sin \alpha_7 - P_7 \cdot \cos \alpha_7 + N_{6p} \cdot \cos(\alpha_7 - \theta_6)]$$

$$N_{7p} = \frac{1}{\cos(91.71 - 88.53)} \cdot (92.75 \cdot \sin 88.53 - 34.41 \cdot \cos 88.53 + 3632.1957 \times$$

$$\times \cos(88.53 - 85.35)) = 3724.1772 \text{ кН}$$

$$R_{7p} = \frac{1}{\cos(\theta_7 - \alpha_7)} \cdot [-Q'_7 \cdot \cos \theta_7 - P_7 \cdot \sin \theta_7 + N_{6p} \cdot \sin(\theta_7 - \theta_6)]$$

$$R_{7p} = \frac{1}{\cos(91.71 - 88.53)} \cdot (-92.75 \cdot \cos 91.71 - 34.41 \cdot \sin 91.71 + 3632.1957 \times$$

$$\times \cos(91.71 - 85.35)) = 371.3103 \text{ кН}$$

Узел 8

$$N_{8p} = \frac{1}{\cos(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot [Q'_8 \cdot \sin \alpha_8 - P_8 \cdot \cos \alpha_8 + N_{7p} \cdot \cos(\alpha_8 - \theta_7)]$$

$$N_{8p} = \frac{1}{\cos(94.57 - 93.14)} \cdot (62.89 \cdot \sin 93.14 - 35.98 \cdot \cos 93.14 + 3724.1772 \times$$

$$\times \cos(93.14 - 91.71)) = 3788.9663 \text{ кН}$$

$$R_{8p} = \frac{1}{\cos(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot [-Q'_8 \cdot \cos \theta_8 - P_8 \cdot \sin \theta_8 + N_{7p} \cdot \sin(\theta_8 - \theta_7)]$$

$$R_{8p} = \frac{1}{\cos(94.57 - 93.14)} \cdot (-62.89 \cdot \cos 94.57 - 35.98 \cdot \sin 94.57 + 3724.1772 \times$$

$$\times \cos(94.57 - 91.71)) = 154.9529 \text{ кН}$$

$$R_{9p} = Q'_9 + N_{8p} \cdot \cos(\theta_8 - 90) = 33.73 + 3788.9663 \cdot \cos(94.57 - 90) = 3810.6295 \text{ кН};$$

$$R'_{9p} = P_9 + N_{8p} \cdot \sin(\theta_8 - 90) = 33.73 + 3788.9663 \cdot \sin(94.57 - 90) = 320.5620 \text{ кН}..$$

Проверка правильности определения усилий состояния «Р»

$$\sum X = H_{0p} - p \cdot y_6 - P_6 - P_7 - P_8 - P_9 - R_{6p} \cdot \sin \alpha_6 - R_{7p} \cdot \sin \alpha_7 - R_{8p} \cdot \sin \alpha_8 + R'_{9p}$$

$$\sum X = 1780.088 - 21.04 \cdot 5.38 - 13.65 - 34.41 - 35.98 - 18.41 - 1377.0145 \cdot \sin 80.75 - 371.3103 \cdot \sin 88.53 - 154.95 \cdot \sin 93.14 + 320.562 = 0,009 \approx 0$$

$$\sum Y = q' \cdot X_6 + R_{6p} \cdot \cos \alpha_6 + R_{7p} \cdot \cos \alpha_7 + R_{8p} \cdot \cos \alpha_8 - R_{9p} + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9$$

$$\sum Y = 599.89 \cdot 5.56 + 1377.0145 \cdot \cos 80.75 + 371.3103 \cdot \cos 88.53 + 154.95 \cdot \cos 93.14 + 63.46 + 92.75 + 62.89 + 33.73 - 3810.6295 = 0.028 \approx 0$$

При этом ошибка не должна превышать 3%

$$\Delta = \frac{(|A_1| - |A_2|) \cdot 2}{|A_1| + |A_2|} \cdot 100\% \leq 3\%$$

где A_1 и A_2 – суммы слагаемых одного знака.

$$\Delta_x = \frac{(|A_1| - |A_2|) \cdot 2}{|A_1| + |A_2|} \cdot 100\% = \frac{(2100.659 - 2100.65) \cdot 2}{2100.659 + 2100.65} \cdot 100\% = 0.0002\% \leq 3\%$$

$$\Delta_y = \frac{(|A_1| - |A_2|) \cdot 2}{|A_1| + |A_2|} \cdot 100\% = \frac{(3819.089 - 3819.117) \cdot 2}{3819.089 + 3819.117} \cdot 100\% = 0.00037\% \leq 3\%$$

• II. Состояние «0»

$$\sum M_6 = 0; \Rightarrow 1 + H_{00} \cdot y_6 = 0$$

$$H_{00} = -\frac{1}{y_6} = -\frac{1}{5.38} = -0,186 \text{ кН};$$

Определяем значения моментов в каждой точке:

$$M_{10} = 1 - \frac{y_1}{y_6} = 1 - \frac{0.08}{5.38} = 0.985 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{20} = 1 - \frac{y_2}{y_6} = 1 - \frac{0.55}{5.38} = 0.898 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{30} = 1 - \frac{y_3}{y_6} = 1 - \frac{1.5}{5.38} = 0.721 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{40} = 1 - \frac{y_4}{y_6} = 1 - \frac{2.63}{5.38} = 0.511 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{50} = 1 - \frac{y_5}{y_6} = 1 - \frac{3.84}{5.38} = 0.286 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

Вычисляем сжимающие силы в каждом стержне:

$$N_{00} = -\frac{1}{y_6} \cdot \text{Cos} \theta_0 = -\frac{1}{5.38} \cdot \cos 3.2 = -0.1856 \text{ кН};$$

$$N_{10} = -\frac{1}{y_6} \cdot \text{Cos} \theta_1 = -\frac{1}{5.38} \cdot \cos 18.56 = -0,1762 \text{ кН};$$

$$N_{20} = -\frac{1}{y_6} \cdot \text{Cos} \theta_2 = -\frac{1}{5.38} \cdot \cos 42.14 = -0,1378 \text{ кН};$$

$$N_{30} = -\frac{1}{y_6} \cdot \text{Cos} \theta_3 = -\frac{1}{5.38} \cdot \cos 55.73 = -0.1047 \text{ кН};$$

$$N_{40} = -\frac{1}{y_6} \cdot \text{Cos} \theta_4 = -\frac{1}{5.38} \cdot \cos 66.35 = -0.0746 \text{ кН};$$

$$N_{50} = -\frac{1}{y_6} \cdot \text{Cos} \theta_5 = -\frac{1}{5.38} \cdot \cos 76.14 = -0.0445 \text{ кН};$$

Узел 6

$$N_{60} = \frac{1}{\text{Cos}(\theta_6 - \alpha_6)} \cdot -\frac{1}{y_6} \cdot \text{Cos} \alpha_6 = \frac{1}{\text{Cos}(85.35 - 80.75)} \cdot -\frac{1}{5.38} \cdot \text{Cos} 80.75 = -0,03 \text{ кН};$$

$$R_{60} = \frac{1}{\text{Cos}(\theta_6 - \alpha_6)} \cdot -\frac{1}{y_6} \sin \alpha_6 = \frac{1}{\text{Cos}(85.35 - 80.75)} \cdot -\frac{1}{5.38} \cdot \sin 80.75 = -0,1859 \text{ кН}$$

Узел 7

$$N_{70} = \frac{1}{\text{Cos}(\theta_7 - \alpha_7)} \cdot N_{60} \cdot \text{Cos}(\alpha_7 - \theta_6) = \frac{1}{\text{Cos}(91.71 - 88.53)} \cdot -0.03 \times$$

$$\times \text{Cos}(88.53 - 85.35) = -0,03 \text{ кН};$$

$$R_{70} = \frac{1}{\text{Cos}(\theta_7 - \alpha_7)} \cdot N_{60} \cdot \text{Sin}(\theta_7 - \theta_6) = \frac{1}{\text{Cos}(91.71 - 88.53)} \cdot -0.039 \times$$

$$\times \sin(91.71 - 85.35) = -0,0033 \text{ кН};$$

Узел 8

$$N_{80} = \frac{1}{\text{Cos}(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot N_{80} \cdot \text{Cos}(\alpha_8 - \theta_7) = \frac{1}{\text{Cos}(94.57 - 93.14)} \cdot -0.03 \times$$

$$\times \text{Cos}(93.14 - 91.71) = -0,03 \text{ кН};$$

$$R_{80} = \frac{1}{\text{Cos}(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot N_{80} \cdot \text{Sin}(\theta_8 - \theta_7) = \frac{1}{\text{Cos}(94.57 - 93.14)} \cdot -0.03 \times$$

$$\times \sin(94.57 - 91.71) = -0,0015 \text{ кН};$$

Узел 9

$$R_{90} = N_{80} \cdot \cos(\theta_8 - 90) = (-0,03) \cdot \cos(94,57 - 90) = -0,0299 \text{ кН};$$

$$R'_{90} = N_{80} \cdot \sin(\theta_8 - 90) = (-0,03) \cdot \sin(94,57 - 90) = -0,0024 \text{ кН}$$

• III. Состояние «б»

$$\sum M_6 = 0; \Rightarrow -1 + H_{06} \cdot y_6 = 0$$

$$H_{06} = H_{66} = \frac{1}{y_6} = \frac{1}{5,38} = 0,186 \text{ кН};$$

Определяем значения моментов в каждой точке:

$$M_{16} = \frac{y_1}{y_6} = \frac{0,08}{5,38} = 0,015 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{26} = \frac{y_2}{y_6} = \frac{0,55}{5,38} = 0,102 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{36} = \frac{y_3}{y_6} = \frac{1,5}{5,38} = 0,279 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{46} = \frac{y_4}{y_6} = \frac{2,63}{5,38} = 0,489 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{56} = \frac{y_5}{y_6} = \frac{3,84}{5,38} = 0,714 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

Вычисляем сжимающие силы в каждом стержне:

$$N_{06} = \frac{1}{y_6} \cdot \cos \theta_0 = \frac{1}{5,38} \cdot \cos 3,2 = 0,1856 \text{ кН};$$

$$N_{16} = \frac{1}{y_6} \cdot \cos \theta_1 = \frac{1}{5,38} \cdot \cos 18,56 = 0,1762 \text{ кН};$$

$$N_{26} = \frac{1}{y_6} \cdot \cos \theta_2 = \frac{1}{5,38} \cdot \cos 42,14 = 0,1378 \text{ кН};$$

$$N_{36} = \frac{1}{y_6} \cdot \cos \theta_3 = \frac{1}{5,38} \cdot \cos 55,73 = 0,1047 \text{ кН};$$

$$N_{46} = \frac{1}{y_6} \cdot \cos \theta_4 = \frac{1}{5,38} \cdot \cos 66,35 = 0,0746 \text{ кН};$$

$$N_{56} = \frac{1}{y_6} \cdot \cos \theta_5 = \frac{1}{5,38} \cdot \cos 76,14 = 0,0445 \text{ кН};$$

Узел 6

$$N_n = \frac{1}{\cos(\theta_n - \alpha_n)} \cdot \left[H_{66} \cdot \cos \alpha_n + N_{n+1} \cdot \cos(\alpha_n - \theta_{n-1}) - \frac{1}{a_{n-1}} \cdot \sin(\alpha_n - \theta_{n-1}) + \frac{1}{a_n} \cdot \sin(\theta_n - \alpha_n) \right];$$

$$N_n = \frac{1}{\cos(\theta_n - \alpha_n)} \cdot \left[H_{66} \cdot \sin \theta_n + N_{n+1} \cdot \sin(\theta_n - \theta_{n-1}) + \frac{1}{a_{n-1}} \cdot \cos(\theta_n - \theta_{n-1}) + \frac{1}{a_n} \right];$$

$$N_{66} = \frac{1}{\cos(\theta_6 - \alpha_6)} \cdot \left[H_{66} \cdot \cos \alpha_6 + \frac{1}{a_6} \cdot \sin(\theta_6 - \alpha_6) \right];$$

$$N_{66} = \frac{1}{\cos(85.35 - 80.75)} \cdot \left[0.186 \cdot \cos 80.75 + \frac{1}{1.605} \cdot \sin(85.35 - 80.75) \right] = 0.0802;$$

$$R_{66} = \frac{1}{\cos(\theta_6 - \alpha_6)} \cdot \left[H_{66} \cdot \sin \theta_6 + \frac{1}{a_6} \right] = \frac{1}{\cos(85.35 - 80.75)} \cdot \left[0.186 \cdot \sin 85.35 + \frac{1}{1.605} \right] = 0.8108;$$

Узел 7

$$N_{76} = \frac{1}{\cos(\theta_7 - \alpha_7)} \cdot \left[N_{66} \cdot \cos(\alpha_7 - \theta_6) + \frac{1}{a_6} \cdot \sin(\alpha_7 - \theta_6) \right];$$

$$N_{76} = \frac{1}{\cos(91.71 - 88.53)} \cdot \left[0.0802 \cdot \cos(88.53 - 85.35) + \frac{1}{1.605} \cdot \sin(88.53 - 85.35) \right] = 0.1148 \text{ кН};$$

$$R_{76} = \frac{1}{\cos(\theta_7 - \alpha_7)} \cdot \left[N_{66} \cdot \sin(\theta_7 - \theta_6) - \frac{1}{a_6} \cos(\theta_7 - \theta_6) \right]$$

$$R_{76} = \frac{1}{\cos(91.71 - 88.53)} \cdot \left[0.0802 \cdot \sin(91.71 - 85.35) - \frac{1}{1.605} \cdot \cos(91.71 - 85.35) \right] = -0.6112 \text{ кН}.$$

Узел 8

$$N_{86} = \frac{1}{\cos(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot N_{76} \cdot \cos(\alpha_8 - \theta_7) = \frac{1}{\cos(94.57 - 93.14)} \cdot (0.1148) \times$$

$$\times \cos(93.14 - 91.716) = 0.1148 \text{ кН};$$

$$R_{86} = \frac{1}{\cos(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot N_{76} \cdot \sin(\theta_8 - \theta_7) = \frac{1}{\cos(94.57 - 93.14)} \times$$

$$\times (0.1148 \cdot \sin(94.57 - 91.71)) = 0.0057 \text{ кН}.$$

Узел 9

$$R_{96} = N_{86} \cdot \cos(\theta_8 - 90) = 0.1148 \cdot \cos(94.57 - 90) = 0.1144 \text{ кН};$$

$$R'_{96} = N_{86} \cdot \sin(\theta_8 - 90) = 0.1148 \cdot \sin(94.57 - 90) = 0.0092 \text{ кН}..$$

• IV. Состояние «7»

Узел 6

$$N_{67} = \frac{1}{\cos(\theta_6 - \alpha_6)} \cdot \left[-\frac{1}{a_6} \cdot \sin(\theta_6 - \alpha_6) \right] = \frac{1}{\cos(85.35 - 80.75)} \times$$

$$\times \left[-\frac{1}{1.605} \sin(85.35 - 80.75) \right] = -0,0502 \text{ кН};$$

$$R_{67} = \frac{1}{\cos(\theta_6 - \alpha_6)} \cdot \left[-\frac{1}{a_6} \right] = \frac{1}{\cos(85.35 - 80.75)} \cdot \left[-\frac{1}{1.605} \right] = -0,625 \text{ кН};$$

Узел 7

$$N_{77} = \frac{1}{\cos(\theta_7 - \alpha_7)} \cdot \left[N_{67} \cdot \cos(\alpha_7 - \theta_6) - \frac{1}{a_6} \cdot \sin(\alpha_7 - \theta_6) + \frac{1}{a_7} \cdot \sin(\theta_7 - \alpha_6) \right];$$

$$N_{77} = \frac{1}{\cos(91.71 - 88.53)} \cdot \left[(-0.0502) \cdot \cos(88.53 - 85.35) - \frac{1}{1.605} \sin(88.53 - 85.35) + \right.$$

$$\left. \frac{1}{1.671} \cdot \sin(91.71 - 80.75) \right] = -0,0516 \text{ кН};$$

$$R_{77} = \frac{1}{\cos(\theta_7 - \alpha_7)} \cdot \left[N_{67} \cdot \sin(\theta_7 - \theta_6) + \frac{1}{a_6} \cos(\theta_7 - \theta_6) + \frac{1}{a_7} \right]$$

$$R_{77} = \frac{1}{\cos(91.71 - 88.53)} \cdot \left[(-0.0502) \cdot \sin(91.71 - 85.35) + \frac{1}{1.605} \cdot \cos(91.71 - 85.35) + \frac{1}{1.671} \right] =$$

$$= 1.214 \text{ кН}.$$

Узел 8

$$N_{87} = \frac{1}{\cos(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot \left[N_{77} \cdot \cos(\alpha_8 - \theta_7) + \frac{1}{a_7} \cdot \sin(\alpha_8 - \theta_7) \right];$$

$$N_{87} = \frac{1}{\cos(94.57 - 93.14)} \cdot \left[(-0,0516) \cdot \cos(93.14 - 91.71) + \frac{1}{1.671} \cdot \sin(93.14 - 91.71) \right] =$$

$$= -0,0366 \text{ кН};$$

$$R_{87} = \frac{1}{\cos(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot \left[N_{77} \cdot \sin(\theta_8 - \theta_7) - \frac{1}{a_7} \cdot \cos(\theta_8 - \theta_7) \right]$$

$$R_{87} = \frac{1}{\cos(94.57 - 93.14)} \cdot \left[(-0,0516) \cdot \sin(94.57 - 91.71) - \frac{1}{1.671} \cdot \cos(94.57 - 91.71) \right] =$$

$$= -0,6005 \text{ кН}.$$

Узел 9

$$R_{97} = N_{87} \cdot \cos(\theta_8 - 90) = (-0,0366) \cdot \cos(94.57 - 90) = -0,0365 \text{ кН};$$

$$R'_{97} = N_{87} \cdot \sin(\theta_8 - 90) = (-0,0366) \cdot \sin(94.57 - 90) = -0,0029 \text{ кН}.$$

- V. Состояние «8»

Узел 6

$$N_{68} = 0 \text{ кН};$$

$$R_{68} = 0 \text{ кН}.$$

Узел 7

$$N_{78} = \frac{1}{\cos(\theta_7 - \alpha_7)} \cdot \left[-\frac{1}{a_7} \cdot \sin(\theta_7 - \alpha_7) \right] = \frac{1}{\cos(91.71 - 88.53)} \times$$

$$\times \left[-\frac{1}{1.671} \cdot \sin(91.71 - 88.53) \right] = -0,0333 \text{ кН};$$

$$R_{78} = \frac{1}{\cos(\theta_7 - \alpha_7)} \cdot \left[-\frac{1}{a_7} \right] = \frac{1}{\cos(91.71 - 88.53)} \cdot \left[-\frac{1}{1.671} \right] = -0,5995 \text{ кН}.$$

Узел 8

$$N_{88} = \frac{1}{\cos(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot \left[N_{78} \cdot \cos(\alpha_8 - \theta_7) - \frac{1}{a_6} \cdot \sin(\alpha_8 - \theta_7) + \frac{1}{a_8} \cdot \sin(\theta_8 - \alpha_8) \right];$$

$$N_{66} = \frac{1}{\cos(94.57 - 93.14)} \cdot \left[(-0,0333) \cdot \cos(93.14 - 91.71) - \frac{1}{1.605} \cdot \sin(93.14 - 91.71) + \right.$$

$$\left. \frac{1}{1.756} \cdot \sin(94.57 - 93.14) \right] = -0,0340 \text{ кН};$$

$$R_{88} = \frac{1}{\cos(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot \left[N_{78} \cdot \sin(\theta_8 - \theta_7) + \frac{1}{a_6} \cdot \cos(\theta_8 - \theta_7) + \frac{1}{a_8} \right]$$

$$R_{66} = \frac{1}{\cos(94.57 - 63.14)} \cdot \left[(-0,0333) \cdot \sin(94.57 - 91.71) + \frac{1}{1.605} \cdot \cos(94.57 - 91.71) + \frac{1}{1.756} \right] =$$

$$= 1.1661 \text{ кН}.$$

Узел 9

$$R_{98} = N_{88} \cdot \cos(\theta_8 - 90) - \frac{1}{a_8} \cdot \sin(\theta_8 - 90) = (-0,034) \cdot \cos(94.57 - 90) -$$

$$-\frac{1}{1.756} \cdot \sin(94.57 - 90) = -0,0793 \text{ кН};$$

$$R'_{98} = N_{88} \sin(\theta_8 - 90) + \frac{1}{a_8} \cdot \cos(\theta_8 - 90);$$

$$R'_{76} = (-0,0340) \cdot \sin(94.57 - 90) + \frac{1}{1.756} \cdot \cos(94.57 - 90) = 0.5651 \text{ кН}..$$

- VI. Состояние «9»

Узел 6

$$N_{69} = 0 \text{ кН};$$

$$R_{69} = 0 \text{ кН}.$$

Узел 7

$$N_{79} = 0 \text{ кН};$$

$$R_{79} = 0 \text{ кН}.$$

Узел 8

$$N_{89} = \frac{1}{\cos(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot \left[-\frac{1}{a_8} \cdot \sin(\theta_8 - \alpha_8) \right] = \frac{1}{\cos(94.57 - 93.14)} \times$$
$$\times \left[-\frac{1}{1.756} \cdot \sin(94.57 - 93.14) \right] = -0.0142 \text{ кН};$$

$$R_{89} = \frac{1}{\cos(\theta_8 - \alpha_8)} \cdot \left[-\frac{1}{a_8} \right] = \frac{1}{\cos(94.57 - 93.14)} \cdot \left[-\frac{1}{1.756} \right] = -0,5698 \text{ кН}.$$

Узел 9

$$R_{99} = N_{89} \cdot \cos(\theta_8 - 90) + \frac{1}{a_8} \cdot \sin(\theta_8 - 90);$$

$$R_{99} = (-0.0142) \cdot \cos(94.57 - 90) + \frac{1}{1.756} \cdot \sin(94.57 - 90) = 0,0313 \text{ кН};$$

$$R'_{99} = N_{89} \cdot \sin(\theta_8 - 90) - \frac{1}{a_8} \cdot \cos(\theta_8 - 90);$$

$$R'_{99} = (-0.0142) \cdot \sin(94.57 - 90) - \frac{1}{1.756} \cdot \cos(94.576 - 90) = -0,5689 \text{ кН}..$$

3.7. Определение перемещений основной системы

Перемещения основной системы определяют по общей формуле строительной механики, преобразованной для стержневой системы на упругих опорах. При этом вычисляют перемещения, увеличенные в E раз.

Неизвестные определяют решением канонических уравнений, каждое из которых отрицает возможность перемещений по направлению удаленной связи (равенство нулю угла взаимного поворота стержней, сходящихся в шарнире).

Для определения перемещений составим таблицу характеристик основной системы (табл. 3.7.1).

Таблица 3.7.1. Характеристики основной системы

№	h_n	h^3	a_{cp}	$\frac{a_{cp}}{A_n}$	$\frac{a_{cp}}{6 \cdot I_n}$	S_n	D_n	$\frac{E}{D_n}$
0	0,9	0,729	1,433	1,593	3,93214	1,433		
1	0,95	0,857375		1,509	3,34338			
2	0,988	0,9644303		1,451	2,97225			
3	1,0	1,0		1,433	2,86653			
4	1,032	1,099105		1,389	2,60806			
5	1,058	1,184287		1,355	2,42047			
6	1,1	1,331	1,677	1,525	2,52022	1,677	2,768974	117,37198
7	1,18	1,643032		1,421	2,041596	1,677	2,768974	117,37198
8	1,31	2,248091		1,280	1,49211	1,677	2,768974	117,37198
9						1,5	3,87672	83,83375

$$I_n = \frac{b \cdot h^3}{12};$$

$$D_n = a_n \cdot b \cdot K.$$

где K – коэффициент упругого отпора;

a_n – ширина постели равная длине стержня отпорной части.

Единичное угловое перемещение пяты обделки равно:

$$E\bar{\gamma} = \frac{E}{I_\phi \cdot K_\phi} = \frac{12 \cdot 325}{6.585 \cdot 1.5^3} = 447.1133$$

E – модуль деформации бетона (для класса В30 $E = 32.5 \cdot 10^3$ МПа).

$$\begin{aligned}
E \cdot \delta_{00}^M &= \sum \int \frac{M_0^2 ds}{I_n} = 3.932 \cdot [0,985 + 0,985 + 2 \cdot (1 \cdot 1 + 0,985^2)] + \\
&+ 3.343 \cdot [0,985 \cdot 2 \cdot 0,898 + 2 \cdot (0,985^2 + 0,898^2)] + \\
&+ 2.972 \cdot [0,898 \cdot 2 \cdot 0,721 + 2 \cdot (0,898^2 + 0,721^2)] + 2.867 \cdot [0,721 \cdot 2 \cdot 0,511 + 2 \cdot (0,721^2 + 0,511^2)] + \\
&+ 2.608 \cdot [0,511 \cdot 2 \cdot 0,286 + 2 \cdot (0,286^2 + 0,511^2)] + 2.420 \cdot 2 \cdot 0,286^2 = 62.312
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E \cdot \delta_{66}^M &= \sum \int \frac{M_6^2 ds}{I_n} = 3.932 \cdot [2 \cdot (0,015^2)] + \\
&+ 3.343 \cdot [0,015 \cdot 2 \cdot 0,102 + 2 \cdot (0,015^2 + 0,102^2)] + \\
&+ 2.972 \cdot [0,102 \cdot 2 \cdot 0,279 + 2 \cdot (0,102^2 + 0,279^2)] + 2.867 \cdot [0,279 \cdot 2 \cdot 0,489 + 2 \cdot (0,279^2 + 0,489^2)] + \\
&+ 2.608 \cdot [0,489 \cdot 2 \cdot 0,714 + 2 \cdot (0,489^2 + 0,714^2)] + 2.420 \cdot [0,714 \cdot 2 \cdot 0,1 + 2 \cdot (0,714^2 + 0,1^2)] = 24.901
\end{aligned}$$

$$E \cdot \delta_{77}^M = \sum \int \frac{M_7^2 ds}{I_n} = 2.52 \cdot 2 \cdot 1^2 + 2.042 \cdot 2 \cdot 1^2 = 9.124$$

$$E \cdot \delta_{88}^M = \sum \int \frac{M_8^2 ds}{I_n} = 2.042 \cdot 2 \cdot 1^2 + 1.492 \cdot 2 \cdot 1^2 = 7.067$$

$$E \cdot \delta_{99}^M = \sum \int \frac{M_9^2 ds}{I_n} = 1.492 \cdot 2 \cdot 1^2 = 2.984$$

$$\begin{aligned}
E \cdot \delta_{06}^M &= \sum \int \frac{M_0 \cdot M_6 ds}{I_n} = 3.932 \cdot [0,015 \cdot 1 + 2 \cdot (0,985 \cdot 0,015)] + \\
&+ 3.343 \cdot [0,985 \cdot 0,102 + 0,898 \cdot 0,015 + 2 \cdot (0,985 \cdot 0,015 + 0,898 \cdot 0,102)] + \\
&+ 2.972 \cdot [0,898 \cdot 0,279 + 0,721 \cdot 0,102 + 2 \cdot (0,898 \cdot 0,102 + 0,721 \cdot 0,279)] + \\
&+ 2.867 \cdot [0,721 \cdot 0,489 + 0,511 \cdot 0,279 + 2 \cdot (0,721 \cdot 0,279 + 0,511 \cdot 0,489)] + \\
&+ 2.608 \cdot [0,511 \cdot 0,714 + 0,286 \cdot 0,489 + 2 \cdot (0,511 \cdot 0,489 + 0,286 \cdot 0,714)] + \\
&+ 2.42 \cdot [0,286 \cdot 1 + 2 \cdot 0,286 \cdot 0,714] = 13.343
\end{aligned}$$

$$E \cdot \delta_{67}^M = \sum \int \frac{M_6 \cdot M_7 ds}{I_n} = 2.52 \cdot 1 \cdot 1 = 2.52$$

$$E \cdot \delta_{78}^M = \sum \int \frac{M_7 \cdot M_8 ds}{I_n} = 2.042 \cdot 1 \cdot 1 = 2.042$$

$$E \cdot \delta_{89}^M = \sum \int \frac{M_8 \cdot M_9 ds}{I_n} = 1.492 \cdot 1 \cdot 1 = 1.492$$

$$\begin{aligned}
E \cdot \Delta_{0p}^M &= \sum \int \frac{M_0 \cdot M_p ds}{I_n} = -3.932 \cdot [471.018 \cdot 1 + 2 \cdot 0,985 \cdot 471.018] - \\
&- 3.343 \cdot [471.018 \cdot 0,898 + 0,985 \cdot 1426.363 + 2 \cdot (0,985 \cdot 471.018 + 0,898 \cdot 1426.363)] - \\
&- 2.972 \cdot [1426.363 \cdot 0,721 + 0,898 \cdot 1869.030 + 2 \cdot (0,898 \cdot 1426.363 + 0,721 \cdot 1869.030)] - \\
&- 2.867 \cdot [1869.030 \cdot 0,511 + 0,721 \cdot 1876.694 + 2 \cdot (0,721 \cdot 1869.030 + 0,511 \cdot 1876.694)] - \\
&- 2.608 \cdot [1876.694 \cdot 0,286 + 0,511 \cdot 1367.829 + 2 \cdot (0,511 \cdot 1876.694 + 0,286 \cdot 1367.829)] - \\
&- 2.420 \cdot [2 \cdot 0,286 \cdot 1367.829] = -78959.658
\end{aligned}$$

$$E \cdot \Delta_{6p}^M = \sum \int \frac{M_6 \cdot M_p ds}{I_n} = -3.932 \cdot [2 \cdot 0,015 \cdot 471.018] -$$

$$- 3.343 \cdot [471.018 \cdot 0,102 + 0,015 \cdot 1426.363 + 2 \cdot (0,015 \cdot 471.018 + 0,102 \cdot 1426.363)] -$$

$$- 2.972 \cdot [1426.363 \cdot 0,279 + 0,102 \cdot 1869.030 + 2 \cdot (0,102 \cdot 1426.363 + 0,279 \cdot 1869.030)] -$$

$$- 2.867 \cdot [1869.030 \cdot 0,489 + 0,279 \cdot 1876.694 + 2 \cdot (0,279 \cdot 1869.030 + 0,489 \cdot 1876.694)] -$$

$$- 2.608 \cdot [1876.694 \cdot 0,714 + 0,489 \cdot 1367.829 + 2 \cdot (0,489 \cdot 1876.694 + 0,714 \cdot 1367.829)] -$$

$$- 2.420 \cdot [1367.829 \cdot 1 + 2 \cdot 0,714 \cdot 1367.829] = -42541.577$$

$$E \cdot \delta_{00}^N = \frac{(-0.1856)^2}{1} \cdot 1.593 + 1.509 \cdot \frac{(-0.1762)^2}{1} + \frac{(-0.1378)^2}{1} \cdot 1.451 +$$

$$+ 1.433 \cdot \frac{(-0.1047)^2}{1} + 1.389 \cdot \frac{(-0.0746)^2}{1} + 1.355 \cdot \frac{(-0.0445)^2}{1} + 1.525 \cdot \frac{(-0.03)^2}{1} +$$

$$+ 1.421 \cdot \frac{(-0.03)^2}{1} + 1.28 \cdot \frac{(-0.03)^2}{1} = 0.1592$$

$$E \cdot \delta_{66}^N = \frac{(0.1856)^2}{1} \cdot 1.593 + 1.509 \cdot \frac{(0.1762)^2}{1} + \frac{(0.1378)^2}{1} \cdot 1.451 +$$

$$+ 1.433 \cdot \frac{(0.1047)^2}{1} + 1.389 \cdot \frac{(0.0746)^2}{1} + 1.355 \cdot \frac{(0.0445)^2}{1} + 1.525 \cdot \frac{(0.0802)^2}{1} +$$

$$+ 1.421 \cdot \frac{(0.1148)^2}{1} + 1.28 \cdot \frac{(0.1148)^2}{1} = 0.2008$$

$$E \cdot \delta_{77}^N = 1.525 \cdot \frac{(-0.0502)^2}{1} + 1.421 \cdot \frac{(-0.0516)^2}{1} + 1.28 \cdot \frac{(-0.0366)^2}{1} = 0.0093$$

$$E \cdot \delta_{88}^N = 1.421 \cdot \frac{(-0.0333)^2}{1} + 1.28 \cdot \frac{(-0.034)^2}{1} = 0.00305$$

$$E \cdot \delta_{99}^N = 1.28 \cdot \frac{(-0.0142)^2}{1} = 0.000259$$

$$E \cdot \delta_{06}^N = -\frac{(0.1856)^2}{1} \cdot 1.593 - 1.509 \cdot \frac{(0.1762)^2}{1} - \frac{(0.1378)^2}{1} \cdot 1.451 - 1.433 \cdot \frac{(0.1047)^2}{1} -$$

$$- 1.389 \cdot \frac{(0.0746)^2}{1} - 1.355 \cdot \frac{(0.0445)^2}{1} - 1.525 \cdot \frac{(-0,03 \cdot 0.0802)}{1} + 1.421 \cdot \frac{(-0,03 \cdot 0.1148)}{1} +$$

$$+ 1.28 \cdot \frac{(-0,03 \cdot 0.1148)}{1} = -0.16833$$

$$E \cdot \delta_{07}^N = 1.525 \cdot \frac{(-0,03 \cdot -0.0502)}{1} + 1.421 \cdot \frac{(-0,03 \cdot -0.0516)}{1} + 1.28 \cdot \frac{(-0,03 \cdot -0.0366)}{1} =$$

$$= 0.0059$$

$$E \cdot \delta_{08}^N = 1.421 \cdot \frac{(-0,03 \cdot -0.0333)}{1} + 1.28 \cdot \frac{(-0,03 \cdot -0.034)}{1} = 0.00272$$

$$E \cdot \delta_{09}^N = 1.28 \cdot \frac{(-0,03 \cdot -0.0142)}{1} = 0.000546$$

$$E \cdot \delta_{67}^N = 1.525 \cdot \frac{(0.0802 \cdot -0.0502)}{1} + 1.421 \cdot \frac{(0.1148 \cdot -0.0516)}{1} + 1.28 \cdot \frac{(0.1148 \cdot -0.0366)}{1} = -0,01994$$

$$E \cdot \delta_{68}^N = 1.421 \cdot \frac{(0.1148 \cdot -0.0333)}{1} + 1.28 \cdot \frac{(0.1148 \cdot -0.0340)}{1} = -0,01042$$

$$E \cdot \delta_{69}^N = 1.28 \cdot \frac{(0.1148 \cdot -0.0142)}{1} = -0.002089$$

$$E \cdot \delta_{78}^N = 1.421 \cdot \frac{(-0.0516 \cdot -0.0333)}{1} + 1.28 \cdot \frac{(-0.0366 \cdot -0.0340)}{1} = 0,00403$$

$$E \cdot \delta_{79}^N = 1.28 \cdot \frac{(-0.0366 \cdot -0.0142)}{1} = 0.000667$$

$$E \cdot \delta_{89}^N = 1.28 \cdot \frac{(-0.034 \cdot -0.0142)}{1} = 0.000618$$

$$E \cdot \Delta_{0p}^N = \frac{(-0.1856) \cdot 1823.5449}{1} \cdot 1.593 + 1.509 \cdot \frac{(-0.1762) \cdot 2216.8643}{1} + \frac{(-0,1378) \cdot 2858.1961}{1} \cdot 1.451 +$$

$$+ 1.433 \cdot \frac{(-0,1047) \cdot 3276.4087}{1} + 1.389 \cdot \frac{(-0,0746) \cdot 3528.1389}{1} + 1.355 \cdot \frac{(-0,0445) \cdot 3637.5945}{1} +$$

$$+ 1.525 \cdot \frac{(-0,03) \cdot 3632.1957}{1} + 1.421 \cdot \frac{(-0,03) \cdot 3724.1772}{1} + 1.28 \cdot \frac{(-0,03) \cdot 3788.9663}{1} = -3246.3726$$

$$E \cdot \Delta_{6p}^N = \frac{(0.1856) \cdot 1823.5449}{1} \cdot 1.593 + 1.509 \cdot \frac{(0.1762) \cdot 2216.8643}{1} + \frac{(0,1378) \cdot 2858.1961}{1} \cdot 1.451 +$$

$$+ 1.433 \cdot \frac{(0,1047) \cdot 3276.4087}{1} + 1.389 \cdot \frac{(0,0746) \cdot 3528.1389}{1} + 1.355 \cdot \frac{(0,0445) \cdot 3637.5945}{1} +$$

$$+ 1.525 \cdot \frac{(0.0802) \cdot 3632.1957}{1} + 1.421 \cdot \frac{(0.1148) \cdot 3724.1772}{1} + 1.28 \cdot \frac{(0.1148) \cdot 3788.9663}{1} = 4384.8688$$

$$E \cdot \Delta_{7p}^N = 1.525 \cdot \frac{(-0.0502) \cdot 3632.1957}{1} + 1.421 \cdot \frac{(-0.0516) \cdot 3724.1772}{1} + 1.28 \cdot \frac{(-0.0366) \cdot 3788.9663}{1} =$$

$$= -728.6997$$

$$E \cdot \Delta_{8p}^N = 1.421 \cdot \frac{(-0.0333) \cdot 3724.1772}{1} + 1.28 \cdot \frac{(-0.0340) \cdot 3788.9663}{1} = -340.842$$

$$E \cdot \Delta_{9p}^N = 1.28 \cdot \frac{(-0.0142) \cdot 3788.9663}{1} = -68.9544$$

$$E \cdot \delta_{00}^R = \sum \frac{R_{nn}^2 \cdot E}{D_n} = 117.372 \cdot [(-0,1859)^2 + (-0,0033)^2 + (-0,0015)^2] + (-0,0299)^2 \cdot 83.834 = 4.1311$$

$$E \cdot \delta_{66}^R = 117.372 \cdot [(0.8108)^2 + (-0.6112)^2 + (0.0057)^2] + (0.1144)^2 \cdot 83.834 = 122.1095$$

$$E \cdot \delta_{77}^R = 117.372 \cdot [(-0,6250)^2 + (1.2140)^2 + (-0,6005)^2] + (-0,0365)^2 \cdot 83.834 = 261.256$$

$$E \cdot \delta_{88}^R = 117.372 \cdot [(-0,5995)^2 + (1.1661)^2] + (-0,0793)^2 \cdot 83.834 = 202.3063$$

$$E \cdot \delta_{99}^R = 117.372 \cdot [(-0,5698)^2] + (0.0313)^2 \cdot 83.834 = 38.1874$$

$$E \cdot \delta_{06}^R = \sum \frac{R_{n0} \cdot R_{n6} \cdot E}{D_n} = 117.372 \cdot [(-0,1859) \cdot 0,8108 + (-0,0033) \cdot (-0,6112) - 0,0015 \cdot 0,0057] +$$

$$+ 83.834 \cdot (-0,0299) \cdot 0,1144 = -17.7376$$

$$E \cdot \delta_{07}^R = 117.372 \cdot [(-0,1859) \cdot -0,6250 + (-0,0033) \cdot (1,2140) - 0,0015 \cdot -0,6005] + 83.834 \cdot (-0,0299) \cdot -0,0365 = 13.3567$$

$$E \cdot \delta_{08}^R = 117.372 \cdot [(-0,0033) \cdot (-0,5995) - 0,0015 \cdot 1,1661] + 83.834 \cdot (-0,0299) \cdot -0,0793 = 0.22798$$

$$E \cdot \delta_{09}^R = 117.372 \cdot [-0,0015 \cdot -0,5698] + 83.834 \cdot (-0,0299) \cdot 0,0313 = 0.02174$$

$$E \cdot \delta_{67}^R = 117.372 \cdot [(0,8108) \cdot -0,6250 + (-0,6112) \cdot (1,2140) - 0,6005 \cdot 0,0057] + 83.834 \cdot (-0,0365) \cdot 0,1144 = -147.3137$$

$$E \cdot \delta_{68}^R = 117.372 \cdot [(-0,6112) \cdot (-0,5995) + 1,1661 \cdot 0,0057] + 83.834 \cdot (-0,0793) \cdot 0,1144 = 43.02495$$

$$E \cdot \delta_{69}^R = 117.372 \cdot [-0,5698 \cdot 0,0057] + 83.834 \cdot (0,0313) \cdot 0,1144 = -0.08322$$

$$E \cdot \delta_{78}^R = 117.372 \cdot [(-0,5995) \cdot 1,2140 + (-0,6005) \cdot (1,1661)] + 83.834 \cdot (-0,0365) \cdot -0,0793 = -167.36618$$

$$E \cdot \delta_{79}^R = 117.372 \cdot [-0,6005 \cdot -0,5698] + 83.834 \cdot (-0,0365) \cdot 0,0313 = 40.06714$$

$$E \cdot \delta_{89}^R = 117.372 \cdot [-0,5698 \cdot 1,1661] + 83.834 \cdot (-0,0793) \cdot 0,0313 = -78.1931$$

$$E \cdot \Delta_{0p}^R = \sum \frac{R_{n0} \cdot R_{np} \cdot E}{D_n} =$$

$$= 117.372 \cdot [(-0,1859) \cdot 1377,0145 + (-0,0033) \cdot 371,3103 - 0,0015 \cdot 154,9529] + 83.834 \cdot (-0,0299) \cdot 3810,6295 = -39760.3717$$

$$E \cdot \Delta_{6p}^R = 117.372 \cdot [(0,8108) \cdot 1377,0145 + (-0,6112) \cdot 371,3103 + 0,0057 \cdot 154,9529] + 83.834 \cdot (0,1144) \cdot 3810,6295 = 141075.4494$$

$$E \cdot \Delta_{7p}^R = 117.372 \cdot [(-0,6250) \cdot 1377,0145 + (1,2140) \cdot 371,3103 - 0,6005 \cdot 154,9529] + 83.834 \cdot (-0,0365) \cdot 3810,6295 = -30319.5661$$

$$E \cdot \Delta_{8p}^R = 117.372 \cdot [(-0,5995) \cdot 371,3103 + 1,1661 \cdot 154,9529] + 83.834 \cdot (-0,0793) \cdot 3810,6295 = -30247.3817$$

$$E \cdot \Delta_{9p}^R = 117.372 \cdot [-0,5698 \cdot 154,9529] + 83.834 \cdot (0,0313) \cdot 3810,6295 = -378.2303$$

Проверка правильности определения перемещений от изгибающего момента:

$$E \cdot \delta_{ss} = \sum E \cdot \delta_{ii} + 2 \cdot \sum \delta_{ii}$$

$$E \cdot \delta_{ss} = \sum \frac{a_n}{I_n} = 6 \cdot (3.932 + 3.343 + 2.972 + 2.867 + 2.608 + 2.42 + 2.52 + 2.042 + 1.492) = 145.18$$

$$\sum E \cdot \delta_{ii} + 2 \cdot \sum \delta_{ik} = 62.312 + 24.901 + 9.124 + 7.067 + 2.984 + 2 \cdot (13.343 + 2.52 + 2.042 + 1.492) = 145.18$$

$$E \cdot \Delta_{sp} = \sum E \cdot \Delta_{ip}$$

$$E \cdot \Delta_{sp} = \sum \int \frac{M_s \cdot M_p ds}{I_n} = \frac{(0 - 471.018) \cdot 1.433 \cdot 12}{2 \cdot 0.729} + \frac{(-471.018 - 1426.363) \cdot 1.433 \cdot 12}{2 \cdot 0.8574} +$$

$$\frac{(-1426.363 - 1869.030) \cdot 1.433 \cdot 12}{2 \cdot 0.9644} + \frac{(-1869.030 - 1876.694) \cdot 1.433 \cdot 12}{2 \cdot 1.0} +$$

$$+ \frac{(-1876.694 - 1367.829) \cdot 1.433 \cdot 12}{2 \cdot 1.0991} + \frac{(-1367.829 - 0) \cdot 1.433 \cdot 12}{2 \cdot 1.1843} = -121501.235$$

$$\sum E \cdot \Delta_{ip} = -78959.658 + (-42541.577) = -121501.235$$

Условия проверки выполняются

Проверяем правильность определения перемещений от N и R.

$$\sum E \cdot \delta_{ii}^N + 2 \cdot \sum E \cdot \delta_{ik}^N = 0$$

$$\sum E \cdot \delta_{ii}^R + 2 \cdot \sum E \cdot \delta_{ik}^R = 0$$

$$0.1592 + 0.2008 + 0.0093 + 0.00305 + 0.000259 + 2 \cdot [(-0.16833) + 0.0059 + 0.00272 + 0.000546 -$$

$$- 0.01994 - 0.01042 - 0.002089 + 0.00403 + 0.000667 + 0.000618] \approx 0$$

$$4.1311 + 122.1095 + 261.256 + 202.3063 + 38.1874 + 2 \cdot [(-17.7377) + 13.3567 + 0.22798 - 0.02174 -$$

$$- 147.3137 + 43.02495 - 0.08322 - 167.36618 + 40.06714 - 78.1931] \approx 0$$

Вычисляем перемещения:

$$E \cdot \delta_{00} = 62.312 + 0.1592 + 4.1311 = 66.6019$$

$$E \cdot \delta_{66} = 24.901 + 0.2008 + 122.1095 = 127.3508$$

$$E \cdot \delta_{77} = 9.124 + 0.0093 + 261.256 = 270.389$$

$$E \cdot \delta_{88} = 7.067 + 0.00305 + 202.3063 = 209.3768$$

$$E \cdot \delta_{99} = 2.984 + 0.0000259 + 38.1874 = 41.1719$$

$$E \cdot \delta_{06} = -0.16833 - 17.7376 + 13.343 = -4.5634$$

$$E \cdot \delta_{07} = 0.0059 + 13.3567 = 13.3626$$

$$E \cdot \delta_{08} = 0.00272 + 0.22798 = 0.2307$$

$$E \cdot \delta_{09} = 0.000546 + 0.02174 = 0.0223$$

$$E \cdot \delta_{67} = 2.52 - 0.01994 - 147.3137 = -144.8134$$

$$E \cdot \delta_{68} = -0.01042 + 43.02495 = 41.0145$$

$$E \cdot \delta_{69} = -0.002089 - 0.08322 = -0.0853$$

$$E \cdot \delta_{78} = 2.042 - 167.36618 + 0.00403 = -165.3206$$

$$E \cdot \delta_{79} = 0.000667 + 40.06714 = 40.0678$$

$$E \cdot \delta_{89} = 1.492 + 0.000618 - 78.1931 = -76.7004$$

$$E \cdot \Delta_{0p} = -78959.658 - 3246.3726 - 39760.3717 = -121966.4026$$

$$E \cdot \Delta_{6p} = -42541.577 + 141075.4494 + 4384.8688 = 102918.74136$$

$$E \cdot \Delta_{7p} = -70689.4657 - 728.6997 = -71418.1655$$

$$E \cdot \Delta_{8p} = -30247.3817 - 340.842 = -30588.2237$$

$$E \cdot \Delta_{9p} = -68.9544 - 378.2303 = 447.1848$$

Составляем и решаем канонические уравнения:

$$\begin{aligned} 66.6019 \cdot M_0 - 4.5634 \cdot M_6 + 13.3626 \cdot M_7 + 0.2307 \cdot M_8 + 0.0223 \cdot M_9 &= 121966.4026 \\ -4.5634 \cdot M_0 + 127.3058 \cdot M_6 - 144.8134 \cdot M_7 + 43.0145 \cdot M_8 - 0.0853 \cdot M_9 &= -102918.7414 \\ 13.3626 \cdot M_0 - 144.8134 \cdot M_6 + 270.389 \cdot M_7 - 165.3206 \cdot M_8 + 40.0678 \cdot M_9 &= 71418.1655 \\ 0.2307 \cdot M_0 + 43.0145 \cdot M_6 - 165.3206 \cdot M_7 + 209.3768 \cdot M_8 - 76.7004 \cdot M_9 &= 30588.2237 \\ 0.0223 \cdot M_0 - 0.0853 \cdot M_6 + 40.0678 \cdot M_7 - 76.7004 \cdot M_8 + 488.2852 \cdot M_9 &= 447.1848 \end{aligned}$$

$$M_0 = 1861.725$$

$$M_6 = -1494.627$$

$$M_7 = -651.12$$

$$M_8 = -52.412$$

$$M_9 = 45.772$$

Окончательные данные по M, N и R сведем в таблицу.

Таблица 3.7.2. Значения M, N и R

№	M	N	R	r
0	1861,725	1206,229	R' ₄ = 248,945	
1	1341,244719	1630,731		
2	95,30716013	2399,719		
3	-934,726179	2928,249		
4	-1641,048564	3280,075	250,351	149,267
5	-1880,303208	3489,4744	501,243	298,856
6	-1464,627	3491,612	447,609	266,878
7	-651,12	3535,529	3616,736	
8	-52,412	3590,6304		
9	45,772			

3.8. Проверка прочности сечений

Прочность принятой монолитной обделки проверяется в соответствии со СНиП 2.03.01-84. В соответствии с этими нормами напряжения от действующих усилий не должны превышать расчетных сопротивлений бетона: R_b и R_{bt} .

Для расчетного сечения обделки с наибольшим положительным моментом M и соответствующей нормальной силой N определяем расчетный эксцентриситет приложения силы:

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{1861.725}{1206.229} = 1.54 м;$$

$$e_0 \geq 0,45 \cdot h = 0,45 \cdot 0,9 = 0,405 м$$

Значит, предельное состояние обуславливается расчетным сопротивлением бетона растяжению:

$$N \leq N_{np} = \frac{1,75 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot b \cdot h \cdot R_{bt}}{\frac{6 \cdot e_0}{h} - 0,8} = \frac{1,75 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,1 \cdot 10^6}{\frac{6 \cdot 1,54}{0,9} - 0,8} = 148.239 кН;$$

где m_1 – коэффициент, учитывающий возможную неточность при принятии расчетной схемы обделки ($m_1 = 0,9$);

m_2 – коэффициент, учитывающий понижение прочности бетона при отсутствии наружной гидроизоляции ($m_2 = 0,9$);

1,75 – коэффициент повышения несущей способности за счет проявления пластических деформаций;

R_{bt} – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению (для В30 $R_{bt} = 1,1$ МПа);

b, h – ширина и высота расчетного сечения, м.

$N = 1206.229 > N_{np} = 148.239$. Условие не выполняется. Так как увеличение сечения нецелесообразно ввиду большой разницы между предельным и допустимым значением нормальной силы N , то требуется установка арматуры $\varnothing 12$ АШ В количестве 5 шт. на 1 метр погонный.

Проверим условия прочности для сечения с отрицательным моментом:

$$e_0 = \frac{M}{N} = \frac{1880.303}{3489.474} = 0,539 м;$$

$$e_0 \geq 0,45 \cdot h = 0,45 \cdot 1,058 = 0,476 м$$

$$N \leq N_{np} = \frac{1,75 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot b \cdot h \cdot R_{bt}}{\frac{6 \cdot e_0}{h} - 0,8} = \frac{1,75 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1,058 \cdot 1,1 \cdot 10^6}{\frac{6 \cdot 0,539}{1,058} - 0,8} = 731.013 кН;$$

$N = 3489,474 > N_{np} = 731,013$. Условие не выполняется. Так как увеличение сечения нецелесообразно ввиду большой разницы между предельным и допустимым значением нормальной силы N , то требуется установка арматуры $\varnothing 12$ АШ В количестве 5 шт. на 1 метр погонный.

4. ПРОИЗВОДСТВО РАБОТ ПО СООРУЖЕНИЮ ТОННЕЛЯ

4.1. Выбор способа производства работ

Способы производства работ при горном способе сооружения тоннелей можно объединить в две группы:

К первой группе относятся способы, применяемые в устойчивых ($f \geq 4$) и средней устойчивости ($f = 2 - 4$) скальных грунтах для проходки тоннелей без ограничения длины трассы. Основными способами этой группы являются:

- способ сплошного вертикального забоя,
- способ ступенчатого забоя,
- способ нижнего уступа,
- способ центральной штольни.

Ко второй группе относят способы, используемые для проходки в неустойчивых скальных грунтах коротких тоннелей или коротких участков на трассе, а также для проходки зон тектонических разломов. Такими грунтами являются сильно трещиноватые скальные, полускальные и нескальные. Основными способами этой группы являются:

- ✓ способ раскрытия на полный профиль по частям;
- ✓ способ опертого свода;
- ✓ способ опорного ядра;
- ✓ новый способ опорного ядра.

В последнее время получают все большее использование новые технологии:

- новоавстрийский способ;
- способ опережающего крепления.

Для выбора способа ведения работ необходимо проанализировать свойства грунтов на участке и с учетом размеров сечения тоннеля и выполнить соответствующее обоснование.

В данных инженерно-геологических условиях целесообразно проводить работы по способу нижнего уступа.

В скальных грунтах средней крепости ($f = 2 - 4$), а также при выработках больших сечений, для обеспечения безопасного ведения работ необходимо не только расчленение забоя, но и закрепление кровли непосредственно после взрыва грунта. Так как у верхнего забоя для обуривания его и установки временной, а иногда и постоянной Крепи свода, необходим комплекс проходческих механизмов, то длина ступени, назначаемая из условия безопасного размещения на ней этих механизмов, должна быть не менее 50 – 100 м.

Разработку грунта в забоях обычно ведут буровзрывным способом с применением легких самоходных бурильных установок или кареток.

Возможны две технологии работ с буровзрывной разработкой забоев: в грунтах с ($f \geq 3,8 - 4,0$), в которых оставление кровли на временной крепи, возможно, на период до возведения обделки полного профиля, и в грунтах, где целесообразно бетонировать обделку в два приема.

По первой технологии взорванный грунт верхнего забоя подают к краю уступа самоходными транспортными средствами (самоходными вагонами ВС - 5П1, погрузочно-транспортными машинами типа ПД или ПТ) и сбрасывают на нижний ярус, где высокопроизводительными погрузочными машинами ПНБ - 3Б весь грунт погружают в большегрузные транспортные средства. Иногда для доставки грунта к краю уступа используют вагонетки, где его перегружают в транспортные средства нижнего яруса с помощью передвижной эстакады с буккером. Однако такая схема откатки увеличивает трудоемкость работ за счет укладки и разборки временных рельсовых путей.

По второй технологии раскрытие сечения производится по частям: проходят калотту сплошным забоем с устройством арочной крепи; на расстоянии 12–25 м от забоя бетонируют свод с выносными пятнами; разрабатывают ядро уступа буровыми станками; затем участками в шахматном порядке разрабатывают боковые штроссы и подводят столбами стены обделки, разрабатывают грунт под обратный свод; бетонируют обратный свод.

Разработанный грунт верхнего забоя транспортируют самосвалами без перегрузки на уступе, для этого отсыпают пандус. Работы в калотте и разработку ядра штроссы ведут последовательно участками. При строительстве протяженных тоннелей с целью снижения объема проходческой вентиляции эффективным является устройство подвижного пункта перегрузки.

В слабо трещиноватых скальных грунтах средней устойчивости контур выработки закрепляют анкерами с сеткой, иногда усиливая слоем набрызгбетон. В средней крепости и слабых скальных грунтах выработки, закрепляют арками, причем после проветривания и оборки забоя и кровли забой сначала закрепляют временно с помощью балок-подхватов, подвешенным к предыдущим аркам.

Обделку по первой технологии возводят на полный профиль в передвижной опалубке на расстоянии не менее 50–80 м от уступа. В сильно трещиноватых грунтах длительное пребывание выработки на временной крепи нежелательно, поэтому обделку возводят в два приема. В калотте на расстоянии 12–25 м бетонируют свод в сборно-разборной опалубке. Выносные пяты его обеспечивают частичное опирание на породу при последующем подведении стен. Минимальная длина ступени назначается из условия набора прочности бетоном свода над забоем уступа, разрабатываемого взрывным способом, не менее 60% от проектной, т.е. длина ступени равная 50–100 м.

Способ нижнего уступа широко применяется в тоннелестроении, хотя и обладает тем недостатком, что требует большого количества проходческих механизмов, значительных затрат по перегрузке грунта, а также зачастую трудно обеспечить синхронность выполнения операций в двух забоях. Поэтому при строительстве коротких тоннелей возможен вариант: калотту проходят на всю длину тоннеля, штроссу целесообразно разрабатывать большими участками с применением скважинных вертикальных или слабонаклонных зарядов. Обделку бетонируют на все сечение или отдельно в зависимости от устойчивости грунтов и размеров выработки.

Новоавстрийский метод строительства тоннелей

В 60-х годах австрийские инженеры Л. Рабцевич, Л. Мюллер и Ф.Пахер разработали новую технологию строительства тоннелей, получившую название "Новоавстрийский метод". Сущность его состоит в том, что с помощью специальной технологии ведения горных работ грунт, окружающий тоннель, включается в совместную работу с крепью выработки, образуя как бы замкнутое несущее кольцо. Этот рентабельный и технически совершенный метод распространен в Западной Европе и Японии при строительстве железнодорожных, автодорожных тоннелей и тоннелей метрополитенов в разнообразных грунтах, включая выветрелые, трещиноватые скальные, полускальные и песчано-гравелистые грунты.

Новоавстрийский метод основан на использовании результатов исследований перераспределения напряжений и деформаций, возникающих в массиве после проходки выработки, а также на применении эффективной крепи ее. Механизм статической работы податливо подкрепленной выработки с позиций указанного метода может быть представлен следующим образом. В первой стадии работы происходят упругие деформации контура с постепенно уменьшающимся давлением на податливую крепь. При дальнейшем перемещении контура наступает вторая стадия, при которой начинают развиваться пластические деформации, разрушающие грунт вблизи контура выработки и сопровождающиеся увеличением давления на крепь. Задача состоит в том, чтобы остановить перемещения контура в конце первой стадии и не допустить развития второй путем усиления крепи, придания ей большей жесткости. Этим создается возможность использовать прочный грунт приконтурной зоны, включить его в статическую работу системы "крепь-среда".

Необходимым условием успешного применения метода является проведение в процессе проходки систематических измерений деформаций контура выработки и развивающегося давления на крепь, а также тщательное предварительное изучение физико-механических свойств грунтов. Кроме этого, необходимо строго соблюдать последовательность возведения замкнутой по форме податливой тонкослойной крепи, а также толщину и время возведения вторичной.

Существенным здесь является то, что первичная и вторичная оболочки являются равноправными элементами окончательной обделки.

Схема проходки тоннеля зависит от прочности и устойчивости грунтов. Проходка может производиться сплошным забоем или малыми уступами высотой 1,5–3,0 м длиной до 10–20 м. Грунт в забоях разрабатывают взрывным, механизированным способами или ручными пневматическими инструментами.

Непосредственно после разработки грунта на заходке (при взрывном способе – после проветривания забоя и оборки грунта в кровле) устраивают податливую первичную обделку, состоящую из арок или слоя набрызгбетона толщиной 3–7 см, что способствует сохранению прочностных характеристик грунтов вблизи контура выработки. Затем постепенно в соответствии с результатами наблюдений за поведением контура ее усиливают анкерами, вторичным слоем набрызгбетона. Общая толщина первичной оболочки из набрызгбетона может составлять в среднем 10–20 см.

К концу первой стадии работы системы "крепь-грунт", когда прекращаются упругие деформации контура, возводят вторичную стабилизирующую бетонную обделку толщиной 25–35 см.

4.2. Разработка грунта буровзрывным способом

Буровзрывным способом разрабатывают грунт при проходке тоннелей в скальных и полускальных грунтах с коэффициентом крепости $f > 1,5$. Процесс разработки забоев этим способом состоит из следующих операций: бурения шпуров или скважин, заряжания их взрывчатым веществом, взрывания зарядов и проветривания забоев. Шпурами принято называть взрывные выработки диаметром менее 75 мм и длиной менее 5 м, скважинами – взрывные выработки $d > 75$ мм. Обычно применяют шпуровые заряды, скважинные – при разработке нижнего уступа высотой более 4,5 м.

Чтобы качественно разработать забой, т.е. разработать грунт в пределах проектного контура без "переборов" сечения и на полную глубину заходки при требуемом дроблении и допустимом разбросе взорванного грунта, необходимо правильно назначить вид взрывчатых веществ, способ взрывания и параметры, паспорта буровзрывных работ.

В качестве взрывчатых веществ для подземных работ, в основном, используют аммониты – смеси специально обработанной аммиачной селитры с тротилом или гранулиты – смеси гранулированной аммиачной селитры с тротиловым сенсibilизатором. Характеристики основных взрывчатых веществ приведены в таблице 4.2.1. Тип взрывчатых веществ в зависимости от свойств грунтов можно назначить по таблице 4.2.2.

Нормы рекомендуют применять метод контурного взрывания забоев при электрическом способе взрывания зарядов. Для этого используют электродетонаторы мгновенного действия (ЭД-8-Э – водостойкий предохранительный, ЭД-8-ПМ – предохранительный, водостойкий повышенной мощности) короткозамедленные. К числу последних можно отнести ЭДКЗ или ЭДКЗ-ПМ-25 с временем замедления 25; 50; 15; 100; 150; 200 мс и ЭДКЗ-ПМ-15 с временем замедления 15; 30; 45; 60; 75; 90; 105; 120 мс. Применяют электродетонаторы замедленного действия с замедлением от 500 мс до 10 с.

Таблица 4.2.2. Рекомендуемые ВВ

Грунты	Взрывание	Рекомендуемые ВВ для			
		шпуровых зарядов			патронов-боевиков
		врубовых	отбойных и подошвенных	контурных	
Крепкие монолитные и слаботрещиноватые с $f = 8-12$	обычное	1; 2; 3	1; 2; 3	1; 2; 3	1; 2; 3
	гладкое	1; 2; 3	5; 6	5; 6	1; 2; 3
Крепкие трещиноватые и сильнотрещиноватые с $f = 8-12$, монолитные и слаботрещиноватые с $f = 4-8$	обычное	1; 2; 3	5; 6	5; 6	1; 2; 3
	гладкое	2; 5; 6	5; 6	5; 6	1; 2; 3
Трещиноватые и сильнотрещиноватые с $f = 4-8$, слабые скальные и полускальные с $f < 4$	обычное	5; 6	5; 6	5; 6	5; 6
	гладкое	5; 6	7; 8	7; 8	5; 6

Таблица 4.2.1. Характеристика промышленных ВВ, допущенных для подземных работ

№	Взрывчатое вещество	Работоспособность P, см ³	Плотность заряжения ρ г/см ³	Диаметр выпускаемых патронов α, мм	Передача детонации, см	Коэффициент относительной работоспособности	Вид упаковки
Непредохранительные ВВ повышенной мощности и мощные							
1	Аммонал скальный №3	420-470	1,0-1,1	24, 28, 36	6-8	0,80	Патроны в ящиках
2	Детонит М	460-500	1,15-1,20	28, 32, 36	10-18	0,82	
3	Аммонал 10-М	430	1,1	32, 36	4	0,91	
4	Нитрат 31К Франция	430	1,5	-	-	0,90	
Непредохранительные ВВ средней мощности							
5	Аммонит №6 ЖВ	360-380	1,0-1,2	36, 40, 48	5-13	1,00	Патроны в ящиках
6	Динафталит - 200	320-350	1,0-1,15	30-42	8	1,08	
Предохранительные ВВ							
7	Аммонит АП-5ЖВ	320-350	1,0-1,15	26-26	5-8	1,10	Патроны в ящиках
8	Аммонит ПЖВ-20	265-280	1,05-1,2	26-36	4-8	1,20	
Гранулированные, водоустойчивые ВВ							
9	Граммонал А-8	420-440	1,0-1,25	-	-	0,80	В мешках
10	Гранулит АС-4В	390-410	0,8-0,9	-	-	0,95	

4.2.3. Бурение шпуров

При проходке тоннелей для бурения шпуров в зависимости от крепости и абразивности грунтов используют бурильные машины вращательного действия – сверла, ударно-поворотного действия – перфораторы и вращательно-ударного действия – бурильные молотки. По условиям применения и способу поддержки во время бурения бурильные машины разделяют на ручные, телескопные и колонковые.

Ручные электросверла применяются для бурения шпуров глубиной 1,5–3 м в грунтах с коэффициентом крепости $f < 3$ при проходке штольнеобразных выработок малого сечения. Ударно-поворотное бурение эффективно в крепких породах с $f = 4-20$, вращательно-ударное – в породах с $f = 6-12$.

При небольшом протяжении выработок в забоях высотой до 2,5-3,0 м применяют ручные перфораторы, поддерживаемые в рабочем положении пневмоподдержками. Ручное бурение шпуров под анкерное крепление (глубиной до 4 м) и ведение восстающих выработок производят с помощью телескопных бурильных молотков. Технические параметры пневматических ручных, колонковых и телескопных перфораторов даны в таблице 4.2.3.1.

Таблица 4.2.3.1. Технические параметры перфораторов

Перфораторы	Тип	Масса, кг	Число ударов в мин.	Расход сжатого воздуха м ³ /мин	Диаметр коронки, мм	Мак глубина бурения, м	Рекоменд. условия применения
Ручные	ПР-20Л	20	2500	2,8	32-46	4	$f=8-12, l\omega=3-4$
	ПР-25Л	26,5	2500	3,5	36-56	4	
	ПР-30	24	1900	3,5	36-56	4	
Колонковые	КС-50	50	1670	5,0	45-85	12	$f < 12, l\omega > 3$
	ПК-60	60	2800	9,0	40-65	25	
	ПК-75	75	2000	13,0	65-85	30	
Телескопные	ПТ-29М	40	2400	3,3	40	8	Бурение снизу вверх
	ПТ-45	46	1600	4,0	до 65	6	

Колонковые бурильные машины конструктивно объединяют бурильную головку, буровой инструмент и автоподатчик, создающий усилие на буровой инструмент, достигающее 12 кН. Они предназначены для бурения шпуров со специальных установочных приспособлений – манипуляторов и являются основным рабочим органом современных самоходных бурильных установок серии СБУ или УБШ и агрегатов типа ПБА.

Буровые рамы к тому же являются элементом комплексной механизации: с их площадок можно бурить анкерные шпурь, производить установку анкеров, зарядку шпуров, навеску вентиляционных труб. Однако их можно использовать в выработках определенных поперечных сечений. Технические характеристики приведены в таблица.4.2.3.2.

ОБРАЗВЕДЦ

Таблица.4.2.3.2. Технические характеристики установок и агрегатов

Показатели	Типы бурильных установок							
	БКГ-2	1СБУ-2К	СБУ-4	ПБА-2	УБШ-532Д (ЗБК-5Д)	УБШ-662	Джумбо	Брокке
Размеры забоя обуриваемые с одной позиции								
Высота	3,5	5,8	12	9,0	7,0	12	9,0	9,0
Ширина	1,5	6,2	8,7	8,0	11,3	12	7,2	7,2
Кол. машин, шт	2	2	4	6	3	6	5 (1)	5
Глубина бурения, м	2,8	4	-	4	4	4	3,3	4
Диаметр шпуров, мм	42	40-42	40-42	42	42	42 (50)	42 (100)	42 (76)
Тип ходовой части	Рельс.	Гусенич.	Гусенич.	Рельс.	Пневмо-колесн.	Пневмо-колесн.	Рельс.	Пневмоход
Тип бурильного молотка	БКГ	БГА-1М	БГА-1	БГА-1М	ПК-75,БКА	ПК-75	ПД-100	Д-475А
Расход сжатого воздуха м ³ /мин	20	30	60	72	35	50-90	77	60
Габариты в транспортном положении								
Высота	1,61	2,75	3,36	8,66	2,5	-	8,6	3,8
Ширина	1,41	2,4	3,2	5,8	2,4	-	6,4	3,45
Длина	6,8	19,2	8,0	19,0	11,8	-	19,35	12,7
Размеры портала (hxb)	-	-	-	-	-	-	3,8 X 3,6	-
Масса, т	5,5	14,6	26,7	60	20	-	-	28

В состав бурильных машин входит буровой инструмент, с помощью которого непосредственно разрушается грунт в забое шпура. Применяют буровой инструмент в виде цельного бура или состоящий из буровой штанги и сменного резца или буровой коронки, армированной твердым сплавом.

Буровой инструмент для вращательного бурения ручными и колонковыми сверлами состоит из съемных резцов, буровой витой штанги ромбического сечения, имеющей на одном конце хвостовик с конусом, а на другом – головку с гнездом под хвостовик резца и шпильки для соединения резца со штангой. Резцы бывают двухперые и трехперые диаметром 41, 42 и 43 мм. К ним приваривают пластинки твердого сплава ВК-6В, ВК-8В или ВК-15 с небольшим содержанием кобальта.

Буровой инструмент для ударно-поворотного бурения состоит из съемной перфораторной коронки и буровой штанги. Различают долотчатые коронки пластинчатые (КДП) и штыревые (КДШ), трехперые (КТП и КТШ) и крестовые (ККП и ККШ). Они армированы пластинками или штырями вышеуказанных сплавов. Диаметр и область применения по грунту приведены в таблице 4.2.3.3. Штанги и колонки имеют промывочное отверстие диаметром 8 мм. Диаметр штанг – 22–32 мм, длина – 3-5 м.

Таблица 4.2.3.3. Диаметр и область применения бурового инструмента

Марка буровой коронки	Диаметр, мм	Область применения
КДП-32-19	32	Вязкие монолитные породы $f = 10-20$
КДП-36-22	36	Вязкие монолитные породы $f = 10-20$
КДП-40-25-2	40	Вязкие монолитные породы $f = 10-20$ с пылеулавливанием
КДП-43-25	43	Трещиноватые и абразивные $f = 10-18$
КДП-46-26	46	Трещиноватые и абразивные $f = 10-18$
БКР	45-70	Различные породы (бурение колонковыми перфораторами)

4.3. Погрузка и транспортирование грунта

Уборка из призабойной зоны отделенной горной массы ведется породопогрузочными шахтными машинами. В зависимости от размеров сечения выработки, принятой технологии проходки используют погрузочные машины различного принципа действия исполнительного органа, способа передачи грунта на транспортное средство. В выработках большого сечения широкое распространение получили машины непрерывного действия типа ПНБ, циклического – тоннельные экскаваторы (ЭО-5114, ЭО-7114), в штольнеобразных выработках при прочных скальных грунтах – машины периодического действия с прямой погрузкой типа ППН, при полускальных – машины периодического действия со ступенчатой погрузкой типа ППМ.

При проходке тоннелей способом нижнего, уступа уборку в верхнем забое можно эффективно производить погрузочно-транспортными машинами типа ПД с совмещенным погрузочно-транспортным

ковшом и типа ПТ с ковшовым погрузочным органом и транспортным кузовом. Параметры основных типов погрузочных машин приведены в таблице 4.3.1.

Принимаем для погрузки грунта машину типа ПНБ-3к

ОБРАЗВЕДЦ

Таблица 4.3.1. Параметры основных типов погрузочных машин

Показатели	Погрузочные машины							Подземные экскаваторы			Погрузочно- доставочные машины		
	Периодического действия				Непрерывного действия			ЭО-5114	ЭО-7114	BROYTх41 (Норвегия)			
	Прямой погрузки		Ступенчатой погрузки								ПД-5	ПД-8	
	ППН-1с	ППН-3	ППМ-4п	ППМ-4у	ПНБ-3к	ПНБ-3д	ПНБ-4						
Тех. производительность, м ³ /мин.	0,8	1,25	0,75	1,25	3,0	3,5	6,0	2,0	2,6				
Емкость ковша, м ³	0,2	0,5	0,25	0,32				1,2	2,0	2,5	2,5	4,0	
Макс. размер куска породы, мм	300	600	400	400	600	600	800						
Фронт погрузки, м	2,2	3,2	4,0	4,0	Не ограничен								
Высота выгрузки, м	1,3	1,65	1,45	1,45	2,4	2,4	3,0	4,3	3,6	4,0	1,8	2,2	
Наиб. высота копания, м								6,7	10,1	7,5			
Макс. скорость, км/ч											20	20	
Наименьшие габариты выработки													
Ширина, м	2,15	2,5	2,3	2,3	3,7	3,7	4,0	5,5	8,0	7,1	2,9	3,5	
Высота, м	2,35	2,9	2,35	2,35	2,5	2,5	3,0	6,5	10	7,0	2,7	3,0	
Габариты машины ширина, м	1,15	1,90	1,40	1,54	2,0	2,5	2,7				3,3	1,9	2,5
Длина, м	2,77	3,2	7,43	7,65	8,5	9,0	10,0				6,8	7,85	9,2
Высота транспортная, м	1,5	1,8	1,88	1,73	1,45	1,9	2,0				4,1	2,24	2,46
Высота максимальная, м	2,25	2,8	2,15	2,25									
Мощность двигателя, кВт	17,8	37	33,3		86,6	94	140	55	160	179	81,4	140,6	
Масса, т	3,5	7,0	9,0	10,0	24	25	34	33,4	89,0	32,4	13,5	22,4	

4.3.1. Транспортирование грунта

Применяют рельсовую, пневмоколесную и конвейерную откатки. Основным видом откатки в выработках большой протяженности является рельсовая. В состав рельсового транспорта входят: вагонетки, электровозы, рельсовый путь и энергетическое оборудование. В зоне погрузки грунта устраивают специальные разминочные приспособления. В зависимости от вместимости вагонеток и интенсивности грузопотоков рельсовые пути устраивают шириной колеи 600, 750 и 900 мм с укладкой рельсов Р24 (при вместимости вагонеток до 2 м³) и Р33 (более 2 м³).

Саморазгружающиеся с торца большегрузные вагоны с донным конвейером типа ВПК позволяют эффективно производить уборку грунта при строительстве тоннелей. Благодаря подъему кузова при погрузке их можно объединять в бункер-вагоны, при этом порода грузят (машиной ПНБ) в крайний от забоя вагон, и скребковыми донными конвейерами вагонов она перемещается к головному. В результате сокращается время погрузки за счет исключения маневров.

При строительстве тоннелей небольшой протяженности весьма эффективным является использование самосвалов для транспортирования грунта и строительных материалов. В этом случае нет необходимости прокладывать рельсовые пути, организовать транспортное энергообеспечение. Однако во многих случаях требуется устройство разворотных приспособлений (поворотного круга, скользящей стальной плиты) или уширений выработки, и по мере увеличения длины тоннеля резко возрастает объем вентиляции. Поэтому пневмоколесный транспорт применяют при длине плеча откатки до 1 км.

При проходке нижним уступом для транспортирования грунта калотты в зону разработки уступа можно использовать самоходные вагоны на пневмоходу типа ВС. Эти вагоны оборудованы донным скребковым конвейером и электрическим приводом с питанием по гибкому кабелю, который наматывается на кабельный барабан объемом до 400 м. Параметры таких вагонов приведены в таблице 4.3.1.1.

Таблица 4.3.1.1. Параметры самоходных вагонов

Показатели	Марки самоходных вагонов			
	4ВС-10	1ВС-20	СКВ-10	2ВС-15
Грузоподъемность, т	10	20	13	15
Вместимость кузова, м ³	8,4	12,9	7,5	9,0
Скорость передвижения, км/ч	8,0	8,0	8,5	7,0
Предельный уклон, град	10	10	12	12

Продолжительность бурения шпуров

Техническая производительность буровой машины определяется как:

$$Q_b = v_m \cdot k_z \cdot k_b = 2 \cdot 0.65 \cdot 0.85 = 1.105 \text{ м/мин}$$

v_m - скорость бурения шпуров, для грунтов $f=3...4 - 2,5...2,0$ и $f=6...8 - 1,6...1,2$. В нашем случае принимаем $v_m=2,0$;

k_z - коэффициент потерь на замену бурового инструмента, принимается равным $0,6...0,7$;

k_b - коэффициент потерь на вспомогательные операции, $0,8...0,9$;

Техническая производительность бурового агрегата:

$$Q_T^a = 60 \cdot Q_T \cdot k_0 \cdot m_b = 60 \cdot 1,105 \cdot 0,85 \cdot 2 = 112,71 \text{ м/час}$$

$$Q_T = Q_b = 1,105 \text{ м/мин}$$

k_0 - коэффициент одновременности работы буровых машин, при $m=2...3 - 0,85...0,95$; $m=4...6 - 0,7...0,8$;

m_b - количество машин на агрегате;

Эксплуатационная производительность:

$$Q_{\text{экспл}}^a = Q_T^a \cdot K_{\text{исп}} = 112,71 \cdot 0,65 = 73,26$$

$K_{\text{исп}}$ - коэффициент использования, $K_{\text{исп}}=0,6-0,65$;

Продолжительность бурения:

$$T_b = \frac{N \cdot L_K}{Q_{\text{экспл}}^a \cdot n} = \frac{111 \cdot 1,67}{73,26 \cdot 2} = 1,27 \text{ часов}$$

N - количество шпуров на забое, $N=111$;

L_K - длина комплекта шпуров, $L_K = \frac{\omega}{\eta} = \frac{1,5}{0,9} = 1,67 \text{ м}$;

η - коэффициент использования шпура, принимается $0,9-0,95$;

n - количество агрегатов

Продолжительность зарядки шпуров:

$$T_z = \frac{N \cdot t_{\text{одн}}}{60 \cdot n_{\text{заряд}}} = \frac{111 \cdot 5}{60 \cdot 6} = 1,54 \text{ часов}$$

N - количество шпуров;

$t_{\text{одн}}$ - время зарядки одного шпура, $4...7$ мин.

$n_{\text{заряд}}$ - число зарядчиков, 6 человек.

4.3.2. Расчет продолжительности уборки грунта

Продолжительность погрузки грунта T_n для принятой погрузочной машины ПНБ-3К определяется по формуле:

$$T_n = T_1 + \varphi \cdot T_2 = 18 + 1,1 \cdot 313,9383 = 363,332;$$

где T_1 - время для подготовки машины к работе, принимается $15-20$ мин;

φ - коэффициент, учитывающий задержки во время работы машины, равный $1,1-1,15$;

T_2 – время погрузки грунта, определяется в зависимости от типа погрузочной машины. Для машины типа ПНБ-3К время чистой погрузки вычисляется по формуле:

$$T_2 = T' + T'' + T^{IV} = 42.58 + 56.97 + 49.07 = 148.62, \text{ мин.},$$

$$\text{где } T' = \frac{\alpha_1 \cdot V \cdot k_0 \cdot k_p}{\sigma \cdot Q_T} = \frac{0.15 \cdot 104.67 \cdot 1.8 \cdot 1.13}{0.25 \cdot 3.0} = 42.58;$$

$$T'' = \frac{(1 - \alpha_1) \cdot V \cdot k_0 \cdot k_p}{Q_T} = \frac{(1 - 0.15) \cdot 104.67 \cdot 1.7 \cdot 1.13}{3.0} = 56.97$$

$$T^{IV} = \frac{V \cdot k_0 \cdot k_p \cdot t_2 \cdot (1 - \beta)}{\psi_g \cdot G} = \frac{104.67 \cdot 1.7 \cdot 1.13 \cdot 3 \cdot (1 - 0.15)}{0.95 \cdot 11.0} = 49.07$$

где α_1 – доля объема грунта, остающаяся у стен выработки, принимается 0,1-0,15;

V – полный объем грунта, м^3 .

k_0 – коэффициент разрыхления грунта при взрыве, принимается 1,4-2,0;

k_p – коэффициент дополнительного разрыхления при погрузке, принимается 1,1-1,15;

σ – Коэффициент снижения производительности машины на подборке, 0,2-0,25;

Q_T – техническая производительность машины, $Q_T=3,0 \text{ м}^3/\text{мин}$.

β – доля объема грунта, требующая зачистки вручную, 0,1-0,15;

t_2 – продолжительность смены транспортного сосуда, принимается для самосвалов 2-4 мин;

ψ_g – коэффициент заполнения транспортного сосуда, 0,95;

G – емкость транспортного сосуда, 8.5 м^3 ;

$$V = \mu \cdot \eta \cdot l_{ш} \cdot S = 1.1 \cdot 0.9 \cdot 1.67 \cdot 63.31 = 104.67$$

где μ – коэффициент излишка сечения, равный 1,05-1,10;

η – коэффициент использования шпура, принимается 0,9-0,95;

$$l_{ш} - \text{длина комплекта шпуров}, l_{ш} = \frac{\omega}{\eta} = \frac{1.5}{0.9} = 1.67 \text{ м};$$

S – проектная площадь сечения выработки, $S=63.31 \text{ м}^2$

4.4. Назначение и типы временной крепи

Для поддержания кровли и стен выработки от обрушения и предохранения, работающих в тоннеле и горной техники от вывалов грунта устраивают временную крепь. В полускальных грунтах при раскрытии выработки по частям применяют, как правило, деревянную веерную крепь, а в скальных, проходку которых осуществляют сплошным или ступенчатым забоем, применяют контурную крепь, расположенную у контура выработки, позволяющую использовать высокопроизводительное проходческое оборудование, инвентарную передвижную опалубку.

Различают следующие виды контурной крепи: анкерную, арочную, набрызгбетонную и комбинированную. По характеру работы различают: подпорную – оказывающую сопротивление смещающимся в выработку породам (веерная, рамная, арочная), упрочняющую – увеличивающую прочность и устойчивость, окружающих выработку пород (анкерная, сочетание анкерной и набрызгбетонной), ограждающую – предохраняющую выработку от случайных выпадений кусков (металлическая сетка между анкерами или арками).

Вид временной при строительстве тоннелей горным способом назначается в зависимости от инженерно-геологических условий, которые обуславливают степень устойчивости контура выработки. Под устойчивостью понимается такое состояние породы, когда в течение некоторого времени не будет происходить обрушение контура. Степень устойчивости характеризуется с помощью комплексного показателя S .

$$S = f \cdot \frac{K_M \cdot K_R \cdot K_W}{K_N \cdot K_t \cdot K_A \cdot K_\alpha} = 4,2 \cdot \frac{3,16 \cdot 1 \cdot 0,3}{2 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 1,5} = 0,265$$

f - коэффициент крепости грунта в куске, $f=4,2$

K_M - коэффициент, характеризующий степень трещиноватости породы, определяется в зависимости от коэффициента относительной трещиноватости χ , $\chi = b/b_T = 12,7/0,25 = 50,8$, где b - ширина выработки, b_T - расстояние между трещинами, м. Тогда $K_M=3,16$.

K_R - коэффициент, зависящий от вида поверхности трещин, $K_R=1$

K_W - коэффициент, зависящий от обводненности пород, $K_W=0,3$

K_N - количество систем трещин, $K_N=2$

K_t - коэффициент, характеризующий раскрытие незаполненных трещин, $K_t=1$

K_A - коэффициент, характеризующий заполнение трещин, $K_A=5$

K_α - коэффициент, принимаемый равным 1,5.

Так как показатель S находится в пределах от 0,05 до 1, то грунт относится к IV категории породы по устойчивости. Для данной категории степень устойчивости – весьма неустойчивая, допустимое время обнажения выработки – не более суток. Таким образом, после обуривания забоя и вентиляции необходимо сразу устанавливать временную крепь. Поскольку высота выработки более 10 м, то, в соответствии с нормами, принимаем способ нижнего уступа.

Исходя из категории породы по устойчивости, назначаем набрызгбетон с арками. До уборки породы производится проветривание, далее производится оборка кровли нависающих кусков породы, затем наносится слой набрызгбетона и устанавливается верхняя часть арок. Только затем производится уборка грунта.

Арочная крепь представляет собой пространственную систему, состоящих из обычных или широкополочных двутавров или специальных профилей, соединенных связями жесткости. Между арками и грунтом по всему периметру, а при относительно устойчивых стенах выработки – только в

кровле, закладывают затяжку из досок или железобетонных плит «в разбежку», которую тщательно расклинивают в породу.

Возведение арочной крепи из-за значительной массы составляющих ее элементов обычно выполняют с помощью специальных самоходных крепеукладчиков. Для этой цели используют буровые установки, рамы, оборудованные гидравлическими захватами на автоподатчиках манипуляторов. Исходя из показателя Принимаем арочную крепь с выносными пятнами.

В качестве расчетной схемы арочной крепи принимаем трехшарнирную арку. Активной нагрузкой является вертикальное горное давление q_c . При расстоянии между арками c нагрузка на каждую арку составит $q_c = q \cdot c$, где q – нормативное вертикальное горное давление, определяемое по

$$формуле $q = \frac{3}{4} \cdot \frac{\gamma}{f_n} \cdot (b + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\varphi}{2})) = 0.75 \cdot \frac{26}{4.2} \cdot (12.7 + 2 \cdot 10.5 \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \frac{62}{2})) = 83.27, \text{ кН/м}^2$$$

где γ – удельный вес грунта, кН/м³;

f – коэффициент крепости породы в куске;

b – ширина выработки, м.;

φ – кажущийся угол внутреннего трения грунта, град.

Принимаем двутавр №33 с площадью поперечного сечения $A=53,8 \text{ см}^2$, моментом сопротивления $W=597 \text{ см}^3$, радиусом инерции $r=13.5 \text{ см}$. Расстояние между арками принимаем $c=0.5w=0.75 \text{ м}$.

Далее определяются изгибающие моменты и нормальные силы в 2-3 точках арки и выбирается максимальное. Расчет производим по следующим формулам:

$$M_{nx} = \frac{q \cdot c}{2} \cdot \left(\frac{b^2 \cdot y}{4 \cdot f_c} - x^2 \right)$$

$$N_{nx} = q \cdot c \cdot \left(\frac{b^2}{8 \cdot f_c} \cdot \cos \theta + x \cdot \sin \theta \right)$$

$$\theta_1 = 22.5^\circ, \theta_2 = 45.0^\circ, \theta_3 = 67.5^\circ, \theta_4 = 75^\circ$$

$$x_1 = 1.887, \quad y_1 = 0.165$$

$$x_2 = 3.954, \quad y_2 = 0.65$$

$$x_3 = 5.636, \quad y_3 = 2.195$$

$$x_4 = 5.94, \quad y_4 = 2.96$$

где f_c – стрела подъема трехшарнирной арки, $f_c = 4.5 \text{ м}$;

$$M_{1x} = \frac{q \cdot c}{2} \cdot \left(\frac{b^2 \cdot y_1}{4 \cdot f_c} - x_1^2 \right) = \frac{83.27 \cdot 0.75}{2} \cdot \left(\frac{12.7^2 \cdot 0.165}{4 \cdot 4.5} - 1.887^2 \right) = -65.02 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$N_{1x} = q \cdot c \cdot \left(\frac{b^2}{8 \cdot f_c} \cdot \cos \theta_1 + x_1 \cdot \sin \theta_1 \right) = 83.27 \cdot 0.75 \cdot \left(\frac{12.7^2}{8 \cdot 4.5} \cdot \cos 22.5 + 1.887 \cdot \sin 22.5 \right) = 303.604 \text{ кН}$$

$$M_{2x} = \frac{q \cdot c}{2} \cdot \left(\frac{b^2 \cdot y_2}{4 \cdot f_c} - x_2^2 \right) = \frac{83.27 \cdot 0.75}{2} \cdot \left(\frac{12.7^2 \cdot 0.65}{4 \cdot 4.5} - 3.954^2 \right) = -306.32 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$N_{2x} = q \cdot c \cdot \left(\frac{b^2}{8 \cdot f_c} \cdot \cos \theta_2 + x_2 \cdot \sin \theta_2 \right) = 83.27 \cdot 0.75 \cdot \left(\frac{12.7^2}{8 \cdot 4.5} \cdot \cos 45.0 + 3.954 \cdot \sin 45.0 \right) = 372.46 \text{ кН}$$

$$M_{3x} = \frac{q \cdot c}{2} \cdot \left(\frac{b^2 \cdot y_3}{4 \cdot f_c} - x_3^2 \right) = \frac{83.27 \cdot 0.75}{2} \cdot \left(\frac{12.7^2 \cdot 2.195}{4 \cdot 4.5} - 5.636^2 \right) = -377.72 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$N_{3x} = q \cdot c \cdot \left(\frac{b^2}{8 \cdot f_c} \cdot \cos \theta_3 + x_3 \cdot \sin \theta_3 \right) = 83.27 \cdot 0.75 \cdot \left(\frac{12.7^2}{8 \cdot 4.5} \cdot \cos 67.5 + 5.636 \cdot \sin 67.5 \right) = 432.27 \text{ кН}$$

$$M_{4x} = \frac{q \cdot c}{2} \cdot \left(\frac{b^2 \cdot y_4}{4 \cdot f_c} - x_4^2 \right) = \frac{83.27 \cdot 0.75}{2} \cdot \left(\frac{12.7^2 \cdot 2.96}{4 \cdot 4.5} - 5.94^2 \right) = -273.55 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$N_{4x} = q \cdot c \cdot \left(\frac{b^2}{8 \cdot f_c} \cdot \cos \theta_4 + x_4 \cdot \sin \theta_4 \right) = 83.27 \cdot 0.75 \cdot \left(\frac{12.7^2}{8 \cdot 4.5} \cdot \cos 75.0 + 5.94 \cdot \sin 75.0 \right) = 430.75 \text{ кН}$$

Прочность сечения определяется по формуле внецентренного сжатия

$$\frac{N}{A} \pm \frac{M_{\max}}{W_{pl}} \leq R_y$$

$$\frac{432.27}{0.00538} + \frac{377.72}{895.5 \cdot 10^{-6}} = 208.56 \leq 210$$

Где R_y – расчетное сопротивление прокатной стали по пределу текучести, $R_y = 210 \cdot 10^3$ кПа;

A – площадь поперечного сечения, $A = 0.00538 \text{ м}^2$;

W_{pl} – пластический момент сопротивления инерции, м^3 , равный $1.5 \cdot W$ (W – момент сопротивления). $W_{pl} = 1.5 \cdot 597 = 895.5 \text{ см}^3$

Окончательно принимаем двутавр №33 и шаг арок $c = 0.75 \text{ м}$.

Сущность способа крепления выработок набрызгбетоном заключается в том, что на обнаженную поверхность выработки наносят способом набрызга слой (или несколько слоев толщиной по 3-5 см) из быстро твердеющего бетона. Между грунтом и слоем нанесенного таким способом бетона образуются прочные связи. Выходы трещин и щели в грунте заполняются и укрепляются до уровня начальной прочности грунта. Таким образом, над выработкой образуется защитный слой конструкции с высокой несущей способностью. Набрызгбетон наносится механизированным способом и обладает высокими технико-экономическими показателями.

В трещиноватых грунтах с $f \geq 3$ применяют набрызгбетон в сочетании с арками.

В этих случаях набрызгбетон наносится по металлической сетке, прикрепленной к аркам.

Толщина, бетонного покрытия определяется из условия:

$$t_b = 0.75 \cdot c \cdot \sqrt{\frac{q_{gr,n}}{R_{bt} \cdot k_n}} = 0.75 \cdot 0.75 \cdot \sqrt{\frac{4.875}{1.55 \cdot 10^6 \cdot 0.038}} = 0.5,$$

где s – шаг крепи (расстояние между поперечными рядами арок), м;

$q_{gr,n}$ – нормативное давление возможного вывала, кН/м, определяемое по формуле $q_{gr,n} = \beta \gamma c = 0,25 \cdot 26 \cdot 0,75 = 4,875$ кН/м². Здесь $\beta = 0,25$;

R_{bt} – расчетное сопротивление набрызгбетона на растяжение (1,55);

K_n – коэффициент, учитывающий рост горного давления (0,038).

Независимо от результатов расчета минимальная толщина неармированного набрызгбетона принимается $t_b = 3$ см, армированного - $t_b = 8$ см.

Принимаем толщину армированного набрызгбетона $t_b = 8$ см.

Продолжительность работ по закреплению участка длиной 1 м можно определить по формуле:

$$T = t_1 + \frac{60 \cdot S \cdot t_b \cdot k_c \cdot k_0}{Q_1 \cdot k_m \cdot \xi} = 15 + \frac{60 \cdot 63,31 \cdot 0,08 \cdot 1,1 \cdot 1,5}{6 \cdot 0,8 \cdot 0,69} = 116,07 \text{ мин.}$$

где t_1 – продолжительность подготовки выработки ($t_1 = 10-20$ мин.);

S – площадь закрепляемой поверхности, м²;

t_b – толщина покрытия, м;

Q_1 – техническая производительность машины, м³/ч (Для машин ВМ-68, БМ-70 $Q_1 = 5-6$ м³/ч, дальность подачи – 200 м);

ξ – коэффициент выхода набрызгбетона, равный 0,69;

k_c – коэффициент, учитывающий способ проходки $k_c = 1,1$;

k_m – коэффициент использования машины во времени ($k_m = 0,6-0,8$);

k_0 – коэффициент, учитывающий процент отскока бетона (1,15-1,25).

ЛИТЕРАТУРА

1. Тоннели железнодорожные, автодорожные и гидротехнические. Метрополитены. СНиП Ш-44-77. - М.: Стройиздат, 1977. - 87 с.
2. Тоннели и метрополитены. Учебн. для вузов железнодорожного транспорта. - 2-е Изд., перераб. и доп./Под ред* В.П.Волкова. - М.: Транспорт, 1975. - 550 с.
3. Покровский Н.М. Технология строительства подземных сооружений и шахт - Ч. I. Технология сооружения горизонтальных выработок и тоннелей: Учебник для вузов. - 6-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1977. 400с.
4. Методические указания по выполнению курсового проекта тоннеля, сооружаемого горным способом. - Ч. II. Организация работ /В.Э. Котляревский. - Днепропетровск: ДШТ, -1983, -54с.
5. Тоннели: Справочно-методическое пособие /Под ред. д.т.н., проф. Д.И. Федорова. - М.: Транспорт, 1979. -176 с.
6. Маковский Л.В. Городские подземные транспортные сооружения: Учеб. для вузов,- М.:Стройиздат, 1979,
7. Малевич Н.А. Горнопроходческие машины и комплексы: Учебн. для вузов, - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Недра, 1980. - 384 с.
8. Современная технология сооружения транспортных тоннелей в сложных горногеологических условиях. Экспресс-информация. - М.: ВПТИТрансстрой, 1987.-ВЫЛ. 2. - 36с.
9. Рекомендации по производству буровзрывных работ с применением механизированного заряжания и гидрозабойки при проходке транспортных тоннелей. - М'. ЦНИИС, 1980,. -71с.
10. Насонов И.Д., ФеджинВ.А., ШупликМ.Н. Технология строительства подземных сооружений; Часть II. Строительство горизонтальных и наклонных выработок: Учеб, для вузов. - М.: Недра, 1983. - 272 с.
11. Современные конструкции анкеров для крепления транспортных тоннелей. - Транспортное строительство, 1986, № 2. - с.53-55.
12. Инструкция по применению анкеров, и набрызгбетона в качестве временной крепи выработок транспортных тоннелей. ВСН 126-78:Минтрансстрой. - М.,: Оргтрансстрой, 1979. - 84 с.
13. Применение новоявстрийского метода проходки тоннелей. -Транспортное строительство за рубежом: Экспресс-информация. - М.:ВНТИ Трансстрой, 1986.
14. Плотников Ю. Особенности проектирования и строительства I очереди. - Метрострой.~1984.~№ 4,-С. 5-8.
15. Чеканов В. II очередь: конструктивные и объемно-планировочные решения. - Метрострой.-1984. № 4,- С. 30-31.
16. Кузьмицкий В.А, Лукша Л,К., Тихоновец Н.Н. Проектирование и строительство тоннелей: Учебное пособие. - Минск: БШ, 1990.-84с.
17. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Нормы проектирования.СНиП П-44-78. - М.: Стройиздат, 1978. -20с