

РУКОВОДСТВО

по инженерно-
геологическим
изысканиям
для строительства
подземных
гидротехнических
сооружений

П-771-82
ГИДРОПРОЕКТ

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Министерство энергетики и электрификации СССР

Главный проект

Всесоюзный ордена Ленина проектно-изыскательский
и научно-исследовательский институт Гидропроект имени
С. Я. Жука

РУКОВОДСТВО
ПО ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИМ ИЗЫСКАНИЯМ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

П-771-82

Гидропроект

С о с т а в и т е л и: Л. А. Молоков, В. К. Разумов, И. С. Толоконников, Н. Н. Кондратьев

В Руководстве даны основные сведения, необходимые для организации и выполнения инженерно-геологических изысканий для строительства подземных гидротехнических сооружений. Описаны особенности методики изучения геологического строения, гидрогеологических условий, физико-механических свойств пород, физико-геологических явлений, температурных условий и газоносности недр. Приведены состав и объем изыскательских работ, которые надо выполнять на различных этапах и стадиях проектирования, а также в процессе строительства подземных гидротехнических сооружений.

Руководство рассчитано на инженеров и техников-геологов, работающих на изысканиях для гидротехнического строительства.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проектирование гидротехнических сооружений в горных областях связано с решением сложных вопросов подземного строительства, которое весьма существенно зависит от инженерно-геологических условий. В целях повышения качества инженерно-геологического обоснования проектов подземных гидротехнических сооружений в 1978 г. институтом Гидропроект было выпущено „Руководство по инженерно-геологическим изысканиям для строительства подземных гидротехнических сооружений” (П-655-77 / Гидропроект).

В настоящее время накоплен дополнительный опыт изысканий, проектирования и строительства крупных гидротехнических туннелей (Арпа—Севан и др.). В связи с этим возникла необходимость переработать и переиздать Руководство.

В настоящее его издание внесены следующие изменения и дополнения: переработано описание изучения гидрогеологических условий, физико-механических свойств пород, напряженного состояния массивов горных пород.

Руководство составлено применительно к наиболее часто встречающимся условиям строительства подземных гидротехнических сооружений. В нем отсутствует описание специальных исследований, которые следует проводить в особых условиях (в многолетнемерзлых породах, пльвунах и др.). Эти исследования проводят по программам, составленным на основании Руководства и специальных пособий.

В Руководство внесены исправления и дополнения в соответствии с замечаниями: В. Е. Лаврова, В. М. Мосткова и О. П. Павлушиной (НИС Гидропроекта), Р. Р. Тизделя и Ю. Л. Фишмана (ОСО), В. З. Чечота и А. В. Количко (Средазгидропроект), Б. Д. Мальцева (Гидроспецпроект), Н. Ф. Новикова и А. А. Сорокина (Ленгидропроект).

Руководство предназначено для инженеров и техников-геологов, занимающихся изысканиями для гидротехнического строительства.

Раздел I

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

1. ЗАДАЧИ ИЗЫСКАНИЙ

При гидротехническом строительстве возводят разнообразные по конструкции и назначению подземные сооружения: деривационные туннели гидроэлектростанций, камеры для машинных залов и трансформаторных подстанций ГЭС и ГАЭС, подземные бассейны ГАЭС, туннели и шахты водохозяйственного и транспортного назначения и др. (рис. 1).

По глубине заложения подземные сооружения различаются следующим образом: мелкого заложения – до 100, среднего – от 100 до 300, глубокого – более 300 м.

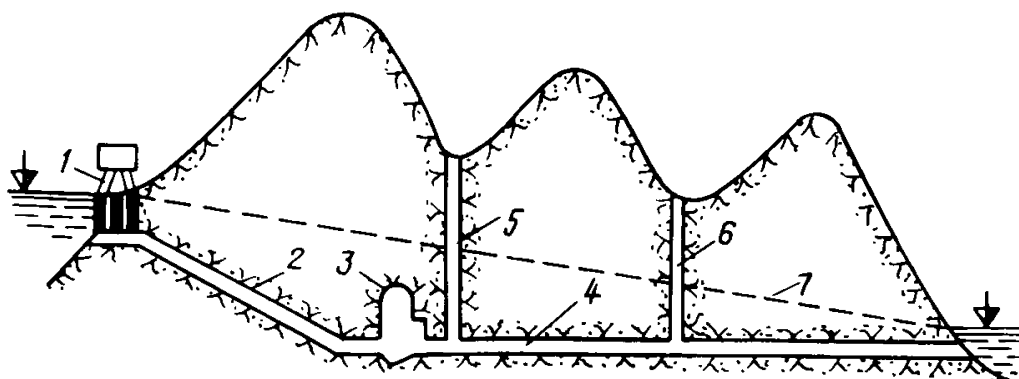


Рис. 1. Схема деривационной гидроэлектростанции с подземным машинным залом в начале деривации:

1 – головной узел; 2 – напорный туннель турбинного водовода; 3 – подземная камера машинного зала; 4 – безнапорный отводящий туннель; 5 – аэрационная шахта; 6 – строительная шахта; 7 – проекция естественного русла реки

По протяженности различают туннели: короткие – до 1, средней длины – 1-5 и длинные – более 5 км. По условиям работы туннели могут быть напорными и безнапорными. По капитальности подземные гидротехнические сооружения делятся на четыре класса в соответствии с СНиП 11-50-74.

При проектировании и строительстве подземных гидротехнических сооружений требуется тщательное изучение и анализ инженерно-геологических условий для обоснования принимаемых проектных решений, выбора трасс туннелей и участков расположения машинных залов; выбора типов и конструкций креплений; определения способов ведения строительных работ. Детальность инженерно-геологического обоснования проекта зависит от этапов и стадий проектирования, типов, размеров, глубины заложения и условий работы сооружений. На методику, состав, объемы

инженерно-геологических изысканий влияют также сложность геологического строения и гидрогеологических условий, доступность местности и ее обнаженность.

Особенности инженерно-геологических изысканий для строительства подземных гидротехнических сооружений определяются тем, что их закладывают на значительной глубине. Поэтому изыскания не могут обеспечить достаточно полную и точную информацию о строении и свойствах горных пород, слагающих интересующий проектировщиков горный массив. Полнота и точность сведений об инженерно-геологических условиях зависят также от правильности выбора и комплексирования методов изысканий и исследований.

При проведении изысканий следует учитывать, что горные породы могут служить для подземных сооружений основанием, средой и материалом, используемым в конструктивных элементах (своды, стены, опорные целики, колонны и т. п.). Поэтому необходимо проводить всестороннее изучение свойств горных пород в массиве.

Перечисленные выше особенности изысканий для подземных гидротехнических сооружений определяют необходимость широкого применения метода инженерно-геологического прогнозирования. Инженерно-геологический прогноз надо составлять на всех этапах изысканий, так как его содержание изменяется в зависимости от детальности проектирования и степени знания природной обстановки. Первоначально, основываясь на данных о проектируемом сооружении и имеющихся материалах (литературных, фондовых, рекогносцировочного обследования), составляют предварительную прогнозную инженерно-геологическую модель, служащую отправным материалом для выпуска программы инженерно-геологических изысканий.

В процессе выполнения программы изысканий необходимо проверять, уточнять или изменять предварительную прогнозную модель, а программу изысканий и исследований корректировать.

Результатом инженерно-геологических изысканий является прогнозная модель района предполагаемого строительства, составленная с учетом их материалов.

В строительный период при документации подземных выработок необходимо оценивать точность выполненных ранее прогнозов и их соответствие природной обстановке и вести дальнейшее уточнение инженерно-геологических условий строительства и эксплуатации сооружений. С этой целью должны составляться дополнительные текущие прогнозы.

Практика инженерно-геологического обоснования проектов гидротехнических туннелей показывает, что в сложных геологоструктурных условиях прогноз инженерно-геологических и гидрогеологических условий на наиболее сложных участках должен подтверждаться данными опережающего бурения из ствола выработки и его тщательной геологической документацией.

Основными природными факторами, определяющими инженерно-геологические условия возведения и эксплуатации подземных гидротехнических сооружений, которые надо учитывать при составлении прогнозных моделей и программы изысканий, являются:

геологическое строение района: состав, распространение, мощность и условия залегания коренных горных пород, мощность и состав покровных отложений;

тектоника района: наличие складчатых и разрывных структур, зон ослабления пород, характер и ориентировка преобладающих систем трещин;

гидрогеологические условия: наличие водоносных горизонтов, их распространение, водообильность, водопроницаемость горных пород, распределение напоров подземных вод, химический состав и агрессивность подземных вод;

физико-механические свойства горных пород в массиве с учетом их литологических и текстурных особенностей, трещиноватости, естественного напряженного состояния, влажности, водосгойкости, определяющие способы производства строительных работ, типы и конструкции временного и постоянного крепления;

физико-геологические и инженерно-геологические процессы, влияющие на строительство и эксплуатацию подземных сооружений, сейсμοактивность и возможность проявления современных тектонических подвижек блоков пород;

геотермические условия, определяющие условия строительства и эксплуатации подземных сооружений;

газоносность горных пород: наличие и возможности поступления в подземные горные выработки природных газов, взрывоопасных и вредных для здоровья людей и сохранности техники.

При составлении программы необходимо исходить из основных положений оптимизации изысканий, позволяющих при наименьших затратах получить необходимый эффект [29].

2. ИЗУЧЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ РАЙОНА

Инженерно-геологическая съемка. На ранних стадиях проектирования перед составлением программы изысканий для назначения и предварительной оценки вариантов компоновки сооружений выполняют инженерно-геологическое обследование местности. В процессе его уточняют имеющиеся геологические материалы и дополняют представления о тектонической структуре, трещиноватости пород, интенсивности физико-геологических процессов и др.

Затем проводят инженерно-геологические съемки, масштабы которых выбирают в зависимости от стадии проектирования, типа и размеров проектируемого сооружения, сложности геологического строения, геоструктурных условий и доступности местности.

Мелкие масштабы съемок принимают на ранних этапах проектирования для туннелей с несложными инженерно-геологическими условиями при глубоком их заложении и большой протяженности. Для туннелей глубокого заложения, находящихся в сложных геологических условиях, можно проводить съемки среднего масштаба. Крупные масштабы съемок принимают на стадии проекта для крупных туннелей, проходимых в сложных инженерно-геологических условиях и при относительно небольшой их протяженности, а также на участках расположения подземных камер машинных залов ГЭС и ГАЭС, на порталных участках туннелей. Наиболее подробно изучают порталные участки туннелей, так как их проходят в породах, наиболее ослабленных экзогенными процессами. В процессе геологосъемочных и разведочных работ необходимо охарактеризовать устойчивость откоса массива, в котором закладывается портал, установить размеры и откосы припортальной выемки.

При определении ширины полосы инженерно-геологической съемки по трассе гидротехнического туннеля следует исходить из того, что она должна охватывать все рассматриваемые проектом варианты трассы и освещать геологическое строение на необходимую глубину. Поэтому желательно, чтобы в контуры съемки вошли обнажения всех комплексов пород, в которых должен пройти туннель, и основные геологические структуры. В связи с этим контуры съемки на отдельных участках могут быть расширены, а в случаях, когда обнажения пород находятся на значительном расстоянии от намечаемого места расположения сооружений, для их изучения необходимо делать специальные маршруты.

Основные съемочные маршруты следует прокладывать по возможности вкрест простиранию пород, обращая особое внимание на изучение комплексов и отдельных разновидностей слабых пород и зон тектонических нарушений. Геологическая карта должна подробно отражать все основные геологические структуры.

Среди складчатых структур следует тщательно выделять осевые части антиклиналей и синклиналей, зоны малой складчатости, смятия пород и т. п. Для всех элементов складок должны быть даны ориентировка их в пространстве и основные размеры.

Разрывные тектонические нарушения рекомендуется различать по мощности (ширине) и протяженности приразломных зон дробления, трещиноватости и осложняющей складчатости с учетом их подразделения на порядки. В СНиП II-16-76 рекомендуется пользоваться классификацией нарушений сплошности горных массивов, помещенной в табл. 1.

Изучение разломов и сопровождающих их зон милонитизации, дробления и трещиноватости следует проводить с особой тщательностью, так как при пересечении их туннелем обычно возникают большие осложнения: нарушается устойчивость кровли и стенок выработки, увеличивается приток подземных вод и т. п. На участках разломов сильно снижаются показатели деформируемости пород в массиве, что имеет важное значение при проектировании напорных туннелей.

Таблица 1

Характер нарушения сплошности массивов	Протяженность нарушений	Мощность зоны дробления разломов и ширина трещин
Разломы I порядка – глубинные, сейсмогенные	Сотни и тысячи километров	Сотни и тысячи метров
Разломы II порядка – глубинные, несейсмогенные и частично-сейсмогенные	Десятки и сотни километров	Метры и десятки метров
Разломы III порядка	Единицы и десятки километров	Метры и десятки метров
Разломы IV порядка	Сотни и тысячи метров	Десятки и сотни сантиметров
Мелкие разломы и крупные трещины	Десятки и сотни метров	Десятки сантиметров
Средние трещины	Метры и десятки метров	Миллиметры и сантиметры
Мелкие трещины	Сантиметры и метры	Доли миллиметра и миллиметры

При изучении разлома необходимо прежде всего установить его порядок, которым определяется масштаб сопровождающих его нарушений. Затем должен быть определен кинематический тип разлома (сброс, надвиг, взброс и т. п.), установлены направления и амплитуда смещения, охарактеризованы зоны милонитизации, дробления и трещиноватости. Кроме того, изучают соотношение данной о тектонического нарушения с другими структурными элементами, а также явления, сопровождающие тектоническое нарушение: трещины оперения, приразрывную сланцеватость, изгиб слоев у поверхности сместителя и пр.

Изучение трещиноватости горных пород. Трещиноватость является одним из главных показателей сохранности скальных массивов, определяющих устойчивость сводов и стен подземных выработок, условия разработки пород, характер крепления и обделки выработки.

Необходимо различать мелкую трещиноватость и тектонические разрывные нарушения, так как подход к их изучению и оценке неодинаков. Мелкая (фоновая) трещиноватость бывает представлена небольшими разрывами чаще всего без смещений по ним. Она существенно влияет на прочностные, деформационные и фильтрационные свойства пород, их разрабатываемость [10].

Для оценки характера и степени трещиноватости массивов горных пород необходимо определять основные генетические типы трещин, их густоту (частоту), ширину (раскрытие), протяженность, элементы залегания плоскостей трещин (азимут и угол падения), шероховатость стенок, состав и свойства заполнителя

Количественную оценку степени трещиноватости пород следует производить по модулю трещиноватости, блочности и коэффициенту трещинной пустотности [11].

Модуль трещиноватости характеризует количество трещин, развитых на протяжении 1 м рассматриваемого разреза горного массива. По модулю трещиноватости горные породы по СНиП II-16-76 рекомендуется делить на четыре группы (табл. 2).

Таблица 2

Группа пород	Модуль трещиноватости	Среднее расстояние между трещинами, м
Слаботрещиноватые	1,5	0,65
Среднетрещиноватые	1,5–5	0,20–0,65
Сильнотрещиноватые	5–30	0,03–0,20
Весьма сильнотрещиноватые (раздробленные)	30	0,03

Модуль трещиноватости обычно определяют как для исследуемых обнаженных поверхностей пород, так и для каждой из основных систем трещин. Применительно к последним его определяют вкрест простиранию к плоскостям трещин и используют для решения общегеологических задач, а также в практике проектирования гидротехнических сооружений. Этот показатель служит для выявления механизма образования трещин, их связи с основными складчатыми и разрывными структурами, а также дает возможность судить об анизотропности инженерно-геологических свойств пород (прочности, деформируемости, водо- и газопроницаемости).

Блочность характеризует средний размер элементарных блоков, на которые массив расчленен трещинами, или количество кусков породы в 1 м³. Чем меньше при прочих равных условиях элементарные блоки, тем ниже устойчивость пород в подземной выработке и тем легче они поддаются разработке.

Заполнитель трещин в значительной степени определяет устойчивость пород в подземной выработке и их водопроницаемость. Заполнитель может быть представлен как продуктами разрушения пород (песок, супесь, глина), так и минеральным веществом (кальцит, гипс и др.). Эти продукты могут заполнять трещину полностью или частично. При изысканиях необходимо выявить мощность и состав заполнителя, оценить его прочность, суффозионную устойчивость, сжимаемость и сопротивление сдвигу.

Косвенными показателями степени разрушенности скальных пород могут служить также коэффициент выветрелости (отношение плотности выветрелой породы к плотности невыветрелой) и коэффициент трещинной пустотности (отношение объема полостей трещин к объему породы).

Для оценки трещиноватости массивов пород используют также результаты опытных нагнетаний и наливов в буровые скважины. По удельному водопоглощению q , л/мин, и коэффициенту фильтрации K_f , м/сут, породы можно классифицировать согласно СНиП II-16-76 (табл. 3).

Таблица 3

Степень водопроницаемости пород	Удельное водопоглощение q , л/мин	Коэффициент фильтрации K_f , м/сут
Практически водонепроницаемые	Меньше 0,01	Меньше 0,01
Слабоводопроницаемые	0,01–0,1	0,01–0,1
Водопроницаемые	0,1–1	0,1–1
Сильноводопроницаемые	1–10	1–10
Очень сильноводопроницаемые	Больше 10	Больше 10

В разведочных и строительных горных выработках могут выполняться опыты по воздушному определению трещиноватости горных пород методом ВОТ. Результаты этих определений используют для косвенной оценки трещиноватости пород и наблюдений за их разгрузкой в массиве.

При бурении разведочных скважин о степени трещиноватости пород можно судить по выходу керна или показателю качества породы RQD (см § 4). Однако эти показатели являются косвенными и могут быть использованы только при наличии других качественных и количественных характеристик трещиноватости.

В настоящее время наметилась тенденция комплексного подхода к оценке степени трещиноватости пород массива и его нарушенности в целом, т. е. не только по приведенным показателям, но и по деформационным и упругим характеристикам: модулю деформации E и скорости распространения упругих волн (см. § 4).

Собранные в процессе полевых исследований данные о простирании и углах падения трещин подвергают графической обработке, что позволяет систематизировать трещины и наглядно показывать закономерность их ориентировки. Чаще всего для этого используют круговые диаграммы, диаграммы-розы и карты трещиноватости.

Характерный пример круговой диаграммы трещиноватости, составленной применительно к практике проектирования гидротехнических туннелей, приведен на рис. 2 Эта форма графической обработки позволяет наглядно представить ориентировку основных систем трещин и выбрать оптимальное место расположения и компоновку проектируемых подземных сооружений по отношению к наиболее неблагоприятным системам трещин, которые могут способствовать образованию вывалов пород.

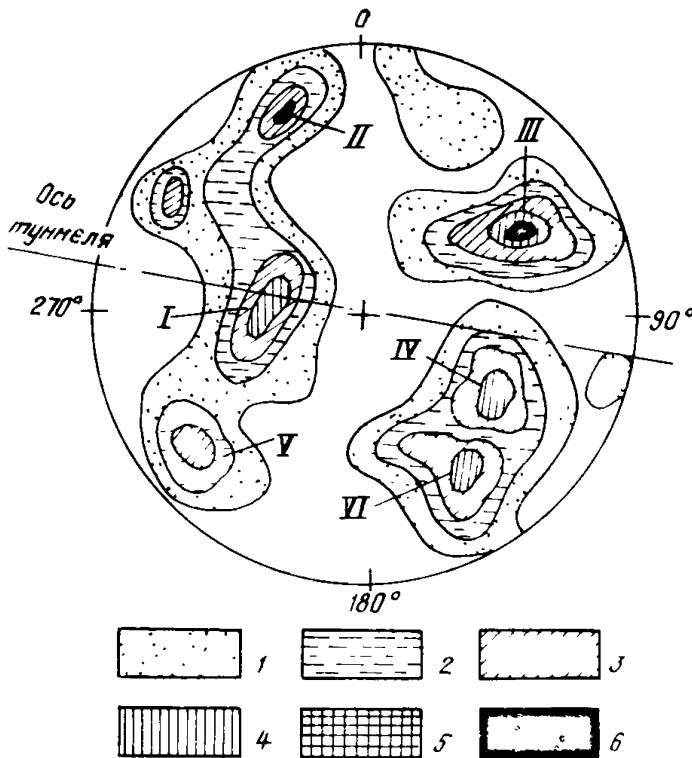


Рис. 2. Круговая диаграмма трещиноватости горных пород: содержание трещин 1 — до 2%; 2 — до 5%; 3 — до 10%; 4 — до 15%; 5 — до 20%; 6 — до 30%. I—VI системы трещиноватости

Существуют и другие методы обработки данных по трещиноватости массивов скальных пород: вероятностный метод, предложенный Э. Г. Газиевым, метод М. В. Раца [17] и др.

Трещиноватость в значительной степени определяет устойчивость пород в подземных выработках. Неблагоприятными для устойчивости пород обычно являются системы трещин с субпараллельным простиранием по отношению к стенкам подземных выработок, имеющие крутые (от 40 до 80°) углы падения, глинистый

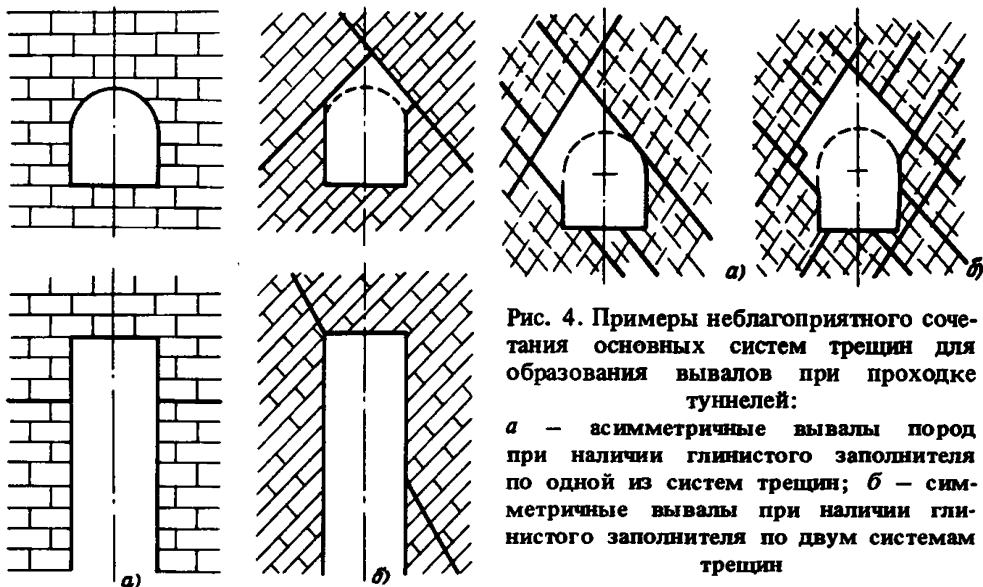


Рис. 3. Характерные случаи пересечения пластов и трещин в горных массивах при проходке туннелей:

а — благоприятные (под прямым углом); *б* — неблагоприятные (под острым углом)

заполнитель, зеркала скольжения. В этих случаях независимо от состава и крепости пород в своде и стенках выработок неизбежны вывалы. Высота куполов вывалов над сводом обычно определяется направлениями сходящихся плоскостей трещин.

Типичные схемы неблагоприятного сочетания основных систем трещин в горизонтальных выработках приведены на рис. 3 и 4. В выработках, проходимых в слоистых скальных породах с ярко выраженной пластовой отдельностью, образование вывалов пород происходит в основном со стороны нависающих пластов (рис. 5). Опыт показывает, что объемы вывалов меньше зависят от крепости пород, чем от степени их трещиноватости, характера напластования, угла падения, мощности пластов, обводненности, наличия слабых прослоев, глинистого заполнителя по трещинам и т. п. Этими же факторами обычно определяется и асимметрия очертаний вывалов.

Пример крупного вывала, связанного с зоной тектонического дробления, смятия и обводненности пород при проходке туннелей, приведен на рис. 6. Следует, однако, иметь в виду, что большая часть таких вывалов помимо инженерно-геологических факторов бывает обусловлена несоблюдением соответствующих технических условий проходки выработок: нарушениями технологии разработки, неоправданно большими зарядами взрывчатых веществ, отставанием или недостаточной прочностью крепления и недостаточной достоверностью прогнозов инженерно-геологических условий.

При проектировании и строительстве туннелей, как правило, более благоприятными представляются случаи, когда туннели проходят вкрест по отношению

к простиранию пластов и основных тектонических нарушений. В этих случаях обычно наблюдается более частое чередование различных инженерно-геологических условий, но при встрече неблагоприятных участков пласты пересекаются по кратчайшему расстоянию.

При прохождении туннелей по простиранию или под острыми углами к направлению простирания пород и основных тектонических нарушений чаще всего возникают неблагоприятные условия. При выборе трассы в этих условиях следует обращать особое внимание на то, чтобы туннель не прошел по наиболее слабым пластам или не совпал с зоной крупного тектонического нарушения. При оценке устойчивости стен и свода подземной выработки в зависимости от угла встречи трассы с простиранием пород и тектонических зон необходимо учитывать также угол падения, прочность, характер трещиноватости и ряд других факторов.

Разведочные работы. С помощью разведочных выработок уточняют геологическое строение, устанавливают физико-механические свойства и водопроницаемость пород, геотермические условия и газоносность. По трассам туннелей и на участках расположения подземных камер проходят глубокие буровые скважины, а на участках неглубокого заложения сооружений – горные выработки. Применение разведочных работ ограничено трудной доступностью горной местности и большой глубиной заложения сооружений. Поэтому назначать их необходимо весьма обоснованно, с учетом условий выполнения работ.

Основную часть разведочных выработок закладывают на наиболее выжных и сложных в инженерно-геологическом отношении участках. К их числу относятся: порталные участки туннелей на склонах с мощными поверхностными отложениями; участки развития слабых и недостаточно устойчивых горных пород; контакты и зоны тектонических нарушений; участки развития оползней, карста, пород с повышенной водоносностью; участки неглубокого заложения туннелей, прохождения их под современными и погребенными эрозионными понижениями рельефа.

Горные разведочные выработки (шурфы, шахты, смотровые скважины, штольни) дают наиболее полную и объективную информацию о геологическом строении, однако применение их ограничено большой стоимостью горных работ, которая резко возрастает с увеличением глубины выработки. Поэтому их обычно проходят только на порталах туннелей и в местах заложения различных подземных камер для вскрытия отдельных контактов и зон ослабления пород, залегающих на относительно небольшой глубине.

Для разведки трасс туннелей и участков других подземных сооружений глубокого заложения проходят буровые скважины. Разведочные скважины, закладываемые на трассе выбранного варианта туннеля, должны быть на 10 м глубже отметки его подошвы, но глубина скважин обычно не должна превышать 300 м, так как более глубокое бурение малоэффективно и сложно по организации в горных условиях. Бурение по трассе туннеля скважин глубиной более 300 м должно быть обосновано особыми геологическими условиями или проектно-техническими соображениями: необходимостью выявить крупные тектонические нарушения и другие важные контакты и зоны, установить геотермические условия и газоносность пород и др.

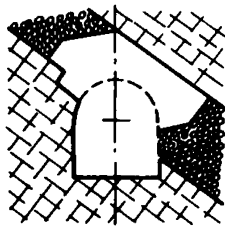
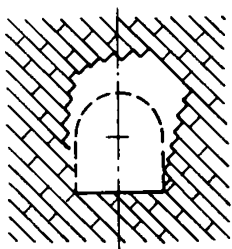


Рис. 5. Характерные вывалы в туннелях, проходимых в слоистых скальных породах с ярко выраженной трещиноватостью напластования

Рис. 6. Крупный вывал породы, связанный с зоной тектонического дробления

По осям проектируемых строительных шахт и камер подземных зданий ГЭС и ГАЭС скважины проходят на всю глубину заложения этих сооружений. В целях получения наиболее полной информации разведочные скважины надо проходить в скальных породах колонковым способом и контролировать их отклонение от заданного направления.

Геофизические методы разведки применяют для изучения геологического строения и физико-механических свойств пород в массиве. С помощью этих методов могут быть выявлены контакты и тектонические зоны, границы распространения пород, резко отличающихся по физическим свойствам. Наиболее успешно эти методы используют на трассах туннелей и участках подземных сооружений малой и средней глубины заложения. По трассам туннелей и других сооружений глубокого заложения, а также при сильной изрезанности местности поверхностные методы геофизической разведки, как правило, имеют ограниченное применение и часто не дают желаемых результатов. В этих случаях находят применение главным образом различные скважинные методы (сейсмический, ультразвуковой, электрический и термический каротаж), которые дают возможность определить некоторые физико-механические показатели пород (степень сохранности, деформационные свойства и др.), а также геотермические условия.

3. ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Задачи и методы. Гидрогеологические наблюдения и исследования, выполняемые при инженерно-геологических изысканиях на различных стадиях и этапах проектирования подземных гидротехнических сооружений, должны дать материал, необходимый для характеристики общих гидрогеологических условий и установления параметров отдельных водоносных горизонтов.

Изучение гидрогеологических условий на каждой стадии (этапе) проектирования должно давать достаточный материал для прогноза возможных притоков вод в подземные выработки, определения гидростатических напоров подземных вод, действующих на обделку сооружений, и оценки агрессивности вод по отношению к бетону.

Основными вопросами, которые должны быть освещены при характеристике гидрогеологических условий, являются:

стратиграфическое положение, литологический состав, условия залегания водонасыщающих и водоупорных пород;

гидравлические типы основных водоносных горизонтов, их распространение и мощность;

условия питания и дренирования водоносных горизонтов, положение уровней и режим подземных вод;

водопроницаемость и водообильность пород;

химический состав и агрессивность подземных вод.

Большая часть перечисленных вопросов решается в комплексе с другими вопросами инженерно-геологических изысканий в ходе выполнения инженерно-геологических съемок, разведочных работ по трассам и участкам расположения основных сооружений. Для более подробного изучения гидрогеологических условий можно выполнять гидрогеологическую съемку, бурение скважин, наблюдения за режимом подземных вод и некоторые специальные исследования: изучение направления и действительных скоростей движения подземного потока, выявление карстовых полостей, путей движения сосредоточенных подземных потоков.

По трассам напорных деривационных туннелей и на участках других подземных сооружений с водопроницаемой облицовкой, которые могут подвергаться воздействию больших естественных гидростатических напоров, на ранних стадиях

изысканий должны быть установлены уровни подземных вод. На стадии проекта необходимо изучать режим подземных вод путем наблюдений в буровых скважинах, на источниках и т. п. На стадии рабочей документации наблюдения за режимом подземных вод должны быть продолжены.

Для изучения водообильности и водопроницаемости пород во всех разведочных выработках на стадии проекта выполняют опытно-фильтрационные работы: наливов, нагнетания и откачки воды. При наличии разведочных горных выработок может быть использован как дополнительный метод определения водопроницаемости по параметрам трещиноватости, основные положения которого изложены в [17].

Опытные наливов и нагнетания обычно проводят на отметках заложения подземных выработок как в обводненных, так и в необводненных породах. Откачки проводят при залегании уровня воды не глубже 100 м, так как при большей глубине они малозффективны и трудны.

По результатам опытных работ определяют водопроницаемость пород вокруг выработки и рассчитывают фильтрацию из туннеля или приток воды в выработку, а также оценивают возможность и условия выполнения инъекционного уплотнения пород.

Опытно-фильтрационные работы следует производить в соответствии с действующими руководствами [22–27] и ГОСТ 232778–78 „Грунты, методы полевых испытаний проницаемости”.

Прогноз притока воды в подземные выработки является весьма сложной задачей. Это обусловлено трудностью учета всего многообразия и непостоянства отдельных факторов, определяющих гидрогеологические условия, особенно при наличии трещинных и карстовых вод и в районах с несколькими взаимодействующими водоносными горизонтами. Наибольшую трудность представляет прогноз притоков трещинно-напорных вод, приуроченных к зонам тектонических нарушений, и карстовых вод. С этими водами при проходке подземных выработок часто бывают связаны большие притоки, а иногда и внезапные прорывы вод, дебит которых в начальный период может достигать нескольких сотен литров в секунду, но затем он обычно уменьшается.

В зависимости от конкретных гидрогеологических условий и наличия соответствующих исходных данных для определения ожидаемого притока подземных вод в горные выработки пользуются следующими основными методами: аналитическим, гидрогеологических аналогий, водного баланса и моделирования.

При прогнозе притока воды аналитическим методом принимают, что в области фильтрации действует линейный закон сопротивления движению подземных вод (закон Дарси) даже при больших понижениях уровня и приуроченности этих вод к трещиноватым закарстованным породам. Движение подземных вод по нелинейному закону сопротивления может возникать в редких случаях лишь в непосредственной близости от подземных выработок.

Аналитический метод используют, когда геологические и гидрогеологические условия, определяющие характер и размеры притоков воды, могут быть сведены к типовым расчетным схемам. Эти схемы определяют простейшую геометрическую конфигурацию области фильтрации в плане, однородность и изотропность расчетной водоносной толщи, отсутствие дополнительного питания водоносного горизонта по площади, горизонтальное залегание водоупора (для безнапорных горизонтов), линейность процесса фильтрации, совершенство границ области фильтрации (ограничение ее водоупорными породами), соблюдение на них простейших граничных условий.

Типовым расчетным схемам по конфигурации границ пласта в плане отвечают неограниченный водоносный пласт (в течение расчетного времени влияние границ пласта не сказывается на режиме фильтрации) и водоносные пласты с фиксированными внешними контурами простейшей геометрической формы (полуограниченный

пласт, пласт-полоса, круговой пласт). Внутренние границы области фильтрации определяются расположением и формой подземной выработки. Простейшим граничным условиям на внешних и внутренних границах области фильтрации отвечают:

а) граничные условия первого рода, когда задано определенное значение напора, которое чаще всего принимают постоянным по всей границе и неизменным во времени (например, река или водоем с незакольтматированным руслом):

б) граничное условие второго рода, когда на границе области фильтрации задан расход потока, в частном случае этот расход равен нулю.

При схематизации гидрогеологических условий для расчета притоков воды аналитическим методом неоднородные слоистые в профиле толщи пород и неоднородные в плане массивы пород, отдельные слои или участки которых отличаются по водопроницаемости менее чем в 10 раз, могут быть приведены к однородным со средним коэффициентом фильтрации, который для слоистой толщи при движении подземных вод вдоль пластов определяют по формуле

$$K_{ср} = \frac{K_1 m_1 + K_2 m_2 + \dots + K_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}; \quad (1)$$

для неоднородного в плане массива пород

$$K_{ср} = \frac{K_1 p_1 + K_2 p_2 + \dots + K_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n}, \quad (2)$$

где K_1, K_2, \dots, K_n – коэффициенты фильтрации отдельных слоев или участков массива, м/сут; m_1, m_2, \dots, m_n – мощности отдельных слоев, м; p_1, p_2, \dots, p_n – площади отдельных участков массива, характеризующихся различными коэффициентами фильтрации K_1, K_2, \dots, K_n .

В случае резкого различия водопроницаемости отдельных слоев или участков массива (более чем в 10 раз) расчет притоков воды в подземные выработки производится для каждого слоя или участка массива в отдельности. При этом движением подземных вод в слабопроницаемых слоях (на слабопроницаемых участках) можно пренебречь, приняв эти слои (участки массива) за относительный водоупор.

Для оценки притоков воды используют наиболее простые расчетные зависимости стационарной фильтрации, учитывающие гидравлический характер и основные гидрогеологические параметры водоносных пластов, глубину заложения и форму выработок и их расстояние до границ питания и естественного дренажа, а если эти границы отдалены (схема неограниченного пласта), – радиус влияния, т. е. расстояние от выработки до условного контура фильтрации.

Для определения притока воды в шахты и шахтные стволы с системой горизонтальных выработок обычно используют расчетные зависимости притока воды к скважинам, в которых радиус скважины r заменяют радиусом шахты $r_{ш}$ или приведенным радиусом „большого колодца” r_0 , сечение которого равновелико площади участка, занимаемого системой выработок, при условии, что отношение поперечных размеров последнего меньше 10.

При отношении поперечных размеров участка, занимаемого системой выработок, меньше 3 значение r_0 вычисляют по формуле

$$r_0 = \sqrt{F/\pi}; \quad (3)$$

при отношении больше 3 – по формуле

$$r_0 = P/2\pi, \quad (4)$$

где F и P соответственно площадь, м², и периметр, м, участка, занимаемого системой выработок.

В условиях неограниченного пласта ожидаемый максимальный приток воды, м³/сут, в шахту („большой колодец“), полностью пересекающую водоносный пласт, может быть определен по формулам Дюпюи:

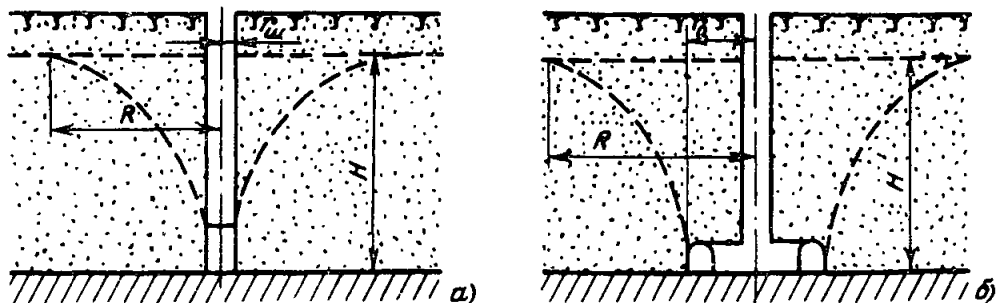


Рис. 7. Схема притока безнапорных вод в неограниченном пласте:
а – к шахтному стволу; б – к системе выработок („большому колодцу“)

приток из безнапорного пласта (рис. 7)

$$Q = \frac{1,36KH^2}{\lg R - \lg r_w}; \quad (5)$$

$$Q = \frac{1,36KH^2}{\lg(R+r_0) - \lg r_0}; \quad (5a)$$

приток из напорного пласта (рис. 8)

$$Q = \frac{1,36K(2H-M)M}{\lg R - \lg r_w}; \quad (6)$$

$$Q = \frac{1,36K(2H-M)M}{\lg(R+r_0) - \lg r_0}; \quad (6a)$$

где H – мощность безнапорного водоносного пласта или высота пьезометрического уровня напорных вод, м, измеряемые по оси ствола шахты („большого колодца“);
 M – мощность напорного водоносного пласта, м; R – радиус влияния, м.

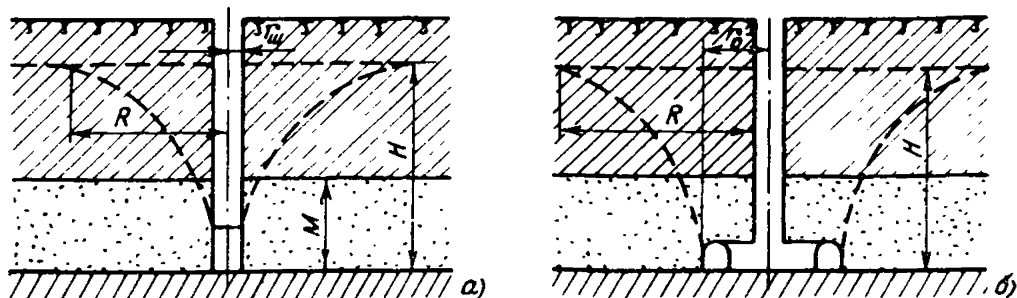


Рис. 8. Схема притока напорных вод в неограниченном пласте:
а – к шахтному стволу; б – к системе выработок („большому колодцу“)

При наличии нескольких разобнесенных напорных водоносных горизонтов водопритоки определяют по каждому из них отдельно. При этом следует учитывать, что шахтные стволы обычно вскрывают все водоносные горизонты, а горизонтальные

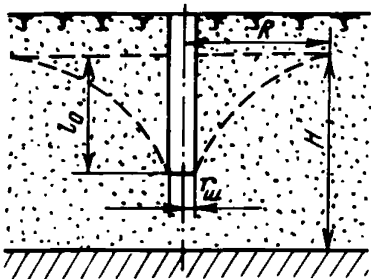


Рис. 9. Схема притока безнапорных вод в шахту, частично вскрывающую водоносный пласт

и наклонные выработки – только часть водоносной толщи. В связи с этим нередко приходится делать отдельные расчеты водопритокков по шахтным стволам и системам горизонтальных и наклонных выработок, используя в зависимости

от конкретных условий различные расчетные схемы.

Приток в шахту („большой колодец“) из безнапорного водоносного пласта при расположении выработок вблизи водоема на расстоянии $L < 0,5 R$ определяют по формулам (5) и (5а), в которых R заменяют на $2L$.

Приток воды в шахту, частично вскрывающую безнапорный водоносный пласт в процессе проходки (рис. 9), может быть определен по формуле А. Чарного при условии $l_0 > 5r$

$$Q = \frac{\pi K H l_0}{\ln \frac{R}{r_w} + \left(\frac{H}{l_0} - 1\right) \ln \frac{4H}{r_w} - \frac{H}{2l_0} \varphi\left(\frac{l_0}{H}\right)}, \quad (7)$$

где l_0 – размер заглубления ствола шахты ниже статического уровня, м; $\varphi(l_0/H)$ – функция, значения которой приведены ниже:

l_0/H	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\varphi(l_0/H)$	6,4	5,2	3,7	2,5	1,3	0,0

Значение расчетного радиуса влияния при прогнозе ожидаемого притока воды в шахту („большой колодец“) в условиях неограниченного пласта можно приближенно определить по эмпирическим формулам или данным о радиусе влияния кустовых откачек, выполненных в аналогичных гидрогеологических условиях. Из эмпирических формул для определения радиуса влияния в безнапорном пласте чаще всего используют формулу И. П. Кусакина

$$R = 2S\sqrt{KH}; \quad (8)$$

в напорном пласте – формулу Зихардта

$$R = 10S\sqrt{K}; \quad (9)$$

где S – понижение уровня воды в стволе шахты („большом колодце“), м.

Следует учитывать, что применительно к трещиноватым породам эти формулы дают заниженные значения радиуса влияния. Радиус влияния при опытной кустовой откачке, которая должна быть достаточно продолжительной, можно приближенно вычислить по формулам, вытекающим из основных уравнений движения воды к скважинам:

для напорных вод

$$\lg R = \frac{S_1 \lg X_2 - S_2 \lg X_1}{S_1 - S_2}; \quad (10)$$

для безнапорных вод

$$\lg R = \frac{S_1(2H - S_1) \lg X_2 - S_2(2H - S_2) \lg X_1}{(S_1 - S_2)(2H - S_1 - S_2)}, \quad (11)$$

где x_1 и x_2 – расстояния от центральной до наблюдательных скважин; S_1 и S_2 – понижения уровня воды в наблюдательных скважинах.

Имея опытные данные кустовых откачек, значение расчетного радиуса влияния шахты, („большого колодца“) можно приближенно определить по формулам Краснопольского–Керкиса:

в условиях напорных вод

$$R(\lg R - \lg r_0) = R_{отк}(\lg R_{отк} - \lg r) S / S_{отк}; \quad (12)$$

в условиях безнапорных вод

$$R(\lg R - \lg r_0) = R_{отк}(\lg R_{отк} - \lg r) \frac{(2H - S)S}{(2H - S_{отк})S_{отк}}, \quad (13)$$

где r , $S_{отк}$, $R_{отк}$ – соответственно радиус скважины, понижение уровня и радиус влияния при откачке; r_0 , S , R – соответственно радиус „большого колодца“, понижение уровня в нем и радиус его влияния.

Для прогноза притока воды в горизонтальные и наклонные подземные выработки при неглубоком их заложении в зоне полного водонасыщения могут быть использованы расчетные зависимости притока воды к горизонтальному линейному дренажу.

Приток воды к горизонтальной выработке, заложенной на водоупоре в неограниченном пласте, при поступлении воды с двух сторон может быть определен по преобразованным формулам Дюпюи:

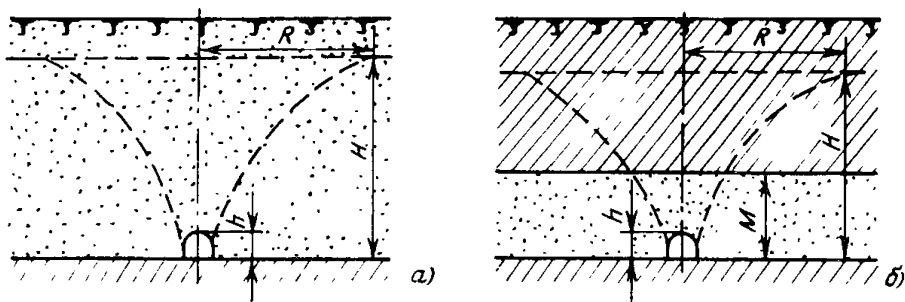


Рис. 10. Схемы притока подземных вод к совершенной горизонтальной выработке: а – безнапорные воды; б – напорные воды

из безнапорного водоносного пласта (рис. 10, а)

$$Q = KH^2B/R; \quad (14)$$

из напорного водоносного пласта (рис. 10, б)

$$Q = K(2H - M)MB/R, \quad (15)$$

где H – средняя мощность безнапорного пласта или средний пьезометрический уровень напорного пласта, м; B – длина выработки, м.

Приток безнапорных вод к горизонтальной выработке несовершенного типа в тех же условиях (рис. 11, а) может быть определен по формуле А. В. Романова

$$Q = KB \left[\frac{h^2}{R} + \frac{\pi(H - T)}{2 \left(\lg \frac{2T}{\pi b} + \frac{\pi R}{2T} \right)} \right], \quad (16)$$

где h – расстояние от подошвы выработки до непониженного уровня воды, м; B – длина выработки, м; b – ширина выработки, м; T – расстояние от подошвы выработки до водоупора, м.

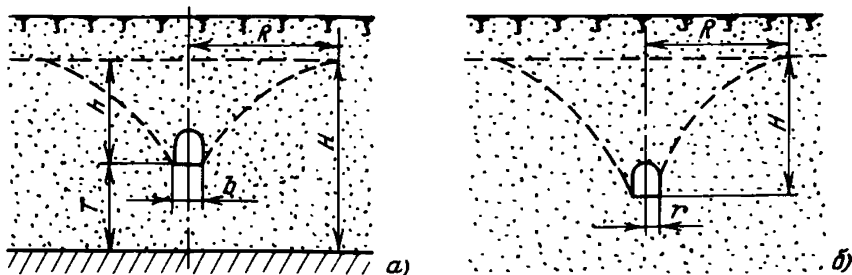


Рис. 11. Схема притока безнапорных вод к несовершенной горизонтальной выработке: *а* – при неглубоком залегании водоупора; *б* – при глубоком залегании водоупора

Приток безнапорных вод к горизонтальной выработке несовершенного типа при глубоком залегании водоупора (рис. 11, б) может быть определен по формуле А. Н. Костякова

$$Q = \frac{2\alpha K H_1}{\lg R - \lg r}, \quad (17)$$

где H_1 – глубина погружения центра выработки в водоносный слой, м; $\alpha = \pi/2 + H_1/R$; r – радиус (или приведенный радиус) выработки, м.

Приток воды из безнапорного горизонта к горизонтальной выработке, расположенной на водоупоре параллельно водоему на расстоянии L , может быть определен по формуле Дюпюи

$$Q = KB \left(\frac{H^2}{2L} + q \right), \quad (18)$$

где H – превышение уреза воды в водоеме над водоупором, м; q – удельный расход грунтового потока до устройства выработки, определяемый обычными гидрогеологическими методами.

Эмпирические формулы для определения установившегося радиуса влияния горизонтальных выработок в условиях неограниченного пласта отсутствуют. Для ориентировочного расчета этого радиуса допускается использование приведенных зависимостей, справедливых для вертикальных водосборов.

При глубоком заложении горизонтальной выработки в зоне полного водонасыщения большой мощности кривая депрессии подземных вод, особенно в слабо-водопроницаемых породах, не опускается до отметок заложения выработки. Над ней образуется лишь незначительное понижение (прогиб) уровня подземных вод (рис. 12).

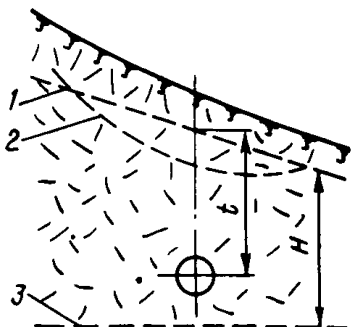
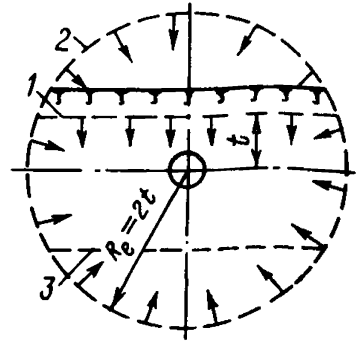


Рис. 12. Схема депрессионной поверхности подземных вод над горизонтальной выработкой глубокого заложения:

- 1 – непониженный уровень подземных вод;
- 2 – пониженный уровень подземных вод;
- 3 – плоскость отсчета напоров

Рис. 13. Схема внешних границ области фильтрации:

1 – плоская граница области фильтрации; 2 – эквивалентная круговая граница области фильтрации; 3 – плоскость отсчета измерений



В практических расчетах можно пренебречь этим прогибом и считать верхнюю границу области фильтрации плоской, принимая напор на слой постоянным. Это допущение приводит к практически незначительному завышению при расчетах водопритоков в выработку. В связи с тем что выработка не может дренировать всю вышележащую толщу пород над ее сводом, приток в нее будет определяться фильтрационной способностью ее поверхности.

В соответствии с „Указаниями по проектированию дренажа подземных гидротехнических сооружений” приток воды в туннельную выработку в таких условиях может быть рассчитан по формуле, аналогичной формуле Дюшои для притока воды к совершенной скважине в напорном пласте,

$$Q = \frac{2\pi KHB}{\ln R_e - \ln R}, \quad (19)$$

где $R_e = 2t$; t – расстояние от оси выработки до плоской границы области питания, м; $H \approx t$ – действующий напор, м; R – радиус выработки, м, при поперечном сечении выемки, отличном от кругового.

Расчетный радиус выработки определяется по формуле $R = P/2\pi$, где P – периметр поперечного сечения, м.

Это приближенное решение основывается на теоретических исследованиях, согласно которым для подземной выработки протяженностью B и глубиной заложения t , которые значительно превосходят ее поперечные размеры, взамен плоской границы области фильтрации с соответствующим напором на ней можно принять эквивалентную границу в виде соосного кругового цилиндра с радиусом $R_e = 2t$ (рис. 13).

Метод гидрогеологических аналогий является приближенным. и обоснованность прогнозов этим методом определяется правильным выбором аналога. Аналогия должна быть по геологическому разрезу участков сооружений и условиям их обводненности. Метод целесообразно применять в сложных гидрогеологических условиях, когда их изучение для прогноза притоков воды гидродинамическим методом сопряжено с большими трудностями (определение расчетных параметров, граничных условий и т. д.). В первую очередь это относится к прогнозу притоков воды по зонам тектонических нарушений, пластам закарстованных карбонатных, гипсоносных и соленосных пород, на участках развития молодых лавовых потоков и покровов и т. п. Для приближенной оценки притоков воды в горные выработки, проходимые в сравнительно простых гидрогеологических условиях, расчеты по методу аналогий могут базироваться на гидродинамических зависимостях. Так, оценку притоков воды в проектируемую шахту, которая отличается от шахты-аналога лишь значениями понижения в ней, можно провести по формуле, позволяющей учесть разницу в понижениях в безнапорных условиях

$$Q_n = Q_3 \frac{(2H_n - S_n) S_n}{(2H_3 - S_3) S_3}, \quad (20)$$

где $Q_{\text{п}}$ и $Q_{\text{з}}$ – соответственно прогнозный приток в проектную выработку и фактический приток в построенную выработку-аналог, м³/сут; $H_{\text{п}}$ и $H_{\text{з}}$ – мощность водоносного горизонта соответственно в проектной и построенной выработках, м; $S_{\text{п}}$ и $S_{\text{з}}$ – понижения уровня воды соответственно в проектной и построенной выработках, м.

Использование для прогнозов притоков воды в подземные выработки балансового метода, основанного на учете всех составляющих питания и разгрузки подземных вод в условиях их отбора, весьма ограничено в силу слабого дренирующего влияния этих сооружений, обусловленного их сравнительно небольшими размерами. Балансовый метод может быть применен лишь в условиях локального развития водоносных горизонтов (например, при пересечении подземными выработками закрытых и полузакрытых пластов) при наличии данных о количественных характеристиках питания и дренирования подземных вод.

Способы различного моделирования гидрогеологических условий для определения притока вод в подземные выработки применяются сравнительно редко, главным образом в тех случаях, когда объект исследования, являясь сложным в гидрогеологическом отношении, заслуживает особого внимания, а расчеты по другим методам не дают удовлетворительных результатов. Наиболее распространенным в практике исследований для гидротехнического строительства является метод моделирования, основанный на электрогидродинамических аналогиях (ЭГДА), который позволяет решать как плоские, так и пространственные задачи. Расчеты притоков воды с помощью моделирования обычно выполняют специализированные подразделения научно-исследовательских институтов и лабораторий.

Прогноз гидростатического давления на обделку туннеля и оценка агрессивности подземных вод. Подземные гидротехнические сооружения часто строят значительно ниже уровня подземных вод или ложа водоема. В таких условиях для напорных туннелей, водоводов и других сооружений, выполняемых с бетонной или металлической обделкой, должен быть дан прогноз размеров гидростатического давления, действующего на обделку. При ожидаемом значительном давлении подземных вод на отметках заложения сооружений в проекте предусматривают усиление обделки в целях полного восприятия ею этого давления или мероприятия по уменьшению давления подземных вод – общий или местный дренаж и др.

Значение возможного гидростатического давления на обделку туннеля определяется как разность абсолютных отметок уровня подземных вод (свободного или пьезометрического) и заложения туннеля. Прогнозная оценка гидростатического давления на обделку подземных сооружений должна базироваться на данных не только о положении уровней подземных вод, но и о водопроницаемости пород на отметках заложения сооружений. Необходимо установить границу, ниже которой породы являются практически водонепроницаемыми. Как показывает опыт строительства некоторых туннелей (деривационный туннель Шамбской ГЭС, туннель Арпа-Севан и др.), эта граница на отдельных участках находится выше кровли подземных сооружений, поэтому проходка их на этих участках осуществлялась в необводненных породах. Прогноз возможности проявления гидростатического давления на участках проектируемых подземных сооружений надо давать с учетом положения этой границы по отношению к отметкам заложения подземных сооружений. Для ориентировочного определения положения границы практически водонепроницаемых пород следует использовать результаты всего комплекса изыскательских работ – геолого-съемочных, геофизических, буровых и опытно-фильтрационных.

Прогноз распределения и размеров гидростатического давления, действующего на обделку, с учетом работы дренажа может быть сделан достаточно правильно только с помощью исследований на пространственных моделях ЭГДА. В необходимых случаях такие исследования выполняют на стадии рабочей документации специализированные организации.

Данные о положении уровней и напоров подземных вод на участках заложения проектируемых подземных сооружений используются также для оценки возможного развития некоторых инженерно-геологических процессов, связанных с разгрузкой подземных вод во время строительства сооружений: суффозионного выноса частиц, вымыва заполнителя трещин, прорыва подземных вод в выработку, деформаций пород под напором воды, гравитационного уплотнения и осадок пород в пределах воронки депрессий и т. п.

Оценку агрессивности подземных и поверхностных вод производят по данным об их химическом составе в соответствии со СНиП II-28-73 „Защита строительных конструкций от коррозии“.

При проектировании напорных подземных сооружений предъявляются более высокие требования к данным о химическом составе и оценке агрессивности вод, причем следует учитывать все возможные изменения этих показателей по сезонам года. Известно, например, что выщелачивающая агрессивность вод горных рек, пропускаемых по туннелям, и некоторых подземных вод резко возрастает в наводковый период, а сульфатная агрессивность подземных вод – зимой.

Следует учитывать также возможность повышения агрессивности подземных вод, поступающих в подземную выработку из различных водоносных горизонтов, в результате их смещения. Повышение агрессивности воды возможно также при фильтрации ее за обделку туннеля. Это может вызвать растворение вмещающих пород и разрушение бетона.

4. ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Общая инженерно-геологическая характеристика горных пород. В практике изысканий для подземного гидротехнического строительства чаще всего приходится иметь дело со скальными и полускальными породами и реже с крупнообломочными, песчаными и глинистыми. Указанные виды пород существенно различаются по физико-механическим свойствам, поэтому при проходке в них подземных выработок применяют различные способы крепления.

Существуют два принципиально разных подхода к креплению подземных выработок. В относительно устойчивых массивах, но находящихся в сильно напряженном состоянии, работы ведут с отставанием крепления от забоя или с применением гибкого крепления с целью дать массиву разгрузиться. В относительно мало устойчивых массивах, находящихся в слабо напряженном состоянии, работы ведут преимущественно с жестким креплением, которое устанавливают вслед за забоем, чтобы не дать массиву разгрузиться и потерять устойчивость. В материалах изысканий должны быть приведены данные, необходимые для выбора способа крепления выработки исходя из устойчивости пород.

Наиболее устойчивыми в подземных выработках являются массивные, слабогребциноватые изверженные и метаморфические скальные породы: кварциты, диабазы, граниты, гнейсы, кристаллические сланцы и др. Пройденные в таких породах подземные выработки даже большого сечения, обычно не крепят, эти породы не отслаиваются и не создают большого горного давления.

Известняки, песчаники, крепкие аргиллиты и алевролиты и подобные им слоистые породы средней крепости, если они слабогребциноватые, также не создают большого горного давления в выработках, поэтому в них требуется крепление только защитного, а не несущего типа.

В мергелях, глинистых сланцах, слабых известняках и доломитах, алевролитах и аргиллитах средней прочности и других полускальных породах, создающих вертикальное и боковое горное давление, обычно требуется несущее крепление выработок. Эти породы легко подвергаются выветриванию, а некоторые их разновидности в выветренном состоянии способны размокать и разбухать.

Некоторые разновидности глинистых сланцев и алевролитов после вскрытия забоем под воздействием сухового воздуха теряют содержащуюся в них влагу и превращаются в рыхлую породу. Для защиты их применяют быстрое покрытие набрызг-бетоном (Нурекская ГЭС). Другие разновидности сланцев под влиянием поступающих в выработку подземных вод и влажного воздуха подвержены пучению. Разрушение и пучение глинистых сланцев, мергелей и глин сопровождается ростом горного давления.

Устойчивость слоистых и сланцеватых горных пород в подземных выработках меньше, чем массивных, так как слоистые породы обычно более трещиноватые. Чем меньше прочностные связи между слоями, ослабленными трещинами напластования, и чем тоньше эти слои, тем легче породы обрушаются в выработке. Поэтому подземные выработки в слоистых породах рекомендуется проходить целиком или хотя бы сводовой частью в пределах залегания толстослоистых пород. Вторичная сланцеватость пород (кливаж) способствует их дроблению, особенно в тех случаях, когда направление сланцеватости перпендикулярно слоистости.

В связных и несвязных нескальных породах подземные гидротехнические сооружения строят редко. Обычно в них проходят только припортальные участки. Эти породы оказывают всестороннее горное давление, в них необходимо применять сплошную несущую крепь. Часто они бывают обводненными, что также весьма осложняет проходку выработок. Проходка подземных выработок в таких грунтах бывает возможна лишь с применением специальных методов: водопонижения, замораживания, опережающего химического закрепления, с использованием щитового способа проходки и др.

Глинистые и глиноподобные породы характерны для зон тектонических нарушений и дроблений, где их протяженность по трассе выработки может достигать десятков и даже сотен метров. Для глинистых пород часто характерны деформации, связанные с их пластическим течением под воздействием естественных гравитационных напряжений в горных массивах, а также явления набухания. В выработках глубокого заложения, как правило, наблюдается выпирание (пучение) этих пород на незакрепленных участках подошвы или стен. Максимальную способность к набуханию имеют высокодисперсные бентонитовые и некоторые другие глины твердой природной консистенции. Давление набухания в них иногда превышает 1,5 МПа и нередко является причиной разрушения крепи (обделки), сужения проектного сечения выработок, что осложняет строительство и эксплуатацию подземных сооружений.

Состав и объем исследований горных пород. Для получения классификационных характеристик и расчетных показателей физико-механических свойств горных пород как среды подземных гидротехнических сооружений выполняют их лабораторные и полевые исследования, примерный состав которых приведен в табл. 4.

Во всех случаях для проектирования подземных гидротехнических сооружений должны быть даны следующие расчетные показатели свойств грунтов: крепость, временное сопротивление сжатию, параметры сопротивления сдвигу φ и c , модуль деформации E , коэффициент удельного отпора K_0 , пучение пород в выработках, напряженное состояние, коэффициент фильтрации. Кроме того, должен быть дан прогноз горного давления, а в процессе строительных работ в отдельных случаях определены его размеры полевыми исследованиями. Исследования горных пород в массиве и в образце следует проводить в условиях, близких к тем, в которых породы будут работать в подземном сооружении, с учетом обводнения, цементации (если она запроектирована), нарушенности пород взрывами, действия длительных и кратковременных нагрузок, слоистости, сланцеватости, трещиноватости.

При проектировании подземных гидротехнических сооружений I и II классов деформационные характеристики пород E и K_0 , сопротивление сдвигу и напряженное состояние должны определяться по данным полевым исследованиям на типичных

Характеристики	Виды пород			
	скальные	полускальные	крупнообломочные песчаные	глинистые
Петрографический состав	+	+	+	+
Гранулометрический состав	—	—	+	+
Плотность частиц грунта	+	+	+	+
Плотность грунта	+	+	+	+
Естественная влажность	—	+	+	+
Показатели пластичности	—	—	—	+
Временное сопротивление сжатию	+	+	—	—
Модуль трещиноватости в массиве	+	+	—	—
Параметры сопротивления сдвигу в массиве и по трещинам	+	+	+	+
Угол естественного откоса в массиве	—	—	+	—
Модуль деформации в массиве и образце	+	+	+	+
Коэффициент удельного отпора в массиве	+	+	+	+
Коэффициент Пуассона в массиве	+	+	+	+
Водопоглощение	+	+	—	—
Набухание	—	+	—	+
Размокаемость	—	+	—	+
Просадочность	—	—	—	+
Содержание водорастворимых солей	—	+	+	+
Коэффициент фильтрации в массиве	+	+	+	+
Напряженное состояние	+	+	—	—

инженерно-геологических участках, определяющих условия проходки и обделки выработки. Для сооружений I и II классов определение коэффициента удельного отпора следует вести методами нагружения круглоцилиндрических выработок (инвентарные установки типа ЦГШ, УЦН и др.). Метод прессиометрии допускается использовать для сооружений этих классов только на ранних стадиях проектирования при выборе варианта компоновки сооружений.

Для подземных сооружений III и IV классов следует предусматривать полевые исследования геофизическими и прессиометрическими методами, при этом допускается использование аналогов.

Размеры горного давления на обделку и крепь для безнапорных подземных сооружений I класса и напорных сооружений I и II классов должны определяться полевыми исследованиями на участках с характерными инженерно-геологическими условиями. Для остальных классов подземных сооружений горное давление допускается определять расчетом по формулам или аналогам [22].

Прогнозирование и полевые исследования горного давления на входят в компетенцию инженера-геолога, так как оно в значительной степени зависит от строительных условий (размеров выработки, способов производства строительных работ и др.). Поэтому исследованием горного давления в процессе строительства занимаются специальные подразделения научно-исследовательских институтов при участии изыскателей и строительных организаций.

В случае если в проекте предусматривается применение при строительстве проходческих комбайнов, необходимо охарактеризовать неоднородность пород в забое, их абразивность и изучить другие показатели по заданию проектировщиков.

Лабораторные исследования грунтов должны выполняться для проектирования подземных сооружений всех классов для всех выделяемых по геолого-петрографическим и генетическим признакам элементов инженерно-геологического разреза (слоев, линз, магматических тел и т. п.).

При исследовании грунтов особое внимание должно быть обращено на так называемые „слабые” элементы разреза (прослои, тектонические зоны, трещины с рыхлым заполнителем и др.), которые нередко, несмотря на их относительно небольшие размеры, играют решающую роль при оценке устойчивости пород и выборе конструкции крепления и обделки подземных сооружений. Особенно тщательно надо выбирать места для проведения полевых исследований, так как эти опыты имеют главное значение для оценки физико-механических свойств скальных пород в массиве.

При всех лабораторных и полевых испытаниях механических свойств горных пород следует учитывать анизотропность их строения (слоистость, наличие глинистых и других прослоев, направление преобладающих систем и трещин).

Лабораторные исследования физико-механических свойств пород в основном выполняют в соответствии с действующими ГОСТ и общепринятыми инструктивными указаниями. Особенность испытаний некоторых механических свойств заключается лишь в том, что эти испытания, как правило, выполняют с водонасыщением (замачиванием) пород и при высоких нагрузках. При анизотропном стрессе пород их опробование должно быть строго ориентированным по отношению к плоскостям напластования, расщепления или главных систем трещин.

В связи с тем, что зоны, доступные для полевых исследований физико-механических свойств пород и отбора их крупных проб, могут быть расположены в менее сохранный части массива, а также в связи с неизбежным ослаблением пород при подготовке опытных площадок необходимо корректировать полученные результаты испытаний пород геофизическими и другими методами.

Полевые опытные исследования параметров сопротивления сдвигу, модуля деформации, коэффициента отпора напряженного состояния массива пород и их пучения выполняют специализированные подразделения научно-исследовательских или крупных проектно-изыскательских организаций. Эти исследования являются наиболее сложными в организационном отношении и проводятся большей частью на стадии проекта в специально пройденных камерах и иногда на стадии рабочей документации непосредственно в строительных выработках.

В зависимости от стадии проектирования, размеров и значения каждого инженерно-геологического элемента для проектируемого сооружения количество лабораторных определений физико-механических свойств пород может изменяться от 5 до 30. Количество полевых определений параметров сопротивления сдвигу и деформационных свойств для наиболее характерных разностей пород должно быть не менее 6 (ГОСТ 20522-75). Для изучения горного давления и пучения пород чаще всего выполняют единичные опыты.

В каждом отдельном случае должны назначаться оптимальный состав и объемы исследований физико-механических свойств пород. Методы оптимизации изысканий изложены в статье Ю. А. Фишмана [29].

Определение показателей крепости горных пород. М. М. Протодыяконовым была предложена классификация горных пород по коэффициенту крепости, которую используют в горном деле (табл. 5). Для определения коэффициентов крепости $f_{кр}$ скальных и твердых полускальных пород служит эмпирическая зависимость

$$f_{кр} = R_c / 100, \quad (21)$$

где R_c – временное сопротивление породы сжатию.

Таблица 5

Горные породы	Коэффициент крепости $f_{кр}$	Плотность грунта, кг/м ³
Наиболее крепкие плотные и вязкие кварциты и базальты, исключительные по крепости другие породы	20	2800–3000
Очень крепкие гранитные породы, кварцевый порфир, очень крепкий гранит, кремнистый сланец, менее крепкие, нежели указанные выше, кварциты, самые крепкие песчаники и известняки	15	2600–2700
Гранит (плотный) и гранитовые породы, очень крепкие песчаники и известняки, кварцевые рудные жилы, крепкий конгломерат, очень крепкие железные руды	10	2500–2600
Известняки (крепкие), некрепкий гранит, крепкие песчаники, крепкий мрамор, доломит, колчеданы	8	2500
Обыкновенный песчаник, железные руды	6	2400
Песчанистые сланцы, сланцеватые песчаники	5	2500
Крепкий глинистый сланец, некрепкий песчаник и известняк, мягкий конгломерат	4	2800
Разнообразные сланцы (некрепкие), плотный мергель	3	2500
Мягкий сланец, мягкий известняк, мел, каменная соль, гипс, мерзлый грунт, антрацит, обыкновенный мергель, разрушенный песчаник, цементированная галька и хрящ, каменистый грунт	2	2400
Щебенистый грунт, разрушенный сланец, слежавшаяся галька и щебень, крепкий каменный уголь, отвердевшая глина	1,5	1800–2000
Глина (плотная), средний каменный уголь, крепкий нанос, глинистый грунт	1	1800
Растительный грунт, торф, легкий суглинок, сырой песок	0,6	1500
Легкая песчанистая глина, лесс, гравий, мягкий уголь	0,8	1600
Песок, осыпи, мягкий гравий, насыпной грунт, добытый уголь	0,5	1700
Плывуны, болотистый грунт, разжиженный лесс и другие разжиженные грунты	0,3	1500–1800

П р и м е ч а н и я: 1. Относить каждую породу к той или иной категории надлежит не только по ее наименованию, но и по физическому состоянию, сравнивая ее по крепости с другими перечисленными в таблице породами. Выветрившиеся, разрушенные, разбитые отдельностями, перемятые дислокациями, близкие к поверхности и подобные породы надлежит относить к более низким категориям, чем породы того же названия, указанные в таблице, где приведены породы в плотном состоянии.

2. ГОСТ 21153.1–75 „Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протодяконову” предусматривает измерение работы, затраченной на дробление горной породы до размера частиц менее 0,5 мм.

Коэффициент крепости не имеет прямой физической сущности и связывает горнотехнические свойства массива пород (разрабатываемость, горное давление и др.) с прочностью отдельного образца. Для уверенного назначения этого показателя надо иметь практический опыт горных работ в аналогичных геологических условиях. Коэффициент крепости зависит от формы и размеров подземной выработки, технологии ее проходки и других горнотехнических условий.

Определение временного сопротивления породы сжатию основано главным образом на принципе раздавливания образцов правильной, неправильной и полуправильной формы. По результатам исследований установлено, что между пределами прочности образцов неправильной формы $R_{с.н}$ и правильной цилиндрической или кубической формы R_c существует следующая зависимость:

$$R_{с.н} \approx 0,19R_c. \quad (22)$$

Для пород с сильно выраженной сланцеватостью важно знать их прочность вдоль и поперек слоистости. С этой целью используют методы испытаний на растяжение, скалывание и изгиб отдельных плиток породы, затем для расчетов применяют известные соотношения: $R_{раст} = 3 \div 5\%R_c$; $R_{скал} = 6 \div 8\%R_c$; $R_{изг} = 7 \div 15\%R_c$.

При испытаниях пород, ослабленных выветриванием, со слабым цементом, в том числе брекчий, конгломератов и др., важно соблюдать масштабный фактор. Испытываемые образцы этих пород должны быть больше образцов однородных пород. Например, для обломочных разностей пород представительность образца обеспечивается при условии $d_{обр} \geq 6,7d_{зер}$, где $d_{обр}$ – средний диаметр образца, мм; $d_{зер}$ – средний диаметр зерен (обломков), мм.

При изучении прочностных свойств пород по керну буровых скважин для определения коэффициента крепости следует учитывать тот факт, что образцы для лабораторных испытаний чаще всего отбирают из наиболее сохранных пород, а менее сохранные участки исследуют или по единичным образцам, или вообще не исследуют.

При выборе расчетных показателей коэффициентов крепости пород f_p необходимо учитывать также их физические свойства в массиве: направление преобладающих трещин, наличие глинистого заполнителя или глинистых прослоев, глини или брекчий трения, зеркал скольжения по трещинам и т. п. Эти факторы в зависимости от их значения для оценки разрабатываемости, устойчивости пород или проявления горного давления могут учитываться введением в отношении М. М. Протодьяконова (21) соответствующего поправочного коэффициента, характеризующего структурное ослабление пород в массиве,

$$f_p = \nu R_c / 100, \quad (23)$$

где ν – поправочный коэффициент, значение которого для скальных пород в зависимости от степени их трещиноватости и выветрелости может быть установлено по табл. 6 с учетом комплекса данных, характеризующих свойства горного массива. Поправочный коэффициент следует вводить с большой осторожностью после тщательного анализа всех определяющих его факторов.

Расчетные значения коэффициентов крепости, применяемые при оценке устойчивости пород и горного давления для деривационных туннелей, водоводов, напорных камер и других подземных сооружений, заполняемых водой, следует вычислять с учетом водонасыщения пород (R_c их определять в водонасыщенном состоянии).

Нередко коэффициенты крепости определяют на основе теории М. М. Протодьяконова о горном давлении из отношения

$$f_{кр} \approx L / (2H). \quad (24)$$

где L – пролет выработки, м; H – высота купола вывала над проектным очертанием свода выработки, м.

Как уже сказано выше, коэффициент крепости является в значительной степени условной величиной, определяемой визуалью на основании косвенных признаков, и зависит от субъективного подхода к назначению поправочного коэффициента. Поэтому коэффициент крепости может с достаточной точностью характеризовать разрабатываемость пород, но недостаточно обоснованно характеризует параметры, необходимые для расчетов крепления и обделки подземных выработок. В связи с этим в настоящее время разрабатываются методы расчета подземных сооружений,

Породы	Модуль деформации E , 10^3 МПа	Скорость упругих продольных волн в массиве, м/с	Коэффициент крепости $f_{кр}$	Коэффициент структурного ослабления ν
Скальные:				
слабдеформируемые неветрелые, слаботрещиноватые, слабоводопроницаемые	10	4200	12	0,8–0,9
среднедеформируемые, слабоветрелые, среднетрещиноватые, водопроницаемые	5–10	3500–4200	8–12	0,6–0,8
сильнодеформируемые, ветрелые, сильнотрещиноватые	2–5	2000–3500	4–8	0,6–0,7
сильнодеформируемые, сильноветрелые, очень сильнотрещиноватые	2–5	2000–3500	4–8	0,6–0,7
Полускальные:				
слабдеформируемые, слабоветрелые и неветрелые	1–2	1500–2500	4	0,5–0,6
сильнодеформируемые, ветрелые и сильноветрелые	1	1500	2–3	0,3–0,5

П р и м е ч а н и е. Для разрушенных скальных пород, а также глинистых и песчано-гравелистых грунтов расчетное значение коэффициента крепости f_p следует определять опытным путем или по таблице М. М. Протодяконова без введения коэффициента структурного ослабления.

основанные на использовании такого объективного показателя, как модуль деформации массива пород, методика определения которого разработана достаточно подробно. Этот показатель отражает сохранность массива и к нему никаких поправочных коэффициентов вводить не надо. В случае отказа от коэффициента крепости как основной характеристики для проектирования подземных сооружений рекомендуется при изысканиях давать разделение скального массива по категориям сохранности с использованием следующих признаков: визуальные признаки; характеристика трещиноватости (блочность, модуль трещиноватости, раскрытие трещин); модуль деформации E , МПа; скорость упругих волн, м/с; коэффициент крепости (как вспомогательная характеристика); параметры сопротивления сдвигу (коэффициент внутреннего трения, сцепление c , МПа).

По совокупности приведенных параметров определяют тип крепи и обделки при проектировании и уточняют их в процессе строительства.

В последнее время за границей вместо классификации по коэффициенту крепости применяют классификацию по показателю качества породы RQD (качественная характеристика скалы), который равен $\sum l_1/L$, где $\sum l_1$ – сумма ненарушенных кусков длиной 10 см или больше; L – длина исследуемого интервала.

В зависимости от значения RQD качество породы оценивают следующим образом.

RQD	Характеристика породы
0–25	Очень слабая
25–50	Слабая
50–75	Удовлетворительная
75–90	Хорошая
90–100	Отличная

В отечественной практике показатель RQD еще не нашел применения и нуждается в апробации.

Степень нарушенности массива скальных и полускальных пород можно оценить путем сравнения скоростей распространения продольных упругих волн в массиве и ультразвуковых исследований в образце (жерне). Разница в этих скоростях пропорциональна нарушению сплошности массива. При этом ультразвуковые скорости в образце следует определять в лабораторных условиях под осевым давлением, равным давлению в массиве на глубине взятия образца, создаваемому массой вышележащих пород.

Косвенные показатели крепости пород могут быть получены также путем ультразвукового испытания их образцов и ультразвукового каротажа скважин. По испытаниям в лабораторных условиях на образцах устанавливают корреляционную связь между R_c и скоростью распространения упругих волн, а затем проводят массовый ультразвуковой картаж. Эти исследования могут дать обобщенные показатели R_c и $f_{кр}$ пород в массиве и позволяют выделять участки с различной степенью их трещиноватости и сохранности.

При определении предварительного значения горного давления на туннельную обделку необходимо знать φ_K — кажущийся угол внутреннего трения в градусах с учетом сил сцепления (рис. 14). Значение φ_K для скальных и полускальных пород

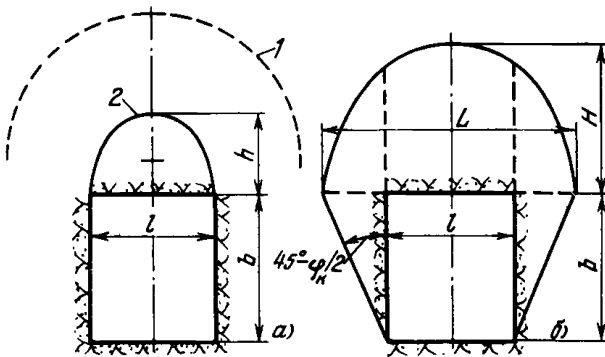


Рис. 14. Схема проявления горного давления по М. М. Протодяконову: a — в крепких породах; b — в слабых и мягких породах 1 — разгружающийся свод; 2 — свод давления

следует определять из выражения $\varphi_K = \arctg f_p$, где f_p расчетный коэффициент крепости по М. М. Протодяконову с учетом коэффициента структурного ослабления массива (табл. 6). Для глинистых, песчаных и других грунтов с $f_p \leq 2$ кажущийся угол внутреннего трения рекомендуется определять на основе опытных данных. Значение сцепления породы в нарушенной зоне c , МПа, принимается по данным натурных исследований. Для предварительных расчетов допускается принимать $c = 0,3f_p$.

Для определения групп пород при разработке отбойными молотками, вручную и буровзрывным способом следует пользоваться „Инструкцией по определению группы пород посредством контрольного бурения” и таблицей 4 ЕНиР, сборник 36, вып. 2 „Строительство метрополитенов, туннелей и подземных сооружений специального назначения”, 1976 г. В этой таблице приведено сопоставление между категориями пород, коэффициентами крепости по М. М. Протодяконову, временем чистого бурения 1 м шпура и средней плотностью сухого грунта.

На стадии рабочей документации в процессе строительства подземного сооружения коэффициент крепости пород в массиве уточняет горная комиссия, в состав которой входят представители строительной и проектной организаций и геологической службы.

Определение сопротивления сдвигу. Показатели сопротивления пород сдвигу обычно определяют для наиболее слабых их разновидностей, способных оказывать

боковое давление на обделку (крепь) горных выработок. Лабораторные исследования проводят на образцах в приборах методом сдвига плиток по трещинам напластования или по искусственно подготовленным поверхностям. Полевые опыты по определению сопротивления сдвигу массивов скальных пород проводят методами среза-сдвига бетонных штампов по породе или целика горной породы по прослою или трещине. При этом учитывают шероховатость поверхности трещины, ее заполнение и водонасыщение всего массива пород.

В особо ответственных случаях (при значительной высоте стен подземных выработок, наличии плоскостей ослабления) определения показателей сопротивления пород сдвигу следует выполнять по индивидуальной методике как в лабораторных условиях, так и в натуре.

Расчетные значения показателей сопротивления пород сдвигу (угол внутреннего трения и сцепление) следует принимать в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 20522-75. В зависимости от задач (определение зоны неупругих деформаций, расчет временной крепи, расчет анкеров, отдельных блоков, постоянной обделки) расчетные параметры прочности могут приниматься как среднеминимальные по трещинам, среднеминимальные по массиву и средние по массиву. В отдельных случаях вокруг подземной выработки выделяют несколько зон, которые отличаются по крепости, сопротивлению сдвигу и сжимаемости пород в массиве.

Таковыми зонами могут быть: зона пород, ослабленных взрывами и выветриванием, зона разгрузки напряжений, зона естественного состояния и др. В зависимости от расчетного времени (этапа строительства) могут изменяться положение этих зон, а также их прочность и сжимаемость.

Определение деформационных свойств. В практике проектирования подземных гидротехнических сооружений деформационные свойства массивов горных пород оценивают значениями модуля деформации E , коэффициента отпора K_0 и коэффициента поперечной деформации (коэффициента Пуансона) μ , определяемыми на основе полевых и лабораторных исследований, а также аналитическими расчетами.

Среди полевых методов исследований деформационных свойств массивов пород наиболее распространены:

методы нагружения поверхности цилиндрических горизонтальных или вертикальных выработок диаметром до 2,5 м равномерно распределенной нагрузкой;

методы нагружения стенок, кровли или подошвы прямоугольных выработок штампами площадью до 1-2 м²;

геофизические методы, основанные на измерении скоростей распространения упругих волн, возбуждаемых при сейсмических и ультразвуковых воздействиях на породы;

методы испытаний пород в стенках буровых скважин или скальных массивах с помощью прессиометров или щелевых домкратов.

Наиболее надежные результаты дают два первых метода, но из-за трудоемкости и громоздкости аппаратуры испытания пород этими методами обычно проводят в ограниченных объемах на завершающих стадиях проектирования. Эти испытания можно проводить как в специально пройденных выработках (опытных камерах), так и непосредственно в строящихся туннелях.

Геофизические методы обычно дают такие результаты, которые могут быть использованы для проектных расчетов только после сопоставления их с результатами полевых и лабораторных испытаний. После установления корреляционной зависимости между динамическими и статическими модулями деформации геофизические методы могут быть использованы для массовых испытаний горных пород.

В ходе строительства напорных туннелей и водоводов на характерных участках следует проводить сплошное сеймопрофилирование по подошве и стенкам выработок, а в процессе цементизации или силикатизации пород выполнять сейсмоакустические испытания до и после укрепительных мероприятий.

Прессиометрические методы, так же как и геофизические, могут быть использованы для массовых испытаний пород. Достоинством является невысокая стоимость исследований и возможность быстрого определения характеристик деформационных свойств пород. Недостатком прессиометрических испытаний является невысокая точность результатов по сравнению с данными, получаемыми крупномасштабными полевыми опытами. Наиболее достоверные результаты прессиометрические испытания могут дать при изучении ослабленных зон скальных пород совместно с сейсмоакустическими исследованиями.

Полевые исследования деформационных свойств массивов пород для подземных гидротехнических сооружений рекомендуется проводить с учетом влияния ряда факторов: возможного насыщения пород водой, анизотропии массива, длительной прочности (ползучести), укрепительных мероприятий. Опытные выработки необходимо ориентировать таким образом, чтобы направление нагрузок, передаваемых на их стенки, соответствовало направлению давления, которое будет действовать при эксплуатации сооружений. В условиях многолетней мерзлоты деформационные характеристики следует определять для мерзлого и талого состояний пород.

Исследования деформационных свойств массива пород целесообразно сопровождать воздушным определением трещиноватости методом ВОТ для установления корреляционных связей и переноса результатов опытов на весь массив.

На предварительных стадиях проектирования значения показателей деформационных свойств пород допускается принимать по обоснованным аналогам.

Модуль деформации скальных пород в зависимости от метода исследований, способа приложения и вида нагрузки может быть выражен следующими показателями: E_0 – статический модуль упругости породы в образце, определяемый в лаборатории по статической нагрузке; E – статический модуль деформации породы в массиве, определяемый полевыми исследованиями; $E_{д.о}$ – динамический модуль упругости породы в образце, определяемый по скорости прохождения упругих волн; $E_{д}$ – динамический модуль деформации породы в массиве, определяемый по скорости распространения продольных и поперечных упругих волн (V_p и V_s) с учетом структурного ослабления пород.

Для расчетов конструкций подземных гидротехнических сооружений используется статический модуль деформации E . Расчетные значения модуля деформации E вычисляются путем статистической обработки частотных значений E для данной разности пород, принимая нижнюю доверительную границу с вероятностью 0,95.

Зная динамический модуль деформации $E_{д}$ и динамический модуль упругости породы в образце $E_{д.о}$, можно получить представление о характере относительной трещиноватости породы в массиве.

Классификация пород по деформируемости приведена в СНиП II-16-76, приложение 1.

Коэффициент отпора пород K является деформационной характеристикой. Как и модуль деформации, его учитывают в расчетах обделок подземных гидротехнических выработок. Коэффициент отпора характеризует давление, приложенное к стенке подземной выработки, которое необходимо создать, чтобы радиус круглой выработки увеличился на 1 см. На практике для сравнения значений K , полученных в выработках различного диаметра, введено понятие коэффициента удельного отпора K_0 , представляющего собой значение K для выработки радиусом 1 м.

Для напорных туннелей круглой формы, проходимых в однородных изотропных породах, зависимость между основными показателями деформационных свойств K_0 и E определяется формулой Б. Г. Галеркина

$$K_0 = \frac{E}{100(1 + \mu)} \quad (25)$$

Эта формула справедлива, если E определяли методом нагружения круглоцилиндрических выработок. Если модуль деформации определяли методом нагружения плоских штампов, к K_0 нужно вводить понижающий поправочный коэффициент, равный 0,66.

При проходке выработки происходит образование вокруг нее ослабленной зоны. Необходимость выделения зон сохранности скального массива вокруг подземной выработки обусловлена выбором метода расчета ее обделки. При расчетах обделки туннеля с помощью коэффициента удельного отпора K_0 разделение на зоны разгрузки и сохранности пород проводить не нужно, так как в реальных условиях обделка контактирует с ослабленной зоной и использует именно ее упругие свойства. Поскольку полевые опыты определения K_0 проводятся в подземных выработках, также имеющих зону разгрузки, то они в известной степени моделируют условия работы обделки туннеля в натуре и автоматически учитывают изменение модуля деформации по глубине массива.

При расчетах обделок и напряженно-деформированного состояния окружающего подземную выработку скального массива с помощью модуля деформации E нужно знать изменение деформационных свойств массива пород по глубине. В этом случае следует изучать как зону разгрузки, так и зону сохранности пород.

По материалам ультразвукового каротажа скважин в однородных изотропных породах ослабленная зона представлена двумя слоями (кольцами): от контура выработки на глубину до 1–3 м интенсивно нарушенными породами, и далее на глубину до двух радиусов выработки – породами, разгруженными от естественных напряжений. Далее расположена зона перенапряженных пород – „несущее кольцо”. В интенсивно нарушенных породах модуль деформации в 3–10 раз меньше, чем в массиве, а в разгруженных породах это уменьшение, как правило, составляет 10–25%. В выработках малого диаметра эти зоны отдельно можно не выделять.

Таким образом, в формуле (25) модуль E зависит от параметров ослабленной зоны и характера изменения модуля деформации породы в образце E_0 , который в пределах ослабленной зоны может быть переменной величиной. Кроме того, параметры ослабленной зоны не постоянны по периметру выработки: для изотропной среды, как правило, мощность ослабленной зоны больше в своде и лотке, чем в стенках.

Наиболее достоверным методом изучения изменений модуля деформации по глубине является метод штампов, оборудованных глубинными штангами, фиксирующими перемещение скального массива на разных глубинах, а также метод прессиометрии. Геофизические методы можно применять только в сочетании с прямыми методами исследований, используя их как базовые для дальнейшего распространения на весь скальный массив. Характер изменения упругих и деформационных свойств от контура выработки в глубь массива можно изучать с помощью ультразвукового каротажа радиальных скважин, пробуренных по периметру выработки на глубину до 1–3 ее радиусов через 45–90° (в зависимости от сложности строения массива и ослабления зоны).

Большое значение имеют правильная постановка комплекса исследований по определению коэффициента удельного отпора в опытных камерах и переноса результатов опыта на условия туннеля. Так как параметры ослабленной зоны оказывают решающее влияние на размеры деформаций в опыте и зависят от свойств пород и технологии проходки, то нужно изучать эти параметры как в опытных камерах, так и в туннеле.

Штамповые опыты по определению модуля деформации в туннельных выработках можно использовать для определения K_0 с учетом всего сказанного выше о строении массива вокруг выработки.

Для определения отношения мощности ослабленной зоны к радиусу выработки можно использовать сейсмоакустические методы – ультразвуковой каротаж

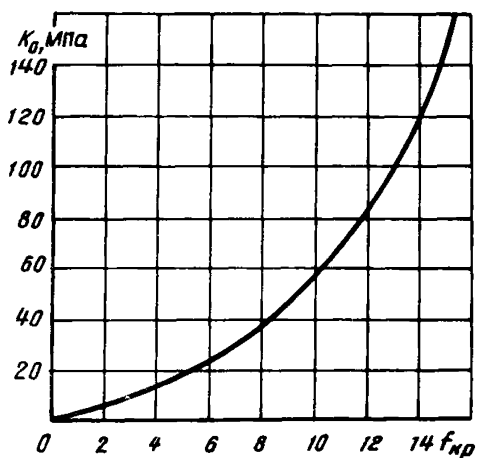


Рис. 15. График зависимости коэффициента отпора K_0 от коэффициента крепости породы $f_{кр}$

и детальное сейсмическое профилирование по подошве и стенкам выработок. Сейсмическое профилирование с шагом между сейсмоприемниками 0,5–1 м желательно проводить сплошь во всех выработках, дополняя его ультразвуковым каротажем для более детального изучения строения массива по периметру выработки. Места бурения выбирают с учетом геологического

строения, его изменчивости и различий технологии проходки.

Значение коэффициента K_0 для трещиноватых горных пород на предварительных стадиях проектирования согласно „Указаниям по проектированию гидротехнических туннелей” (СН 238–73) допускается определять также через коэффициент крепости $f_{кр}$ по графику, приведенному на рис. 15 [28]. Для пород с коэффициентом крепости 10 и меньше, отличающихся слабой трещиноватостью, значения K_0 , полученные по указанному графику, рекомендуется увеличить на 30%.

Ориентировочные значения коэффициентов удельного отпора для некоторых типичных разностей пород, полученные методом нагружения цилиндрических поверхностей подземных выработок равномерно распределенной нагрузкой, приводятся в табл. 7 [28].

Таблица 7

Породы	Коэффициент удельного отпора K_0 , МПа/см	Коэффициент крепости по Протодюкову $f_{кр}$
Пролувиально-аллювиальные крупнообломочные отложения	5	1,5
Рыхлая брекчия с пемзовым песком, андезитобазальты выветрелые, вулканические выбросы и шлаки	3,5–5	1,4–2,4
Глины плотные	6–10	1–1,5
Вулканические выбросы, цементированные серицитовые сланцы, сильновыветрелые скальные породы	10	1,2–2,2
Рыхлые вулканические выбросы и шлаки, обсидиановые брекчии с пемзовым песком	3,5–4	0,8–1
Вулканические шлаки и брекчии литоидной пемзы слабоцементированные, слабые туфы	10–12	1,5–2,5
Глинистые и песчаные сланцы, серицитовые сланцы, слабые песчаники, чередующиеся со сланцами и т. п.	13–22	2,8–4,5
Песчаники среднезернистые, переслаивающиеся алевролиты и песчаники	33–57	6–10
Песчаники и туфопесчаники крепкие	56–80	8–12
Аспидные и метаморфизованные глинистые сланцы слаботрещиноватые	80–110	10–18

Породы	Коэффициент удельного отпора K_0 , МПа/см	Коэффициент крепости по Протодьяко- нову $f_{кр}$
То же затронутые выветриванием. Известняки и песчаники на известковом цементе плотные, слаботрещиноватые	100–150	12–15
То же трещиноватые	50	6–8
Порфиры андезитовые и диабазовые, крепкие мелкообломочные туфобрекчии	90	12–18
То же сильнотрещиноватые	20–25	4–6
Туфобрекчии крупнообломочные, туфы андезитопри- роксеновые, валунные конгломераты и брекчии	40–56	8–10
То же сильноразрушенные	12–13	–
Андезитобазальты трещиноватые	25–45	4–12
То же сильнотрещиноватые	13–15	2,1–2,2
То же с глыбовой отдельностью выветрелые (разборные)	6–9	1,4–2,4
Кварциты и метаморфические сланцы трещиноватые	150	15
Кварцевые песчаники и кварциты с прослоями кристаллических сланцев	380	23
Кварциты плотные	600	25
Граниты, гнейсы биотитовые плотные, слаботрещиноватые	210–220	17–18
То же трещиноватые	100	12–15
Фиббиогнейсы, парagneйсы	65–100	10,5–12,5

Коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) представляет собой отношение относительных деформаций: поперечной к продольной. Он определяется по данным полевых, лабораторных испытаний и геофизических исследований. Коэффициент Пуассона массива пород в большой степени зависит от их трещиноватости, водонасыщенности и некоторых других факторов, но абсолютные его значения изменяются в небольших пределах.

Коэффициент поперечной деформации образца породы изменяется от 0 (прочные разности пород) до 0,45 (пластичные). При его значении больше 0,5 порода находится в текучем состоянии и теряет способность к восстановлению первоначального размера и формы. С увеличением влажности или водонасыщенности пород, а также степени их трещиноватости способность к поперечной деформации увеличивается. т. е. значение коэффициента возрастает. Лабораторными исследованиями установлено, что у таких главнейших породообразующих минералов, как кварц, гематит и пирит, этот коэффициент изменяется в пределах 0,08–0,16, а у полевых шпатов, слюды и других силикатов – 0,21–0,29. Исключительно низкое значение коэффициента Пуассона характерно для кварца (0,08), что обусловлено каркасным строением его кристаллической решетки.

Ниже приведены значения коэффициента Пуассона для некоторых типичных разностей пород:

Гранитоиды	0.18–0.24
Кварциты, кварцевые песчаники	0.09–0.14
Порфиры кислого и среднего состава	0.20
То же метаморфизованные	0.22
Игнимбриды кварцевых порфиров	0.18

Туфогенные песчаники	0,18
Туфы кислого состава метаморфизованные	0,14
Кварцито-песчаники	0,10
Известняки органогеннообломочные	0,27
Мраморизованные известняки	0,30–0,32
Известняки-ракушечники	0,17–0,23
Пески сухие	0,10–0,25
Пески водонасыщенные	0,44–0,49
Супеси	0,30
Суглинки	0,35
Глины	0,42

5. ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ЯВЛЕНИЙ И СЕЙСМИЧНОСТИ

Характеристика основных процессов и явлений. Среди большого разнообразия физико-геологических и инженерно-геологических процессов и явлений для строительства подземных гидротехнических сооружений наиболее существенное значение могут иметь описанные ниже.

Вблизи земной поверхности наибольшее значение имеют процессы, связанные с гравитационными смещениями, действием поверхностных вод, поверхностным выветриванием, выщелачиванием и разуплотнением горных пород (оползни, обвалы, карст и др.). Эти процессы надо учитывать при оценке инженерно-геологических условий верхних зон: при выборе мест заложения порталов туннелей, шахт, штретков, а также в случаях прохождения подземных сооружений на небольших глубинах от дневной поверхности, под логами и речными долинами, крупными оползневыми цирками и т. п.

В подземных выработках глубокого заложения основными агентами, воздействующими на массив пород, являются разгрузка, изменения температуры и влажности воздуха, вода, газы, а также техногенные факторы. Разгрузка напряженного состояния массива вызывает разуплотнение пород, развитие процессов выветривания, пучения и горного давления. Влияние техногенных факторов выражается в дроблении пород при взрывах в забоях, измельчении их буровыми инструментами и колесно-гусеничными механизмами.

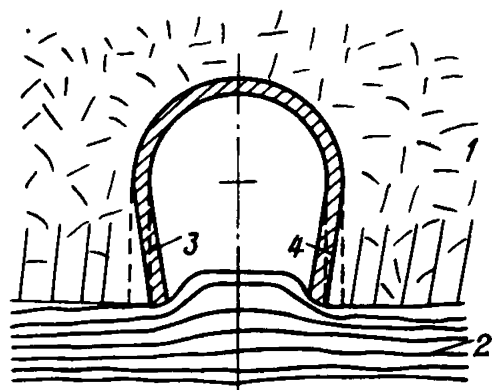
Выветривание существенно влияет на физико-механические свойства пород в подземных выработках, а следовательно, и на производство проходческих работ и выбор их технических схем. Поэтому очень важно в процессе изысканий оценить скорость его проникновения в глубь массива. Особенно это касается легко выветривающихся горных пород, которые необходимо своевременно крепить или покрывать набрызгбетоном.

Процессы, связанные с изменением термического режима, следует учитывать при глубоком заложении подземных сооружений и строительстве их в областях с большим перепадом температуры: в районах развития многолетней мерзлоты, молодого вулканизма и др. Характерной особенностью теплового поля земных недр является слабое колебание температуры воздуха, породы и воды в выработках. В отдельных случаях температура может резко колебаться при прорыве высококилометровой вод или газов. Так, при проходке туннеля Арпа-Севан на глубине 600 м в результате прорыва подземных вод из поверхностных водоносных горизонтов в одном из забоев температура снизилась с 32 до 11 °С.

Процессы пучения пород в подземных выработках обычно наблюдаются на участках распространения глин, а также полускальных пород – глинистых сланцев, алевролитов, аргиллитов, слабых мергелей, туффигов. Пучение пород является следствием

Рис. 16. Схема проявления пучения горных пород в туннеле:

1 — жесткие скальные породы; 2 — слабые глинистые породы; 3 — деформированная бетонная обделка; 4 — первоначальный контур обделки



изменения их естественного водного режима в сфере взаимодействия с подземными сооружениями при воздействии горного давления. В связи с этим особо важную роль приобретают изучение структуры набухания глинистых минералов и получение сведений о поведении сульфатных пород, склонных к расширению при изменении влажности. Борьбу с пучением ведут обычно способами проходки передового разгружающего туннеля или опережающих скважин с дренированием обводненных зон (рис. 16).

Напряженное состояние массива горных пород в условиях естественного залегания возникает под действием многих факторов, из которых основное значение имеют: гравитационные, тектонические, термические, гидродинамические и кристаллизационные. Действие этих факторов накладывается на разнообразную геологическую среду, в результате чего создается сложная картина напряженного состояния массива пород, его динамичности во времени и связи с изменением действующих факторов. На напряженное состояние массивов большое влияние оказывает также расчлененность рельефа местности.

При строительстве подземных сооружений изучение напряженного состояния массивов горных пород имеет весьма важное значение для оценки горного давления на временное крепление и обделку выемки, пучения глинистых пород, возникновения горных ударов в трещиноватых скальных породах, а также образования вывалов, обрушений и т. п. Поэтому прогноз этих неблагоприятных явлений должен базироваться на детальном исследовании распределения и размеров напряжений вокруг подземной выемки. Большая сложность этой проблемы определяет необходимость применения для изучения напряженного состояния одновременно различных полевых и лабораторных методов.

Полевые методы исследования напряженного состояния разделяются на методы разгрузки и методы восстановления. Среди методов разгрузки выделяют методы измерения торцевой деформации керна в забое буровой скважины и деформации цилиндра, образованного соосными скважинами (рис. 17).

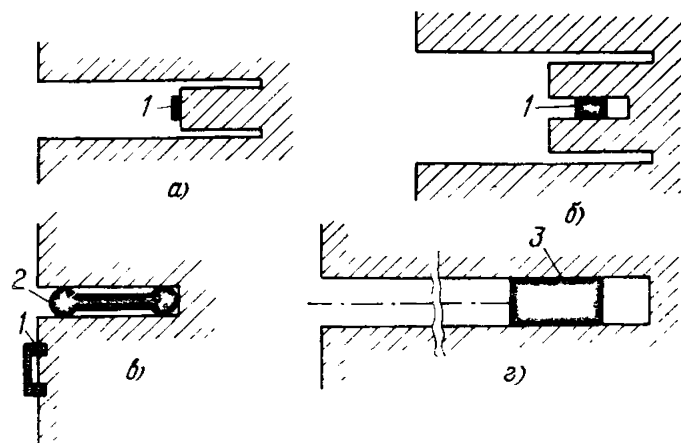


Рис. 17. Схемы полевых методов измерения напряжений:

a — измерение торцевой деформации; *б* — измерение деформаций кольцевого цилиндра; *в* — метод гидроподушек; *г* — метод прессиометра; 1 — измеритель деформаций; 2 — гидроподушка; 3 — прессиометр

Методы восстановления заключаются в измерении давления, которое надо создать в буровой скважине или в прорези в породе для того, чтобы погасить деформацию разгрузки, происшедшую после создания этой полости. В последние годы эти методы находят широкое применение в виде двух основных разновидностей: метода плоских гидравлических подушек; метода цилиндрических камер-прессиометров. Оба эти метода кроме определения напряженного состояния массива могут также служить для изучения деформационных характеристик пород.

Среди лабораторных методов определения напряженного состояния массива пород наибольшее распространение получили методы, основанные на теории механического подобия: эквивалентных материалов, тензометрической сетки, фотоупругости и центробежного моделирования.

Весьма перспективными являются сейсмоакустические методы изучения напряженного состояния массива пород. В качестве исходного параметра для этих определений обычно используют скорость распространения продольных волн.

Горное давление возникает вследствие того, что в процессе проходки подземной выработки изменяется естественное напряженное состояние пород в массиве и образуются деформации, вызывающие расстройство свода выработки. При неглубоком заложении выработки деформации могут распространяться до поверхности земли и вызывать „сдвижение” пород, создающее весьма значительное давление на крепь. При глубоком заложении выработки в скальных породах вокруг нее обычно образуется ограниченная зона разгрузки, в пределах которой также развивается давление на крепь. Помимо глубины заложения выработки на горное давление влияет естественное напряженное состояние пород, форма их залегания, трещиноватость и выветрелость, а также ряд строительных условий: площадь сечения выработки, способ проходки и крепления и др. При прочих равных условиях наименьшее горное давление наблюдается в массивных прочих слаботрещиноватых породах. В породах, легко поддающихся выветриванию (глинистых сланцах, аргиллитах, алевролитах и других полускальных породах), горное давление обычно бывает значительным, нарастающим во времени в зависимости от интенсивности выветривания пород.

Динамическими формами проявления горного давления являются горные удары, выбросы пород и газа. Прогноз возможности выбросов большого количества газов основывается на ряде признаков, которые могут быть выявлены бурением опережающих скважин. К числу таких признаков относятся: увеличение крупности буровой муки при бурении шпуров и скважин, интенсивное разделение кернов породы на линзовидные диски, толчки на буровой инструмент и зажатие штанг, похолодание воздуха у забоя, возрастание сейсмической активности массива.

Проявления повышенного напряженного состояния горных пород и как следствие этого горного давления, стреляния и пучения обычно бывают приурочены к осевым частям антиклинальных структур и участкам пересечения туннельной выработкой зон крупных разрывных тектонических нарушений, рыхлых крупнообломочных и песчано-глинистых пород, полускальных пород, участков пород с мелкой складчатостью и перемятостью, в особенности при наличии в них подземных вод. Вывалы пород, проявления вертикального и бокового горного давления часто бывают связаны с неблагоприятным сочетанием направлений основных систем трещин (субпараллельных по простиранию стенкам подземных выработок), а также наличием в трещинах глинистого заполнителя и зеркал скольжения. Обычно неблагоприятными являются случаи, когда горизонтальные составляющие вектора напряжений значительно больше вертикальных.

Процессы, обусловленные действием подземных вод, а также водоотливом и водопонижением, обычно бывают приурочены к определенным литологическим комплексам пород. Неблагоприятными из-за возможного пересечения крупных карстовых полостей и связанных с ними скоплений подземных вод считаются известняки, а также комплексы гипсоносных и соленосных пород. Суффозионные и пльвунные

явления, а иногда обрушение пород и оседание кровли обычно связаны с комплексами рыхлых водоносных пород.

Прогноз возможности прорыва в подземную выработку значительных объемов воды является весьма трудной и ответственной задачей, так как это явление, сопровождающееся обычно выносом породы, может вызвать катастрофические последствия и значительно осложнить ход строительных работ. Такие прорывы возможны по карстовым полостям (Шаорская ГЭС), трещинам в сильноводопроницаемых породах (Ереванская ГЭС), крупным тектоническим разломам (туннель Арпа-Севан), при пересечении туннельной выемкой древних эрозионных понижений, заполненных водонасыщенными песчано-глинистыми породами типа шлывунов (Храмская ГЭС II).

Для того чтобы предвидеть возможность подобных явлений, необходимо прежде всего исходить из общих геологических условий района строительства. В районах развития карбонатных пород необходимо проанализировать гидродинамические условия циркуляции подземных вод. Карст в горно-складчатых областях обусловлен в основном рельефом и структурно-тектоническими факторами. Резкая расчлененность рельефа приводит к тому, что инфильтрация осадков происходит с большим гидравлическим градиентом. Это способствует развитию преимущественно вертикальных карстовых форм (Миатлинское ущелье на р. Сулак). Вода из таких карстовых пустот может поступать под большим напором и с большим дебитом.

В районах, где в разрезе имеются слои сильноводопроницаемых пород, необходимо выявить условия их распространения по трассе и проанализировать возможность притока из них значительных объемов воды.

При наличии крупных разрывных тектонических нарушений необходимо установить места их пересечения туннельной выемкой, охарактеризовать сопровождающие их зоны дробления и трещиноватости, выявить обводненность этих зон и связь их с водоносными горизонтами. Проходка подземных выработок в обводненных зонах тектонических разрывов связана со значительными трудностями, которые обусловлены низкой несущей способностью горных пород, а также необходимостью ведения работ в условиях притока большого количества воды и значительных напоров подземных вод. Такая обстановка часто приводит к поиску возможностей обхода подобных зон, методов повышения прочности пород и изменения технологии проходческих работ.

При прохождении туннелей под высокогорными плато, пересеченными древними эрозионными понижениями, выполненными водонасыщенными аллювиальными или озерными осадками, необходимо проследить эти понижения и дать прогноз возможности встретить их по трассе туннеля.

Изучение физико-геологических процессов и явлений. При неглубоком заложении туннеля, когда его трасса разведывается буровыми скважинами, рассматриваемые неблагоприятные физико-геологические явления могут быть частично выявлены в процессе геологосъемочных и разведочных работ, выполняемых на стадии проекта, но должны быть уточнены в процессе проходки выемки путем бурения отдельных опережающих скважин и геофизическими методами.

При глубоком же заложении туннеля бурение опережающих скважин из забоя является практически единственным надежным методом прогнозирования неблагоприятных явлений, связанных с прорывом в подземную выемку больших объемов воды, газов и т. п. Поэтому при проходке глубоких туннельных выемок на участках, неблагоприятных из-за возможности прорыва значительных объемов воды, слабых пород или газов, должно непрерывно вестись бурение опережающих скважин.

Изучение и прогноз инженерно-геологических процессов следует производить с постепенной постадийной детализацией материалов на основе инженерно-геологического обследования, инженерно-геологической съемки или специальных исследований, причем основное внимание следует уделять тем процессам, которые могут

существенно повлиять на инженерно-геологические условия строительства и эксплуатации сооружений.

Анализ причин проявления в процессе строительства таких наиболее опасных инженерно-геологических явлений, как большое горное давление и пучение, крупные вывалы пород, прорывы подземных вод и плывунов, притоки вредных природных газов и т. п., показывает, что в большинстве случаев их возникновение не было предсказано из-за недостаточной инженерно-геологической изученности участка или предсказывалось без должной количественной оценки явления и поэтому не получало отражения в проектах.

В задачу инженерно-геологической службы на всех стадиях проектирования и строительства подземных гидротехнических сооружений входит:

выявление наличия, распространенности и активности всех неблагоприятных для сооружений процессов и связанных с ними явлений для оценки инженерно-геологической обстановки, выяснение возможности ее изменения, приспособления к ней или ее избежания при строительстве;

качественная и количественная оценка и прогноз развития выявленных процессов, а также возможности возникновения их новых форм и очагов;

обоснование и рекомендация мероприятий по предупреждению опасных процессов или борьбе с их вредным влиянием.

В ходе строительства подземных гидротехнических сооружений все инженерно-геологические процессы и явления надо тщательно документировать, а за наиболее опасными из них проводить наблюдения, которые иногда целесообразно продолжать и в период эксплуатации сооружений. На участках проявления интенсивного горного давления и пучения горных пород, сопровождающихся деформациями крепления выработок, следует проводить инструментальные наблюдения с установкой маяков и специальных приборов, позволяющих судить об интенсивности этих явлений и ее изменениях во времени.

В связи с интенсивными проявлениями горного давления и пучения в ходе строительства подземных гидротехнических сооружений измеряют также естественные напряжения в горном массиве. Эти измерения проводят в целях установления абсолютных или относительных значений и направлений действия главных усилий естественных напряжений, что позволяет косвенно судить о протекающих или протекавших раньше в горном массиве тектонических процессах, оценивать физико-механические свойства горных пород и прогнозировать их изменение при проходке и эксплуатации подземной выработки.

Указанные наблюдения за горным давлением и пучением, а также измерения естественных напряжений в горных массивах выполняют специализированные подразделения изыскательской службы, научно-исследовательские и строительные организации.

Изучение сейсмичности в горно-складчатых областях должно выявлять возможность и интенсивность землетрясений, а также вероятность развития тектонических движений. Оба эти процесса неблагоприятны для подземных сооружений: землетрясения могут вызвать мгновенное нарушение работы туннелей или подземных машинных залов; современные тектонические движения могут привести к постепенной, но существенной деформации подземных выработок.

Оценить возможность проявления современной тектоники и сейсмичности обычно позволяет уже сама принадлежность района строительства к тому или иному структурно-тектоническому и сейсмическому поясу, а также сложность его геологического строения. Предварительно об этих факторах можно судить на основе изучения существующих карт регионального структурно-тектонического и сейсмического районирования. Окончательно же эти явления обычно оценивают после детальных инженерно-геологических съемочных и разведочных работ. Предпосылкой для возможного проявления неотектоники и сейсмичности обычно служат такие

факторы, как наличие в районе молодых складчатых и разрывных тектонических структур, в строснии которых участвуют четвертичные отложения; наличие крупных региональных разломов, местных переуглублений и поднятий в продольном профиле речной долины; асимметричность берегов и разновысотное положение одновозрастных речных террас; сведения из летописей о землетрясениях и пр. В ходе выполнения инженерно-геологических исследований на указанные факторы необходимо обращать особое внимание.

В очень ответственных случаях для определения скоростей относительных тектонических смещений отдельных структурных элементов могут быть организованы специальные инструментальные наблюдения (периодическое точное нивелирование, наблюдения за маяками, шелемерами, наклономерные измерения и др.). Сейсмологические и неотектонические исследования проводят специализированные подразделения научно-исследовательских и проектных организаций.

6. ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ

Значение максимальной ожидаемой температуры внутри горного массива при проектировании подземных выработок глубокого заложения имеет важное значение как для оценки условий производства строительных работ, так и для выбора конструкции обделки сооружений. Известно, что при умеренной влажности человек может работать при температуре до $+50^{\circ}\text{C}$. Во влажной же атмосфере даже при $+40^{\circ}\text{C}$ работа становится практически невозможной и в подземных выработках приходится прибегать к искусственному охлаждению воздуха. Кроме того, значительная разница между температурой пород в массиве и воды, протекающей по туннелю, вызывает дополнительные напряжения в его облицовке, что требует специальных конструктивных решений. В табл. 8 приводятся максимальные температуры, отмеченные при проходке ряда крупных туннелей.

Таблица 8

Туннель	Длина туннеля, м	Наибольшая глубина заложения туннеля, м	Максимальная температура в туннеле, $^{\circ}\text{C}$
Симплон I	19 780	2136	55,4
Сен-Готард	14 984	1706	35,0
Мон-Сенис	12 848	1654	30,1
Лечберг	14 605	1560	34,2
Грехенберг	8565	900	26,5
Арпа-Севан	48 250	1225	46,5
Сурамский	3998	366	23,0

На определенной глубине от земной поверхности существует пояс постоянной температуры, ниже которого она постепенно повышается. У экватора, где колебания температуры незначительны, пояс постоянной температуры лежит на глубине 1–2 м, а в континентальных странах средних широт, где годовые колебания температуры достигают больших размеров, он опускается на глубины до 30–40 м. В районе Москвы, например, пояс постоянной температуры залегает на глубине около 20 м.

Возрастание температуры земной коры с увеличением глубины принято измерять геотермической ступенью или геотермическим градиентом. Геотермическая ступень – глубина в метрах, которая соответствует повышению температуры горных пород (ниже пояса постоянных температур) на 1°C . Геотермическим градиентом называется повышение температуры в градусах Цельсия, которое соответствует углублению в земную кору на 100 м.

В горном деле чаще всего принято пользоваться геотермической ступенью. В разных местах и на разных глубинах она неодинакова и колеблется от 5 до 150 м. Среднее значение геотермической ступени обычно принимают равным 33 м. В пределах равнинных территорий значение геотермической ступени составляет 33–35 м, тогда как под горными вершинами оно часто существенно возрастает. Так, в Сурамском туннеле на Кавказе оно оказалось близким к 45 м, под вершинами Симплона и Сен-Готарда – около 44 м, Мон-Сенис – около 50 м.

Важнейшими факторами, влияющими на увеличение геотермической ступени в горных массивах, следует считать большую продольную и поперечную их изрезанность гидрографической сетью, крутое падение пластов, водообильность пород и интенсивность циркуляции инфильтрационных вод, а также отсутствие молодых вулканических образований.

При проходке горных выработок сильное охлаждающее действие на породы может оказывать приток подземных вод из вышележащих водоносных горизонтов и, наоборот, приток восходящих напорных терминальных вод может существенно повышать температуру пород и воздуха. В связи с циркуляцией подземных вод отмечается заметное повышение общей температуры в пределах антиклинальных структур и снижение ее в синклиналиях. Существенное влияние на значение геотермической ступени оказывает теплопроводность горных пород. В массивах с повышенной теплопроводностью геотермическая ступень возрастает и, наоборот, с уменьшением теплопроводности она снижается.

Значительное уменьшение геотермической ступени обычно отмечается в областях проявления молодого вулканизма. Так, в туннеле Арпа–Севан под Варденисским хребтом среднее значение геотермической ступени составило около 28 м. В строительной шахте того же туннеля на северном склоне Варденисского хребта на глубине 676 м зафиксирована максимальная температура 37,6° С, а геотермическая ступень на глубинах до 240 м в толще слоботеплопроводных рыхлых пемзовалипаритовых туфов составляла 13–14 м. Ниже, в толще плотных порфиров и гранитоидов, она была близка к 33 м. Иногда значительное уменьшение геотермической ступени и общее повышение температуры пород отмечается в зонах больших естественных (остаточных) тектонических напряжений и зонах проявления горного давления.

Для предварительного определения температуры пород на различных глубинах в горном деле применяют формулу

$$t = t_0 + (H - H_0) / hg, \quad (26)$$

где t_0 – среднегодовая температура почвы над выработкой, ° С; H – глубина заложения выработки, м; H_0 – глубина залегания пояса постоянной температуры, м; hg – геотермическая ступень, м.

Для более точного определения температуры пород на глубинах заложения подземных сооружений в ходе бурения разведочных скважин следует систематически измерять в них температуру. Эти наблюдения надо выполнять с учетом возможного охлаждающего воздействия промывочной жидкости при бурении. Поэтому измерения температуры следует проводить после определенного перерыва в бурении, необходимого для восстановления естественных условий. Измерения необходимо производить через определенные интервалы по мере углубления скважин. После завершения бурения следует повторно измерить температуру по всей глубине скважины для проверки и сравнения данных. Для измерений используют максимальные термометры в специальной оправе или электротермометры. Последние позволяют получить непрерывную кривую изменения температуры по глубине и предпочтительнее при изучении глубоких скважин.

Графически все изменения температуры пород в горном массиве по глубине принято изображать в виде линий, соединяющих точки равных температур и называемых

геоизотермами. Геоизотермы обычно накладывают непосредственно на геолого-литологические разрезы или изображают на специальных профилях. При этом следует иметь в виду, что изгиб геоизотерм не точно соответствует поверхности горного массива: под крутыми возвышенностями геоизотермы обычно возвышаются несколько выше дневной поверхности, а под глубокими впадинами с крутыми склонами опускаются плавнее и несколько сгущаясь. Иногда графическое изображение изменения температуры по глубине выполняется в виде кривой, накладываемой на продольный профиль трассы туннеля с помощью дополнительной вертикальной масштабной шкалы температур.

7. ИЗУЧЕНИЕ ГАЗОНОСНОСТИ ПОРОД И ВРЕДНОСТИ ПЫЛИ

Изучение газоносности. При проходке туннелей и других подземных выработок нередко встречаются взрывоопасные и вредные для здоровья людей и техники природные газы. Наиболее часто встречаются метан CH_4 , углекислый газ CO_2 , сероводород H_2S и азот N_2 , а в виде примесей – тяжелые углеводородные газы, водород, редкие – гелий и неон (легкие), аргон, криптон и ксеон (тяжелые).

Метан, называемый иначе рудничным или болотным газом, образуется в результате разложения без доступа воздуха остатков растительных и животных организмов и появляется обычно в выработках, прорезающих глинистые отложения морского, озерного, болотного генезиса. В наиболее значительных количествах метан может поступать по трещинам и зонам тектонических нарушений из угленосных, нефтеносных или соленосных пластов. Метан может скапливаться в ядрах антиклинальных складок, купольных структурах, в слоях, ограниченных водоупорами, и пористых средах. Содержание метана в глинистых породах зависит от их влажности и может достигать 20–25% объема пор.

Метан – газ без цвета и запаха, мало растворим в воде. Имея небольшую плотность, обычно скапливается в верхних частях горных выработок. С воздухом он образует горючие и взрывчатые смеси. Смесь с содержанием метана 0–5% может гореть около источника высокой температуры, 16% – взрываться (максимальная сила взрыва при 9,5%), свыше 16% – гореть при притоке кислорода извне; снижение при этом концентрации метана может привести к взрыву. Температура воспламенения метана находится в пределах 670–750° С. Однако она может быть значительно выше и ниже указанных пределов в зависимости от рода воспламенения, способа воспламенения, содержания CH_4 в воздухе, примеси других газов. Содержание метана в атмосфере подземных выработок должно соответствовать нормам, приведенным в [6 и 16].

Углекислый газ образуется в результате биохимических и окислительных процессов превращения органического вещества углей, метаморфизма горных пород при деятельности углекислых fumarol в очагах проявления молодого вулканизма, а также привноса газа инфильтрационными водами. Этот газ легко проникает во все пустоты и трещины и часто насыщает минерализованные подземные воды. Углекислый газ тяжелее воздуха и накапливается обычно в нижней части подземных выработок. Появление его в большом количестве опасно для жизни людей. Согласно действующим правилам безопасности в атмосфере подземных выработок допускается содержание углекислого газа до 0,5%. При содержании его 3–4% гаснет пламя карбидной лампы.

Углекислый газ, скапливающийся в пористых средах под большим давлением в результате, в частности, процессов термометаморфизма карбонатных пород, может являться причиной возникновения газодинамических явлений, которые характеризуются следующими признаками:

сейсмическим эффектом, более мощным и продолжительным, чем при ведении взрывных работ, сопровождающимся выбросом значительного объема пород;

высокой степени дробления пород, представленных самыми различными фракциями (тонкодисперсной породой мелочью, песком и крупными обломками): интенсивным выделением больших объемов газа.

Все перечисленные признаки характеризуют это явление как выброс породы и газа [5, 14].

С е р о в о д о р о д образуется в результате биохимических, химических и гидротерминальных процессов, протекающих в земной коре. Он ядовит, легко узнается по сильному запаху даже при малой концентрации. При содержании в воздухе 0,01% сероводорода через несколько часов наступает легкое отравление, а при вдыхании воздуха с содержанием его около 0,1% может наступить смерть. При содержании сероводорода в воздухе около 6% образуется взрывчатая смесь. Сероводород действует разрушающе на бетон и металлы.

А з о т - газ без цвета и запаха, встречается значительно реже и выделяется обычно в небольших количествах, накапливаясь в верхних частях подземных выработок. Выделяется он чаще всего в смеси с другими газами. В чистом виде проявления его иногда отмечаются только в породах молодых вулканических массивов. Небольшое увеличение содержания его в воздухе подземных выработок опасности не представляет (в атмосферном воздухе содержание азота составляет 79%). Значительные выделения азота встречаются очень редко.

Т я ж е л ы е у г л е в о д о р о д ы характерны для природных газов угольных пластов и представлены в основном этаном и пропаном, реже бутаном. Тяжелые углеводороды обнаруживаются в угольных пластах, как правило, значительно ниже зоны газового выветривания. Происхождение тяжелых углеводородов в газах угольных месторождений связано с процессами метаморфизма угольного вещества. В ряде случаев тяжелые углеводороды могут проникать также в угленосные толщи из нефтегазовых залежей. Тяжелые углеводороды в смеси с воздухом также образуют горючие и взрывчатые смеси, но пределы их взрывчатости ниже, чем у метана. Этан образует с воздухом взрывчатые смеси, когда его содержание находится в пределах 3,2–12,5, пропан – 2,4–9,5, бутан – 1,9–8,4%.

В о д о р о д обычно встречается в виде незначительных примесей, однако в отдельных случаях среди других газов его содержание достигает 40–50% и более. Происхождение водорода во многом остается неясным. Он может быть связан с биохимическими процессами превращения растительного вещества в уголь, с метаморфизмом угля, проникновением из магматических очагов (ювенильный). При исследовании необходимо учитывать, что водород может образовываться в процессе лабораторной обработки проб. Смеси водорода с воздухом являются взрывчатыми при содержании H_2 от 4,1 до 74%.

При наличии тяжелых углеводородов и водорода в рудничном воздухе значительно снижается температура вспышки смеси метана с воздухом (на 100–150°С), увеличивается сила взрыва, ускоряется распространение пламени, ослабляется весьма важное свойство смеси метана с воздухом – воспламеняемость с некоторым запозданием, а также расширяется диапазон взрывоопасных концентраций.

Газы в породах находятся в свободном и сорбированном состояниях. Свободный газ занимает поровое пространство (гранулярное и трещинное). Количество газа в породах зависит от их пористости и давления, под которым он находится. Если поры и трещины заполнены водой, то содержание газа в них соответственно меньше. Количество свободной о газа обычно нарастает с увеличением глубины.

Сорбционная способность (сорбция) – способность твердого тела поглощать газообразные вещества из окружающего его пространства. Это понятие объединяет несколько видов сорбции – адсорбцию, абсорбцию и хемсорбцию. Адсорбция – поглощение газообразных веществ поверхностным слоем твердого тела (сгущение газа на поверхности адсорбента). Абсорбция – способность твердого тела равномерно поглощать газ всем объемом. Хемсорбция – способность твердого тела вступать с газом в химическую связь.

Основными факторами, определяющими газосодержание и состав газов, являются история геологического развития бассейна, тектоническое строение, гидрогеологические и гидрохимические условия, литологический состав вмещающих пород и их коллекторские свойства, мощность и состав покровных отложений, многолетняя мерзлота, степень метаморфизма и петрографический состав пород.

При изучении газоносности пород определяют качественный состав газа и количественное содержание основных газовых компонентов в единице массы породы. Основным методом установления характера газовой зональности в вертикальном разрезе является метод изучения качественного состава газа. Для выявления количественных показателей газоносности применяются методы прямого и косвенного определения природной газоносности пород [6].

В связи с тем что газоносность пород не может быть достаточно подробно изучена с поверхности земли, при проходке тех участков туннеля, где по имеющимся данным могут быть встречены вредные газы, необходимо помимо перечисленных выше наблюдений за газопроявлением бурить опережающие колонковые скважины и проводить в них соответствующие исследования.

Для предупреждения прорывов в подземную выработку газонасыщенных вод также бурят опережающие скважины, изучают характер выхода воды, ее газонасыщенность, температуру и прочие важные признаки.

Для прогнозирования газодинамических явлений необходимо применять метод прогноза взрывоопасности пород, вошедший в „Инструкцию по безопасной разработке пластов, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа”, которая дополняет § 105 „Правил безопасности в угольных и сланцевых шахтах” Госгортехнадзора СССР. Этот метод прогноза основан на оценке степени разделения на диски керна скважин, буримых а направлении проведения выработки.

Прогноз вредности пыли. На завершающих стадиях изысканий следует давать прогноз о вредности пыли, образующейся при подземных горных работах. По действию на человека пыль делится на ядовитую (свинцовая, ртутная) и неядовитую (пыль горных пород). Неядовитая пыль может вызвать легочные заболевания. Наиболее распространенным и тяжелым заболеванием является пневмокониоз, вызываемый кремнистой пылью и получивший название силикоз. Возможность заболевания силикозом находится в прямой зависимости от интенсивности вдыхания пыли и содержания в ней свободной двуокиси кремния SiO_2 . Единными правилами безопасности установлены следующие предельно допустимые концентрации пыли в зависимости от содержания SiO_2 в горных породах: более 10% SiO_2 – 2 мг в 1 м³ воздуха; до 10% – 4 мг в 1 м³ воздуха.

Основными направлениями в профилактике силикоза являются мероприятия, обеспечивающие уменьшение пылеобразования при рабочих процессах и своевременное подавление пыли (бурение с промывкой, искусственное увлажнение, пылеулавливание, вентиляция и др.) .

Предельно допустимые концентрации ядовитой пыли, а в особых случаях и радиоактивных веществ в воздухе подземных выработок устанавливаются с учетом их вредности на основе специальных исследований.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ И СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И В ПЕРИОД СТРОИТЕЛЬСТВА

8. СХЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОТОКА

Задачей изыскательских работ для составления схемы является обоснование возможных вариантов расположения подземных сооружений. Эта работа проводится обычно на основе имеющихся фондовых материалов и результатов инженерно-геологического обследования местности. Необходимым условием является использование результатов дешифрирования аэрофотоматериалов, а в отдельных случаях и космических снимков. По изучаемым площадям следует использовать аэрофотоснимки всех имеющихся масштабов.

В ходе рекогносцировочного инженерно-геологического обследования местности или инженерно-геологической съемки основное внимание геологов должно быть уделено выявлению и предварительной оценке участков, неблагоприятных для производства строительных работ и эксплуатации подземных гидротехнических сооружений. Таких участков следует по возможности избегать.

Если этого сделать нельзя, то на участках с неблагоприятными или весьма сложными инженерно-геологическими условиями, а также в случаях, когда напор воды в подземных сооружениях будет превышать 10 МПа, допускается проведение небольшого объема разведочных работ (электроразведка, сейморазведка, проходка шурфов, бурение скважин). Портальные участки туннелей должны быть исследованы для оценки устойчивости склонов при их подрезке и возможности обводнения.

На основе всех имеющихся фондовых и полевых материалов инженерно-геологических изысканий по всем намеченным вариантам схемы размещения подземных сооружений составляют инженерно-геологические карты и разрезы, на которых должны быть выделены основные стратиграфо-литологические комплексы пород, показаны гидрогеологические условия и физико-геологические явления и отмечены неблагоприятные в инженерно-геологическом отношении участки. В соответствующем разделе обоснования схемы должны быть даны оценки инженерно-геологических условий участков расположения подземных гидротехнических сооружений по каждому из возможных вариантов, рекомендации по выбору тех или иных вариантов и основные соображения о направлении изысканий на дальнейшей стадии проектирования.

9. ПРОЕКТ

В проекте должны быть приняты окончательные решения по выбору мест расположения всех основных сооружений гидроузла, их типов, компоновки, основных параметров и конструкций, методов производства строительных работ и определена стоимость строительства.

В проекте обязательна вариантная проработка основных вопросов, а объемы и детальность разработки каждого варианта должны обеспечить выбор оптимального решения и определение стоимости строительства сооружения.

Задачей инженерно-геологических изысканий на начальном этапе составления проекта гидротехнического сооружения в целом и подземных сооружений его в частности является освещение инженерно-геологических условий конкурирующих вариантов. Поэтому при проведении изысканий на этом этапе основное внимание следует обращать на те вопросы, которые определяют выбор места расположения сооружений и их компоновки в данных природных условиях.

Конкурирующие варианты трасс и мест расположения подземных сооружений намечаются главным инженером проекта с участием главного геолога объекта. Во избежание излишних работ перед составлением технического задания на изыскания необходимо тщательно проанализировать все имеющиеся инженерно-геологические материалы по участкам расположения намечаемых вариантов сооружений и выполнить предварительные проектные проработки. Это позволит своевременно отказаться от таких вариантов, которые по экономическим, инженерно-геологическим, строительным и другим условиям являются неконкурентоспособными.

При изысканиях по вариантам трасс деривационных туннелей, предусмотренных техническим заданием, следует выполнять инженерно-геологические съемки в масштабе 1:50 000--1:25 000. На участках расположения вариантов подземных камер машинных залов, порталов туннелей, строительных шахт и штреков съемки выполняют в масштабе 1:10 000--1:5000. Кроме того, необходимо проводить горно-буровые и геофизические разведочные работы, гидрогеологические исследования, лабораторные испытания образцов основных разновидностей пород и химические анализы вод.

Масштабы съемок и объемы разведочных работ, гидрогеологических и лабораторных исследований следует определять в зависимости от капитальности проектируемых сооружений, сложности геологического строения, обнаженности, проходимости и других природных особенностей местности с учетом общих указаний, изложенных в разд. 1. При этом объемы разведочных горно-буровых работ и специальных исследований должны быть минимально необходимыми, но достаточными для обоснованного сравнения вариантов и выбора оптимального решения.

Основная часть горно-буровых разведочных выработок должна закладываться на наиболее неблагоприятных и сложных в инженерно-геологическом отношении участках трассы туннеля, на порталах туннелей, участках расположения подземных камер ГЭС и других наиболее важных и ответственных сооружений.

После окончательного выбора варианта трассы туннеля и мест расположения других подземных сооружений изыскания проводят в целях детализации и уточнения инженерно-геологических условий выбранного варианта гидроузла в масштабах и объемах, позволяющих принять окончательные проектные решения.

Инженерно-геологические съемки по выбранной трассе гидротехнического туннеля в зависимости от его капитальности, сложности геологического строения, обнаженности, проходимости местности и других особенностей природных условий, а также протяженности и глубины заложения на стадии проекта могут выполняться в масштабах 1:25 000--1:10 000. На участках расположения порталов туннелей, подземных камер машинных залов, строительных шахт и других наиболее ответственных сооружений инженерно-геологические съемки проводят в масштабе 1:5000--1:2000.

Объемы горно-буровых и других разведочных работ по выбранной трассе туннеля на стадии проекта следует принимать в зависимости от капитальности сооружения и сложности геологического строения с учетом общих указаний, изложенных в разд. 1.

Места заложения буровых скважин по трассе туннеля нужно назначать с учетом рельефа местности и особенностей геологического строения. Скважины следует располагать в понижениях рельефа и на характерных в инженерно-геологическом отношении участках.

При проектировании туннеля большой протяженности его трасса может пересекать участки, различные по сложности геологического строения. Участки трассы с мелким заложением туннеля и плохой обнаженностью коренных пород следует относить к сложным. На таких участках буровые скважины должны быть расположены наиболее часто. На хорошо обнаженных и благоприятных в инженерно-геологическом отношении участках трассы туннеля, особенно при глубоком его заложении и труднодоступной местности, разведочные скважины можно не закладывать.

Трассы напорных туннелей и водоводов, как правило, изучают подробнее, чем ненапорных, так как их обделка стоит дороже и к расчетам ее конструкции предъявляют более высокие требования.

На участках порталов туннелей со сложными геологическими условиями разведочные скважины закладывают как по оси, так и на поперечниках. Порталы туннелей высокой капитальности, а также находящиеся в сложных инженерно-геологических условиях следует разведывать штольнями.

По участкам расположения подземных камер машинных залов, турбинных водоводов, напорных камер и других подземных сооружений станционных узлов гидроэлектростанций на стадии проекта разведочные горно-буровые работы выполняют в объеме, необходимом для принятия окончательных проектных решений. Из всех разведочных выработок здесь по возможности предпочтение следует отдавать штольням, шахтам и смотровым скважинам, которые позволяют детально изучить литологические и текстурные особенности, трещиноватость, выветрелость и физико-механические свойства горных пород, а также провести исследования их деформационных свойств штампами.

При глубоком заложении подземных сооружений станционного узла (больше 300 м) разведку участков их расположения следует проводить буровыми скважинами с обязательным выполнением в них помимо общих геологических и гидрогеологических наблюдений и исследований также электро-, сейсмо- и ультразвукового каротажа.

На стадии проекта следует широко применять геофизические методы (электро- и сейморазведку), результаты которых могут быть использованы для более рационального размещения горно-буровых разведочных выработок. Данные геофизической разведки на сложных и неблагоприятных участках расположения подземных сооружений надо уточнять с помощью буровых скважин или горных выработок. В буровых скважинах, в свою очередь, следует выполнять различные виды каротажа.

Объем и состав гидрогеологических исследований и наблюдений (опытные откачки, наливов, нагнетания, стационарные наблюдения за режимом подземных вод и др.) в разведочных выработках на трассах туннелей и участках размещения подземных сооружений станционного узла следует определять исходя из необходимости получения достаточно полных и достоверных материалов для решения всех гидрогеологических вопросов, возникающих при проектировании (прогноз притока воды, распределение гидростатических напоров, агрессивность вод и др.).

При глубоком заложении туннелей, камер машинных залов и других подземных сооружений на стадии проекта следует проводить также специальные исследования и наблюдения по изучению температурных условий и газоносности пород соответствующих горных массивов. Методы этих исследований и наблюдений изложены в § 6 и 7.

Деформационные характеристики пород E и K_0 для напорных гидротехнических туннелей рекомендуется определять методами нагружения поверхности специально пройденных для этой цели цилиндрических выработок диаметром до 2,5 м равномерно распределенной нагрузкой или методами нагружения стенок (кровли и подошвы) прямоугольных выработок штампами площадью 1–2 м². Испытания пород следует проводить с учетом возможного насыщения их водой, анизотропии и ползучести во времени, а также направлений действия внутреннего давления воды в сооружении. В целях увязки статических и динамических методов исследований деформационных свойств пород в массиве необходимо выполнять в тех же выработках сейсмоакустические исследования.

Для безнапорных подземных сооружений деформационные характеристики пород рекомендуется определять сейсмоакустическими и прессиометрическими методами. С этой целью в пройденных разведочных скважинах на характерных участках следует проводить электро-, сейсмо- и ультразвуковой картаж, а в горных

выработках – прессиометрические испытания пород и сейсмоакустические исследования.

Для интерполяции расчетных характеристик деформационных свойств пород следует выполнять в достаточном для статистической обработки объеме лабораторные исследования физико-механических свойств образцов всех основных их разновидностей. Примерный комплекс и специфика этих исследований приведены в табл. 4 и изложены в § 4. В случае необходимости в разведочных горных выработках следует проводить также полевые испытания по определению сопротивления пород сдвигу и естественных напряжений в массиве.

Расчетные значения физико-механических и строительных показателей горных пород следует выбирать на основе всех материалов инженерно-геологических и специальных исследований в соответствии с действующими строительными нормами и правилами, ГОСТ 20522–75 и „Указаниями по проектированию гидротехнических туннелей„(СН 238–73), а также общими указаниями, изложенными в разд. 1 настоящего Руководства.

Для удобства пользования инженерно-геологическими материалами в проектных целях все основные цифровые и качественные расчетные характеристики физико-механических, строительных и других свойств пород следует заносить в специальные таблицы и показывать в виде графиков на основных чертежах: инженерно-геологических картах, разрезах, картах-срезах и др.

Результаты всех инженерно-геологических изысканий и исследований, выполненных для обоснования проекта подземных гидротехнических сооружений, представляются в отдельном разделе проекта. В нем дается подробная характеристика условий строительства всех подземных сооружений, прогнозы по специальным вопросам и рекомендации по выбору способов производства строительных работ и расчету конструкций сооружений.

Графическими приложениями к тексту должны быть: инженерно-геологические карты участков туннеля и напорно-станционного узла; продольные и поперечные разрезы, составленные в масштабах карт или крупнее в зависимости от требований главного инженера проекта; гидрогеологические карты или карты гидроизогипс; специальные карты (карты-срезы, карты поверхности коренных пород); специальные профили (геотермические, сейсмопрофили и т. п.); графики, таблицы, чертежи, схемы и другие материалы специальных и лабораторных исследований горных пород; разрезы и зарисовки характерных разведочных выработок; графики наблюдений за режимом подземных вод; натурные фотографии, необходимые для иллюстрации текста.

Основным графическим приложением является инженерно-геологический разрез по трассе подземных сооружений, под которым в зависимости от требований проектирования могут быть помещены следующие данные, характеризующие отдельные участки трассы туннеля: абсолютные отметки поверхности, пикетаж, наименование и плотность пород, их временное сопротивление сжатию, модуль трещиноватости, расчетный коэффициент крепости, кажущийся угол внутреннего трения, коэффициент удельного отпора, модуль деформации, коэффициент Пуассона, группа пород для разработки, коэффициент фильтрации, гидростатическое давление, ожидаемый приток воды, агрессивность вод, температура, возможность появления вредных газов.

На разрез наносят элементы геологического строения, тектоники, гидрогеологии, а также показывают разведочные выработки, обнажения, места проведения полевых опытов и другой фактический материал.

Масштаб разреза принимают в зависимости от сложности геологического строения, длины туннеля и характера рельефа. Наиболее часто горизонтальный масштаб принимают от 1:25 000 до 1:5000, а вертикальный – от 1:1000 до 1:200.

Трассу туннеля районуют по инженерно-геологическим условиям с выделением участков на которых рекомендуется применять тот или иной тип крепления и обделки подземной выработки.

10. РАБОЧАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

На стадии рабочей документации и в период строительства подземных гидротехнических сооружений инженерно-геологические изыскания и исследования проводят в целях доработки и уточнения отдельных вопросов, возникших при утверждении проекта, а также в процессе разработки рабочих чертежей и строительства. На этой стадии выполняют необходимые дополнительные инженерно-геологические изыскания, опытные работы и специальные исследования, документацию подземных выемок и развивающихся физико-геологических и инженерно-геологических процессов

Дополнительную разведку буровыми скважинами и горными выработками на стадии рабочей документации проводят главным образом на наиболее сложных и неблагоприятных в инженерно-геологическом отношении участках расположения подземных сооружений (с предполагаемым большим горным давлением, большими притоками воды и др.). В зависимости от конкретных задач новые разведочные выработки можно закладывать как с поверхности земли, так и из имеющихся строительных выработок.

При необходимости в разведочных скважинах проводят электро-, сейсмо- и ультразвуковой каротаж для уточнения степени трещиноватости, плотности, прочности и деформационных свойств пород. В разведочных штольнях, штреках, подземных опытных камерах и шахтах следует выполнять сеймопрофилирование, позволяющее получать показатели деформационных свойств пород.

Для уточнения гидрогеологических условий и отдельных расчетных параметров на участках дополнительной разведки надо проводить гидрогеологические исследования и наблюдения (опытные откачки, нагнетания, наливы и стационарные наблюдения за режимом подземных вод).

В связи с ограниченными возможностями изучения инженерно-геологических условий горно-буровыми разведочными выработками, особенно на труднодоступных участках трасс туннелей, в ходе строительства надо производить тщательную документацию выемок, а в случае необходимости выполнять и специальные исследования в забоях. Значение инженерно-геологической документации и исследований в забоях очень велико, особенно для установления мест с ослабленной устойчивостью пород, повышенным горным давлением, пучением пород, сосредоточенным притоком подземных вод. Поэтому нередко только на основе материалов документации удается правильно оценить природную обстановку, которая иногда вызывает необходимость изменения запроектированных способов проходки, крепления и обделки выработок, а в отдельных случаях даже направлений трассы туннеля.

Инженерно-геологическую документацию подземных строительных выработок надо выполнять систематически по мере их проходки до возведения временной и постоянной крепи. Она должна сопровождаться зарисовками (или фотографированием) и описанием стен, потолочин и забоев подземных выработок и давать полную литологическую характеристику горных пород и данные о фактическом состоянии их массива: крепости, плотности, трещиноватости, влажности, условиях залегания, местах и характере вывалов, зон и поверхностей ослабления, наличии различных физико-геологических и инженерно-геологических процессов и др.

Из характерных разностей пород надо отбирать образцы для лабораторных исследований. Количество отбираемых образцов зависит от типов пород, пересекаемых выработкой, их однородности, частоты смены отдельных литологических разностей, мощностей слоев, характера их залегания и значимости для строящегося сооружения. В общем случае оно должно быть достаточным для статистической обработки результатов исследований по каждой литологической разности пород (комплекс возможных исследований приведен в табл. 4). Породы, содержащие растворимые соли (гипс, ангидрит, каменную соль и др.), должны подвергаться химическим анализам.

Наблюдениями за устойчивостью горных пород в подземных выработках должны быть выявлены: формы проявления неустойчивости; факторы, способствующие снижению устойчивости (литологические и текстурные особенности, трещиноватость, обводненность пород, воздействие взрывных работ и т. п.); условия и закономерности развития нарушений устойчивости.

При документации регистрируют и описывают все случаи деформации горных пород, временного крепления и постоянной обделки (вывалы, пучение, прогибание, деформации стен и элементов временного крепления, образование трещин в постоянной обделке и др.), выявляют закономерности развития этих явлений во времени (интенсификация, затухание, стабилизация). Для многолетнемерзлых пород должны быть установлены скорость и глубина их оттаивания.

Инженерно-геологической документацией подземных выработок должны быть освещены также гидрогеологические условия: места выходов и количество притекающих в выработку подземных вод, их химические свойства и агрессивность по отношению к бетону. Приток подземных вод в выработки на характерных участках следует определять по работе насосов при водоотливе или с помощью водосливов, устанавливаемых в водоотводных канавах, а также объемным способом: по скорости заполнения зумпфов, водосборников и других емкостей.

При инженерно-геологической документации подземных выработок надо также вести наблюдения за температурой воздуха и пород и выходами природных газов. Высокие температуры горных пород могут встретиться главным образом при проходке туннелей на глубинах более 300 м. Температуру следует измерять термометрами, ртутными или электрическими термометрами в шпурах, пробуренных не менее чем за 2–3 ч до начала измерений. В многолетнемерзлых породах измерения температуры проводят в стенах, своде и подошве выработки на специально оборудованных для систематических наблюдений поперечниках. В этих случаях температуру измеряют с интервалами в 0,5 м на глубине 2–3 м и более, что позволяет установить характер и скорость деградации многолетней мерзлоты.

Проявления газов фиксируют по запаху, пузырькам или пленкам нефти на поверхности воды (метан), шумовому (суфлярному) эффекту и другим признакам. При первом же проявлении признаков газовой выделений следует отобрать пробы газов на химический анализ.

Наблюдения за температурой, загазованностью и запыленностью воздуха (в том числе и для определения его силикозоопасности) в подземных выработках обычно проводит служба строительства и контролирует служба горно-технической инспекции (Госгортехнадзор).

В случаях приближения горных выработок к участкам распространения пород, неблагоприятных из-за наличия в них крупных карстовых полостей, скоплений воды, пльвунов, газов и т. п., в забоях следует проводить дополнительные исследования, сопровождающиеся проходкой опережающих буровых скважин или штолен. Для этой цели могут быть использованы также геофизические методы разведки (электропрофилирование, сейсмическое и радиоволновое просвечивание и др.).

Необходимость бурения опережающих скважин из забоя туннеля, их количество и глубину определяют при составлении проекта. На стадии рабочей документации эти данные уточняют с учетом опыта проходки туннелей в подобных условиях, а также на основе геологической и гидрологической документации туннельных работ, геофизической разведки, наблюдений за газопоявлением и т. п.

Отказ от опережающих скважин возможен при проходке туннелей в относительно простых геологических условиях, достаточно подробно изученных путем бурения скважин и другими способами, если исключается возможность прорывов больших объемов воды и выбросов газов. Бурение опережающих скважин и сопровождающие его наблюдения должна осуществлять служба строительства при консультации проектной организации.

Все работы по инженерно-геологической документации подземных выработок надо проводить в тесном контакте геологов со строителями и проектной группой авторского надзора на строительстве. Обо всех изменениях и осложнениях инженерно-геологических условий в процессе проходки выработок должны быть своевременно поставлены в известность главный геолог и главный инженер проекта строящегося гидротехнического объекта, а также строительная организация.

В процессе строительства напорных гидротехнических туннелей, а также подземных участков турбинных водоводов и камер машинных залов гидроэлектростанций на характерных по инженерно-геологическим условиям участках в дополнение к исследованиям, выполненным на стадии проекта, могут быть проведены полевые исследования по определению показателей деформационных свойств горных пород, их напряженного состояния и горного давления.

Исследования выполняют в опытных камерах и горных выработках по особым программам. Места проведения указанных исследований и их методику выбирает главный геолог с участием главного инженера проекта и руководителя специализированного подразделения, выполняющего исследования. Выбранные участки для опытов должны быть представительными, отражать все особенности геологического строения и гидрогеологических условий изучаемого массива.

Помимо испытаний в опытных камерах и специальных горных выработках методами обжатия камер и штампами изучение деформационных свойств пород следует проводить также геофизическими (сейсмоакустическими) и прессиометрическими методами. Эти методы позволяют произвести массовые исследования пород непосредственно в туннельных и других строительных выработках.

При проведении укрепительных мероприятий (цементации, силикатизации и т. п.) исследования деформационных свойств массива пород вокруг выработки на характерных участках обычно выполняют крупномасштабными полевыми опытами, прессиометрией и геофизическими методами до и после осуществления этих мероприятий, что позволяет выявить их эффективность. Водопроницаемость пород после проведения противифльтрационных мероприятий определяют опытными нагнетаниями.

Для менее ответственных туннелей полевые исследования по определению характеристик деформационных свойств горных пород на стадии рабочей документации допускается выполнять только геофизическими и прессиометрическими методами. Горное давление может быть определено на участках его интенсивного проявления (деформации крепления, обделки и т. п.) путем установки динамометров или специальных датчиков на элементах крепления и за обделкой.

Материалы дополнительных инженерно-геологических изысканий и исследований, инженерно-геологической документации, специальных наблюдений и исследований надо систематически обрабатывать. На основе этих материалов составляют уточненные разрезы, карты-срезы, развертки, зарисовки, поперечники и др., а также инженерно-геологические заключения по отдельным участкам и специальным вопросам. По этим данным принимают окончательные решения о типах и конструкциях обделок, необходимых защитных, укрепительных и других мероприятиях, конструктивных и компоновочных изменениях в проекте.

Масштабы зарисовок при документации подземных строительных выработок в зависимости от их размеров и сложности инженерно-геологических условий можно принимать от 1:50 до 1:200. Сводные материалы – инженерно-геологические разрезы, карты-срезы и т. п. – по отдельным участкам и узлам сооружений можно составлять в масштабах 1:200–1:5000.

После завершения строительных работ по материалам всех инженерно-геологических изысканий, инженерно-геологической документации, специальных исследований и наблюдений составляют сводный отчет, который передают заказчику и используют при подготовке отчета о строительстве объекта в целом. В сводном отчете

должны быть освещены инженерно-геологические условия всех основных сооружений и дано их сопоставление с данными предварительных материалов и прогнозов, выдававшихся на стадии проекта, отражены все изменения, внесенные в инженерно-геологические и проектные материалы, и отмечено их значение для производства строительных работ.

На основании данных инженерно-геологической документации подземной выработки составляется ее исполнительная документация и производится приемка основания сооружения специальной комиссией, в которую входит инженер-геолог. Он участвует также в осуществлении авторского надзора за ходом строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акиншин Б. Т. Инженерно-геологические методы исследований в горном деле. – Гидротехническое строительство, 1980, № 1, с. 34–35.
2. Варга А. А. К прогнозу фильтрационных свойств скального массива по параметрам трещиноватости. – Сборник научных трудов Гидропроекта, 1981, вып. 76, с. 30–37.
3. Джегер Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения. М.: Мир, 1975. 210 с.
4. Инженерно-геологические изыскания для строительства гидротехнических сооружений / Под общей ред. В. С. Карпышева. М.: Энергия, 1980. 344 с.
5. Инструкция по безопасному ведению работ на пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа. М.: Недра, 1977. 135 с.
6. Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах. М.: Недра, 1977. 95 с.
7. Карпышев Е. С., Молоков Л. А. Основные положения методики инженерно-геологических изысканий для строительства подземных гидротехнических сооружений. – Труды Гидропроекта, 1974, вып. 36, с. 10–15.
8. Ломизе Г. М., Насберг В. М. Фильтрационные расчеты гидротехнических туннелей. – Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. М.: Госэнергоиздат, 1958, с. 162–176.
9. Мостков В. М., Серков В. С. Об изучении опыта эксплуатации гидротехнических туннелей. – Гидротехническое строительство, 1980, № 1, с. 39–43.
10. Методические рекомендации по изучению мелкой трещиноватости скальных пород при изысканиях для гидроэнергетического строительства. П-719-80 / Гидропроект. М.: Энергоиздат, 1981. 136 с.
11. Методы инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород. М.: Энергия, 1969. 247 с.
12. Молоков Л. А. Основные вопросы методики и организации инженерно-геологических изысканий для обоснования проектов гидротехнических туннелей большой протяженности. – Сборник научных трудов Гидропроекта, 1981, вып. 78, с. 10–16.
13. Никитин В. Н., Лавров В. Е., Михайлов А. Д. Определение коэффициента отпора косвенными (сейсмическими и ультразвуковыми) методами. – Труды Гидропроекта, 1971, вып. 21, с. 133–147.
14. Николин В. И., Матлак Е. С., Саркисян А. В. Выбросы изверженных пород и газа при проходке туннеля Арпа–Севан. – Гидротехническое строительство, 1980, № 6, с. 24–28.
15. Пашкин Е. М. Инженерно-геологические исследования при строительстве туннелей. М.: Недра, 1981. 135 с.
16. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах. М.: Недра, 1976. 400 с.
17. Рац М. В. Автоматизированная система обработки данных (АСОД) по трещиноватости горных пород для инженерно-геологических целей. – Инженерная геология, 1979, № 5, с. 78–89.
18. Руководство по гидрохимическим исследованиям при изысканиях для гидротехнического строительства. П-657-77 / Гидропроект. М.: Энергия, 1978. 86 с.

19. Руководство по составлению инженерно-геологической документации подземных гидротехнических сооружений. М.: Информэнерго, 1976. 86 с.

20. Разумов В. К., Даниелян С. С. Сопоставление и анализ прогнозируемых и фактических инженерно-геологических условий строительства туннеля Арпа-Севан. – Сборник научных трудов Гидропроекта, 1981, вып. 78, с. 99–114.

21. Рукин В. В., Руппенейт К. В. Механизм взаимодействия напорных туннелей с массивом горных пород. М.: Наука, 1969. 157 с.

22. Руководство по проектированию гидротехнических туннелей / Гидропроект. М.: Стройиздат, 1982. 287 с.

23. Руководство по инженерно-геологической документации строительных выемок при строительстве гидротехнических сооружений. П-664-78 / Гидропроект. М.: Энергия 1979. 52 с.

24. Руководство по определению водопроницаемости скальных пород методом опытных нагнетаний воды в скважины. П-656-75 / Гидропроект. М.: Энергия, 1978. 48 с.

25. Руководство по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки. П-717-80 / Гидропроект. М.: Энергоиздат, 1981. 127 с.

26. Справочное руководство гидрогеолога. Т. 1. Л.: Недра, 1979. 512 с.

27. Скабалонович И. А. Гидрогеологические расчеты по динамике подземных вод. М.: Госнаучтехиздат, 1960. 407 с.

28. Тер-Микаелян К. Л. О связи удельного коэффициента отпора и модуля деформации горных пород с коэффициентом крепости. – Труды Гидропроекта, 1974, вып. 33, с. 118–123.

29. Фишман Ю. А. Оптимизация изысканий на основе анализа проектных решений. – Гидротехническое строительство, 1982, № 2, с. 47–48.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Р а з д е л 1. Основные задачи и методы инженерно-геологических изысканий	4
1. Задачи изысканий	4
2. Изучение геологического строения района	6
3. Изучение гидрогеологических условий	12
4. Изучение физико-механических свойств горных пород	21
5. Изучение физико-геологических и инженерно-геологических процессов, явлений и сейсмичности	34
6. Прогноз температурных условий	39
7. Изучение газоносности пород и вредности пыли	41
Р а з д е л 2. Инженерно-геологические изыскания на различных этапах и стадиях проектирования и в период строительства	44
8. Схема использования водотока	44
9. Проект	44
10. Рабочая документация	48
Список литературы	52

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В Энергоатомиздате готовятся к изданию:

Сборник по обобщению опыта изысканий для гидротехнического строительства "Геология и плотины", т. IX. Под ред. А.А. Борового.

Руководство по наблюдениям за режимом подземных вод.

По поводу приобретения брошюр просьба обращаться в институт Гидропроект имени С.Я. Жука по адресу: 125812 Москва, А-80, ГСП, Волоколамское ш., д. 2.

**Руководство
по инженерно-геологическим изысканиям
для строительства подземных
гидротехнических сооружений**

Редактор **Е. С. Карпышев**
Редактор издательства **Р. М. Ваничкина**
Технический редактор **Л. В. Порхачева**

Н/К

Подписано в печать 09.01.84. (набор выполнен в издательстве). Т-04113. Формат 60X90 1/16. Бумага офсетная №1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,5. Усл. кр.-отт. 3,75. Уч.-изд. л. 4,78. Тираж 600 экз. Заказ 81 . Цена 25 к. Заказное.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб.. 10

Типография ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева.
195220, Ленинград, Гжатская ул., 21.