

И.П.ИВАНОВ

ИНЖЕНЕРНАЯ
ГЕОЛОГИЯ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
НОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ

ВЫСШЕЕ
ОБРАЗОВАНИЕ

И.П.ИВАНОВ

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

*Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию в качестве
учебного пособия для студентов
горно-геологических вузов*



МОСКВА "НЕДРА" 1990

ББК 26.3

И 20

УДК 624.131.1 : 622 (075.8)

Р е ц е н з е н т ы: кафедра гидрогеологии и инженерной геологии
Свердловского горного института, Ф. И. Сало

Иванов И. П.

И 20 Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1990. — 302 с.: ил.

ISBN 5-247-01397-2

Рассмотрены инженерно-геологические условия месторождений полезных ископаемых, геологические процессы и явления, подземные воды. Даны оценка горных пород и типизация месторождений твердых полезных ископаемых. Изложено инженерно-геологическое прогнозирование условий разработки месторождений полезных ископаемых. Большое внимание уделено инженерно-геологическому обоснованию мероприятий по улучшению условий ведения горных работ и охране окружающей среды.

Для студентов горных специальностей вузов.

И 1804090000—059
043(01)—90 125—90

ББК 26.3

ISBN 5-247-01397-2

© Издательство «Недра», 1990

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время из недр земли добывается около 400 видов минерального сырья, среди которых основная часть, более 85 % мировой добычи, приходится на долю горючих ископаемых (нефти, газа, угля), около 12 % занимают цветные и черные металлы, 3 % — строительные материалы, минеральные удобрения, неметаллическое сырье и т. д. При этом следует отметить, что 93 % энергетического сырья в мире составляет уголь. В СССР действуют около 1400 шахт и подземных рудников, более 6300 карьеров и приисков, которые привели к нарушению 2 млн га земель. Основная часть этих земель (более 70 %) находится в наиболее развитых и густонаселенных районах страны.

На европейской части территории СССР добывается 75 % полезных ископаемых; ежегодно нарушается до 5 тыс. га, что, при сохранении соответствующей тенденции развития горнодобывающей промышленности, к 2000 г. приведет к выводу из народного хозяйства еще 1 млн га земельных ресурсов. Интересно отметить, что половина всех нарушенных площадей приходится на торфодобывающую промышленность, более 25 % на разработку цветных металлов, более 10 % — на карьеры стройматериалов, более 5 % — на угольную промышленность, в среднем 3 % на добычу черных металлов и минеральных удобрений [19].

Как показывает анализ данных о землях, занятых под горную промышленность, значительная их часть могла бы быть весьма полезной для народного хозяйства. Так, например, для нужд горнодобывающих предприятий Курской магнитной аномалии (КМА) ежегодно отводится 300—350 га земель, из которых 85 % использовались в сельском хозяйстве, в Подмосковном угольном бассейне нарушено более 3,6 тыс. га сельскохозяйственных угодий, на Украине половину площадей, отводимых под горное производство, составляют пашни (в среднем 17—18 тыс. га в год). На огромных площадях изменяется влажностной режим в результате дренирования подземных вод. В этом отношении негативными примерами могут служить горнорудные районы КМА, Североуральского бокситового рудника (СУБР) и Донбасса [19].

В ближайшие годы потребление энергии за счет ископаемых видов топлива возрастет в 12 раз, а удельный вес горнодобывающего производства в валовом национальном продукте — в 2—3 раза и достигнет 12—15 %. Начинаяющаяся интенсификация горного производства происходит при вполне определенной

тенденции в области освоения месторождений полезных ископаемых (МПИ), которая характеризуется следующими основными положениями: а) разведаются и сдаются для разработки месторождения со все более сложными природными условиями; б) увеличивается глубина разработки месторождений подземным и открытым способом, что создает качественно новые условия для разведки и эксплуатации; в) уменьшается содержание полезных компонентов; г) ухудшается физическое состояние горных пород; д) усложняется оценка напряженно-деформированного состояния пород вокруг горных выработок; е) растет водо- и газообильность; ж) применяется все более сложное и производительное оборудование, требующее создания надежных условий работы; з) растут требования к рациональному использованию и охране земных недр, к улучшению условий работы и безопасности труда горняков. На разведку и добычу полезных ископаемых в стране расходуется до 40 % капитальных вложений, здесь сосредоточены около 30 % производственных и 20 % трудовых ресурсов.

Особое значение приобретают своевременность, точность и надежность оценок и прогнозов геологических условий разработки МПИ. Из-за сложности этих условий месторождений и многофакторности процессов, возникающих при их взаимодействии с горными выработками, большая часть проблем, связанных с оценкой и прогнозом устойчивости горных сооружений, решается в период их строительства и эксплуатации (в отличие от других типов сооружений). Поэтому приходится проводить целенаправленные геологические исследования не только в период разведки месторождений, для утверждения их запасов в Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) и проектирования горного предприятия, но и непосредственно в горных выработках во время их строительства.

Многолетняя работа автора на различных МПИ, шахтах, рудниках и карьерах, а также со студентами горных и геологических специальностей убеждает в том, что горному инженеру (технологу, шахтостроителю, маркшейдеру) необходимы знания об определяющей роли геологических условий месторождений как среди горных работ и горных сооружений, т. е. об инженерно-геологических (горно-геологических) условиях МПИ (а не основные сведения из различных разделов геологической науки).

Исходя из высказанных принципиальных позиций, в основу написания учебного пособия был положен инженерно-геологический подход, что представляет собой новую попытку составления подобных учебников для студентов-горняков. С признательностью будут встречены отзывы специалистов-геологов и горняков, которые можно направлять по адресу: 199026, Ленинград, 21-я линия, 2, ЛГИ, кафедра инженерной геологии.

Часть I

Инженерно-геологические условия месторождений твердых полезных ископаемых

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

1.1. ПОНЯТИЕ ОБ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

При изучении МПИ выявляют и оценивают их различные природные особенности: орогидографию, геологическое строение, горные породы, подземные воды и газы, геодинамические процессы и явления, полезное ископаемое, естественное напряженное состояние, тектоническую и неотектоническую обстановку и др. При этом часто говорят о геологических, гидрогеологических, геоморфологических, тектонических, геокриологических условиях месторождения и об их оценке. Все перечисленные особенности природной обстановки имеют определенное значение при оценке территорий с точки зрения их освоения. Основоположник инженерной геологии академик Ф. П. Саваренский, оценивая геологическую ситуацию в целях строительной практики, ввел понятие о геологических условиях строительства, а позже, в своем капитальном труде «Инженерная геология» (1937—1939 гг.), назвал их «инженерно-геологическими условиями». Этот термин используется в инженерной геологии и строительстве и в настоящее время в разных формулировках, но без существенного изменения его первоначального содержания.

Академик А. А. Скочинский, впервые предложивший термин «горно-геологические условия», характеризуя задачи горной науки (1946 г.), отмечал, что необходимо, используя достижения математики, физики, химии и цикла геологических дисциплин, обеспечить научное понимание сложных явлений и процессов, происходящих в недрах земли при разработке месторождений полезных ископаемых. В дальнейшем, в связи с развитием горной науки и практики и освоением месторождений со все более сложными природными условиями, вопросы оценки этих условий и прогноза изменения геологической среды при ее

освоении с целью рационального использования и охраны, встали со всей остротой перед специалистами разных профилей. Наиболее подготовленной для решения задач, возникающих при разработке месторождений полезных ископаемых, оказалась инженерная геология, у которой большой опыт по изучению закономерностей геологических процессов и явлений, а также условий строительства и эксплуатации различных сооружений.

Изучение геологических особенностей МПИ специалистами геологического и горного профиля с целью оценки и прогноза условий их разработки привело к тому, что для общей характеристики этих условий стали применять разный набор природных компонентов под названием геолого-технических, инженерно-геологических и горно-геологических условий. В 1956 г. П. Н. Панюков отождествил инженерно-геологические и горно-геологические условия, написав, что инженерно-геологические условия (и особенности) в горной промышленности принято называть горно-геологическими условиями (и особенностями).

Таблица 1. Определение и содержание инженерно- и горно-геологических условий месторождений

Характеристика условий	Инженерно-геологические условия	Горно-геологические условия
Определение условий, подлежащих оценке и прогнозу	Геологические условия производства инженерных работ и эксплуатации сооружений (по П. Н. Панюкову, 1962 г.)	Совокупность природных свойств полезного ископаемого и вмещающих его пород, которые в значительной степени благоприятно или неблагоприятно сказываются на технико-экономической эффективности и безопасности работы добывающих предприятий
Основные элементы условий, изучаемые при проведении геологических работ	1. Физико-географические условия: климат; рельеф; гидрология 2. Геологическое строение: литология пород; тектонические условия; физико-механические свойства вмещающих пород и полезного ископаемого 3. Гидрогеологические условия: гидростатическое и гидродинамическое давление; обводненность пород 4. Геологические процессы и явления 5. Естественное напряженное состояние горных пород	1. Геологические условия: литология пород и условия их залегания; тектоническая обстановка; строение и качество полезного ископаемого; газоносность; физико-механические свойства вмещающих пород и полезного ископаемого 2. Гидрогеологические условия 3. Геологические процессы и явления 4. Естественное напряженное состояние горных пород

Многие специалисты-геологи и горняки в настоящее время приняли эту тождественность, хотя включают в данные понятия разные элементы (факторы). В табл. 1 для наглядности показаны определение и содержание инженерно-геологических и горно-геологических условий.

Исходя из требований проектирования горных предприятий, строительства и эксплуатации горных сооружений (выработок) с целью рационального использования недр и охраны окружающей среды и имея в виду предмет и задачи инженерной геологии как науки, определим инженерно-геологические условия МПИ. Они представляют собой систему взаимосвязанных и взаимообусловленных элементов (компонентов) природной среды, охарактеризованных количественными и качественными показателями, позволяющими: 1) оценивать и прогнозировать сложность освоения месторождений, процессы и явления, возникающие и развивающиеся под воздействием горных работ, устойчивость выработок (сооружений); степень безопасности и производительность труда; 2) обосновывать способы, системы и технологию разработки и мероприятия с целью рационального использования природных ресурсов, повышения безопасности и эффективности эксплуатации и охраны окружающей среды [9, 10].

1.2. КОМПОНЕНТЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

К основным компонентам инженерно-геологических условий, подлежащим изучению (анализу, оценке, прогнозу), следует отнести: рельеф, климат и гидрологию, площади месторождения и прилегающих к нему территорий, горные породы, вмещающие полезное ископаемое и перекрывающие его (литология и стратиграфия, строение, условия залегания, физическое и напряженное состояние, свойства), подземные воды и газы (водоносность, газоносность), полезное ископаемое (состав, строение, условия залегания, мощность, физико-механические свойства), геологические явления (вызванные как естественными, так и искусственными факторами). Если инженерно-геологические условия рассматривать как некоторую природную систему, то составляющие ее компоненты можно оценивать как подсистемы, определяющие свойства общей системы, в которую они входят.

Инженерный аспект изучения природных компонентов проявляется на отдельных стадиях исследования по-разному. Чаще всего внешнее воздействие предполагается по аналогии с известными и хорошо изученными объектами (на стадии поисков, предварительной и детальной разведки), но мы в дальнейшем будем рассматривать реализованную инженерно-геологическую систему — геологическую среду, находящуюся под воздействием

горного предприятия. По-разному следует относиться и к границам изучаемых территорий. Понятие «сфера влияния» внешнего воздействия очень неоднородно. Оно может включать область воздействия одиночной выработки, группы взаимодействующих выработок, очистного пространства, карьера, отвалов, хвостохранилища, сдренированной территории месторождения, площади заболачивания, запыления, засоления и других изменений, площадь горного или земельного отводов и т. д. Поэтому можно говорить о инженерно-геологических условиях месторождения, шахтного (карьерного) поля, участка, сооружения, выработки.

Детальность изучения компонентов инженерно-геологических условий зависит от характера решаемой задачи и стадии проводимых исследований, но она должна обеспечивать полноту и надежность оценок и прогнозов этих условий в целом для решения поставленной задачи. При этом может меняться как число, так и состав изучаемых компонентов. Исследовать во всех случаях полный набор компонентов для решения любой задачи, как предлагают некоторые авторы, нецелесообразно, неэффективно, а главное, такой подход может привести к недостаточному углублению в оценках ведущих компонентов в конкретном случае. В частности, для прогноза параметров бортов карьеров существенное значение приобретают два аспекта: построение физической (расчетной) модели геологического разреза объекта и выбор расчетных показателей сопротивления сдвигу пород (с учетом их изменения во времени) в зоне наиболее вероятной поверхности скольжения. В этом случае основными становятся строение всей толщи пород, условия залегания отдельных слоев, наличие слабых прослоев, контактов, выдержаных в пространстве трещин (особенно залегающих в сторону откоса выработки под углом $45^\circ - \phi'/2$ к его плоскости, где ϕ' — угол трения по слабому контакту), которые определят положение поверхности скольжения, механизм, динамику, морфологию и масштабы оползней. Для правильного выбора расчетных показателей при уже известной морфологии оползневого тела, необходимо определение в достаточном количестве для статистической обработки, показателей сопротивления сдвигу с учетом физического и напряженного состояний пород в зоне поверхности скольжения.

На рис. 1 приведены геологические разрезы двух угольных месторождений, намеченных к разработке открытым способом. Не трудно понять, что условия залегания пород предопределяют характер вероятных деформаций уступов и бортов карьеров, а следовательно и вид расчетной схемы их устойчивости. При моноклинальном залегании вмещающих пород и полезного ископаемого (см. рис. 1, а) наиболее вероятная (наиболее напряженная) поверхность скольжения, по которой произойдет спол-

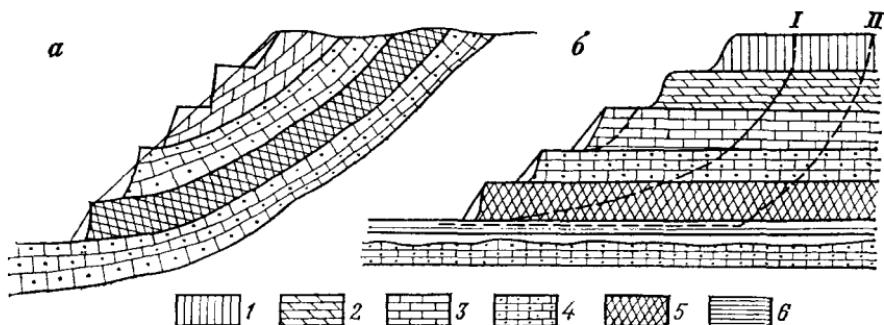


Рис. 1. Геологические разрезы угольных месторождений с моноклинальным (а) и горизонтальным (б) залеганием пород:

1 — суглинок; 2 — мергель; 3 — известняк; 4 — песчаник; 5 — полезное ископаемое; 6 — аргиллит, I, II — потенциальные поверхности скольжения

зание пород, унаследует слабый контакт между разными литологическими слоями (или в слое по трещине наслоения). Поэтому определение углов устойчивых уступов и борта (или его частей) необходимо производить по геологическим фиксированным поверхностям скольжения, а в качестве расчетных показателей прочности принять параметры сопротивления сдвигу по этим поверхностям. В данном случае прочность пород в обычном представлении не имеет решающего значения. Порода может быть очень крепкой, а контакты — трещины обладать только сопротивлением за счет трения.

При горизонтальном залегании (или со слабым наклоном до 3—5°) вмещающих пород и полезного ископаемого (см. рис. 1, б) между отдельными литологическими слоями нет явно выраженных плоскостей ослабления. При этом наиболее вероятные поверхности скольжения, показанные на рис. 1, б, будут близки к круглоцилиндрическим (характерным для однородной среды) и пересекать под разными углами наслойение пород, что и определяет подход к изучению их сопротивлению сдвигу. При наличии более слабых пород (слоистых аргиллитов) в почве угольного пласта оползневая поверхность примет вид II. В этом случае большое значение приобретают показатели сопротивления сдвигу по наслоению аргиллитов.

Если мы обратимся к прогнозу прорыва глинистого слоя пород, отделяющего напорный водоносный горизонт от почвы горной выработки (карьера, шахтного ствола, горизонтальной выработки), то основными моментами, определяющими точность и надежность наших прогнозов являются: величина напора подземных вод и ее изменение под влиянием горных работ; мощность и прочность водоупорных глин, а также форма и размеры их обнажения горными работами. По-другому встанет вопрос

оценки инженерно-геологических условий размещения и устойчивости внешних отвалов пород. В первую очередь здесь необходимо изучать рельеф и речную сеть местности, строение, состав и физико-механические свойства пород основания (незначительной мощности) и пород в теле отвалов, климатические условия.

Горные породы представляют собой определяющий компонент инженерно-геологических условий, ибо они предопределяют особенности рельефа местности, обводненности среды, напряженного состояния, устойчивости выработок, закономерностей возникновения и развития геологических явлений, залегания полезных ископаемых и т. д.

В связи с этим горные породы — важнейший объект исследований на всех стадиях разведки и разработки месторождений. В специальной литературе применительно к толще вмещающих пород, а в последние годы и к любой толще горных пород вошел в употребление термин «массив горных пород», а иногда «горно-геологический массив».

Подземные воды оказывают влияние на условия формирования и изменения свойств горных пород, на естественное напряженное состояние и его изменение вокруг горных сооружений, а также на возникновение и развитие естественных и вызванных горными работами геологических процессов. Изучение подземных вод и их влияния на условия освоения месторождений дает возможность прогнозировать водопритоки к горным выработкам и проектировать мероприятия по осушению и охране. Необходимо отметить, что во время освоения месторождений происходят значительные, не всегда оправданные изменения режима подземных вод. Поэтому детальное их изучение должно соответствовать современным запросам рационального использования и охраны водных ресурсов.

Исследуя условия распространения подземных вод, их залегание, дренирование, питание и движение, нельзя обойтись без изучения поверхностных и атмосферных вод, между которыми существуют определенные закономерные связи. Вместе с тем оценивается общее влияние природных вод на инженерно-геологические условия месторождения.

Как видно, круг вопросов, подлежащих изучению при исследования подземных вод, весьма широкий и требует применения специальных методов и аппаратуры, которые разрабатываются в гидрогеологии.

Газоносность угольных месторождений не может не учитываться при оценке и прогнозе условий его эксплуатации. Газы (метан, азот, углекислый газ, сероводород и другие) обычно заполняют поры и трещины углей или находятся в них в сорбированном состоянии, но они могут находиться также в растворенном виде в подземных водах. Происхождение газов свя-

зано главным образом с метаморфизмом углей и вмещающих пород. Газообильность шахт определяется объемом газов, приходящимся на 1 т добычи. Существенно влияние газов на степень безопасности ведения горных работ и на устойчивость подземных выработок. Так называемые газодинамические явления (внезапные выбросы угля, пород и газа), представляющие опасность для работающих в шахтах и уменьшающие производительность труда горнодобывающего предприятия, часто происходят под влиянием упругой энергии газов.

Естественные геологические процессы и явления очень разнообразны, имеют большое распространение и оказывают значительное влияние на инженерно-геологические условия территорий. Они характеризуют геодинамическую обстановку месторождений. В них, как в фокусе, сходятся различные особенности природной обстановки: рельефа местности, геологического строения, гидрогеологических условий, прочности, деформируемости, напряженного состояния горных пород и т. д. Различают глубинные, эндогенные, геологические процессы (тектонические, сейсмические) и поверхностные, или экзогенные (эрозия, абразия, карст, выветривание, оползни, сели, плывуны, супфузия, мерзлотные, заболачивание). Особое значение приобретают современные процессы и явления, которые оказывают непосредственное влияние на устойчивость сооружений. Изучением закономерностей возникновения и развития геологических процессов и явлений, позволяющих оценивать инженерно-геологические условия и прогнозировать устойчивость горных пород при взаимодействии с различными сооружениями, занимается инженерная геодинамика.

Естественное напряженное состояние горных пород представляет большой практический интерес для решения следующих основных задач: изучения распределения напряжений вокруг горных выработок для оценки их устойчивости; определения показателей прочности и деформируемости пород там, где необходимо соблюдать подобие силового поля. Современная наука рассматривает напряженное состояние земной коры (и в частности, верхней ее части, являющейся средой для горных выработок) как результат двух силовых полей: гравитационного и тектонического. И. А. Турчаниновым, Г. А. Марковым, Г. Д. Панасенко и другими исследователями установлено наличие тектонических силовых полей во многих местах и в непосредственной близости к земной поверхности, причем тектонические напряжения в некоторых случаях на целый порядок превышают напряжения от собственного веса вышележащих пород. Они определяют ряд особенностей проявления горного давления и оползневых деформаций. Замеры показывают, что преобладают горизонтальные напряжения, но в некоторых местах обнаружены и вертикальные. В связи с этим принято говорить о гори-

зонтальной и вертикальной аномалиях естественного напряженного состояния.

При изучении и оценке инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых нельзя не обратить внимание на некоторую относительность значения отдельных их элементов в зависимости от вида системы и технологии разработки. Н. В. Коломенский еще в 1964 г. обращал внимание на то, что одни и те же инженерно-геологические условия оцениваются по-разному, в зависимости от типа и конструкции сооружения. Совершенно естественно например, что рельеф месторождения имеет различное влияние на инженерно-геологические условия при его подземной или открытой разработке. Подобные выводы можно сделать о влиянии грунтового водоносного горизонта на условия разработки месторождения подземным или открытым способами, или о значении залегания горных пород при определении устойчивости бортов карьеров или кровли подземных выработок.

Сложность здесь заключается в том, что, с одной стороны, эти техногенные особенности подчинены в значительной степени природным условиям, а с другой — они влияют на оценку степени сложности инженерно-геологических условий и на характер их дальнейшего изменения. Покажем это на двух примерах.

Пример 1. В геологическом строении угольного месторождения принимают участие глинистые породы плиоцена, среди которых имеется тонкий слой монтмориллонитовых глин с органикой (рис. 2). При разработке месторождения открытым способом наличие этого слоя создает очень неблагоприятные условия для устойчивости откосов карьера. Поэтому при инженерно-геологическом изучении данного объекта большое внимание следует обратить на опробование монтмориллонитовых глин. При подземной разработке эти глины имеют другое значение. Залегая в непосредственной почве пласта они будут отрабатываться вместе с ним и повлияют на качество добываемого угля.

Пример 2. Через поле железорудного месторождения проходит река. На правом склоне реки наблюдаются древние оползни (рис. 3). При открытом способе разработки месторождения главным становится вопрос активизации этих оползней и их отражение на ход и экономику горных работ. Поэтому, в процессе инженерно-геологического изучения месторождения исследование оползневых склонов должно занимать основное место. Если будет принят подземный способ разработки, этот вопрос отодвинется, так как он уже не будет представлять того интереса, как в первом случае. Активизация оползней может произойти при подработке, но тогда основной становится проблема подработки реки.

На втором примере можно показать влияние способа вскрытия месторождения на оценку сложности гидрогеологических условий. При открытом способе отработки необходима постояннодействующая система дренирования грунтовых вод и отвод реки, что осложняет освоение месторождения. В случае же подземной отработки грунтовые воды окажут влияние в период проходки шахтного ствола, когда будет необходимо ввести параллельное водопонижение или замораживание.

Рис. 2. Геологический разрез угольного месторождения:

1 — супеси; 2 — песчаные глины, 3 — плотные глины; 4 — угольный пласт; 5 — монтмориллонитовые глины; 6 — аргиллитоподобные глины

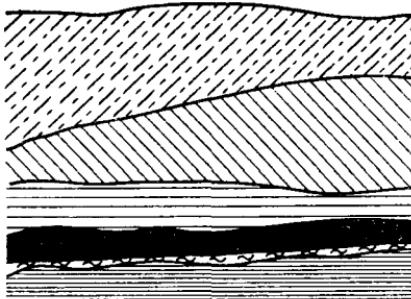
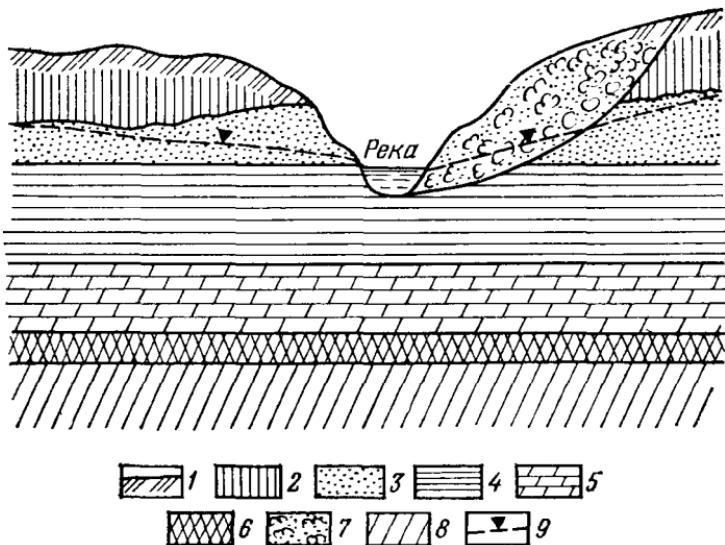
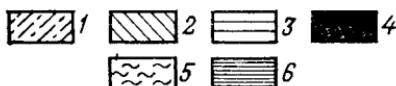


Рис. 3. Геологический разрез железорудного месторождения:

1 — почвенно-растительный слой; 2 — лёссовые породы; 3 — водоносный песок; 4 — плотные глины; 5 — глинисто-мергельная толща; 6 — рудная залежь; 7 — оползень; 8 — водоупор; 9 — уровень грунтовых вод



Подобных примеров в практике довольно много и все они показывают взаимную обусловленность решений задач освоения месторождений полезных ископаемых. Результаты инженерно-геологического изучения могут быть использованы для выбора способа и системы разработки, но и последние могут вызвать ряд целенаправленных исследований. Принцип обратной связи здесь находит свое явное выражение.

Разработка месторождений полезных ископаемых приводит к изменению инженерно-геологических условий территорий. Этому способствуют различные проявления горного давления, оползни, осушение шахтных и карьерных полей, оседание земной поверхности, заболачиваемость, сброс шахтных вод в по-

верхностные водоемы, размещение отходов производства на земной поверхности и др. Эти многофакторные изменения представляют собой предмет инженерно-геологического прогнозирования в период детальной разведки месторождения, но более надежно они изучаются, оцениваются и прогнозируются после отработки некоторой части, по результатам шахтных и наземных геологических исследований и наблюдений. Поэтому в состав геологических работ на действующих горных предприятиях должны входить специализированные инженерно-геологические исследования за изменениями природной среды под влиянием горных работ и разных горных сооружений (подземных и поверхностных).

1.3. НЕОДНОРОДНОСТЬ, АНИЗОТРОПНОСТЬ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИИ

Перед началом рассмотрения с инженерно-геологических позиций отдельных компонентов (элементов), входящих в общую систему условий разработки месторождения (ведение горных работ, взаимодействие геологической среды с горными выработками, изменения в этой среде под влиянием различных процессов горного производства) отметим некоторые важнейшие особенности нашего объекта изучения.

1. Геологические условия характеризуются изменчивостью в пространстве и во времени являющейся следствием геологических процессов в литосфере. Г. К. Бондарик [2] предложил различать стационарный и нестационарный режимы изменчивости.

2. Геологическое пространство, в пределах которого происходит взаимодействие с горными выработками и сооружениями, неоднородно и характеризуется мерой неоднородности по определенному показателю (состава, плотности, водопроницаемости). Причем неоднородность — геологическая особенность, которая предопределяется процессами формирования геологического пространства.

Однородным пространством, как утверждает Д. А. Родионов, следует называть такой геологический объект, разделение которого на мелкие участки не приведет к изменению комплекса признаков. Наверное, можно было бы это определение отнести и к одному конкретному признаку (прочности, водопроницаемости, водоустойчивости и т. п.), по которому производится оценка объекта. Следует иметь в виду, что оценка неоднородности по заданному показателю производится целенаправленно, т. е. исходя из назначения этой оценки.

Неоднородность горных пород может устанавливаться на разных объемах и по разным их свойствам (критериям). В частности, можно выделить однородный объем по составу, в пре-

делах которого наблюдается неоднородность по прочности. Или наоборот, неоднородные по составу породы могут оказаться практически однородными по прочности. Г. К. Бондарик выделяет несколько уровней проявления неоднородности: по генезису, по составу пород и подземных вод, по физико-механическим свойствам пород.

3. Геологическому пространству присуща анизотропия, выражающаяся в наиболее явном виде в существенном различии его свойств в латеральной и вертикальной плоскостях. Анизотропия — результат геологических процессов (изменчивости геологического пространства), но иногда она может быть усиlena техногенными процессами (трещинообразование, расслоение и уплотнение в результате изменения напряженного состояния вокруг горных выработок, увеличение пустотности за счет выщелачивания нисходящими потоками при дренировании подземных вод подземными выработками и др.). Для горной породы большое практическое значение имеет анизотропия таких основных свойств геологической среды, как: прочность, водо- и газопроницаемость горных пород, естественное напряженное состояние, химический состав подземных вод и др.

Отмеченные особенности геологического пространства создают значительные сложности при изучении, оценке и прогнозе условий разработки месторождений, строительстве и эксплуатации различных подземных и наземных сооружений. На большинстве объектов геологи и горняки встречаются с необнаруженной ранее неоднородностью и анизотропностью горных пород, приводящими к осложнению условий проходки выработок, иногда к аварийным ситуациям (водные прорывы, вывалы, увеличение водопритоков, рост давления на крепь и др.).

В связи с этим можно сделать вывод о важности наблюдений и исследований во время разработки месторождения, по результатам которого уточняются не только геологические условия и характер их взаимодействия с горными выработками и сооружениями, но и некоторые закономерности и методические приемы, позволяющие проводить более надежный и своевременный прогноз.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое инженерно-геологические условия месторождений (шахтных и карьерных полей)?
2. Что такое компоненты инженерно-геологических условий и как они влияют на разработку месторождений?
3. Что такое неоднородность геологических условий и каково ее значение при оценке и прогнозе условий ведения горных работ?

Глава 2

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГОРНЫХ ПОРОД

2.1. ГОРНЫЕ ПОРОДЫ — СРЕДА ДЛЯ ГОРНЫХ РАБОТ И СООРУЖЕНИЙ

Ранее горные породы рассматривались как естественные образования, вмещающие различные полезные ископаемые. Это и определяло традиционный геологический подход к их изучению и оценке. Инженерно-геологическое изучение горных пород и полезного ископаемого, базируясь на этом подходе, вносит новые элементы исходя из требований конкретных задач, решаемых проектировщиками, строителями, технологами.

В горном деле породы рассматриваются главным образом как среда, в которой производятся горные работы (проведение, крепление и поддержание выработок, а также выемка полезного ископаемого) и строятся различные сооружения (шахтные стволы, подземные капитальные, подготовительные, очистные и дренажные выработки, карьеры, траншеи, канавы). Вместе с тем породы представляют собой основание для многих наземных сооружений (копров, транспортных коммуникаций, горнодобывающего оборудования, внешних и внутренних отвалов, насосных станций, зданий), а также материал для таких сооружений, как дамбы разного назначения, шламо- и хвостохранилища, отвалы, закладки и др. (рис. 4). При этом следует отметить, что сооружения (выработки) имеют значительные размеры, а породы являются их конструктивным элементом. В настоящее время строят шахтные стволы глубиной более 1 км, а глубина, например, Коркинского угольного карьера превышает 400 м. Эти цифры дают представление об объемах и раз-

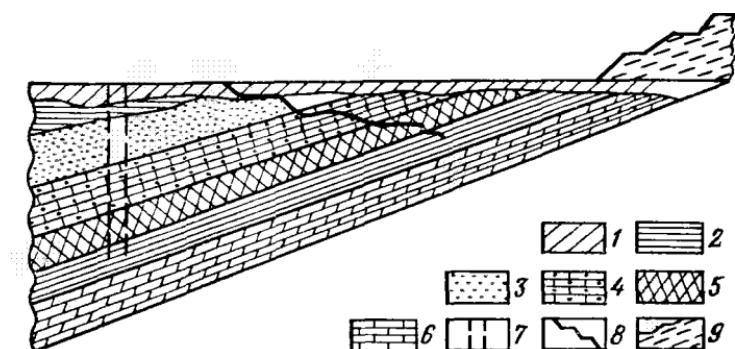


Рис. 4. Горные породы как основание, среда и материал сооружений:
1 — суглинок; 2 — глина; 3 — песок; 4 — песчаник; 5 — рудная залежь;
6 — известняк; 7 — шахтный ствол; 8 — борт карьера; 9 — отвал

нообразии горных пород, которые окажутся под воздействием подобных сооружений. Прибортовая зона среднего современного карьера, в пределах которой ведется прогноз устойчивости горных пород, составляет около 0,5 млрд м³, а в кровле очистного пространства угольной шахты в течение года деформируется до 10 млн м³ и более пород различного состава, строения и свойств. И еще одна специфическая особенность. При разработке месторождений формируются большие площадки искусственных обнажений горных пород, которые подвергаются воздействию атмосферных агентов, поверхностных и подземных вод и целого ряда техногенных факторов. Это откосы и бермы карьеров и отвалов, площадь обнажений которых составляет десятки квадратных километров, а также почва, кровля и стенки подземных выработок. Изменения горных пород, начинающиеся на искусственных обнажениях, проникают в глубь массива и часто становятся главной причиной возникновения и интенсификации различных явлений (оползней, пучения, расслоения и обрушения кровли, прорыва вод и плавунов и т. д.), осложняющих процесс ведения горных работ.

Исходя из характера взаимодействия сложной системы горные породы — горные работы, для решения практических задач необходимы количественные показатели, характеризующие следующие основные свойства пород: плотность, прочность, деформируемость, водоустойчивость, температуроустойчивость, водонепроницаемость. Однако перечисленные свойства зависят от особенностей состава, строения, влажности, трещиноватости, выветриваемости, пористости исследуемых пород, а также от уровня напряженного состояния.

Таким образом, специфика инженерно-геологического изучения и оценки горных пород заключается в том, что: а) изучение ведется на геологической основе и является продолжением геологического изучения месторождения; б) изучаются состав, строение и состояние пород, которые в комплексе позволяют оценить их прочность, деформируемость, проницаемость и устойчивость, а также их изменение под воздействием горных работ; в) свойства горных пород оцениваются количественными показателями с учетом специфики их взаимодействия с горными работами (сооружениями).

Поведение пород различного генезиса, состава и свойств вокруг горных выработок в конечном итоге определяется строением, физическим и напряженным их состоянием. Оценка физического состояния горных пород и прогноз возможных его изменений при освоении месторождений полезных ископаемых представляют собой важнейшие задачи инженерной геологии. Большое значение при этом имеет проблема установления закономерностей формирования и изменения отдельных признаков состояния.

Под физическим состоянием горных пород следует понимать состояние, оцениваемое совокупностью признаков, определяющих условия взаимодействия пород с различными сооружениями. Вполне естественно, что для конкретных типов пород определяющими являются разные признаки. Например, петрографический состав имеет большое значение при изучении свойств всех горных пород; трещиноватость и выветрелость — для характеристики свойств скальных и полускальных пород; влажность, пористость и консистенцию определяют для песчано-глинистых пород; теплофизические свойства — для мерзлых пород и т. д.

Из всего изложенного, а также из знакомства с горными породами, полученного ранее, в результате прохождения занятий и учебной практики по геологическим дисциплинам, можно сделать вывод о большом их разнообразии по генезису, составу, состоянию и свойствам. Это требует проведения некоторой систематизации, позволяющей более целенаправленно в новом аспекте вести изучение горных пород, т. е. необходима классификация, помогающая судить об инженерно-геологических особенностях пород. Разработано довольно много специальных (по устойчивости пород в откосах, несущей способности пород, коэффициенту крепости Протодьяконова и других) и общих (Ф. П. Саваренского, Н. Н. Маслова, Е. М. Сергеева и других) классификаций. Наиболее правильно построена и удобна для дальнейшего рассмотрения в наших целях — общая классификация Ф. П. Саваренского, предложенная им в 1937 г. и позднее дополненная В. Д. Ломтадзе. Она построена на учете генезиса, состава и структурных связей пород, определяющих их прочность, деформируемость, устойчивость и водопроницаемость.

По классификации Ф. П. Саваренского все горные породы подразделяются на пять групп (табл. 2).

В первую группу входят разновидности магматических, метаморфических и осадочных пород, имеющие высокую степень сохранности, большую прочность и устойчивость, малую деформируемость и водопроницаемость.

Вторая группа объединяет большое разнообразие пород, для которых характерны нарушение монолитности (выветрелость, трещиноватость), пониженная прочность и высокая (как правило) водопроницаемость. Эти породы обладают большой неоднородностью и анизотропностью, что создает затруднения при их изучении, а также при оценке их устойчивости в качестве основания и среды сооружений.

Третья группа включает все породы, для которых характерно отсутствие связей между отдельными минеральными частицами и обломками. К ним можно применить механическую модель сыпучей среды и охарактеризовать их прочность в соответствии с законом Кулона коэффициентом внутреннего трения.

Таблица 2. Инженерно-геологическая классификация горных пород (по Ф. И. Саваренскому), с изменениями и дополнениями В. Д. Ломтазе

Группа горы	Магматические		Метаморфические		Осадочные		Известняки и доломиты и отложения и глыбовые
	Губчатые, полутяжелые и пористые	измененные зернистые	Массивные	Сланцеватые	обломочные	глинистые и хематитовые	
I. Скальные	Граниты, гнейсы, гранодиаболиты, дигениты, габбро	Кварцевые и кварцево-полироды, селениты, гранат-диориты, дигениты, габбро	Мраморы, кварцевые и полироды, граниты	Гнейсы, гранито-кварцевые и граниты	Песчаники и конгломераты с гравийным цементом	—	Известняки и доломиты и отложения и глыбовые
II. Песчаные	Сланцы, глины, алевриты, песчаные и глинистые	Глины, доломиты, алевриты, флюиды, лимониты, гипс, соли, флюидоминералы	Глины, доломиты, гипс, соли, гипсоминералы	Песчаники, глинистые, сланцы, гипс, соли, гипсоминералы	Глинистые, сланцы, мергели, песчаные и глинистые	Известняки и доломиты и отложения и глыбовые	
III. Рыхлые	—	—	—	Песчаники, глинистые, сланцы, гипс, соли, гипсоминералы	—	Глины, супеси, суглинки, песчаные породы	Глинистые, сланцы, гипсоминералы и отложения и глыбовые
IV. Мягкие	Глины, супеси, суглинки	—	—	Песчаники, глинистые, сланцы, гипс, соли, гипсоминералы	—	Глины, супеси, суглинки, песчаные породы	Глинистые, сланцы, гипсоминералы и отложения и глыбовые
V. Глыбовые	Мергели, глыбы, редко измельченные процессы, деревоизвестняки и соли	—	—	Песчаники, глинистые, сланцы, гипсоминералы и отложения и глыбовые	—	—	Глинистые, сланцы, гипсоминералы и отложения и глыбовые

Четвертая группа охватывает различные по происхождению мягкие глинистые породы, для которых характерны малая прочность и большая сжимаемость. Породы этой группы представляют собой дисперсные системы и претерпевают большие изменения при взаимодействиях с различными сооружениями, в связи с чем они изучаются и оцениваются с особой тщательностью. В механическом отношении они представляют собой сложный объект, так как ни одна из существующих моделей не подходит к ним в полную меру. Прочность их определяется показателями сопротивления сдвигу — сцеплением и коэффициентом внутреннего трения в соответствии с законом Кулона, а их деформируемость — показателями сжатия в соответствии с законом уплотнения.

Породы, отнесенные к пятой группе очень разнообразны по своему генезису, составу и свойствам. Сюда относят многолетнемерзлые и засоленные породы, техногенные образования, которые приобретают все большее значение в строительстве и другие. Они требуют специфического подхода при изучении и оценке в качестве основания или среды сооружений.

В инженерной геологии изучение горных пород осуществляется с определенной последовательностью, которая позволяет оценивать их с разной степенью точности и надежности. В связи с этим различают следующие группы показателей: состава, строения, физических и водных свойств, прочности и деформируемости, а также некоторых специальных свойств. В этом порядке мы и проведем ознакомление с инженерно-геологической оценкой главнейших особенностей горных пород.

2.2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

2.2.1. Состав

Состав горных пород оценивается содержанием в них различных минералов (минеральный состав) и частиц разного размера (гранулометрический состав).

Минеральный состав во многом определяет свойства горных пород, их плотность, водоемкость, твердость, прочность, деформируемость, устойчивость. Свойства минералов зависят от химического состава, структуры кристаллической решетки и характера связи между атомами, молекулами и ионами. Устойчивость минералов определяется суммарной энергией и строением их кристаллической решетки. Например, наиболее устойчивый против выветривания из породообразующих минералов — кварц, за ним следуют мусковит, ортоклаз, кислые плагиоклазы, амфиболы, пироксены, а к наиболее неустойчивым относятся основные плагиоклазы, биотит, гипс. Если оценивать водоустой-

чивость горных пород, то здесь большое значение приобретают растворимые в воде минералы (кальцит, гипс, галит), а также глинистые минералы, которые адсорбируют большое количество влаги.

Оценивая влияние минерального состава на свойства горных пород, следует различать состав минералов, обломков пород и цементирующего вещества. Если для магматических и метаморфических пород можно ограничиться минеральным составом слагающих кристаллов, то для осадочных необходимо оценивать состав кристаллов, обломков пород, а также различных примесей и цемента между кристаллами и обломками. Представление о некоторых характеристиках породообразующих минералов, которые влияют на свойства горных пород, можно получить из табл. 3.

Высокая прочность и устойчивость породообразующих минералов создает значительную прочность и устойчивость магматических и метаморфических пород. Однако следует иметь в виду, что в этих породах существуют различные дефекты, которые приводят к уменьшению их прочности и увеличению деформируемости и водопроницаемости. Дефекты имеют неодинаковые природу и ранг, поэтому их влияние существенно различно. Можно выделить дефекты в кристаллической решетке (ваканции, замещение и дислокацию атомов, разрушение, перекристаллизацию и т. д.), микротрешины (часто скрытые), трещины соизмеримые с кристаллами, трещины в породе. Все они в разной степени уменьшают прочность пород, а иногда настолько, что

Таблица 3. Некоторые характеристики свойств основных породообразующих минералов (по Б. П. Беликову)

Минералы	Модуль упругости, 10^{-4} МПа	Модуль сдвига, 10^{-4} МПа	Модуль объемного сжатия, 10^{-4} МПа	Коэффициент Пуассона	Скорость распространения упругих волн, км/с	
					продольных	поперечных
Кварц	9,6	4,4	3,7	0,09	6,1	4,1
Ортоклаз	6,3	2,4	5,2	0,29	5,7	3,1
Микроклин	7,5	2,9	5,6	0,28	6,1	3,4
Плагиоклаз	7,8	3,2	6,6	0,28	6,3	3,5
Слюды	7,1	2,8	5,2	0,28	5,6	3,1
Нефелин	7,4	2,9	4,9	0,24	5,8	3,4
Амфиболы	12,5	5,0	9,9	0,25	6,9	4,0
Пироксены	14,4	5,8	9,5	0,24	7,3	4,3
Оlivин	21,7	8,7	13,1	0,24	8,8	5,0
Гранат	24,3	9,6	14,5	0,27	8,7	4,3
Кальцит	8,5	3,3	7,2	0,28	6,3	3,5

Таблица 4. Данные о коэффициенте трения пластинок из различных минералов по Х. М. Хорну

Минералы	Пластины	
	сухие	смоченные
Кварц	0,11—0,16	0,42—0,51
Микроклин	0,13	0,76
Мусковит	0,30—0,36	0,22—0,26
Биотит	0,26	0,13
Хлорит	0,35	0,22
Тальк	0,24	0,14
Кальцит	0,14—0,21	0,60—0,68

приходится принимать в расчетах только коэффициент внутреннего трения, но он также зависит от минерального состава трущихся поверхностей. В этом можно убедиться из данных, приведенных в табл. 4.

Перечисленные породообразующие минералы оказывают влияние и на свойства осадочных пород, однако здесь большое значение приобретают состав цемента и различных включений. Об этом можно судить, представив себе песчаник (состоящий главным образом из кварца) на карбонатном и глинистом цементе. Прочность и устойчивость его будет существенно зависеть от характера и состава цемента.

Глинистые минералы составляют тонкодисперсную и коллоидную часть многих осадочных пород. Их высокая дисперсность (размеры кристаллов менее 0,002—0,001 мм) обусловливает большую удельную поверхность, а следовательно и высокий потенциал поверхностной энергии, с которым связан ряд поверхностных явлений. В связи с этим небольшое содержание глинистых минералов в породах определяет их свойства (влажность, плотность, прочность, деформируемость, устойчивость, водопроницаемость).

Глинистые минералы — соединения водных силикатов слоистого или слоисто-ленточного строения, образовавшиеся главным образом в результате химического выветривания горных пород. В зависимости от состава и кристаллического строения глинистые минералы проявляют различные специфические свойства (особенно при взаимодействии с водой), которые определяют поведение пород в горных выработках. На этой основе все глинистые минералы подразделяются на три группы: каолинита, монтмориллонита и гидрослюды. Основные представители этих групп, некоторые их особенности показаны в табл. 5.

Характерные черты строения кристаллических решеток различных групп минералов (рис. 5) предопределяют свойства по-

Таблица 5. Основные глинистые минералы

Группа минералов	Типичные минералы	Химический состав (по А. Г. Бетехтину)	Молекулярное отношение
Каолинита	Каолинит Диккит	$Al_4[Si_4O_{10}] [OH]_8$	2 2
	Галлуазит	$Al_4 [Si_4O_{10}] [OH]_8 \cdot 4H_2O$	2
Монтмориллонита	Монтмориллонит Нонtronит	$m \{Mg_3 [Si_4O_{10}] [OH]_2\} \times$ $\times P \{[Al, Fe_2 [Si_4O_{10}] \times$ $+ [OH]_2\} \cdot nH_2O$	4 3
	Бейделлит	$Al_2 [Si_4O_{10}] [OH]_2 \cdot nH_2O$	4
Гидрослюды	Гидромусковит Иллит Серицит	$K_{<1} Al_2 [(Si, Al)_4 O_{10}] [OH]_2 \times$ $\times nH_2O$	2 2 2
	Гидробиотит	$K_{<1} (Mg, Fe)_3 [(Si, Al)_4 O_{10}] \times$ $\times [OH]_2 \cdot nH_2O$	2

следних. Особенно отчетливо проявляется индивидуальность глинистых минералов при взаимодействии с водой, которая, как известно, оказывает решающее влияние на свойства глинистых пород. Наиболее гидрофильны минералы группы монтмориллонита.

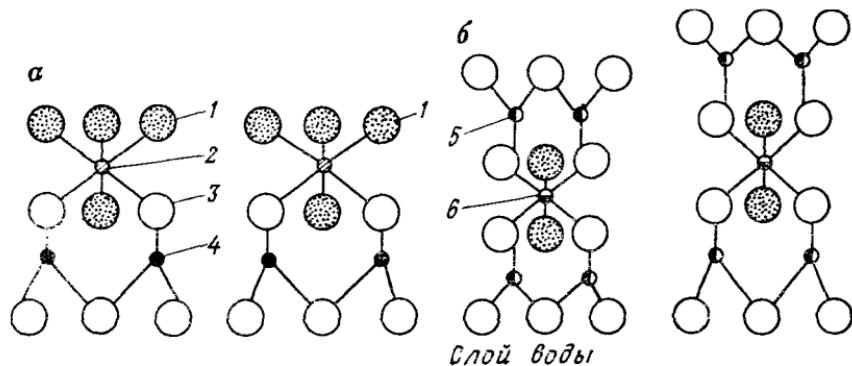


Рис. 5. Схемы расположения слоев в кристаллических решетках каолинита (а) и монтмориллонита (б) (по Г. В. Гринди).

Элементы: 1 — OH; 2 — Al; 3 — O; 4 — Si; 5 — Al, Si; 6 — Al, Mg

нита из-за особенностей кристаллической решетки, отдельные пакеты которой имеют симметричное строение. Это приводит к образованию высокой влажности и пористости пород, содержащих минералы этой группы, а отсюда к высокой активности глинистых суспензий, высокой пластичности, сжимаемости, набухаемости, емкости обмена и т. д.

Минералы группы каолинита менее гидрофильны, так как их кристаллическая решетка прочна, каждый пакет состоит из пяти элементарных слоев, при этом первый представлен атомами кислорода, а последний — гидроксильной группой, что обеспечивает устойчивую связь соседних пакетов. В связи с этим глинистые каолинитовые породы характеризуются меньшей влажностью, пластичностью и набухаемостью. Они более плотные, менее сжимаемые.

Гидрослюдистые минералы занимают промежуточное положение, поэтому глинистые породы гидрослюдистого состава по своим свойствам находятся между двумя группами пород, описанными выше.

Водорастворимые минералы имеют большое распространение главным образом в осадочных породах и определяют их устойчивость при взаимодействии с водой. При растворении и выщелачивании изменяется их плотность, связность, прочность, деформируемость и водопроницаемость. Вода, фильтруясь через такие породы, изменяет свой состав. Глинистые породы, содержащие более 3 % водорастворимых соединений, называются засоленными.

По степени растворимости различают три группы минералов: легкорастворимые, среднерастворимые и труднорастворимые. Они встречаются в горных породах в виде отдельных зерен, стяжений, цемента. Некоторые породы целиком сложены водорастворимыми минералами (известняк, гипс, каменная соль и др.). В табл. 6 приведены основные водорастворимые минералы.

Часто в осадочных породах (в особенности в песчаных и глинистых) встречаются органические соединения, образующиеся в результате жизнедеятельности животных и растений. В большинстве случаев органическое вещество содержится в породах в рассеянном виде (гумусированные и торфяные породы) и придает им высокую влагоемкость, пластичность, сжимаемость, набухаемость, пониженные прочность и водопроницаемость. В связи с этим изучение состава органических примесей всегда производится с необходимой тщательностью.

Изучение минерального состава горных пород производится петрографическими методами, а химического — химическими. Особый интерес в настоящее время представляет изучение глинистых минералов, которые, как уже отмечалось выше, определяют поведение глинистых пород при их взаимодействии

Таблица 6. Основные водорастворимые минералы

Группа водорастворимых минералов	Основные минералы	Химический состав	Растворимость в воде при 10 °C, г/л
Легкорастворимые	Галит Сильвин Мирабилит Сода	NaCl KCl $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ Na_2CO_3	357 312
Среднерастворимые	Гипс Ангидрит	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ $CaSO_4$	2,5
Труднорастворимые	Кальцит Магнезит Доломит	$CaCO_3$ $MgCO_3$ $CaCO_3 \cdot MgCO_3$	0,0005

с инженерными сооружениями. Сложность изучения состава глинистых минералов вызвана малыми размерами глинистых частиц, полиминеральным составом глинистых пород и их полидисперсностью. Поэтому перед началом минералогических анализов производят отмучивание и выделение в тяжелых жидкостях нескольких групп частиц размерами 0,002—0,001; 0,001—0,0005; 0,0005—0,0001 и менее 0,0001 мм, которые подвергаются дальнейшему изучению. Обычно применяют иммерсионный, рентгеноструктурный, электронномикроскопический, термический, хроматографический и другие методы.

Гранулометрическим составом характеризуют степень дисперсности песчано-глинистых пород, а также техногенных продуктов разрушения пород и полезного ископаемого (отходы обогащения и т. д.). Группа частиц одного размера, или определенного диапазона размеров называется фракцией. Принято различать шесть основных групп фракций: глинистую, пылеватую, песчаную, гравийную, галечниковую и валунную (табл. 7). На основе специальных исследований известные советские ученые В. В. Охотин и М. М. Филатов установили, что этот состав определяет петрографические особенности и свойства пород. Например, гранулометрический состав обломочных и песчаных пород определяет их плотность, водопроницаемость и трение. Большое влияние здесь оказывают форма отдельных зерен и степень однородности состава. В глинистых породах размер частиц или, как принято говорить, их дисперсность, еще сильнее сказывается на физико-механических свойствах этих пород. Особо следует подчеркнуть роль глинистой фракции (пластинчатых частиц размером менее 0,002 мм). В них преобладают глинистые минералы, которые увеличивают гидрофильность породы в целом, ее пластичность, пористость, сжимаемость, набухаемость, уменьшают водопроницаемость и проч-

Таблица 7. Классификация фракций

Наименование основных фракций	Наименование частиц фракций по крупности	Размер фракций, мм
Валуны (окатанные) и глыбы (неокатанные)	Крупные Средние Мелкие	>800 800—400 400—200
Галька (окатанная) и щебень (неокатанный)	Очень крупный (булыжник) Крупные Средние Мелкие	200—100 100—60 50—40 40—20
Гравий (окатанный), дресва (неокатанная)	Крупные Средние Мелкие	20—10 10—4 4—2
Песок	Грубые Крупные Средние Мелкие Тонкие	2—1 1—0,5 0,5—0,25 0,25—0,1 0,1—0,05
Пыль	Крупные Мелкие	0,05—0,01 0,01—0,002
Глина	Грубые Тонкие	0,002—0,001 <0,001

ность. Таким образом, определяя содержание в породах глинистых частиц, тем самым можно получить представление о содержании в них глинистых минералов, а также о свойствах самих пород.

Изучение гранулометрического состава пород (определение размеров слагающих их частиц и их количества) производится специальными методами, из которых в инженерной геологии наибольшее распространение получили: ситовой, отмучивание в воде (пипеточный метод), ареометрический (по плотности суспензии), визуальный.

Глинистые и пылеватые частицы определяются отмучиванием по скорости их падения в воде v , см/с, которая рассчитывается по формуле Стокса:

$$v = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho_m - \rho_w}{\nu} ,$$

где g — ускорение свободного падения, см/с²; r — радиус частиц, см; ρ_m — плотность частиц, г/см³; ρ_w — плотность воды, г/см³; ν — вязкость воды, 10⁻¹ Па/с.

Результаты гранулометрических анализов обычно изображают графически и заносят в таблицы. По ним определяют некоторые показатели состава и производят классификацию изучаемых пород. Наиболее распространенной является так назы-

Рис. 6. Интегральные кривые гранулометрического состава более однородной (1) и менее однородной (2) пород

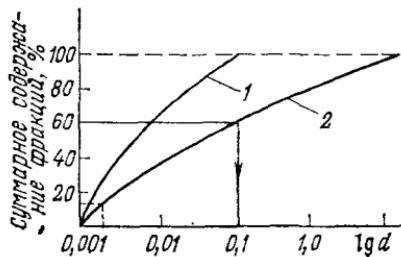
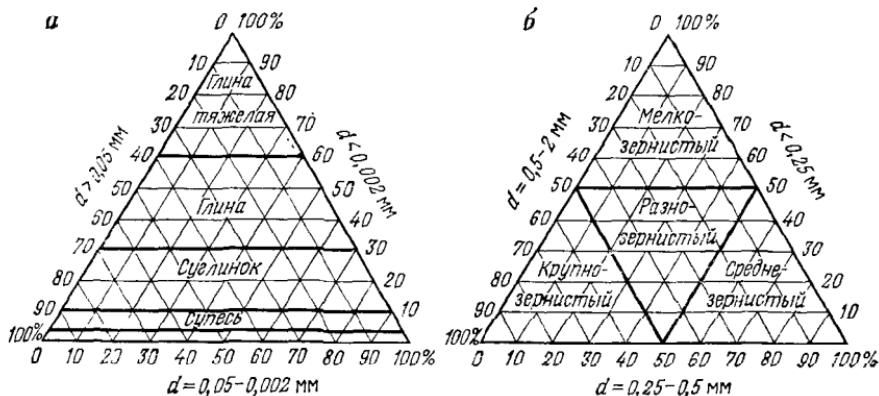


Рис. 7. Треугольные диаграммы гранулометрического состава глинистых (а) и песчаных (б) пород



ваемая интегральная полулогарифмическая кривая, построенная в координатах: процентное содержание частиц (меньше данного размера) — десятичный логарифм диаметра частиц (рис. 6). По этой кривой можно определить действующий или эффективный диаметр d_{10} , используемый в расчетах приближенной величины коэффициента фильтрации песков, а также контролирующий диаметр d_{60} . Отношение $\frac{d_{60}}{d_{10}}$ называют коэффициентом неоднородности и используют для характеристики степени неоднородности пород и для прогноза суффозионных явлений в песках и водопроницаемости. Если величина этого коэффициента составляет для песков больше 3, а для глин больше 5, породы считаются неоднородными.

Для наглядного суждения о составе пород данного слоя или разреза, изменчивости в пределах изучаемой территории, а также для классификации очень удобны треугольные диаграммы, на которые наносят результаты гранулометрических анализов отдельно для песчаных и глинистых пород. Выделяют 3 характерные фракции, содержание которых в сумме должно составлять 100 %. Для песков: 1) $d > 0,5$; 2) $d = 0,5-0,25$; 3) $d < 0,25$ мм. Для глин: 1) $d > 0,05$; 2) $d = 0,05-0,002$; 3) $d < 0,002$ мм. Результат анализа изображают в виде точки, у которой координаты составляют проценты содержания трех

характерных фракций. Пример построения треугольных диаграмм показан на рис. 7.

По гранулометрическому составу можно произвести классификацию песчаных и глинистых пород, которая дает возможность не только назвать их, но и оценить качественно некоторые свойства. Для глинистых пород наиболее удачна с инженерно-геологической точки зрения трехчленная классификация, разработанная для четвертичных отложений В. В. Охотиным (1940 г.). В основу этой классификации положено содержание глинистой фракции ($d < 0,002$ мм) и отношение между песчаной и пылеватой фракциями (табл. 8). Эту классификацию можно применять и при изучении дочетвертичных глинистых пород.

Для классификации крупнообломочных и песчаных пород существуют несколько предложений, некоторые из них получили признание в строительных нормах и правилах (СНиП), утвержденных Госстроем СССР. Наиболее приемлемой с точки зрения оценки свойств песков следует признать классификацию, по которой название породы дается по преобладающей фрак-

Таблица 8. Классификация глинистых пород по гранулометрическому составу

Название пород четвертичного возраста	Название дочетвертичных (коренных) пород	Содержание частиц $d < 0,002$ мм, %	Соотношение между песчаной (песч.) и пылеватой (пыл.) фракциями
Глина тяжелая	Глина тяжелая	>60	песч. > пыл.
Глина тяжелая пылеватая	Глина тяжелая пылеватая (алевритовая)	>60	пыл. > песч.
Глина	Глина	30—60	песч. > пыл.
Глина пылеватая	Глина пылеватая (алевритовая)	30—60	пыл. > песч.
Суглинок тяжелый	Глина песчанистая	20—30	песч. > пыл.
Суглинок тяжелый пылеватый	Глина песчанистая пылеватая (алевритовая)	20—30	пыл. > песч.
Суглинок средний	Глина песчаная	15—20	песч. > пыл.
Суглинок средний пылеватый	Глина песчаная пылеватая (алевритовая)	15—20	пыл. > песч.
Суглинок легкий	Глина сильно песчаная	10—15	песч. > пыл.
Суглинок легкий пылеватый	Глина сильно песчаная пылеватая (алевритовая)	10—15	пыл. > песч.
Супесь тяжелая	Песок глинистый	6—10	песч. > пыл.
Супесь тяжелая пылеватая	Песок глинистый пылеватый	6—10	пыл. > песч.
Супесь легкая	Песок слабоглинистый	3—6	песч. > пыл.
Супесь легкая пылеватая	Песок слабоглинистый пылеватый	3—6	пыл. > песч.
Песок	Песок	<3	песч. > пыл.
Песок пылеватый	Песок пылеватый	<3	пыл. > песч.

ции, содержащейся в ней более 50 %. Так тонкозернистым называют песок, у которого содержание фракции 0,05—0,1 мм составляет более 50 % от массы сухой породы, мелкозернистым — 0,1—0,25 мм и т. д. (см. табл. 7). При этом можно отметить, что с ростом размеров зерен (обломков) преобладающей фракции увеличивается водопроводимость и коэффициент трения пород. Песок, у которого содержание ни одной из фракций не достигает 50 %, называют разнозернистым.

2.2.2. Структура и текстура

При инженерно-геологической оценке горных пород определенное значение приобретают их структура и текстура. Для пород разного генезиса эти особенности играют неодинаковую роль в формировании и изменении их свойств.

Структура породы, как известно, определяется формой, размерами и относительным количественным содержанием отдельных ее компонентов. Можно выделить три уровня структурных особенностей пород макро-, мезо- и микроструктуры, которые имеют различное значение при оценке свойств пород. Признаки, которые можно выявить невооруженным глазом относят к макроструктуре, а под микроскопом — к мезоструктуре и микроструктуре.

Интузивные породы, как известно, характеризуются полнокристаллическими или порфировидными мелко-, средне- и крупнозернистыми структурами, а эфузивные — скрытокристаллическими или порфировыми с неполнокристаллической или тонкозернистой основной частью. Такие структуры формируют высокую прочность, упругость и устойчивость пород. Для преобладающего большинства метаморфических пород характерна кристаллобластическая структура, которая создает тоже высокую прочность и упругость. Все эти породы относятся к группе твердых (скальных), в случае их изменения процессами выветривания они теряют свою монолитность и поэтому переходят в группу полускальных пород.

Из общегеологического курса уже известно, что осадочные породы очень разнообразны по своему генезису и петрографическому составу. Это предполагает большое разнообразие структур этих пород. Так, для карбонатных пород (известняков и доломитов) наиболее часто встречаются кристаллическизернистая, крупно-, средне- и мелкозернистая, скрытокристаллическая и органогенная (из обломков ракушек) структуры. Наиболее прочны и устойчивы кристаллические известняки и доломиты. Среди большой группы обломочных сцементированных пород можно выделить псевфитовую (конгломераты и брекчии), псаммитовую (песчаники разной зернистости) и алевритовую (алевролиты) структуры. Прочность этих обломочных пород во мн-

гом зависит от цементирующего вещества, о котором речь пойдет в разд. 2.2.3. Здесь можно отметить, что наиболее прочны и устойчивы при прочих равных условиях мелко- и среднезернистые песчаники с прочным цементом, которые поэтому относятся к группе твердых (скальных) пород. Эти же породы на глинистом цементе, а также алевролиты обладают пониженной устойчивостью и прочностью и поэтому отнесены ко II группе пород — полускальных.

Глинистые породы характеризуются главным образом пелитовой или алевролитовой структурами. По своему состоянию (плотности, влажности) они изменяются в процессе диагенеза и катагенеза от совсем слабых (группа связных пород) до очень плотных (аргиллитов) и даже переуплотненных (глинистые сланцы), которые относятся к группе полускальных пород.

Таким образом, структура — важная отличительная особенность горной породы, влияющая на прочность, деформируемость и устойчивость, изучением которой нельзя пренебрегать.

Текстура пород рассматривается как признак условий их формирования и показатель анизотропности свойств. Она отражает особенности строения пород, т. е. взаимное пространственное расположение основных компонентов. Для магматических пород обычно различают массивную, флюидальную, сланцеватую и пузырчатую текстуры. Породы массивной текстуры характеризуются беспорядочным расположением кристаллов, которое обеспечивает высокую прочность и устойчивость, однородность и изотропность физико-механических свойств. Флюидальная текстура указывает на параллельное расположение кристаллов (по направлению потока), что приводит к ярко выраженной анизотропии породы.

Сланцеватая, или ленточная текстура еще более подчеркивает анизотропность пород и создает неустойчивость при выветривании.

Пузырчатая текстура характерна для эфузивных пород и указывает на наличие овальных пустот разного размера (результат газовых пузырей при быстром застывании магмы). Породы с такой текстурой обладают пониженной прочностью и устойчивостью при выветривании, а также повышенной водопроницаемостью.

В метаморфических породах различают сланцеватую, гнейсовидную, очковую и плитчатую текстуры. Все они приводят в той или иной мере к анизотропии свойств пород.

Для сланцевых пород характерно наличие плоскостей сланцеватости, которые представляют собой зоны ослабления (пониженной прочности). При выветривании эти породы распадаются на тонкие плитки. Гнейсы, как известно, — весьма прочные по-

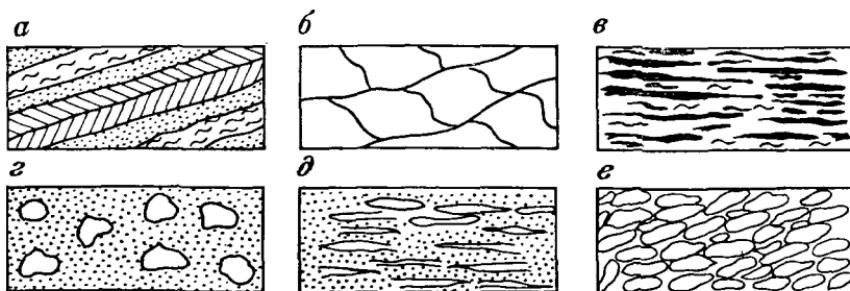


Рис. 8. Характерные текстуры осадочных пород:

а — слоистая; *б* — сетчатая; *в* — сланцеватая; *г* — псевдопорфировая; *д* — флюидальная; *е* — бутовая

роды и их неоднородность и анизотропность обусловлены главным образом трещиноватостью, на формирование которой некоторое влияние оказывает и текстура пород.

В осадочных породах выделяют характерные текстуры для сцементированных разностей (скольких и полускальных) для обломочных рыхлых и для глинистых пород (рис. 8). Наиболее распространенные текстуры угля — массивная и слоистая, но встречается также зернистая и листоватая. Выделяют много текстур руд: гнейсовидная, слоистая, полосчатая, сланцеватая, бобовая и др. Значение этих текстур при инженерно-геологической оценке различно. Кроме того, уровень рассмотрения текстур также имеет большое значение. Чаще всего в горной практике решающей является макротекстура (слоистость, сланцеватость, плитчатость) и только иногда для решения частных задач, необходимо изучение микротекстуры под микроскопом.

Текстурные особенности пород определяют характер расчетных схем при оценке устойчивости горных выработок, объем и методику инженерно-геологического опробования на различных стадиях разведки месторождений, а также тип крепления, осушения и других инженерных мероприятий, направленных на улучшение условий ведения горных работ.

При изучении текстурных особенностей осадочных пород необходимо определять следующие характеристики:

- 1) тип текстуры для различных пород разреза;
- 2) показатель расслоения пород, представляющий собой число слоев, на которые распадается керн длиной в 1 м;
- 3) коэффициент ориентировки глинистых частиц, представляющий собой количество частиц, ориентированных в данном направлении к количеству всех частиц в данной плоскости наблюдения;
- 4) анизотропию основных свойств пород (прочности, водопроницаемости, деформируемости).

2.2.3. Структурные связи

Структурные связи осуществляют взаимодействие (связность) между отдельными структурными элементами (минералами, обломками, органическим веществом) и формируют прочность породы в монолитном объеме. По своей природе эти связи разные в различных породах и даже в одной и той же породе. Этому вопросу посвящены специальные исследования Н. Я. Денисова, П. А. Ребиндера, В. Д. Ломтадзе, Е. М. Сергеева, В. И. Осипова и других ученых. В магматических, метаморфических и химических осадочных породах структурные связи возникают в процессе образования пород за счет кристаллизации и перекристаллизации минерального вещества. Такие связи осуществляются взаимодействием между ионами или атомами кристаллов и являются конденсационно-кристаллизационными. В осадочных породах структурные связи формируются за счет цементации, в результате выпадения из растворов соединений, заполняющих поры или обволакивающих отдельные минеральные частицы и обломки. Эти связи по своей природе могут быть межионными, межатомными или межмолекулярными.

Прочность конденсационно-кристаллизационных структурных связей очень высока, что вызвано большой энергией взаимодействия между кристаллами. В обломочных породах с цементационными связями энергия взаимодействия меньше, поэтому прочность таких пород в целом занижена. Кроме того, для этих пород большое значение в формировании прочности приобретают типы цементации: базальный, контактный, поровый (рис. 9). Для первого и третьего типа обычно характерна более высокая прочность и непроницаемость, а для контактной цементации — низкие прочность и проницаемость.

В общем кристаллизационные и цементационные связи обеспечивают высокую прочность и устойчивость и низкую деформируемость с преобладанием упругих деформаций. Менее устойчивы породы с цементационными связями, которые образованы за счет водорастворимых соединений. Однако все эти связи имеют один существенный недостаток: при разрушении они не восстанавливаются. Поэтому при образовании трещин в скальных и полускальных породах за счет тектонических движений, выветривания и техногенных воздействий их прочность, устойчивость, деформируемость и водопроницаемость изменяются и оцениваются с учетом образовавшихся дефектов (нарушений сплошности).

Гораздо сложнее природа и характер структурных связей в глинистых породах. Связность этих пород, как показывают новейшие исследования В. И. Осипова, формируется за счет совместного действия ионно-электростатических, капиллярных и молекулярных сил. При этом выделены несколько типов кон-



Рис. 9. Типы цементации осадочных пород (по М. С. Швецову):

а — базальный; б — контактный;
в — поровый.
1 — обломок; 2 — цемент

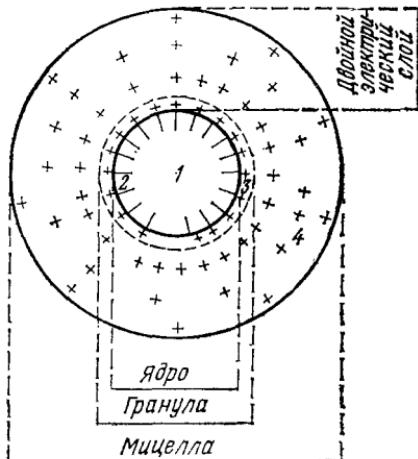


Рис. 10. Схема строения мицеллы, образованной тонкодисперсной частицей:

1 — глинистая частица; 2 — отрицательные заряды; 3 — неподвижный слой противоионов;
4 — диффузный слой отщесоцированных ионов

тактов между глинистыми частицами: коагуляционный, точечный, фазовый. Прочность структурных связей определяется минеральным и гранулометрическим составами, влажностью и плотностью, составом цемента и его распределением в породе.

Одна из главных особенностей глинистых пород — способность глинистых частиц формировать силовое поле в водной среде, которая определяет характер взаимодействия между ними и поведение породы в целом при различных воздействиях и особенно при разгрузке и дополнительном увлажнении. На поверхности глинистой частицы в водной среде появляются свободные активные центры за счет некомпенсированных валентностей Si , Al , O_2 , OH^- и др., или за счет ковалентных сил атомов и молекул (ван-дер-ваальсовые силы). Они создают вокруг глинистой частицы силовое поле, диффузный слой (рис. 10). Характерные структурные связи, формирующиеся в процессе изменения (литификации) глинистых пород (от ила до аргиллита), приведены в табл. 9.

Для структурных связей в глинистых породах характерна обратимость и восстановимость. Они определяют пластический характер деформирования, ползучесть и медленное разрушение сооружений. Для слабых пород, в которых преобладают тиксотропно-коагуляционные связи, характерны тиксотропные изме-

Таблица 9. Природа и характер структурных связей в глинистых породах (по В. Д. Ломтадзе)

Степень лягтификации	Тип породы	Физическое состояние	Степень влажности	Физическая природа структурных связей	Вид структурных связей, образующихся в определенных геологических условиях
Предельно малая	Глинистый ил	Текущее, скрытотекущее	Весьма высокая	Молекулярные, отчасти магнитные	Тиксотропно-коагуляционные
Малая	Глина мягкая	Скрытотекучепластичное	Высокая	Молекулярные, магнитные	То же
Средняя	Глина уплотненная	Явно или скрытопластичное	Умеренная	Молекулярные, магнитные, ионные	Тиксотропно-коагуляционные и цементационные, конденсационно-кристаллизационные
Высокая	Аргиллит	Полутвердое	Малая	Ионные, магнитные, частично атомные (ковалентные) и молекулярные	Кристаллизационно-конденсационные (цементационные) при подчиненном значении коагуляционных
Предельно высокая	Аргиллит сланцеватый	Твердое	Очень малая	Ионные, атомные (ковалентные)	Кристаллизационно-конденсационные (цементационные)

нения (разрушение структурных связей при динамическом воздействии, а затем восстановление их с упрочнением породы при прекращении воздействия), которые имеют большое практическое значение при оценке их устойчивости или при необходимости улучшения их свойств. Подобные явления наблюдаются и в водонасыщенных тонко- и мелкозернистых пылеватых песках, которые при динамическом воздействии переходят в плыун (текущее состояние).

О соотношении между различными типами структурных связей в глинистых породах можно судить по их чувствительности. Показатель чувствительности — отношение прочностей одноосному сжатию породы естественного состояния и нарушенного сложения при той же влажности и плотности:

$$I_q = R_c^e / R_c^n.$$

По этому показателю К. Терцаги в 1948 г. разделил глинистые породы на следующие группы: 1) нечувствительные

глины — $I_q = 2—4$; 2) среднечувствительные — $I_q = 4—8$; 3) очень чувствительные с преобладанием цементационных связей $I_q > 8$ (доходит до нескольких десятков).

Показатель чувствительности может быть использован для определения потенциальной возможности пород к тиксотропии, и восстановлению прочности в процессе деформирования, к определению скорости оползней и т. д.

О характере структурных связей можно судить и по деформационной кривой при сдвиге, проведенном в лабораторных или полевых условиях [9, 10].

2.2.4. Сложение и условия залегания

При инженерно-геологической оценке горных пород для целей горного производства важное значение приобретает вопрос о их сложении. Принято рассматривать естественное (природное) и нарушенное сложения. Проходка горных выработок происходит, как правило, в породах естественного сложения. В отвалы попадают породы нарушенного сложения, для которых характерны новые свойства (плотность, влажность, прочность, деформируемость, водопроницаемость).

Однако нарушение естественного сложения следует увязывать не только с разработкой и перемещением горной массы, но и с теми изменениями, которые происходят под влиянием горного давления, разгрузки, буро-взрывных работ, увлажнения, осушения (очень часто горные работы ведутся в подработанном или надработанном пространстве, выработки проходятся в присечку). Это сложение характеризуется новым состоянием пород, которое имеет динамический характер (не постоянно во времени) и в разные периоды горного процесса может иметь разную направленность (увлажнение — высыхание, разуплотнение — уплотнение, разупрочнение — упрочнение), а следовательно, условия ведения горных работ и устойчивости горных выработок также будут меняться. Прочность большинства пород нарушенного сложения существенно ниже прочности, характеризующей их природное сложение.

Для глинистых пород в качестве показателя оценки разупрочнения можно использовать их чувствительность (см. разд. 2.2.3), а для скальных и полускальных — коэффициент ослабления, представляющий собой отношение прочности при одноосном сжатии в нарушенном и природном сложении. Совершенно очевидно, что сложение пород не полностью определяет их состояние, а следовательно, и прочность.

Скальные и полускальные породы в отвалах (т. е. в нарушенном сложении) характеризуются практически коэффициентом трения, поэтому их прочность на одноосное сжатие здесь близка к нулю. Вспомним из сопротивления материалов, что

между характеристиками прочности твердых тел: сцеплением c , углом внутреннего трения ϕ и прочностью на одноосное сжатие R_c существует определенная связь в виде $R_c = 2c \operatorname{tg}(45^\circ + \phi/2)$. Однако степень нарушенности природного сложения может быть разной для одной и той же породы как в пространстве, так и во времени, и, кроме того, на оценку прочности оказывает влияние и масштабный эффект (размеры выработок). В связи с этим ошибочно представление о возможности оценки состояния и свойств горных пород, характеризующих однозначно их естественное или нарушенное сложение.

В качестве примера можно привести изменение прочности твердых глин юрского возраста, залегающих на глубине 250 м в почве горизонтальных подготовительных выработок, связанное с нарушением их естественного сложения при выдавливании и дополнительном увлажнении. В естественных условиях эти глины, по данным разведки, характеризуются влажностью от 15 до 18 % и прочностью на одноосное сжатие от 5 до 8 МПа (в среднем). После их вскрытия в зависимости от времени службы выработок и интенсивности пучения на разных участках влажность достигает от 20 до 30 % и более, а прочность до 1 МПа [9]. Понятно, что поведение этих глин в почве зависит от степени изменения их естественного сложения.

Условия залегания полезного ископаемого и вмещающих его пород определяются их формой, выдержанностью по мощности и простиранию, наличием тектонических нарушений, и оказывают существенное влияние на различные стороны горного производства: на систему и технологию горных работ, характер и интенсивность проявления горного давления, устойчивость, поддержание и осушение выработок, безопасность труда, качество полезного ископаемого и т. д. Так, например, при открытом способе разработки месторождений Н. В. Мельников выделяет шесть систем в зависимости от условий залегания полезного ископаемого и геологического строения. Если рассматривать вопрос об устойчивости бортов и отвалов, то в первую очередь следует отметить решающее влияние условий залегания пород на выбор расчетной схемы (морфология полезенных тел во многом определяется условиями залегания полезного ископаемого и вмещающих пород). Работами Г. Л. Фисенко, В. Г. Зотеева, Н. Н. Кубаева, М. Е. Певзнера, Э. Л. Галустяна, И. П. Иванова и других показано влияние на устойчивость откосов, уступов, отвалов и бортов карьеров геологического строения месторождений твердых полезных ископаемых. На основе исследований этих авторов предложено несколько классификаций месторождений, подлежащих разработке открытым способом [20, 28].

При подземной разработке также учитываются условия залегания горных пород. Так, при разработке рудных тел (мощ-

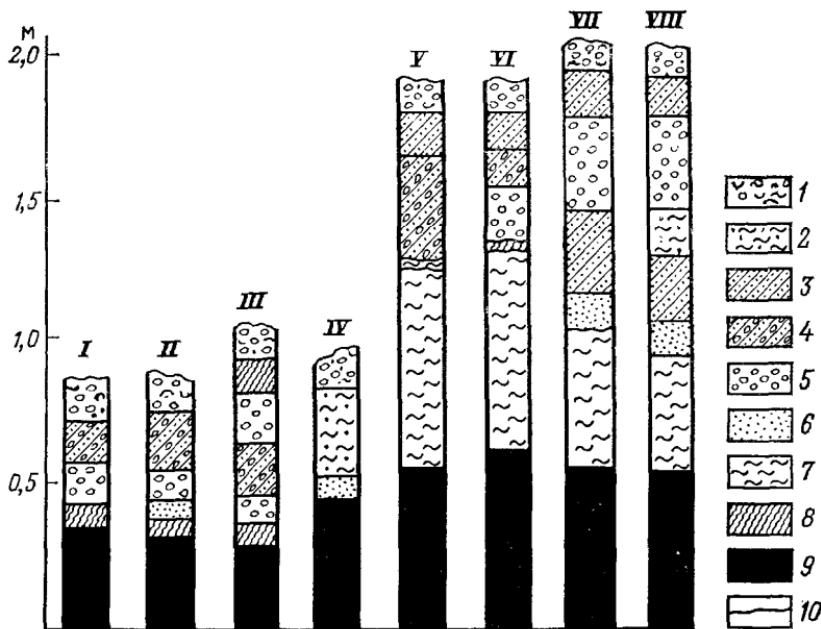


Рис. 11. Характерные разрезы кровли выработок сланцевой шахты «Кашпирская»:

1 — слой с фосфоритизированной фауной (ауцеловый слой); 2 — песчано-алевритовые глины; 3—4 — песчаники соответственно глинистые и глауконитовые; фосфоритовый конгломерат; 5 — крупный; 6 — мелкий; 7 — сапропелевые глины (ложная кровля); 8 — зона размыва сапропелевых глин; 9 — сланец; 10 — плоскости отслоения; I—VIII — номера разрезов

ностью более 3 м) жилообразных месторождений крутого падения (более 50°) применяют системы с магазинированием руды, а для пологого и наклонного залеганий (до 30°) — камерно-столбовую систему. На угольных месторождениях от условий залегания и строения разрабатываемых пластов зависит интенсивность некоторых процессов, водообильность выработок, размеры и характер мульды сдвижения, степень нарушения земной поверхности.

Условия залегания пород определяют такие особенности геологического строения, как однородность и изменчивость, поэтому их оценка при прогнозировании устойчивости выработок имеет первостепенное значение. Они оказывают влияние на свойства пород и тем самым определяют степень неоднородности условий проведения горных работ. В этом отношении особый интерес представляют толщи осадочных пород на угольных, сланцевых, соляных и некоторых рудных месторождениях. В качестве примера на рис. 11 показаны (по условиям залегания)

Таблица 10. Типизация непосредственных кровель очистных выработок на шахте «Кашпирская»

Тип кровли	Номера разрезов кровли (см. рис. 11)	Характер вывалаобразования и меры повышения безопасности ведения работ
Весьма неустойчивая	III, IV	Весьма интенсивное; поддержание невозможно при существующем способе крепления
Неустойчивая	III, VII (а также I и V при их значительном обводнении)	Интенсивное; поддержание возможно при существующем способе крепления с увеличением его плотности
Малоустойчивая	II, VI (а также I и V при слабом обводнении)	Незначительные по числу и размерам вывалы в местах повышенного опорного давления (иногда при нарушении паспорта крепления)
Среднеустойчивая	I, V	Вывалы проявляются только при нарушении паспорта крепления

толщи осадочных пород в непосредственной кровле очистных выработок, а в табл. 10 приведена типизация этой кровли по степени устойчивости в зависимости от геологического строения [9].

Подобные примеры можно привести по угольным шахтам Донбасса и Кузбасса.

2.3. ФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

В результате последовательного воздействия различных геологических процессов горная порода определенного вещественного состава в определенной обстановке приобретает характерное природное физическое состояние, которое предопределяет ее поведение при взаимодействии с горными работами и сооружениями. Приобретенное состояние может быть изменено под влиянием техногенных факторов (иногда по специальной программе с целью улучшения условий строительства и эксплуатации или отвалообразования), и тогда можно говорить о степени и характере изменения естественного физического состояния тем или иным путем (буровзрывными работами, отвалообразованием, осушением, уплотнением, цементацией, замораживанием, силикатизацией и другими средствами). Изучение и оценка существующего состояния и прогноз его изменения представляют большой практический интерес для характеристики поведения пород как среды для горных работ, а также как основание и материал для различных сооружений.

Физическое состояние характеризуется системой признаков, физических свойств, среди которых наиболее важными являются

ются: плотность, пористость, влажность, температура, выветрельность, трещиноватость, закарстованность. Эти признаки (свойства) оцениваются количественными показателями, которые определяются в лабораторных и полевых условиях и дают возможность судить косвенно о наиболее важных особенностях пород: прочности, деформируемости, водопроницаемости, устойчивости (под воздействием воды, температуры и других агентов) и методах их исследования.

2.3.1. Плотность и пористость

Плотность горных пород, которая определяется соотношением между объемами твердых частиц, водой и воздухом (газом), оценивается рядом показателей: плотностью минеральной части, плотностью естественного сложения, плотностью скелета, объемом пористости. Первые два показателя определяются опытным путем, а остальные, как правило, рассчитываются по данным плотности и влажности.

Для определений примем следующие необходимые обозначения (рис. 12):

q_m — масса минеральной части породы, кг, г, т;

$q_{ж}$ — масса поровой жидкости, кг, г, т;

V_m — объем минеральной части, см³, м³;

V_n — объем порового пространства, см³, м³;

W — весовая влажность, доли ед.

Плотность минеральной части определяется показателем $\rho_m = q_m/V_m$ и служит для косвенного суждения о составе основных породообразующих минералов, а также для расчета пористости пород. Некоторые данные о плотности минералов и пород приводятся в табл. 11.

Показатель плотности пород (естественного или нарушенного сложения) зависит от объема пор и степени их заполнения водой (жидкостью):

$$\rho = \frac{q_m + q_{ж}}{V_m + V_n}.$$

Поэтому его величина сама по себе не дает представления о состоянии породы, ибо при одной и той же пористости, но разной степени ее заполнения водой получаются разные значения ρ .

Плотность скелета пород оценивается показателем $\rho_s =$

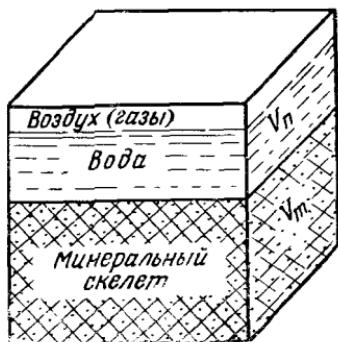


Рис. 12. Схема к определению плотности пород

Таблица 11. Показатели плотности и влажности некоторых пород

Название пород	Плотность минеральной части, г/см ³	Плотность в естественном сложении, г/см ³	Естественная влажность, доли, ед.	Объем пор, %
Гранит	2,65—2,70	2,65—2,70	—	—
Порфирит	2,70—3,0	2,7—2,9	—	—
Базальт	2,82—2,95	2,8—2,9	—	—
Гнейс	2,67—2,72	2,65—2,70	—	—
Мрамор	2,70—2,73	2,70—2,72	—	—
Песчаник	2,64—2,70	2,2—2,5	0,01—0,1	5—15
Известняк	2,40—2,70	2,3—2,6	0,01—0,05	2—8
Аргиллит	2,63—2,86	2,1—2,2	0,05—0,2	15—30
Глина кембрийская	2,68—2,78	2,1—2,2	0,1—0,25	25—35
Глина майкопская	2,68—2,72	1,75—1,85	0,15—0,30	28—36
Глина ленточная	2,70—2,74	1,87—1,93	0,2—0,35	35—40
Лёсс	2,67—2,69	1,50—1,70	0,08—0,18	44—52
Песок	2,64—2,66	1,60—1,72	0,15—0,22	38—43
Торф	0,5—0,7	—	—	—

$\rho_c = \frac{\rho_m}{V_m + V_n}$, который определяется расчетным путем по формуле $\rho_c = \frac{\rho}{1 + W}$. Показатель ρ_c используется для оценки истинной плотности насыпных сооружений по глубине и по профилю с целью определения их однородности по прочности, сжимаемости и водопроницаемости. Он удобен и для определения коэффициента разрыхления пород при экскавации и отвалообразовании.

Размерность всех трех показателей ρ , ρ_m и ρ_c — кг/м³ или г/см³.

Сравнение этих показателей дает возможность судить о пористости пород. Для скальных пород характерно равенство $\rho_m = \rho = \rho_c$, а для песчано-глинистых неравенство $\rho_m > \rho > \rho_c$.

Показатель плотности пород используется при расчетах напряженного состояния, создаваемого вышележащими породами, в виде $\gamma = \rho g$, где γ — удельный вес, Н/м³; g — ускорение свободного падения.

Для песков (в особенности водонасыщенных) трудно определить плотность, соответствующую естественному или искусственноому сложению, поскольку отбор ненарушенных проб связан с большими сложностями. В связи с этим определяют плотность при максимально плотном и максимально рыхлом состояниях для одной и той же влажности, которая зависит от гранулометрического состава, формы и окатанности зерен. Полученные по-

казатели характеризуют относительную плотность, а также способность песков к уплотнению.

Пористость песчано-глинистых, а иногда и полускальных пород оценивается двумя показателями:

объемом пор

$$n = \frac{\rho_m - \rho_c}{\rho_m} \cdot 100$$

и коэффициентом пористости

$$e = \frac{\rho_m - \rho_c}{\rho_c} = \frac{n}{1 - n},$$

которые также дают представление об их плотности.

Относительная плотность песков I_d , в долях единицы определяется отношением

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}},$$

где e_{\max} и e_{\min} — коэффициенты пористости, отвечающие предельно рыхлому и предельно плотному состояниям; e — коэффициент пористости естественного или приобретенного состояния песка.

При $I_d > 0,66$ песок считается плотным (малосжимаемым), при $I_d < 0,33$ песок рыхлый (сильносжимаемый с высокой водопроницаемостью). Наиболее часто в естественных условиях встречаются пески средней плотности, у которых $0,33 < I_d < 0,66$.

Способность песков к уплотнению оценивается коэффициентом уплотняемости

$$u = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\max}}.$$

Чем больше значение этого коэффициента (чем оно ближе к 1), тем песок более уплотняем, т. е. больше может уменьшиться его пористость при внешнем воздействии (особенно динамическом).

2.3.2. Влажность и влагоемкость

Влажность имеет большое практическое значение для оценки состояния пород. Она представляет отношение массы воды, содержащейся в порах к массе скелетной части породы, высушенной при температуре 105 °C и зависит от состава пород и их плотности (см. табл. 11).

Горные породы могут быть охарактеризованы естественной влажностью, или влажностью в определенном состоянии. Для глинистых пород большое значение приобрели влажности двух

характерных состояний — предел текучести — влажность, при которой глина переходит в текучее состояние, и предел пластичности, характеризующий переход от пластичного к полутвердому состоянию глины. Разница между этими характерными влажностями называется числом пластичности. Пределы текучести и пластичности определяют в лабораторных условиях на глинистых образцах нарушенного сложения и используют для косвенной оценки состава пород, так как они отражают их гидрофильность, зависящую от минерального и гранулометрического состава. По числу пластичности производится классификация глинистых пород, которая принята в СНиП для установления их номенклатуры. К глинам относятся разности, у которых число пластичности более 0,17, к суглинкам (песчанистым глинам) — от 0,07 до 0,17, к супесям (глинистым пескам) — от 0,01 до 0,07.

Пределы пластичности вместе с естественной влажностью используются для определения консистенции глинистых пород, характеризующей их физическое состояние. Она оценивается показателем консистенции, который представляет собой следующее отношение характерных влажностей

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p},$$

где W_L и W_p — влажности на пределе текучести и пластичности; W — влажность исследуемой глины (естественная).

В соответствии со СНиП глинистые породы по показателю консистенции подразделяются на:

Твердые	$I_L < 0$
Полутвердые	$I_L = 0-0,25$
Тугопластичные	$I_L = 0,25-0,50$
Мягкопластичные	$I_L = 0,50-0,75$
Текучепластичные	$I_L = 0,75-1,00$
Текущие	$I_L > 1,0$

Консистенцию учитывают при определении несущей способности глинистых пород, поэтому изучение ее имеет большое практическое значение. При этом следует иметь в виду, что строго она определяет физическое состояние глинистых пород, у которых отсутствуют цементационные структурные связи. Многими примерами уже показано, что определение физического состояния необходимо проводить не по значениям пределов пластичности, которые характеризуют определенные состояния породы нарушенного сложения, а по сопротивлению их при естественной влажности, плотности и сложении. Для этой цели можно использовать пенетрацию (в лабораторных условиях) и зондирование (в условиях естественного залегания).

СНиП рекомендуют определять удельное сопротивление погружения P_n , Па, при погружении стального конуса с углом при вершине $\alpha=30^\circ$ по формуле

$$P_n = P/h^2,$$

где P — усилие в Н, необходимое для погружения конуса в породу на глубину h в м.

При $P_n > 0,2$ МПа порода считается очень прочной, а при $P_n < 0,05$ МПа — слабой. Для сравнения P_n , МПа, с показателем консистенции I_L можно использовать предложение В. Ф. Рязанова, в соответствии с которым при

$I_L < 0$	$P_n > 0,19$
$I_L = 0,25$	$P_n = 0,19-0,085$
$I_L = 0,25-0,50$	$P_n = 0,085-0,038$
$I_L = 0,50-0,75$	$P_n = 0,038-0,017$
$I_L = 0,75-1,0$	$P_n = 0,017-0,0076$
$I_L > 1,0$	$P_n < 0,0076$

Консистенция глинистых пород зависит от их минерального и гранулометрического состава, плотности и влажности, а также от состава поровой воды и характера структурных связей между минеральными частицами.

Влагоемкость горных пород определяется способностью их вмещать и удерживать данное количество воды в различных условиях. Различают породы влагоемкие, которые могут удерживать воду вокруг минеральных частиц (глинистые породы) и невлагоемкие, вмещающие воду, но отдающие ее при свободном истечении (крупные пески, галечники, трещиноватые и зарастающие породы). Промежуточное положение занимают мелкозернистые, пылеватые и глинистые пески.

Для песчано-глинистых пород определяют полную W_n , молекулярную W_{mm} и капиллярную W_k влагоемкости.

Полная влагоемкость характеризует влажность пород при полном насыщении всех их пустот водой. Расчет ее можно провести по формуле

$$W_n = \frac{n\rho_b}{\rho_m(1-n)} = \frac{e\rho_b}{\rho_m},$$

где n — объем пор; e — коэффициент пористости; ρ_m — плотность минеральной части; ρ_b — плотность воды.

Водонасыщение горных пород характеризуется степенью заполнения пор водой, для чего используется отношение определенной влажности породы W к ее полной влагоемкости W_n , т. е.

$$G = W/W_n;$$

$$G = \frac{W\rho_m}{e\rho_b}.$$

Показатель степени водонасыщения используют в качестве классификационного признака песчано-глинистых пород ($G < 0,5$ — маловлажные, $G = 0,5—0,8$ — влажные и $G > 0,8$ — водонасыщенные), а также для косвенной оценки их прочности, деформируемости и устойчивости. Физическое состояние пород во многом зависит от степени заполнения порового пространства флюидом. В зависимости от G изменяется просадочность, размокаемость, набухание, сжатие, сопротивление сдвигу, ползучесть.

Молекулярная влагоемкость характеризует способность пород удерживать физически связанную воду на поверхности минеральных частиц или в межпакетных пространствах их кристаллов. Связь определяется сорбционными силами, которые способствуют образованию водных (сольватных) оболочек различной толщины в зависимости от размеров частиц и их состава, а также от состава воды. Если из водонасыщенного песка свободно стечет вода, то в нем останется физически связанная вода, соответствующая максимальной молекулярной влагоемкости. В глинистых породах даже свободная вода отжимается с некоторым усилием извне. Поэтому до максимальной молекулярной влагоемкости можно довести водонасыщенную породу, выдержав ее под нагрузкой 6,55 МПа в течение 10 мин. Испытуемый образец представляет собой лепешку высотой 2 мм и диаметром 50 мм.

Способность пород, насыщенных водой, отдавать некоторую ее часть за счет свободного стекания называется водоотдачей W_0 :

$$W_0 = W_n - W_{mm}.$$

Коэффициент водоотдачи, который часто используется при расчете водопритоков, дренажных сооружений, скорости осушения, представляет собой отношение объема стекающей воды к объему водосодержащей породы V_n :

$$\mu_B = V_B / V_n.$$

Капиллярность песчано-глинистых пород характеризуется высотой капиллярного поднятия (в см), зависящей от поверхностного натяжения, развивающегося в их порах (капиллярах) и определяемой по закону Жюрена:

$$H_k = \frac{2a^2}{rg\rho_B},$$

где a — капиллярная постоянная; r — радиус капилляра, см; g — ускорение свободного падения, $\text{см}/\text{с}^2$; ρ_B — плотность воды, $\text{г}/\text{см}^3$.

За счет капиллярности над поверхностью подземных вод обычно формируется «капиллярная кайма», в пределах кото-

Таблица 12. Характерные данные показателей влагоемкости песчано-глинистых пород

Название пород	W_{MM}	W_{II}	W_0	μ_B	$H_K, \text{ см}$
Крупнозернистый песок	0,01—0,05	0,20—0,26	0,9—1,0	0,2—0,3	2—10
Мелкозернистый песок	0,02—0,03	0,22—0,28	0,8—0,9	0,15—0,2	30—50
Пылеватые пески	0,06—0,12	0,20—0,30	0,3—0,5	0,05—0,1	100—160
Глина песчанистая	0,15—0,20	0,25—0,35	0,1—0,15	0,01—0,05	200—300
Глина	0,25—0,40	0,30—0,50	0	0	200—500

рой прочность пород меняется, что следует учитывать при оценке их устойчивости. В табл. 12 приведены данные, характеризующие влагоемкость и водоотдачу песчаных и глинистых пород.

Водоемкость скальных и полускальных пород, в которых пустотность слагается из незначительной пористости и трещиноватости, оценивают двумя показателями: водопоглощением, характеризующим способность породы впитывать воду в водной среде при атмосферном давлении, и водонасыщением — способностью поглощать воду в особых условиях (под вакуумом, при кипячении, под давлением и т. д.). Эти два показателя, несмотря на малую влагоемкость пород (от долей процента до нескольких процентов) имеют определенную практическую ценность. Водопоглощение определяет открытую пористость, а отношение водопоглощения к водонасыщению (степень водонасыщения) указывает на морозоустойчивость пород. Наиболее неустойчивыми считаются породы, у которых это отношение больше 0,8.

2.3.3. Выветрелость и трещиноватость

Выветривание горных пород приводит к изменению их состава, монолитности и, как следствие, прочности, деформируемости, водопроницаемости. Как известно из курса геологии, выветривание может быть физическим, приводящим к механической дезинтеграции пород, и химическим, в результате которого происходит изменение их состава. Глубина проникновения процесса выветривания составляет 200—300 м, а иногда достигает 1 км.

Особое значение имеет зона выветривания до глубины первых десятков метров, в пределах которой нарушение сплошности горных пород приводит к существенному уменьшению прочности и увеличению водопроницаемости. Породы, подвергшиеся или подверженные процессам выветривания, образуют древнюю или современную кору выветривания. В горной практике боль-

шое значение приобретает и современный процесс выветривания, в связи с искусственным раскрытием больших площадей горных пород открытыми работами и формированием новых техногенных массивов (отвалов, терриконов).

При инженерно-геологической оценке степени выветрелости Н. В. Коломенский и В. Д. Ломтадзе выделяют по глубине 4 зоны (снизу вверх).

1. Зона монолитных пород, разбитых тектоническими трещинами или трещинами разгрузки.

2. Глыбовая или грубообломочная зона, представленная трещиноватыми породами (в результате физического выветривания), отдельные блоки которых имеют размеры в несколько десятков дециметров. Трещины открытые, или заполнены песчано-глинистым материалом из верхних зон. Водопроницаемость этой зоны значительная, коэффициент фильтрации составляет иногда более 100 м/сут. Прочность и деформируемость пород здесь определяется с учетом интенсивности и характера трещиноватости.

3. Мелкообломочная (щебенистая) зона, в пределах которой горные породы сильно трещиноватые и представлены отдельными кусками размером от 5—10 до 20—30 см. Минеральный состав изменен (химическое выветривание). Прочность пород в этой зоне в большинстве случаев можно характеризовать коэффициентом внутреннего трения, т. е. ее можно рассматривать как квазиоднородную среду. Водопроницаемость здесь уменьшается и характеризуется коэффициентом фильтрации от нескольких миллиметров в сутки до первых метров в сутки.

4. Зона дресвяно-песчаная, в которой «материнская» порода неизвестна. Вторичные минералы составляют основную массу. Порода приобрела свойства песчано-глинистых отложений.

Показателями выветрелости горных пород являются различные отношения между показателями выветрелых и невыветрелых разновидностей одной и той же породы.

Наибольшее распространение и признание получили следующие показатели.

1. Степень выветрелости $C_v = \frac{\rho_v}{\rho_e}$, где ρ_v — плотность выветрелой породы; ρ_e — плотность невыветрелой породы.

2. Показатель выветрелости $n_v = \frac{W_v - W_e}{W_e}$, где W_v и W_e — влажность выветрелой и естественной породы.

3. Коэффициент трещиноватости (см. ниже).

4. Коэффициент разупрочнения $K_p = \frac{R_c^e - R_c^v}{R_c^e}$, где R_c^e и R_c^v — прочность на одноосное сжатие невыветрелой и выветрелой породы.

$$5. \text{Коэффициент выветрелости (по СНиП)} \quad K_{\text{вк}} = \frac{K_1 - K_0}{K_1},$$

где K_1 — отношение массы частиц размером менее 2 мм к массе частиц более 2 мм после испытания на истирание во вращающемся полочном барабане; K_0 — то же до испытания на истирание.

При $K_{\text{вк}} = 0,0 - 0,5$ породы считаются невыветрелыми, при $K_{\text{вк}} = 0,5 - 0,75$ — слабо выветрелыми и при $K_{\text{вк}} = 0,75 - 1$ — сильно выветрелыми.

По значениям указанных показателей оценивают изменение состояния горных пород, устанавливают закономерности процесса выветривания и разрабатывают прогнозы изменения свойств горных пород, особенно в искусственных откосах угольных и рудных карьеров, длительная устойчивость которых во многом зависит от степени и скорости изменения состояния пород, слагающих их.

При оценке взаимодействия горных пород с различными сооружениями и прогнозе их устойчивости исключительно важное значение приобретает трещиноватость. Она характерна главным образом для скальных и полускальных пород и определяет их физическое состояние, пространственную неоднородность и анизотропию. Нарушение сплошности пород трещинами различного происхождения оказывает определяющее значение на такие важные их свойства как прочность, деформируемость, пустотность, проницаемость, устойчивость при выветривании и карстообразовании, категорию трудности разработки и др.

По своему происхождению трещины делятся на две группы: тектонические и нетектонические. Первые образуются в результате воздействия на породы тектонических напряжений сжатия (трещины скальвания) и растяжения (трещины разрыва). Для них характерны: а) строгое пространственное расположение с формированием нескольких взаимно пересекающихся систем трещин, которые закономерно сочетаются со структурно-петрографическими и тектоническими элементами пород (слоистостью, сланцеватостью, складками, нарушениями и т. д.); б) большая протяженность и выдержанность. В этой группе выделяют особый тип трещин — кливаж (от английского слова «кливаж» — раскол). Это система густых параллельных трещин, секущих слоистость или согласных с ней.

Нетектонические трещины могут образоваться при остывании магматических пород за счет неравномерного уменьшения объема (трещины первичной отдельности), при уплотнении осадочных пород (трещины напластования), в результате разрушения пород при выветривании (трещины выветривания) или при разгрузке реками, котлованами, горными выработками (трещины разгрузки), оползневые трещины на склонах и откосах,

трещины сдвижения и горного давления, усыхания, трещины, образующиеся при искусственных взрывах, и др. Нетектонические трещины отличаются очень большим разнообразием, часто имеют хаотическое распространение, невыдержанную протяженность, поэтому их изучение и оценка влияния на свойства пород очень сложные.

Иногда говорят о микро- и макротрещиноватости горных пород. Такое разделение весьма условно и трудно поддается четкому разграничению для различных объемов пород. Однако следует иметь в виду, что при изучении прочности на образцах небольших объемов (стандартные размеры опытных образцов) макротрещиноватость обуславливает большой разброс опытных данных.

Изучение трещиноватости горных пород проводится на естественных обнажениях, в различных выработках, по керну скважин, а суммарная пустотность за счет трещиноватости может быть определена опытными откачками и нагнетаниями воды, сейсмоакустическими методами, различными каротажами и т. д.

Для характеристики трещиноватости и оценки ее влияния на инженерно-геологические условия месторождения изучают следующие особенности.

1. Элементы залегания трещин (азимут простирания или падения и угол наклона), которые дают возможность оценить пространственное их положение, взаимоотношение с проектируемым сооружением, анизотропию пород, выбрать расчетные схемы и методику инженерно-геологического опробования. Для суждения о характере трещиноватости, системах, генезисе обычно по замерам строят различные графики (рис. 13), точечную диаграмму трещиноватости (рис. 14), диаграмму трещиноватости в изолиниях (рис. 15) и др. Интересно предложение В. Н. Славянова о построении «розы устойчивости» откоса (рис. 16).

2. Степень трещиноватости с целью количественной оценки и получение ряда показателей. Для этого определяют:

а) коэффициент трещинной пустотности, %

$$K_{\text{тр}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{тр}i}}{S_0} \cdot 100,$$

где $S_{\text{тр}i}$ — площадь раскрытия трещины; S_0 — площадь обнажения, в пределах которого ведется изучение трещиноватости;

б) коэффициент удельной трещиноватости для каждой системы трещин

$$K_{\text{ут}} = n_{\text{тр}}/l,$$

где $n_{\text{тр}}$ — число трещин данной системы, замеренных по перпендикуляру на расстоянии l , м;

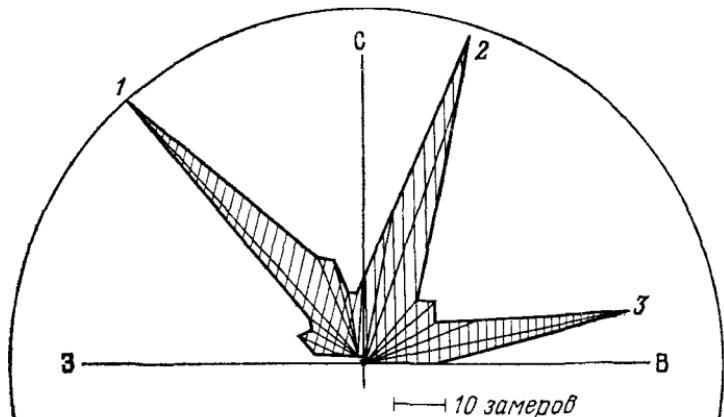


Рис. 13. Роза трещиноватости.

Азимуты простирания: 1 — СЗ 320°; 2 — СВ 20°; 3 — СВ 80°

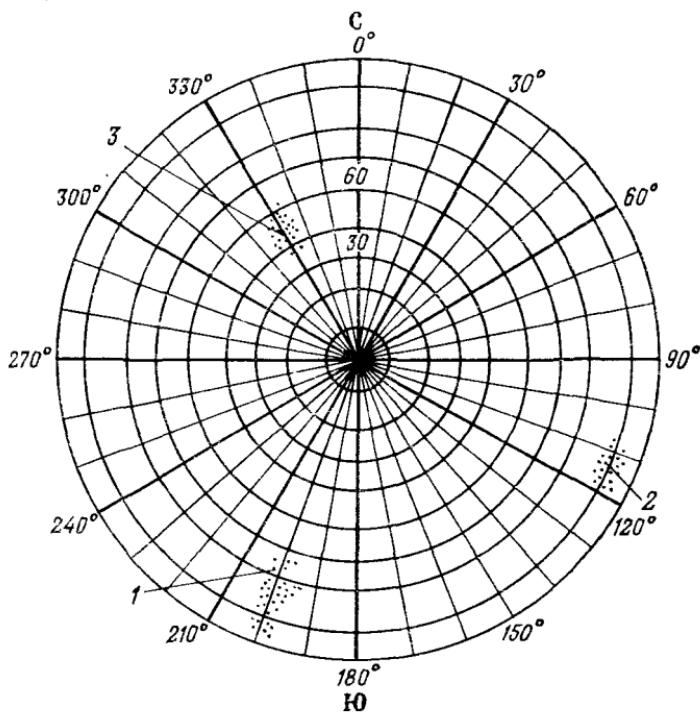


Рис. 14. Точечная диаграмма трещиноватости.

Азимуты падения: 1 — 200°; 2 — 115°; 3 — 325°; углы падения: 1 — 75°; 2 — 82°; 3 — 43°

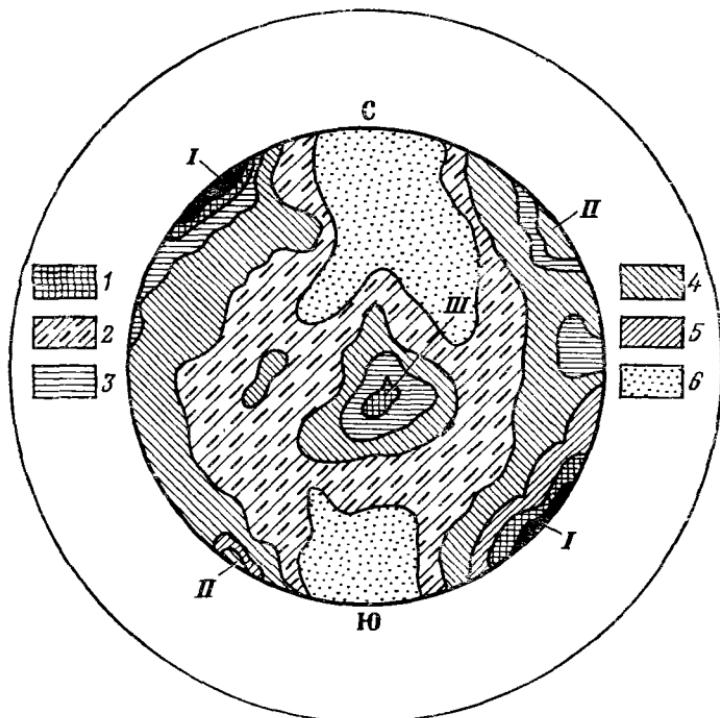


Рис. 15. Диаграмма трещиноватости в изолиниях.

Зоны характерных трещин: I — вертикальных с аз. пр. СВ 50°; II — вертикальных с аз. пр. ЮВ 130°; III — наклонных с аз. пр. СВ 25°.
 Число точек из общего числа замеров, %: I — 6—5; 2 — 5—4; 3 — 4—3; 4 — 3—2; 5 — 2—1; 6 — 1—0

в) трещинную пустотность, %

$$ТП = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\delta}}{\bar{a}_i + \bar{\delta}_i} 100,$$

где $\bar{\delta}_i$ и \bar{a}_i — средние арифметические значения расстояний между трещинами и ширины трещин одной системы; n — число систем трещин;

г) средний объем блоков, ограниченных трещинами

$$V_6 = \bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3,$$

где \bar{a}_1 ; \bar{a}_2 ; \bar{a}_3 — средние расстояния между трещинами трех главных систем.

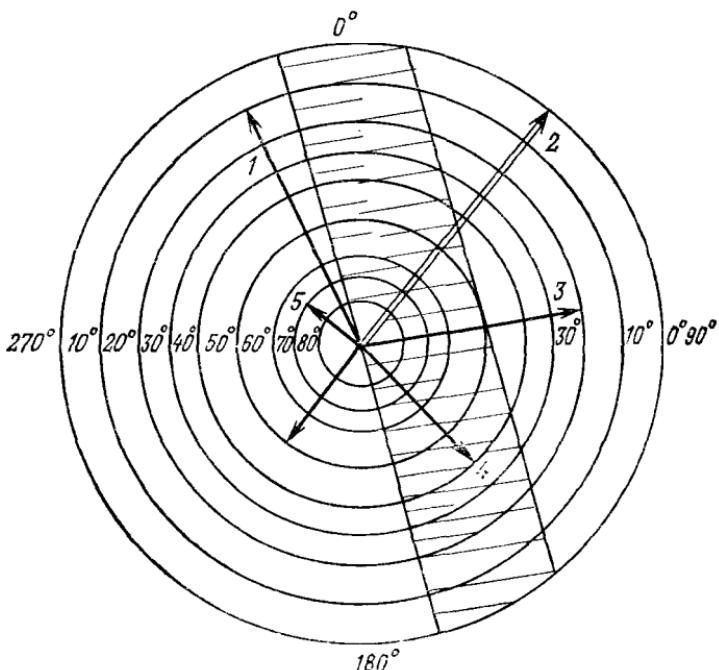


Рис. 16. Роза устойчивости откоса (по В. Н. Славянову):

1 — проекция откоса $\frac{80^\circ}{34^\circ}$; 2 — падение пород $\frac{45^\circ}{90^\circ}$; 3 — тектонические разломы $\frac{330^\circ}{17^\circ}$; 4 — тектонические трещины $\frac{80^\circ}{20^\circ}, \frac{220^\circ}{55^\circ}$; 5 — гравитационные трещины $\frac{130^\circ}{45^\circ}, \frac{290^\circ}{55^\circ}$
(в числителе — азимут падения, в знаменателе — угол падения)

При наличии большего числа систем трещин:

$$V_6 = \frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\left(1 + \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\bar{a}_4}}\right) \left(1 + \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\bar{a}_2}}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\bar{a}_3}}\right)},$$

где $\bar{a} = \frac{\Pi}{n} \sin \alpha$; Π — периметр исследуемого обнажения пород;

α — средний угол падения трещин; n — число трещин;

д) по этим данным обычно вычисляют объемный коэффициент трещиноватости

$$K_V = \frac{1}{V_6};$$

е) при изучении трещиноватости по керну скважин обычно определяют удельную кусковатость, т. е. число кусков на 1 м длины керна, а также показатель качества керна (RQD), представляющий отношение суммарной длины кусков керна длиной

Таблица 13. Связь между различными показателями трещиноватости (по В. Д. Ломтадзе)

Название породы	ТП, %	k , м/сут	q , л/мин
1. Практически нетрещиноватые, водоупорные	<0,3	<10 ⁻³	0,5—10 ⁻³
2. Весьма слаботрещиноватые и слабо водопроницаемые	0,3—1,0	10 ⁻³ —10 ⁻²	0,5 (10 ⁻³ —10 ⁻²)
3. Слабо трещиноватые и слабо водопроницаемые	1—3	10 ⁻² —10 ⁻¹	0,5 (10 ⁻² —10 ⁻¹)
4. Среднетрещиноватые и средневодопроницаемые	3—10	10 ⁻¹ —10	0,5 (10 ⁻¹ —10)
5. Сильно трещиноватые и сильно водопроницаемые	>10	>10	>5

более 10 см к длине опробуемого интервала. Значения этого отношения менее 0,3 указывают на сильно трещиноватую породу, а более 0,7 — на слабо трещиноватую;

ж) суммарная пустотность определяется по удельному водопоглощению при нагнетании воды q , л/мин в трещиноватые «сухие» породы или по коэффициенту фильтрации k , м/сут при откачках воды из водосодержащих трещиноватых пород. Оценка трещиноватости пород по коэффициенту фильтрации и удельному водопоглощению приводится в табл. 13.

3. Морфология трещин, степень изменения состава и состояния их стенок, а также заполнитель трещинных пустот. Эти элементы имеют большое практическое значение при оценке прочности, деформируемости и проницаемости горных пород. Известно, например, что коэффициент трения по свежей трещине близок к коэффициенту внутреннего трения породы, но различные изменения стенок трещины приводят к падению трения. Заполнение трещин приводит к уменьшению водопроницаемости и к возможности ее роста при увеличении скорости фильтрации в период дренирования месторождения. Прочностные и деформационные свойства трещиноватого массива зависят от состава заполнителя и его механических характеристик. Механизм деформирования (проявления горного давления) в трещиноватых породах зависит от состава и свойств заполнителя и характера поверхностей трещин. Здесь можно наблюдать хрупкое разрушение в квазисыпучей среде и пластические деформации, характерные для глинистых пород. При оценке трещиноватости в горных выработках необходимо учитывать наличие искусственных трещин, являющихся результатом горного давления.

Искусственная трещиноватость, формирующаяся в породах и полезном ископаемом, вмещающих горные выработки, привлекла внимание геологов и горняков очень давно. Еще в 1936 г.

Д. С. Ростовцев выделял эксплуатационные «волосные» трещины в кровле выработок, параллельные между собой, и линии забоя, зависящие от состава и слоистости пород. Трещиноватость, как результат горных работ, была описана В. Д. Слесаревым, А. А. Борисовым, Г. Н. Кузнецовым, Г. Л. Фисенко, С. Т. Кузнецовым и с особой тщательностью В. Л. Свержевским, назвавшим их трещинами горного давления. По результатам наблюдений в подготовительных и очистных выработках на шахтах Донбасса В. Л. Свержевский выявил основные закономерности образования искусственной трещиноватости в слоистых и массивных песчаниках, алевролитах, аргиллитах и углях, залегающих в кровле и почве выработок на глубинах от 150 до 1000 м. Автор считает, что трещины образуются в результате отрыва при разрушении пород, прочность которых меньше напряжения, возникающего от давления вышележащих пород в призабойной зоне шириной 10—55 м (в кровле) и 5—25 м (в почве).

Он приводит характерные черты эксплуатационных трещин, позволяющие отличать их от трещин естественного происхождения.

1. Трещины оконтуривают горные выработки (очистные и подготовительные) в плане, разрезе и параллельно забою, чем и определяется их простиранье.

2. Угол наклона трещин к наслоению составляет в среднем 60—70° и обратно пропорционален прочности пород: падение в кровле в сторону забоя, а в почве — от забоя.

3. На стенках трещин нет следов скольжения, нет пленок и налетов минеральных образований, но иногда на них наблюдается породная или угольная пыль.

4. Эксплуатационные трещины пересекают естественные, если угол между ними составляет более 15—20°, в противном случае они проходят параллельно им.

5. Расстояние между искусственными трещинами зависит от прочности пород и мощности слоев.

Большое значение при оценке устойчивости подземных выработок приобретает расслоение горных пород. Как отмечается в исследованиях Всесоюзного научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ), разрушение толщ осадочных пород над очистными выработками в угольных шахтах начинается с расслоения. Расслоение пород — это их способность к распаданию на плитки разной толщины по природным поверхностям ослабления. Такими поверхностями могут служить трещины отдельности и сланцеватости, а также слабые прослойки глин и растительных остатков, углистых и сланцевых веществ, скопления слюды и т. д. (иногда считают, что поверхности ослабления появляются в результате формирования горного давления, но более вероятно предпола-

Таблица 14. Степень расслоения пород (ВСЕГИНГЕО [11])

Степень расслоения	Удельная кусковатость	
	в первый день	через 15 дней
1. Весьма слабая (практически отсутствует)	1	1
2. Слабая	2—4	4—8
3. Значительная	4—10	8—20
4. Весьма значительная	10—20	20—40
5. Полное расслоение	>20	>40

гать их естественное происхождение с дальнейшим развитием, расширением при проходке выработок).

С. И. Малинин выделяет пять типов кровель угольных пластов в зависимости от степени расслоения.

1. Весьма неустойчивые породы, обрушающиеся сразу после выемки угля с толщиной плиток 0,1—0,2 см.

2. Неустойчивые породы, требующие немедленного закрепления вслед за выемкой угля, с толщиной плиток 5—15 см.

3. Малоустойчивые породы, с толщиной плиток 10—25 см.

4. Среднеустойчивые породы, с большой толщиной плиток.

5. Весьма устойчивые породы, практически не расслаивающиеся.

Оценка степени расслоения производится по удельной кусковатости керна (число столбиков на 1 м длины керна) сразу после его извлечения и через различные промежутки времени. Во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) проводились наблюдения, которые позволили выделить пять категорий пород по степени расслоения (табл. 14). Для этого использовалась величина удельной кусковатости, определенная сразу после бурения и на 15-й день после этого.

С. Т. Кузнецов и И. Н. Воронин, оценивая расслоение горных пород различных угольных бассейнов, приходят к выводу о возможности прогноза поведения кровли выработок по механическому воздействию на керн.

2.4. ВОДОУСТОЙЧИВОСТЬ И ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ

В результате взаимодействия горных пород с водой происходят различные процессы, характер, масштабы и интенсивность которых зависят от водных свойств пород. Среди них особо важное значение при оценке условий разработки месторождений имеют водоустойчивость и водопроницаемость.

Водоустойчивость горных пород определяется главным образом их составом и характером структурных связей,

а также химическим составом воды. В скальных и полускальных породах при взаимодействии с водой происходит размягчение, которое приводит к снижению прочности. Особое значение этот процесс приобретает в осадочных породах. Принято оценивать водоустойчивость коэффициентом размягчаемости K_p , представляющим собой отношение прочности на одноосное сжатие водонасыщенного образца к прочности до водонасыщения. По значению этого коэффициента горные породы делятся на 4 категории: водоустойчивые (магматические), $K_p > 0,9$; пониженнной водоустойчивости (известняки, песчаники) $K_p = 0,7—0,9$; средней водоустойчивости (песчаники на глинистом цементе, слабые известняки, алевролиты, опоки), $K_p = 0,5—0,7$; водонеустойчивые (мергели, аргиллиты, глинистые сланцы и др.) $K_p < 0,5$.

Для некоторых полускальных и в особенности глинистых пород при увлажнении характерно увеличение объема — набухание, которое достигает 30 и более процентов. Процесс набухания связан со способностью глинистых частиц активно сорбировать влагу своей поверхностью, поэтому величина набухания зависит от степени дисперсности и минерального состава породы. Особенно ярко выражено набухание в монтмориллонитовых глинистых породах. Однако оно может происходить только при определенном напряженном состоянии. Максимальное набухание наблюдается при полной разгрузке и называется свободным. При достижении его порода поглощает максимальное количество воды — влажность набухания. По относительной его величине δ_n , представляющей отношение приращения высоты образца Δh при его увлажнении в условиях невозможности бокового расширения к его первоначальной высоте h_0 ($\delta_n = \frac{\Delta h}{h_0} 100$) производят классификацию глинистых пород: ненабухающие — $\delta_n < 4\%$; слабонабухающие — $\delta_n = 4—8\%$; средненабухающие — $\delta_n = 8—16\%$; сильнонабухающие — $\delta_n > 16\%$.

Свободное набухание имеет место на поверхностях откосов карьеров, выемок, котлованов, на стенках, почве и кровле подземных горных выработок, пройденных в глинистых породах или в породах на глинистом цементе. Если набухающий образец поместить в герметичную камеру так, чтобы он плотно прилегал к ее стенкам, и увлажнить его, то стенки камеры испытывают давление, называемое давлением набухания. Если на стенках камеры предварительно прикрепить датчики напряжения по трем координатным осям, можно убедиться в том, что давление набухания в разных направлениях неодинаковое. Таким образом, максимального значения давление набухания достигает при отсутствии изменения объема породы. Следовательно, для возникновения самого процесса необходимо, чтобы давление на породу было меньше ее давления набухания.

Природа формирования давления набухания весьма сложна и изучается в специальных разделах инженерной геологии. Его величина зависит от гидрофильтрости, плотности, влажности и естественного напряженного состояния глинистых пород и изменяется от 0,1—0,2 до 0,8—1,2 МПа. Для расчета крепи выработок в глинистых породах необходимо учитывать их давление набухания.

Таким образом, процесс набухания характеризуется тремя основными показателями: величиной относительного набухания, влажностью набухания и давлением набухания. При решении задач по оценке устойчивости сооружений в глинистых породах с учетом их объемного напряженного состояния правильнее рассматривать объемное набухание, т. е. $\Delta V/V_0$, где ΔV — приращение объема; V_0 — начальный объем. Степень разупрочнения породы в результате набухания имеет большое практическое значение при оценке и прогнозе устойчивости горных выработок (см. гл. 5).

При изучении набухания следует иметь в виду еще одну важную особенность, связанную с циклическим изменением влажностного режима пород в откосах и подземных выработках длительного срока службы. При высыхании происходит их усадка, которая сопровождается растрескиванием, расслоением, т. е. в конечном итоге приводит к уменьшению прочности. Последующее увлажнение приводит к более значительному набуханию и разупрочнению, чем то, которое имело место при увлажнении породы естественной влажности — плотности.

Некоторые глинистые породы обладают способностью к размоканию в водной среде, которая приводит к потере их прочности.

Скорость размокания различна. Очень быстро размокают пылеватые глинистые разновидности небольшой естественной влажности и плотности.

Водопроницаемость горных пород характеризует их способность пропускать (фильтровать) воду через пустоты (поры, трещины, карстовые полости) под напором (рис. 17). Более общим является понятие проницаемость, под которым понимают свойство горных пород пропускать через себя жидкости или газы под давлением. Показатель водопроницаемо-

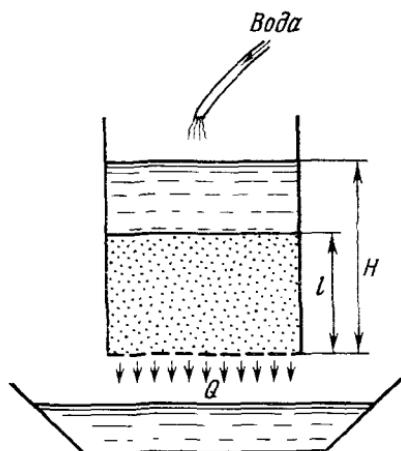


Рис. 17. Схема к определению водопроницаемости песков

ности — коэффициент фильтрации, который был предложен Ж. Дарси в 1856 г. в виде

$$Q = kFIt,$$

где Q — количество воды (м^3), протекающее за промежуток времени t (сут) через сечение породы F (м^2) при гидравлическом градиенте потока $I = H/l$; H — напор водного потока (м); l — длина пути фильтрации (м).

Наиболее распространено так называемое скоростное выражение коэффициента фильтрации k , см/с ($\text{м}/\text{сут}$): $\frac{Q}{Ft} = v_\Phi = kI$,

или при $I = 1$ $k = v_\Phi$, где v_Φ — скорость фильтрации.

Таким образом, коэффициент фильтрации горной породы представляет собой скорость фильтрации водного потока, содержащегося в этой породе при градиенте, равном единице.

Однако здесь сразу надо сделать оговорку. Скорость фильтрации v_Φ , определенная как $\frac{Q}{Ft}$, не является действительной скоростью движения воды в порах (пустотах) породы v_d . Несоответствие заключается в том, что принятое Дарси сечение характеризует площадь всей породы, а не порового пространства, заполненного водой, сечение которого составляет Fn (n — объем пор). Поэтому между двумя скоростями существует зависимость

$$v_\Phi = v_d n.$$

При решении фильтрационных задач удобнее пользоваться значениями v_Φ и k , поскольку они относятся ко всему объему пород, определяемому гораздо проще, чем объем пустотного пространства.

Коэффициент проницаемости K_n , м^2 представляет собой количество жидкости или газа Q в см^3 , проходящее через сечение $F = 1 \text{ см}^2$ при перепаде давления $p = 1 \text{ Па}$ и длине пути фильтрации $l = 1 \text{ см}$ за время $t = 1 \text{ с}$, при вязкости флюида $\nu = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ и определяется по формуле

$$K_n = \frac{Qvl}{Ftp}.$$

Между двумя коэффициентами существует следующая зависимость:

$$k = K_n \frac{\rho_\Phi}{\nu},$$

где ρ_Φ — плотность флюида; $k = 1 \text{ м}/\text{сут}$ соответствует примерно $K_n = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Коэффициент фильтрации представляет собой важный показатель, который используется в расчетах водопритоков

Таблица 15. Коэффициент фильтрации некоторых пород

Название пород	<i>k</i> , м/сут
Карстовые известняки (выветрелые)	>200
Сильнотрещиноватые скальные породы	100—200
Слаботрещиноватые (тектоническая трещиноватость) скальные породы	1—10
Галечник	>100
Крупные пески	5—50
Мелкие пески (по В. Д. Ломтадзе)	1—5
Песчанистая глина	0,1—0,01
Глина	<0,001

в горные выработки и дренажные сооружения, при разработке водопонизительных мероприятий, расчете сжимаемости пород и т. д. Он определяется в полевых условиях специальным опытно-фильтрационными работами (откачками, наливами, нагнетаниями), а также в лабораториях на специальных приборах, дающих возможность моделировать фильтрационный процесс в определенном напряженном состоянии и температурном режиме (главным образом для песчано-глинистых пород — пористых сред). Характерные значения *k* приведены в табл. 15.

Ф. П. Саваренский предложил различать 3 группы пород по степени их водопроницаемости: а) водопроницаемые (трещиноватые и закарстованные скальные породы, обломочные породы) с $k > 1$ м/сут; б) полупроницаемые (глинистые пески и слаботрещиноватые слеганые породы) с $k = 1—0,001$ м/сут; в) водупорные — практически водонепроницаемые (монолитные скальные породы, плотные глины, аргиллиты) с $k < 0,001$ м/сут.

В гидрогеологических расчетах вместо коэффициента фильтрации применяют величину водопроводимости водоносного горизонта (водосодержащих пород), представляющую собой произведение km , где m — мощность горизонта. Но это уже не есть свойство, характеризующее водопроницаемость породы.

Оценивая водопроницаемость песчано-глинистых пород, нельзя пренебрегать исследованием гидравлического градиента фильтрации. Дело в том, что закон Дарси построен на линейной зависимости между скоростью фильтрации и гидравлическим градиентом, которая наблюдается в песках и трещиноватых породах. В глинистых породах эта зависимость нелинейна (рис. 18); для практических расчетов (спрямляя ее) можно записать закон Дарси в виде $v_F = k(I - I_0)$, где I_0 — отрезок на оси I , называемый начальным градиентом фильтрации. Этот показатель следует рассматривать как характеристику водного свойства глинистых пород, отражающую специфику фильтрационного процесса в них и имеющую громадное практическое зна-

чение при решении задач их уплотнения (консолидации). Для пород разного состава и различной степени уплотнения начальный градиент составляет величину от 1—2 до 20—30.

Газопроницаемость горных пород, оцениваемая коэффициентом проницаемости K_p , оказывает влияние на характер и масштабы мероприятий по дегазации угольных шахт и дренированию подземных вод. Движение газов в виде эфузии происходит через поры, трещины и другие пустоты в горных породах или диффузионно в растворенном виде в подземных водах (или других жидкостях). Последнее имеет место в водонасыщенных породах. Плотные песчаники, монолитные кристаллические породы и плотные глины обычно газонепроницаемы (газоупорны).

2.5. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, МАГНИТНЫЕ И РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Теплофизические свойства горных пород необходимо знать при изучении тепловых процессов в них. Чаще всего такое изучение проводится при проектировании и строительстве сооружений в зоне многолетнемерзлых пород, при разработке месторождений на больших глубинах, исследованиях теплового режима земной коры и др.

Содержание льда в мерзлых породах характеризуется относительной льдистостью $i_l = q_l/q_v = (W - W_{nз})/W$, где q_l и q_v — массы льда и всех видов воды; W и $W_{nз}$ — влажность породы и влажность за счет незамерзшей воды; $W_{nз} = KW_p$; W_p — предел пластичности; K — коэффициент, зависящий от вида породы, ее пластичности и температуры.

Степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой определяется из выражения

$$G = \frac{1,1W_l + W_{nз}}{e_{p_v}} \rho_m,$$

где $W_{nз} = W - W_{nз}$ — влажность за счет содержания льда.

Основные показатели теплофизических свойств — удельная теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, температурный коэффициент линейного расширения.

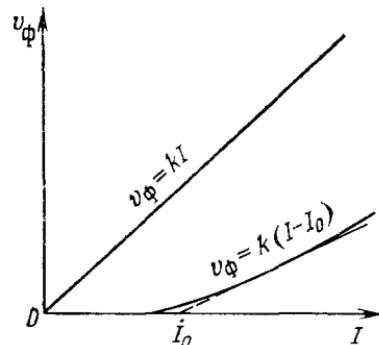


Рис. 18. Зависимости скорости фильтрации от гидравлического градиента

Теплоемкость представляет собой количество тепла, расходуемое на увеличение температуры породы на 1 °С. Ее определяют путем сравнения скорости охлаждения двух материалов (образца и металла цилиндра) в лабораторных условиях. Для этого на образец изучаемой породы надевают тонкостенный металлический цилиндр.

Коэффициент теплопроводности — это количество тепла в Джоулях, необходимое для изменения температуры на 1 °С объема породы в 1 м³ (сечением 1 м² и высотой 1 м) в течение 1 ч. Определяется по данным термокаротажа скважин, или в лабораторных условиях по скорости охлаждения. В практике чаще используют величину, обратную этому коэффициенту, и называют ее удельным тепловым сопротивлением, которым характеризуют сопротивление пород передаче тепла.

Коэффициент температуропроводности (в м²/с) характеризует скорость изменения температуры в породе. Он представляет собой отношение коэффициента теплопроводности к произведению удельной теплоемкости на плотность породы при постоянном давлении. Используется для изучения поведения горных пород при нестационарных тепловых процессах.

Коэффициенты линейного и объемного теплового расширения пород — основные теплофизические характеристики. Они служат для оценки способности пород трансформировать тепловую энергию в механическую.

Теплофизические свойства пород зависят от их состава, влажности, плотности. Некоторые данные о них приведены в табл. 16.

Электрические свойства горных пород используются при изучении месторождений полезных ископаемых геофизическими методами, при выделении зон распространения многолетнемерз-

Таблица 16. Теплофизические свойства некоторых горных пород (по В. Н. Дакцову и Д. И. Дьяконову)

Наименование пород	Удельная теплоемкость, кДж/кг	Коэффициент теплопроводности, Вт/м	Коэффициент температуропроводности, м ² /с
Гранит	0,34—0,79	2,4—3,65	2200—2700
Диорит	0,70	2,2—2,4	4400
Диабаз	0,70	2,2	3900
Габбро	0,70	1,97	2800—4800
Мрамор	0,80	3,0—3,7	5500
Песчаник плотный	0,81	1,28—3,0	5000
Известняк	0,67—1,04	0,81—2,2	1800—4330
Глинистый сланец	0,75	1,5—2,2	3500
Глина	—	1,0	—
Песок сухой	0,80	0,39	—
Песок влажный	—	3,4	—

лых пород, для изучения процессов промерзания и оттаивания в песчано-глинистых породах и т. д. Наибольшее распространение в инженерной геологии получило изучение электропроводности горных пород как способности их пропускать электрический ток.

Показатель электропроводности — *удельное электрическое сопротивление* (в Ом·м) — электрическое сопротивление образца породы кубической формы с сечением в 1 м² и высотой 1 м. Величина, обратная этому показателю, называется *проводимостью*. Определение электрического сопротивления пород производится по результатам каротажа буровых скважин или в лабораторных условиях двух- и четырехэлектродным методом. Пропуская через образец ток силой I и наблюдая за падением напряжения ΔU между двумя экви-потенциальными сечениями, расположенными в средней части опытного образца, определяют удельное сопротивление по формуле:

$$R_{уд} = K \frac{\Delta U}{I},$$

где $K = \frac{\pi d^2}{4l}$ для образца цилиндрической формы и $K = \frac{ab}{l}$ для призматического образца; l — расстояние между центрами электродов; d — диаметр цилиндрического образца; a и b — размеры сторон сечения призматического образца.

Удельное электрическое сопротивление изменяется в широких пределах для пород одного литологического состава и зависит от влажности, плотности, концентрации и состава порового раствора, температуры и т. д. Так, для глин оно составляет 0,5—10, для водонасыщенного песка — 10—100, а для песчаника и известняка от 30—50 до 10⁵ Ом·м. Магматические и метаморфические породы обладают еще более высоким сопротивлением.

Магнитные свойства пород оцениваются показателем относительной магнитной проницаемости μ , которая представляет собой отношение абсолютной магнитной проницаемости μ_a и магнитной постоянной μ_0 , т. е.

$$\mu = \mu_a / \mu_0,$$

где $\mu_a = B/u$; B — магнитная индукция поля; u — напряженность поля; в вакууме $\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м.

Все породы обладают магнитными свойствами, которые обусловливаются наличием парамагнетиков (минералов, у которых атомы обладают магнитным моментом при отсутствии внешнего поля) и ферромагнитных соединений (магнетит, пирротин, гематит и др.).

Радиационные свойства горных пород оцениваются величиной удельной радиоактивности, которая представляет собой

количество распадающихся в одну секунду атомов в 1 кг вещества. Ее определяют по интенсивности излучения горных пород с помощью радиометров, сцинтилляционных анализаторов и других специальных приборов.

Естественная радиоактивность пород связана с наличием в них минералов, содержащих радиоактивные элементы (уран, радий, торий) или радиоактивные изотопы калия, кальция, олова, вольфрама и др.

Изучение радиоактивности в горном деле применяется для определения границ радиоактивных рудных тел, для сортировки урановых руд, калийных солей, для обогащения угля (выборка пустой породы).

2.6. ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Комплекс признаков горных пород, рассмотренный выше (минеральный и гранулометрический состав, структурные связи, плотность, влажность, трещиноватость, выветреность, водоустойчивость, водопроницаемость), в своем взаимодействии и взаимообусловленности определяет поведение пород при силовых воздействиях, т. е. их механические свойства или прочность и деформируемость. Эти свойства определяют: крепость пород, их твердость, разрабатываемость, упругость, пластичность, несущую способность, сжимаемость, реологические особенности, которые характеризуют в основном условия проходки и устойчивости горных выработок (строительства и эксплуатации сооружений). Оценка механических свойств сопряжена с двумя сложными проблемами — учет масштабов и характера напряженного состояния, в котором происходит их нагружение, а также их природная (или приобретенная в техногенных условиях) неоднородность и анизотропность, определяющие так называемый масштабный эффект. Л. И. Барон в 1977 г. в качестве показателя масштабного эффекта предложил отношение R_c/R_c' , где R_c и R_c' — сопротивления сжатию образца стандартных и бесконечно больших размеров.

При рассмотрении практических задач удобно воспользоваться оценкой неоднородности пород разных порядков, предложенной М. В. Рацем в 1974 г. Он выделил четыре порядка.

I. Неоднородность массива пород, вызванная наличием различных по составу, структуре и текстуре пород, тектонических нарушений, зон выветривания.

II. Неоднородность в пределах слоя, пачки, вызванная переслаиванием пород разной литологии, трещиноватости, мелкоамплитудных тектонических нарушений.

III. Неоднородность породы, определяющаяся неоднородностью минерального и гранулометрического состава и структуры, цемента и пористости, наличием микротрещиноватости.

IV. Неоднородность, связанная с дефектами кристаллической решетки и неоднородностью кристаллов.

Оценивая поведение горных пород при их взаимодействии с горными работами и сооружениями, мы встречаемся преимущественно с II и III порядками неоднородности. Порядок III выявляется разбросом результатов экспериментальных исследований в лаборатории на стандартных образцах, а II — при проведении оценки механических свойств и водопроницаемости полевыми (натурными) опытами, крупномасштабными экспериментами (принудительное обрушение больших объемов пород, опытные откачки, промышленное водопонижение и др.). Порядок I неоднородности представляет интерес при решении задач, связанных с оценкой обрушаемости основной кровли очистных выработок, устойчивости бортов карьеров и других крупных сооружений. Изучение свойств пород с учетом этой неоднородности представляет значительные трудности.

Предлагаемая классификация неоднородностей имеет реальную основу, поскольку рассматриваются природные особенности, существующие в горных породах и представляющие интерес для их изучения с разной степенью детальности. Однако изучение и оценка горных пород с инженерно-геологической точки зрения всегда привязано к определенной задаче, поэтому неоднородность приобретает относительный характер, т. е. одно и то же пространство может рассматриваться однородным или неоднородным, в зависимости от масштаба внешнего воздействия. На это обстоятельство обращали внимание многие специалисты в области инженерной геологии и механики горных пород. Обратимся и мы к нему, исходя из задач, решаемых при проведении горных работ.

Как уже отмечалось, область взаимодействия горных пород с горными работами (в широком понятии) характеризуется разными размерами, в среднем от нескольких кубических сантиметров (шпуры и скважины) до 0,2—0,5 км³. В связи с этим остро встает проблема оценки и прогноза механических свойств горных пород с учетом их природной неоднородности и размерами того пространства, в пределах которого происходит их взаимодействие с внешней (технологической) средой. Это пространство носит различные названия: сферы влияния (взаимодействия) сооружения, определяющей области, горного массива, инженерно-геологической зоны и др.

Если объем однородного геологического пространства, в пределах которого среднее значение исследуемого показателя (прочности, деформируемости, водопроницаемости) не зависит от местоположения его определения, обозначить через V_b (чаще всего это блочность в трещиноватых породах), а область (сферу) взаимодействия — через V_v , то можно рассматривать три основных случая:

а) $V_b \geq V_b$ (скважины, шпуры, небольшие фундаменты механизмов и машин), когда изучение и оценку механических свойств можно производить на однородных опытных телах стандартных размеров и обычно в лабораторных условиях (определение прочности на одноосное сжатие под прессом в шахте не означает изучение в полевых условиях *in situ*); б) $V_b \ll V_b$ (борта карьеров, основная кровля очистных выработок, массив пород вокруг шахтного ствола, основание отвалов и других крупных сооружений), когда горные породы могут изучаться как квазиоднородная среда (трещиноватые породы как квазисыпучая среда); в) $V_b < V_b$ (откосы уступов, непосредственные кровли и почва капитальных и подготовительных выработок, транспортные магистрали, площадки крупных механизмов, экскаваторов, комбайнов) — наиболее часто встречаемый случай и наиболее сложная задача оценки механических свойств горных пород, так как их количественные показатели зависят от величины отношения V_b/V_b , а следовательно являются непостоянными даже для пород с постоянной степенью неоднородности.

Исходя из желания показать однородность горных пород с учетом уровня ее рассмотрения или иначе, сравнивая ее порядок с размерами области взаимодействия и учитывая построения Я. Б. Фридмана, М. В. Раца и В. Д. Ломтадзе, можно представить все изложенное здесь в виде диаграммы, приведенной на рис. 19. На ней под углом 45° проведена линия соответствия, отвечающая условию $V_b = V_b$, которая разделяет поле диаграммы на две части: верхнюю, характеризующую неоднородную геологическую среду, и нижнюю — однородную. Но в неоднородной половине можно выделить ту часть, которая отвечает условию $V_b \ll V_b$ и поэтому представляет собой практически квазиоднородную.

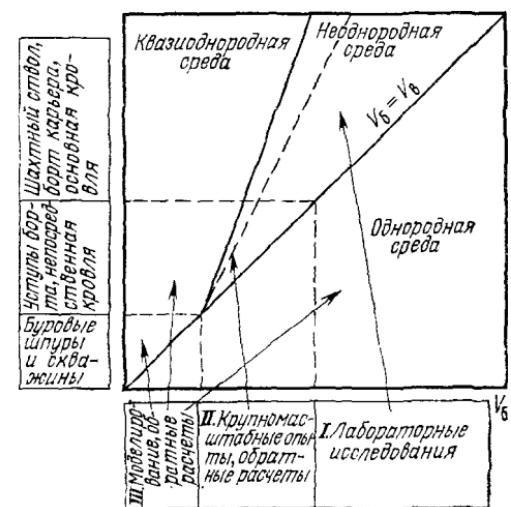


Рис. 19. Диаграмма неоднородности:
I—III — рекомендуемые методы исследования; по вертикали — характерные сооружения

Оценка прочности пород в разных зонах диаграммы (см. рис. 19), если исходить из условий их работы в области взаимодействия, отвечающей условию $V_b = V_b$, которая разделяет поле диаграммы на две части: верхнюю, характеризующую неоднородную геологическую среду, и нижнюю — однородную. Но в неоднородной половине можно выделить ту часть, которая отвечает условию $V_b \ll V_b$ и поэтому представляет собой практически квазиоднородную.

Оценка прочности пород в разных зонах диаграммы (см. рис. 19), если исходить из условий их работы в области взаимодействия, отвечающей условию $V_b = V_b$, которая разделяет поле диаграммы на две части: верхнюю, характеризующую неоднородную геологическую среду, и нижнюю — однородную. Но в неоднородной половине можно выделить ту часть, которая отвечает условию $V_b \ll V_b$ и поэтому представляет собой практически квазиоднородную.

вия, может выполняться разными методами. Для условий $V_b \leq V_6$ — лабораторными экспериментами на стандартных образцах; по результатам этих же экспериментов или подобным им можно охарактеризовать квазиоднородную зону. В неоднородных породах в зависимости от отношения V_b/V_6 необходимо сочетание лабораторных исследований, крупномасштабных экспериментов в горных выработках, моделирования на эквивалентных материалах, обратных расчетов по наблюдениям за обрушениями пород при выполнении горных работ.

Прочность горных пород. Способность пород сопротивляться разрушению под действием давления характеризует их прочность. Пределом прочности принято называть напряжение при котором происходит разрушение породы.

Для решения большинства задач горной практики породы характеризуются пределами прочности при сжатии, растяжении, сдвиге (резце), изгибе. Часто возникает необходимость определения твердости, дробимости, абразивности, сопротивления резанию и др.

Прочность на одноосное сжатие определяется на образцах правильной цилиндрической или призматической формы, у которых диаметр (или сторона) сечения равен высоте и в соответствии с рекомендациями Международного бюро по механике горных пород должен составлять $d = 42 \pm 3$ мм. (В соответствии с новыми рекомендациями Международного бюро отношение h/d должно равняться 2,5). В этом случае величина прочности, $\text{Н}/\text{м}^2$ (Па) вычисляется как

$$R_c = p/S,$$

где p — давление разрушения; S — площадь поперечного сечения, на которое действует p .

При отличии от стандартного отношения высоты к диаметру можно использовать формулу

$$R_c = \frac{9p}{s \left(7 + \frac{2d}{h} \right)}.$$

При разведке месторождения допускается определение прочности на сжатие на образцах неправильной формы, а также методом соосных пуансонов.

Сопротивление разрыву, $\text{Н}/\text{м}^2$ (Па) определяют на цилиндрических стандартных образцах методом диаметрального сжатия, а расчет производят по формуле

$$R_p = \frac{0,637p}{hd},$$

где p — разрушающая нагрузка, Н.

Существует еще ряд методов для определения R_c и R_p , которые излагаются в соответствующих «Указаниях...», «Методиках», учебных пособиях. Там же рассматриваются способы обработки результатов испытаний. Опытами установлено, что отношение R_c/R_p для пород с $R_c=20 \div 100$ МПа изменяется от 6 до 9. Для осадочных пород выявлены зависимости вида $R_p=0,15+0,1R_c$ (Г. Л. Фисенко) и $R_p=1,42+0,093R_c$ (Л. И. Барон).

Прочность на одноосное сжатие — основная характеристика для оценки скальных и полускальных пород как в период разведки месторождения, так и во время его эксплуатации. Значение ее меняется в широких пределах в зависимости от ряда факторов, о которых речь шла ранее.

На формирование прочности осадочных пород большое влияние оказывает степень их литификации. Особый интерес в этом отношении представляют результаты специальных исследований С. И. Малинина, В. Л. Свержевского, Б. П. Овчаренко и других на угольных месторождениях Донбасса. При этом особое внимание обращается на глубину залегания пород и на те вторичные процессы, которые протекают на стадии между диагенезом и начальным метаморфизмом. Особенности формирования свойств рассматриваются в соответствии с изменением марочного состава углей как наиболее явно выраженного критерия их метаморфизма. По результатам выполненных исследований в Донбассе установлены закономерности между механическими свойствами пород, глубиной их залегания и степенью метаморфизма углей, которые в краткой форме приводятся в табл. 17.

Слабая степень метаморфизма характерна для пород, залегающих на глубинах 450—550 м, средняя — 550—650 м и вы-

Таблица 17. Изменение прочности на сжатие углевмещающих пород Донбасса в зависимости от степени метаморфизма углей

Исследуемые породы	Степень метаморфизма	Марка углей	Прочность на одноосное сжатие, МПа
Аргиллиты	Слабая	Д, Г	28—35
	Средняя	Ж, К	43—41
	Высокая	ОС, Т, ПА, А	49—55
Алевролиты	Слабая	Д, Г	44—53
	Средняя	Ж, К	62—56
	Высокая	ОС, Т, ПА, А	64—77
Песчаники	Слабая	Д, Г	43—54
	Средняя	Ж, К	84—101
	Высокая	ОС, Т, ПА, А	96—131

сокая — более 700 м. Поэтому изменение прочности оценивается и с глубиной. Для песчаников и алевролитов выявлена следующая зависимость

$$R_c = R_{co} + KH,$$

где R_{co} — некоторая начальная прочность, характерная для углей марки Д; K — угловой коэффициент прямой в координатах R_c/H .

Коэффициент корреляции имеет наиболее высокие значения (0,51—0,79) для алевролитов. Для аргиллитов не удалось выявить определенной зависимости между их прочностью и глубиной залегания.

Установление более тесных зависимостей между прочностью пород и физическим состоянием дает возможность судить о прочности по составу пород, их физическим свойствам, степени литификации, или по некоторым другим косвенным признакам, что особенно важно на ранних стадиях разведки месторождения.

Прочность пород при сдвиге (срезе) характеризуется, как известно, двумя показателями: коэффициентом внутреннего трения и сцеплением, которые входят в уравнение прочности Кулона — Мора. Эти показатели используются в расчетах устойчи-

Рис. 20. Схема определения прочности в условиях объемного напряженного состояния:

1 — опытный образец; 2 — камера

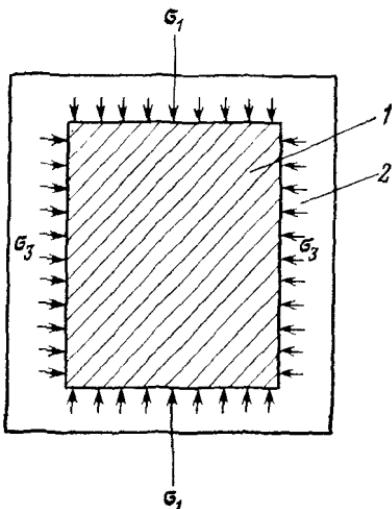
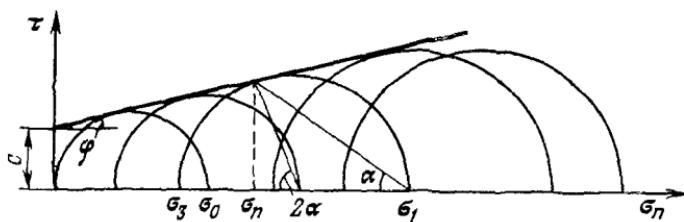


Рис. 21. Диаграмма сдвиговой прочности



вости сооружений, поэтому изучение их представляет особый интерес. Наиболее удовлетворительные результаты показывают испытания в условиях объемного напряженного состояния (рис. 20), которые проводят в специальных камерах-стабилометрах, позволяющих создавать независимо все три главные напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 или боковое $\sigma_2 = \sigma_3$ и σ_1 . На практике делают серию опытов и по ним, используя теорию Мора, вычерчивают диаграмму сдвиговой прочности, как огибающую полуокружностей, построенных на разности $\sigma_1 - \sigma_3$ как на диаметре. По этой диаграмме определяют показатели прочности ϕ и c (рис. 21).

Для практических расчетов песчано-глинистые породы исследуются, как правило, в сдвиговых приборах с раздельным приложением нормальных (вертикальных) и касательных (горизонтальных) давлений (рис. 22, а), а скальные и полускальные — в специальных клиновых приборах с одновременной подачей нормальных и касательных давлений одной нагрузкой от пресса (рис. 22, б). По результатам этих опытов строят прочностные диаграммы сдвига в координатах τ/σ_n .

В общем виде зависимость $\tau = f(\sigma_n)$ — криволинейная, однако можно выбрать такой диапазон напряжений, в пределах которого результаты испытаний аппроксимируются прямой, от-

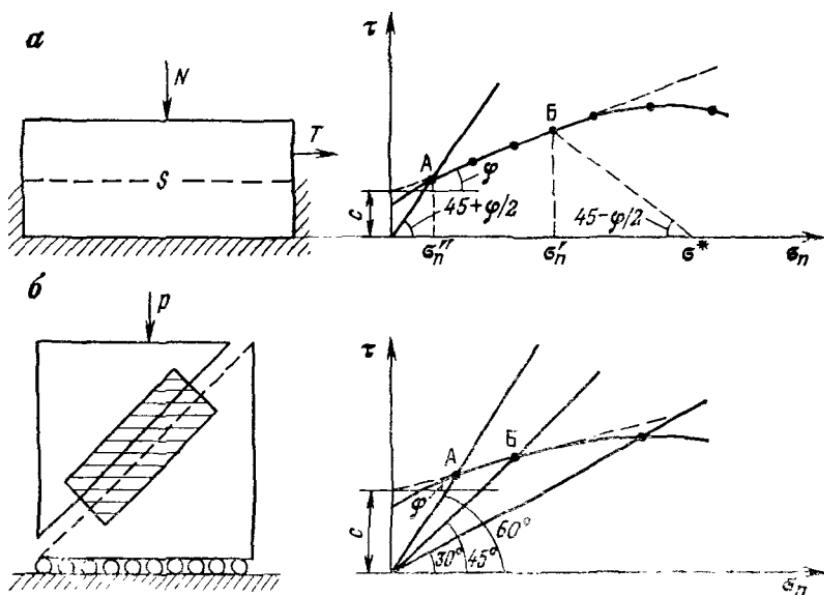


Рис. 22. Схема к определению сопротивления пород сдвигу в условиях плоского напряженного состояния и прочностные диаграммы при раздельной (а) и одновременной (б) подаче нормальных и касательных давлений

вечающей закону Кулона (см. на рис. 22, участок АБ). Для решения большинства задач горного производства необходимо знание прочности пород, соответствующей их природному состоянию, т. е. естественной (природной) прочности. Для определения параметров этой прочности при сдвиге необходимо сохранение природного состояния пород не только при отборе, но и во время испытания. Это потребует определения диапазона нормальных напряжений, в пределах которых зависимость $\tau = f(\sigma_n)$ является линейной и определенные на этом участке показатели ϕ и c характеризуют естественную прочность и имеют определенный физический смысл [9].

Максимальная величина нормального давления не должна превышать значения σ_n' , определенного из условия возникновения в образце максимального главного нормального напряжения по выражению:

$$\sigma_n' = \sigma^* (1 - \sin \phi) - c \cos \phi,$$

где σ^* — соответствует уплотняющему давлению или структурной прочности данной разновидности пород.

Минимальную величину нормального давления σ_n'' , при которой отсутствует деформация отрыва в опыте, уменьшающая сопротивление сдвигу, находят из выражения

$$\sigma_n'' = \frac{c}{\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) + \operatorname{tg} \phi}.$$

Величину угла внутреннего трения горных пород определяют главным образом по их петрографическому составу и структуре. Об этом можно судить по данным, приведенным в табл. 18. Сцепление пород зависит от ряда факторов, определяющих взаимодействие между отдельными минеральными частицами и обломками, т. е. от природы структурных связей. Максимальные значения характерны для магматических и метаморфических

Таблица 18. Показатели сцепления и трения для некоторых пород (по данным ВНИМИ)

Вид пород	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, градус	Вид пород	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, градус
Гранитоиды	22,0—42,5	37	Филлиты	15,2—30,0	27—35
Гранодиориты	18,0—56,0	32—36	Известняки	14,0—22,0	27—33
Габбро	18,0—30,0	35—36	Песчаники	5,0—17,0	27—36
Диабазы	7,0—46,0	30—37	Алевролиты	0,3—7,0	31—33
Кварциты	16,5—70,0	34—36	Аргиллиты	0,3—4,0	29
			Глины	0,05—0,4	9—25

ских пород, а минимальные — для глинистых. Здесь следует отметить, что сцепление позволяет произвести довольно четкое разделение горных пород на группы. Так, для скальных пород (I группа) сцепление составляет более 15, для полускальных (II группа) 15—5, для глинистых (III группа) 0,5—0,1 МПа.

На прочность пород большое влияние оказывает трещиноватость, слоистость и сланцеватость. Сопротивление по выдержанной трещине или контакту наслоения характеризуется практически только трением, поэтому здесь его можно определить испытанием на трение двух поверхностей и записать выражение

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \phi',$$

где ϕ' — трение по контакту двух поверхностей.

Большое число опытов, проведенных во ВНИМИ и других организациях, показывают, что если по исследуемым поверхностям не происходили изменения состава и состояния вмещающей породы, то угол трения по этим поверхностям равен углу внутреннего трения породы. Сопротивление сдвигу по трещинам большого протяжения или по другим ослабленным контактам зависит от степени и характера неровностей, а также от состава, состояния и мощности рыхлого заполнителя. Изучение сопротивления производится в лабораторных и полевых условиях по специальным методикам, разработанным во ВНИМИ, Институте горного дела имени А. А. Скочинского (ИГД), Всесоюзном научно-исследовательском институте гидротехники имени Б. Е. Веденеева (ВНИИГ), Всесоюзном ордена Ленина проектно-изыскательском и научно-исследовательском институте имени С. Я. Жука (Гидропроект) и др. Надежные данные о сопротивлении сдвигу по слабым контактам можно получить в ре-

Таблица 19. Значения углов трения по трещинам в разных породах

Наименование пород	Углы трения поверхностей разного характера, градус			
	неровные шероховатые	ровные шероховатые	неровные гладкие	ровные гладкие
Порфиры, роговики, джеспилиты, песчаники	28—31	24—28	22—27	20—26
Вторичные кварциты, гранодиориты, кварцевые порфиры, гранодиорит-порфиры, скарнированные породы, сенинты, диориты, алевролиты	25—28	22—25	20—23	17—20
Известняки, метаморфические сланцы, магнетиты	24—27	23—25	20—22	16—19
Глинистые сланцы, аргиллиты	23—25	21—23	18—20	15—18
Филлиты, талько-хлоритовые и сернитовые сланцы	23—25	20—22	13—15	9—12

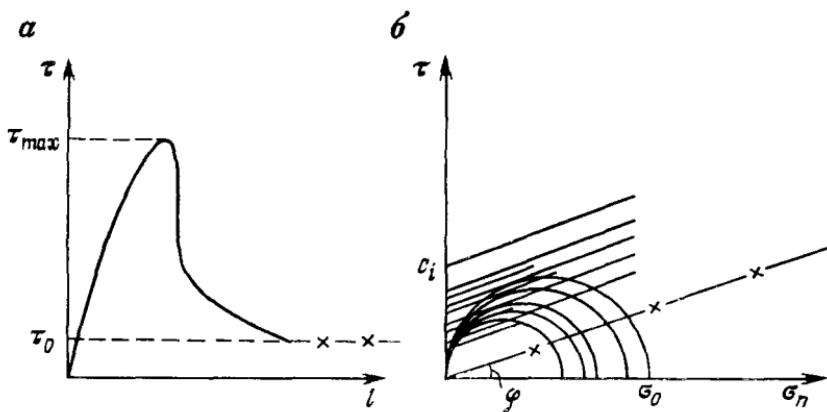


Рис. 23. К определению трения (а) и сцепления (б) микротрещиноватых пород:

— сдвиговая деформация

зультате обратных расчетов оползней, происходящих на уступах карьеров по поверхностям скольжения, совпадающим с природными ослаблениями (трещиной, наслоением, сланцеватостью, слабым слоем и др.). В табл. 19 приведены некоторые данные ВНИМИ об углах трения по трещинам.

В зависимости от характера трещиноватости ее влияние может быть обнаружено на различных по объему образцах. Микротрещиноватость оказывает влияние на прочность стандартных образцов, что заметно по большому разбросу результатов испытаний. При этом получаемый разброс величин сопротивления сдвигу по существующей методике его определения относится как к сцеплению, так и к углу внутреннего трения, так как $\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c$ и $R_c = 2c \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2)$.

Однако совершенно очевидно, что уменьшение прочности при нарушении сплошности породы связано с уменьшением сцепления, а не угла внутреннего трения. Поэтому для микротрещиноватых горных пород определение показателей прочности φ и c необходимо вести раздельно. Для этого угол трения определяют по результатам опытов по готовой поверхности или используя данные остаточного (установившего) сопротивления (рис. 23), а сцепление вычисляется по данным опытов, принимая постоянное значение угла внутреннего трения из выражения:

$$c_i = \tau_i - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi.$$

Для этой цели можно провести испытания при одном нормальном давлении в диапазоне прямолинейности зависимости $\tau = f(\sigma_n)$ или на одноосное сжатие, зная, что

$$c = \frac{R_c}{2} \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right).$$

Прочность трещиноватой горной породы, взаимодействующей с сооружениями, зависит от двух величин (без учета временного фактора): 1) прочности породы в образце; 2) отношения между средними размерами зоны, в пределах которой рассматриваются условия предельного равновесия породных блоков, ограниченных трещинами, т. е. масштабного фактора. Вращательное перемещение отдельных блоков пород при сдвиге в толще пород, кроме того, зависит от ориентации тензора напряжений, а также от изменения свойств пород от слоя к слою. Исследования ВНИМИ показали, что коэффициент структурного ослабления пород (отношение сцепления данной толщи пород к сцеплению в стандартном образце) λ_{co} может быть определен по следующей зависимости

$$\lambda_{co} = \frac{1}{1 + a \ln(H/l)},$$

где a — коэффициент, зависящий от характера трещиноватости и прочности блока породы (табл. 20); H — средний размер зоны деформации; l — средний размер блока, ограниченного трещинами. Коэффициент структурного ослабления, по данным ВНИМИ, изменяется от 0,7 для пород слаботрещиноватых и небольшой прочности в образце ($R_c=10$ МПа) до 0,01 для сильнотрещиноватых высокой прочности ($R_c=1000$ МПа).

Последние 20 лет изучение прочности трещиноватых пород проводилось во многих организациях на угольных и рудных месторождениях, что позволило уточнить влияние различных факторов и предложить формулы перехода от показателей, характеризующих монолитные породы к показателям прочности

Таблица 20. Значения коэффициента a (по данным ВНИМИ)

Характеристика пород	Сцепление в образце, МПа	Коэффициент a
Песчано-глинистые слабоуплотненные и слаботрещиноватые	0,4—0,9	0,5
Песчано-глинистые уплотненные с нормально секущей трещиноватостью; сильно выветрелые изверженные	5,0—8,0	2
Те же породы, но с преобладанием кососекущей трещиноватости	5,0—8,0	3
Прочные слонистые породы с нормально секущей трещиноватостью	10,0—15,0	3
	15,0—20,0	4
Прочные породы с нормально секущей трещиноватостью	20,0—30,0	6
	>30,0	7
Прочие изверженные породы с кососекущей трещиноватостью	>20,0	10

трещиноватого массива. Так, для определения сцепления c_m , Г. Л. Фисенко предложил выражение

$$c_m = c_t + (c_0 - c_t) / [1 + a \ln (H/l)],$$

где c_t и c_0 — сцепление по трещине и в монолитном образце.

А. Б. Фадеев в 1969 г., в результате моделирования в лабораторных условиях, получил зависимость между касательными и нормальными напряжениями в зоне сдвига шириной h

$$\tau = (l/h + \operatorname{tg} \alpha) \sigma,$$

где α — угол наклона между σ и направлением основной системы трещин.

Прочность трещиноватого угля на одноосное сжатие по исследованиям ВНИМИ составляет от 30 до 50 % от прочности образца кубической формы. Исследованиями ИГД и некоторых других организаций получены результаты, отличающиеся от приведенных здесь.

При оценке осадочных пород, окружающих горные выработки, необходимо учитывать совместную работу слоистой толщи, сложенной породами разной прочности и деформируемости. Опыты на моделях и наблюдения на оползневых участках показывают, что сопротивление всей деформирующейся толщи не представляет собой средневзвешенную величину сопротивлений слагающих ее пород [9]. Работы, проведенные в подземных выработках по оценке прочности слоистых целиков R_u высотой h_u , показали, что она зависит от прочности самой крепкой R_k и самой слабой R_c породы, а также от их мощностей h_k и h_c . Эта зависимость, предложенная Ф. П. Бубликом в 1966 г., имеет вид

$$R_u = R_k / [1 + (R_k / R_c - 1) (h_c / h_k)].$$

Р. Э. Дашко в 1973 г., изучая прочность на одноосное сжатие слоистых опытных образцов, состоящих из слоев горючего сланца и известняка, приводит следующую зависимость

$$R_{сл} = R_k e^{-1,25m},$$

где $R_{сл}$ и R_k — прочность слоистого образца и прочного слоя (известняка); m — относительная мощность слабого слоя в образце в долях единицы.

Совместное деформирование пород разной прочности определяет механизм, динамику и морфологию оползневых явлений, пучения почвы подземных выработок, сдвижение пород и т. д.

Для трещиноватых пород наиболее надежен метод обратных расчетов по наблюдениям за нарушением их устойчивости в склонах и откосах, котлованах, шахтах и др. При больших величинах H/l , которые разными авторами рекомендуются от 10 до 100, эти породы следует рассматривать как сыпучую среду (точнее квазисыпучую) и характеризовать только коэффициен-

том трения. К этой категории следует отнести и крупнообломочные отложения, а также отвалы из скальных и полускальных пород.

Слоистость горных пород, а также сланцеватость и трещиноватость формируют их анизотропию прочности и деформируемости. М. В. Рац предлагает различать четыре порядка анизотропии: I — связанная с наличием тектонических разрывных нарушений; II — вызываемая макрослоистостью толщи пород; III — петрографическая анизотропия, связанная с текстурой и микротрещиноватостью пород (обнаруживается в образцах при лабораторных испытаниях); IV — связанная со строением кристаллических решеток минералов, слагающих породу.

Наибольший практический интерес представляют II и III порядки анизотропии, а количественную оценку по существу получила анизотропия прочности только III порядка. Для этой оценки Л. И. Барон предлагает коэффициент относительной анизотропии, представляющий отношение прочностей, полученных на образцах разной ориентации. Для характеристики анизотропии прочности на одноосное сжатие можно записать

$$K_a = R_c^{\perp}/R_c^{\parallel},$$

где R_c^{\perp} и R_c^{\parallel} — прочность при нормальном и параллельном направлениях усилия к слоистости (сланцеватости).

Для различных осадочных пород (песчаники, сланцы, угли, алевролиты, аргиллиты) K_a составляет 1,2—1,6. Разными значениями K_a характеризуется анизотропия при растяжении, сдвиге, изгибе, резании, истирании.

Кроме того, прочность пород при решении задач горного дела характеризуется следующими показателями.

1. Коэффициент крепости М. М. Протодьяконова, который принимается равным 0,01 R_c . Л. И. Барон предлагает для определения коэффициента крепости f_k формулу

$$f_k = \frac{R_c}{100} + \frac{\sqrt{R_c}}{30}.$$

2. Твердость или контактная прочность, определяемая по величине нагрузки на штамп, вызывающей крупный выкол породы под ним ($p_k = KR_c$, где $K = 5—20$).

3. Истираемость или абразивность, которая оценивается по износу материала, контактирующего с породой при помощи коэффициента абразивности $K_{ab} = \frac{\Delta V}{F}$ (ΔV — объем износа материала на 1 м пути, F — сила, с которой материал прижимается к породе).

4. Сопротивление пород резанию — усилие, приходящееся на единицу длины режущего инструмента, необходимое для среза породы.

5. Буримость — сопротивление породы разрушению буровым инструментом, которое оценивается по длине шпура (скважины), пройденных за 1 мин и некоторые другие показатели, которые применяются при рассмотрении процессов разработки горных пород и полезных ископаемых [22].

Большой интерес иногда представляют такие слабые разновидности, отбор образцов из которых практически невозможен без нарушения их сложения. К ним следует отнести слабые основания отвалов, материал шламохранилищ, закладки, гидроотвалов, намывных сооружений и др. Для определения прочности здесь необходимо проводить полевые испытания методами вращательного среза, прессометрии, зондирования, которые получили широкое распространение в инженерной геологии.

Деформируемость горных пород. Деформации горных пород под силовым воздействием имеют разную природу и оцениваются различными показателями. Для скальных монолитных пород характерно преобладание упругих деформаций, а для глинистых — остаточных (пластичных). О характере деформаций можно судить по кривой зависимости между напряжениями и деформациями при испытании пород в условиях одноосного сжатия (рис. 24).

Упругие деформации характеризуются статическим и динамическим модулем упругости, модулем сдвига и коэффициентом поперечных деформаций (Пуассона). Статический модуль упругости (продольный) E , $\text{Н}/\text{м}^2$ (Па) определяют на образцах цилиндрической или призматической формы диаметром (стороной сечения) 40—43 мм и отношением $h/d=2$ статическом нагружении и напряжениях меньших предела упругости (прямолинейности зависимости $\epsilon=f(\sigma)$) из известного закона Гука:

$$E = \sigma/\epsilon,$$

где ϵ — относительная продольная деформация.

Динамический модуль упругости определяют по скорости распространения упругих колебаний, возбуждаемых в образцах пород в диапазоне звуковых и ультразвуковых частот. Чаще применяют импульсный метод, который заключается в замере скоростей распространения повторяющихся импульсов ультразвуковых колебаний при прозвучивании или продольном профилировании образцов пород. При этом определяют скорости

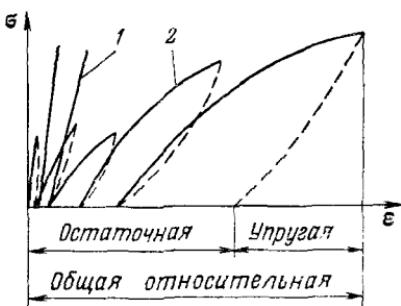


Рис. 24. Деформационные кривые с разгрузкой при одноосном сжатии для пород с преобладанием упругих (1) и остаточных деформаций (2)

продольных v_p , поперечных v_s и поверхностных v_R волн ($v_p > v_s > v_R$). Из физики известно, что

$$v_p = \sqrt{\frac{E_d}{\gamma} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}; \quad \frac{v_p}{v_s} = \sqrt{2 \frac{1-\mu}{1-2\mu}};$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\gamma(1+\mu)}}.$$

Определяя по специальным номограммам коэффициент поперечных деформаций $\mu = f\left(\frac{v_p}{v_s}\right)$, вычисляют модуль продольной упругости E_d из выражения

$$E_d = v_p^2 \gamma \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu}.$$

В. Н. Никитин, исследуя зависимость между динамическим E_d и статическим E_{ct} , Па модулями упругости большого разнобразия скальных пород, вывел следующее уравнение регрессии:

$$E_d = 0,88 \div 0,97 E_{ct}.$$

В табл. 21 приводятся данные статических и динамических модулей упругости наиболее распространенных пород по В. В. Ржевскому и Г. Я. Новику, которые показывают иные отношения.

Произведение плотности породы на скорость распространения волны носит название акустической жесткости (сопротивления) q , т. е.

$$q = \rho v.$$

Коэффициент поперечных деформаций (Пуассона) представляет собой отношение между относительными поперечными и продольными деформациями $\mu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z}$ при одноосном сжатии. При статических испытаниях он определяется по результатам непо-

Таблица 21. Статические и динамические модули упругости [22]

Название породы	Модуль упругости, Па		E_d/E_{ct}
	$E_{ct} \cdot 10^{10}$	$E_d \cdot 10^{10}$	
Базальт	4,4	7,8	1,8
Гранит	7,1	7,6	1,1
Кварцит	6,7	8,8	—
Известняк	2,3	5,6	2,5
Песчаник кварцевый	4,5	8,6	1,9
Доломит	5,1	5,3	1,04

средственных замеров поперечных и продольных деформаций и изменяется для различных пород от 0,1 до 0,5. По значениям μ можно судить о боковом распоре в породах, так как

$$\xi = \frac{\mu}{1 - \mu}.$$

При максимальном значении $\mu = 0,5$ распределение напряжений происходит по законам гидростатики, т. е. $\sigma_z = \sigma_y = \sigma_x$. Коэффициент бокового распора можно определить замером при отсутствии боковой деформации.

Модуль сдвига представляет собой коэффициент пропорциональности между касательным напряжением τ и соответствующей ему деформацией сдвига Δ , т. е.

$$G = \tau / \Delta \quad (\Delta \text{ в радианах}).$$

Между модулями линейной упругости и сдвига существует следующая зависимость

$$E = 2G(1 + \mu).$$

В условиях всестороннего сжатия величины относительных деформаций по трем взаимоперпендикулярным осям пространства имеют следующие значения:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y)]; \quad \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu (\sigma_z + \sigma_y)];$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu (\sigma_z + \sigma_x)].$$

Относительная объемная деформация $\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_z + \varepsilon_x + \varepsilon_y = \frac{1 - 2\mu}{E} (\sigma_z + \sigma_x + \sigma_y)$, а следовательно модуль объемного сжатия E_V связан с модулем линейной упругости выражением

$$E_V = E/3(1 - 2\mu).$$

Деформации пород при оценке их взаимодействия с крепью подземных сооружений может быть охарактеризована еще коэффициентом упругого отпора K'_{yo} , определяемый как

$$K'_{yo} = \frac{p}{\Delta l},$$

где p — удельная нагрузка на крепь; Δl — перемещение крепи.

Коэффициент упругого отпора можно определить по данным испытаний, т. е.

$$K_{yo} = \frac{E}{(1 + \mu)r} \quad \text{или} \quad K_{yo} = 50af_k,$$

где r — радиус подземной выработки; f_k — коэффициент крепости; a — коэффициент, учитывающий трещиноватость ($a=0,8-1,2$).

По характеру деформирования скальные и полускальные породы существенно отличаются. Если у скальных пород преобладают упругие деформации и деформирование их заканчивается хрупким разрушением, то у полускальных они имеют подчиненное значение. Основное место у них занимают пластические (остаточные) деформации, которые развиваются во времени с разной скоростью и приводят к хрупкопластическому или пластическому разрушению. Такой характер деформирования полускальных пород обусловлен природой их структурных связей и наличием различных дефектов строения (трещин, полостей, неоднородности цемента и др.). В связи с этим, полускальные породы характеризуются модулем общих деформаций, который для одной и той же породы представляет собой переменную величину, зависящую от диапазона напряжений, скорости загружения и развития деформаций, т. е.

$$E_o = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon},$$

где $\Delta\sigma$ и $\Delta\varepsilon$ — диапазон действующего напряжения и соответствующая ему относительная деформация.

Для оценки характера деформаций горных пород используют коэффициенты хрупкости K_{xp} и пластичности K_{pl} ($K_{pl} = \frac{1}{K_{xp}}$). Коэффициент хрупкости представляет собой отношение работы, затраченной на деформирование до предела упругости к полной работе, затраченной на разрушение образца. Для наиболее крепких скальных пород $K_{xp} \approx 1,0$, а для полускальных он изменяется от 0,5 до 0,01.

При проходке горных выработок во взаимодействие с ними приходят значительные объемы горных пород, в пределах которых имеется много нарушений, которые приводят к остаточным деформациям. Поэтому для решения практических задач необходимо характеризовать эти породы модулем общих деформаций.

Особо следует отметить анизотропию деформируемости пород, которая имеет важное значение при изучении слоистых осадочных пород. Обычно говорят о ортотропности деформационных свойств, т. е. параллельно E_{\parallel} и перпендикулярно E_{\perp} слоистости. В табл. 22 приводятся данные, характеризующие анизотропию пород по В. В. Ржевскому и Г. Я. Новику [22].

Так как $E_{\perp} = \sum_i^n \frac{E_i}{V_i}$, а $E_{\parallel} = \sum_i^n E_i V_i$, где E_i и V_i — модуль

Таблица 22. Характерные данные анизотропии деформируемости

Название пород	Модуль упругости, Па		E_{\parallel}/E_{\perp}	Коэффициент Пуассона		$\mu_{\parallel}/\mu_{\perp}$
	$E_{\parallel} \cdot 10^{10}$	$E_{\perp} \cdot 10^{10}$		μ_{\parallel}	μ_{\perp}	
Алевролит	2,7	1,7	1,6	0,25	0,29	0,86
Известняк	8,4	7,3	1,15	0,28	0,3	0,93
Антрацит	0,4	0,5	0,8	—	0,13	—

упругости и относительный объем i -того слоя, то теоретически всегда $E_{\parallel} > E_{\perp}$.

Определение модуля общих деформаций в трещиноватых и слоистых породах производится в полевых условиях с помощью специальных устройств, позволяющих загружать значительные площади (более 1 м²) и создавать большие сжимающие нагрузки.

В песчано-глинистых и некоторых более слабых полускальных породах деформации происходят главным образом за счет уменьшения объема порового пространства, т. е. уплотнения, поэтому они носят пластический характер (остаточные деформации). Изучение уплотнения представляет большой интерес при оценке осадок различных сооружений, оседаний земной поверхности при откачках воды и нефти из недр земли. Деформируемость таких пород принято характеризовать показателями компрессионного сжатия (без бокового расширения). В результате испытания строится зависимость изменения пористости от приложенного давления $e=f(p)$ (рис. 25), которая называется компрессионной кривой и описывается сложной степенной функцией.

Построение компрессионной кривой ведется из следующих соображений. Уплотнение породы происходит только за счет уменьшения порового объема, поэтому если обозначить объем минеральной части через m , а поровой через n (рис. 25), то для исследуемой породы до и после сжатия можно записать

$$m_0 = \frac{h_0 F_0}{1 + e_0} \quad \text{и}$$

$$m_i = \frac{h_0 - \Delta h_i}{1 + e_i} F_0,$$

где h_0 , F_0 , e_0 — высота,

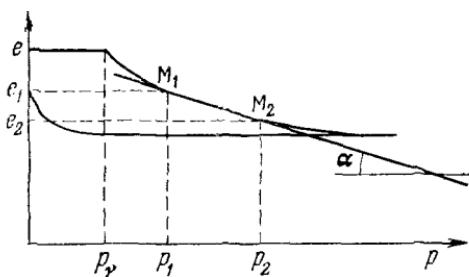


Рис. 25. Компрессионная кривая (с ветвью разгрузки) для глинистой горной породы, уплотненной в природных условиях давлением p_V

сечение и коэффициент пористости образца до опыта; Δh_i , e_i — уменьшение высоты образца и его коэффициент пористости после уплотнения от нагрузки.

Поскольку по условию $m_0 = m_i$, то

$$e_i = e_0 - \frac{\Delta h_i}{h_0} (1 + e_0).$$

Для упрощения условий использования компрессионной кривой на ней выделяют малый участок Δp , в пределах которого зависимость $e = f(p)$ принимается линейной (см. рис. 25). Для прямой, проходящей через точки M_1 и M_2 , можно написать уравнение в следующем виде

$$e_1 - e_2 = (p_2 - p_1) \operatorname{tg} \alpha.$$

Величина $\operatorname{tg} \alpha$, характеризующая количественно процесс, называется коэффициентом сжимаемости (уплотнения). Таким образом, коэффициент сжимаемости, МПа^{-1} равен отношению изменения коэффициента пористости к величине действующего давления Δp , т. е.

$$a = \frac{e_1 - e_2}{p_1 - p_2}.$$

Это выражение известно как основной закон уплотнения и более строго записывается в дифференциальной форме как

$$de = -adp.$$

Закон формулируется следующим образом: бесконечно малое изменение коэффициента пористости пород прямо пропорционально бесконечно малому изменению давления.

По аналогии с законом Гука можно написать выражение для определения модуля деформации при компрессии E_k , если принять для прямолинейного участка

$$\frac{\Delta h_i}{h_0} = \varepsilon_k = \frac{e_0 - e_i}{1 + e_0} = \frac{p_i}{E_k},$$

откуда

$$E_k = \frac{1 + e_0}{a}.$$

Переход к модулю общих деформаций осуществляется коэффициентом $\beta = 1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu}$ (который для глин составляет 0,43 и для песков 0,81) по выражению $E_o = \beta E_k$.

Это выражение получено из обобщенного закона Гука для объемного сжатия из предложения отсутствия боковых

деформаций (компрессионное сжатие), т. е. $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ и $\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z$ (в данном случае $\sigma_z = p$), а следовательно $E_o = \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}\right) E_k$.

По кривой разгрузки аналогичным образом определяют коэффициент разуплотнения a' в диапазоне разуплотнения Δp , на котором происходит увеличение коэффициента пористости на величину $\Delta e'$, т. е.

$$a' = \frac{\Delta e'}{\Delta p}.$$

Этот показатель используется для расчета величин деформаций дна и стенок выработок, пройденных в глинистых породах за счет их разуплотнения. Основная часть этих деформаций происходит в результате набухания при разгрузке и дополнительном увлажнении.

С ростом давления на породы наряду с уплотнением происходят изменения их объема за счет упругих деформаций минеральных частиц и порового флюида (жидкости и газа). Поэтому модуль деформации представляет собой показатель, отражающий упругие и остаточные деформации, зависящие от величин действующего давления, скорости загружения, продолжительности процесса уплотнения.

Для определения модуля деформации песчано-глинистых пород разного состава и состояния в условиях их естественного залегания в основаниях наземных сооружений, гидроотвалах, хвостохранилищах и на трассах рудничного транспорта проводят специальные полевые опыты методом пробных статических нагрузок или прессиометрии. Пробные нагрузки производят в горных выработках и буровых скважинах опытными штампами квадратной или круглой формы площадью 600—5000 см² и по их результатам модуль общих деформаций E_o определяется по формуле Шлейхера — Польшина:

$$E_o = (1 - \mu^2) d \frac{\Delta p}{\Delta S}.$$

Опыты с помощью прессиометров проводятся в скважинах, а модуль деформации определяется по формуле Лямэ:

$$E_o = (1 + \mu) r_0 \frac{\Delta p}{\Delta r},$$

где μ — коэффициент поперечных деформаций (Пуассона); Δp — диапазон давлений, для которого определяется E_o ; d — диаметр штампа; r_0 — радиус скважины; ΔS — величина осадки

штампа, соответствующая Δp ; Δr — увеличение радиуса скважины от давления Δp .

Деформационные свойства песчаных и глинистых пород следовательно зависят от их состава, строения и физического состояния, а также от величины и характера напряженного состояния. В современных СНиП для оснований зданий и сооружений значения модуля деформации для глинистых пород четвертичного возраста оцениваются в зависимости от их происхождения, гранулометрического состава, консистенции и пористости. Диапазон изменений этих значений составляет 5,0—75,0 МПа.

В горном деле чаще изучается, оценивается и прогнозируется уплотнение водонасыщенных глинистых пород, которое осуществляется за счет отжатия поровой жидкости. Если пренебречь сжимаемостью минеральных частиц и флюида, заполняющего поровое пространство, то величина уменьшения объема пород при сжатии равна величине объема отжатой жидкости. Таким образом, процесс уплотнения связан с фильтрацией порового флюида (чаще поровой воды), т. е. с водопроницаемостью уплотняемой породы. В связи с этим возникают три важных положения.

Во-первых, в водонасыщенных породах разной сжимаемости (плотности, прочности и водопроницаемости) прилагаемое давление уплотнения воспринимается частично минеральным скелетом (эта часть носит название эффективного давления) и частично поровой жидкостью, создавая в ней напор $H = \frac{\alpha p}{\rho_w g}$, где p — внешнее давление; ρ_w — плотность воды; g — ускорение свободного падения; α — коэффициент передачи давления на воду, изменяющийся от 0 до 1,0. Давление, возникающее в воде, называют поровым. Таким образом, под влиянием эффективного давления происходит уплотнение, а под влиянием напора — фильтрация. Процесс уплотнения во времени при постоянном внешнем давлении называют консолидацией.

Во-вторых, из известного закона Дарси (см. разд. 2.4), для глинистых пород имеет место выражение $v_\phi = k(I - I_0)$, из которого следует, что уплотнение возможно при определенном гидравлическом градиенте, при котором $v_\phi > 0$. Следовательно, уплотнение происходит не всегда при наличии уплотняющей нагрузки, а только тогда, когда возникающий напор $H = \frac{p}{\rho_w g}$ создает гидравлический градиент $I = H/l > I_0$, где l — длина пути отжимаемой воды из пор; при двусторонней фильтрации $l = m/4$, m — мощность слоя уплотняемой глины (рис. 26).

В-третьих, поскольку скорость фильтрации зависит от величины гидравлического градиента и водопроницаемости уплотняемой породы, то встает вопрос о продолжительности про-

цесса консолидации. Если предположить, что уплотнение происходит только за счет фильтрации, т. е. имеет место фильтрационная консолидация и что в момент приложения внешней нагрузки она целиком передается на поровую воду (именно такое предположение сделал известный ученый К. Терцаги в начале 20-х годов нашего столетия), то для условий компрессионного сжатия можно записатьное уравнение

$$\frac{\partial v_\Phi}{\partial \bar{h}} = - \frac{\partial e}{\partial t},$$

где v_ϕ — скорость фильтрации; $\bar{h} = h/(1+e)$ — приведенная мощность уплотняемого слоя породы; e — коэффициент пористости; t — время уплотнения.

Это означает, что приращение скорости фильтрации равно скорости уменьшения объема пор.

Но мы уже знаем, что

$$v_\Phi = -kI = -\bar{k} \frac{\partial H}{\partial \bar{h}}; \quad \bar{k} = \frac{k}{1+e}; \quad \partial e = -\partial p a,$$

откуда после дифференцирования по t и \bar{h} следует, что

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -a \frac{\partial p_{ef}}{\partial t} = -a \gamma_B \frac{\partial H}{\partial t}; \quad \gamma_B = \rho_B g; \quad \frac{\partial v_\Phi}{\partial h} = -\bar{k} \frac{\partial^2 H}{\partial h^2},$$

где p_{ef} — эффективное давление.

Тогда можно записать:

$$\bar{k} \frac{\partial^2 H}{\partial \bar{h}^2} = a \gamma_b \frac{\partial H}{\partial t}$$

или, обозначив $K(1+e)/a\gamma_b = C_V$, получим

$$C_V \frac{\partial^2 H}{\partial h^2} = -\frac{\partial H}{\partial t},$$

где C_v — коэффициент консолидации, $\text{см}^2/\text{с}$ (в строительной практике $\text{см}^2/\text{год}$).

В результате решения этого дифференциального уравнения [8] находят выражение для определения продолжительности

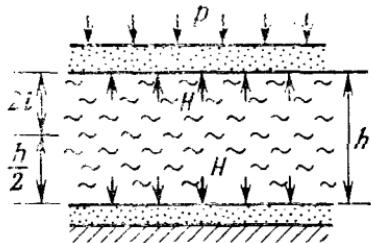


Рис. 26. Схема к объяснению уплотнения пористых пород

следующее дифференциаль-

уплотнения (консолидации) слоя глинистой породы мощностью h в виде

$$t = \frac{T_V h^3}{\pi^2 C_V},$$

где T_V — фактор времени, безразмерная величина, равная 2,80 при 95 % консолидации и двусторонней фильтрации поровой воды и 0,7 при односторонней фильтрации.

Современные исследования закономерностей консолидации глинистых пород показывают более сложный характер этого процесса. Большую роль в нем играют реологические особенности пород и, в частности, ползучесть минерального скелета, в связи с чем выделяют первичную (фильтрационную) и вторичную (за счет ползучести) консолидацию.

2.7. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Реологические свойства горных пород проявляются в виде ползучести (деформация во времени при постоянном напряжении) релаксации (падение напряжений при постоянной деформации) и длительной прочности (уменьшение прочности в результате ползучести). Реологические процессы наблюдаются в склонах и откосах, в подземных выработках (потеря устойчивости кровли или почвы со временем, увеличение давления на крепь, оседание земной поверхности, сдвижение), в вечномерзлых породах при повышении температуры, а также при складкообразовании и других деформациях горных пород. Эти процессы имеют неодинаковое значение в различных горных породах. Наибольшую склонность к ползучести проявляют глинистые, а наименьшую — скальные (интрузивные) породы. Однако во многом реологические процессы в породах (как, впрочем, и в других материалах) определяются напряженно-деформированным состоянием.

Механизм деформирования и длительного разрушения горных пород весьма сложен и не до конца изучен. Существует ряд гипотез и построений, которые приводятся в специальной литературе. Исходя из большого числа опытов в лабораторных условиях и наблюдений за деформациями различных сооружений, можно признать наиболее удачным представление С. С. Вялова. В основе процесса ползучести пород он видит два противоположных эффекта — упрочнение и разупрочнение, которые связаны с концентрацией напряжений в некоторых участках рассматриваемого сечения, что приводит к их разрушению. Такими участками в различных породах могут оказаться, по всей видимости, монолитные зоны в ослабленной трещинами скальной породе, или зоны повышенной прочности за счет цемента-

ции в песчано-глинистых отложениях, а также за счет льда в вечномерзлых породах.

В дальнейшем, опять же в зависимости от характера пород и от напряженного состояния, может происходить более плотная упаковка, «заличивание» пустот и микротрещин, в результате чего происходит упрочнение, которое в конечном итоге приведет к затуханию деформации (затухающая ползучесть). При каком-то стечении обстоятельств «заличивание» и нарушение отдельных участков компенсируют друг друга и мы наблюдаем установившуюся (а точнее, квазиустановившуюся) ползучесть. Дальнейший ход разрушения и «заличивания» может привести или к прогрессирующей, или к затухающей ползучести. Накопление во времени нарушений и достижение наибольшей плотности повреждений (дефектов) приводит в конечном итоге к разрушению породы.

Закономерность изменения прочности во времени обычно выражается графиком (рис. 27), на котором выделяется мгновенная (стандартная) σ_0 , длительные (временные) прочности σ_1 , σ_2 и предел длительной прочности σ_∞ при $t \rightarrow \infty$. Между значениями длительной σ_∞ и мгновенной σ_0 прочности установлены опытами различные соотношения.

По результатам многолетних исследований длительной прочности различных горных пород во ВНИМИ, рекомендованы следующие ее значения в процентах от предельного сопротивления сдвигу.

Для скальных пород ($R_c > 1000$ кг/см ²)	90—98
Для полускальных пород (кроме сланца и песчано-глинистых)	85—95
Для полускальных пород (сланцеватых и песчано-глинистых)	65—80
Для связных (глинистых) пород	40—80

Подобные рекомендации приводятся и другими исследователями. Общая черта всех этих данных — большая условность.

При решении задач устойчивости различных сооружений можно принять три принципа расчета: 1) на основе условно мгновенной прочности в случае краткосрочной службы сооружений; 2) расчет с использованием предела длительной прочности для очень ответственных сооружений длительного срока службы; 3) с допускаемой деформацией пород определенной скорости или определенной величины. В горной практике чаще применяют первый и третий принципы.

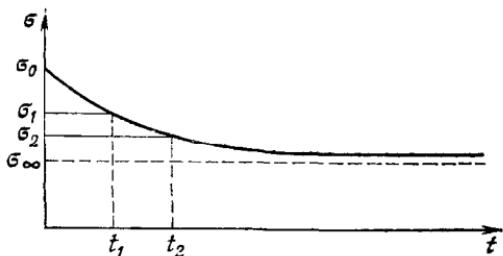


Рис. 27. Схематический график уменьшения прочности во времени

2.8. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРНЫХ ПОРОД УГОЛЬНЫХ И РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Горные породы будучи средой горных работ, естественно, представляют большой практический интерес в их природном залегании. Поэтому для оценки свойств пород как геологических образований можно использовать таблицы 7—23, а здесь попытаемся рассмотреть породы как систему, взаимодействующую с горными работами и сооружениями, получившую название горногеологического массива (П. Н. Панюков, 1956). Для удобства описания основных особенностей пород, вмещающих полезные ископаемые, рассмотрим их отдельно на угольных и рудных месторождениях.

Угольные месторождения сложены осадочными породами, среди которых, как мы уже знаем, встречаются все группы: скальные, полускальные, песчаные, глинистые и особого состава, состояния и свойств. Таким образом, угольные месторождения характеризуются большим разнообразием горных пород. Вторичные изменения, которые происходят после образования пород, создают геологические толщи сложного строения и состояния, которые определяют условия освоения месторождений и в целом территорий.

Среди вторичных изменений основное место занимают тектонические преобразования, поэтому П. Н. Панюков выделил по фациально-литологическим и генетическим особенностям вмещающих пород и тектоническим условиям четыре типа угольных месторождений, которые мы положим в основу характеристики горных пород, слагающих их. Первый тип — платформенные месторождения землистых и бурых углей, второй тип — месторождения каменных и бурых углей межгорных депрессий горноскладчатых областей, третий тип — месторождения каменных углей и антрацитов геосинклиналей, четвертый тип — месторождения промежуточного типа. Примеры геологического строения угольных месторождений четырех типов приводятся на рис. 28, а характеристика пород — в табл. 23.

Изучая горные породы с целью оценки их устойчивости в бортах угольных карьеров ВНИМИ в своем «Методическом пособии» [28] предлагает выделить пять групп горных пород.

1. Прочные — скальные ($R_c > 80$ МПа) слаботрещиноватые, слабовыветрелые, не набухающие и не размокающие породы различных генетических типов. Устойчивость бортов здесь определяется сопротивлением сдвигу по поверхностям ослабления и элементами залегания этих поверхностей в массиве пород.

2. Породы средней прочности, полускальные ($R_c = 8—80$ МПа), трещиноватые, не набухающие, не размокающие, не пластичные. Устойчивость в бортах определяется сопротивлением сдвигу по поверхностям ослабления и элементами залегания этих поверхностей в массиве пород.

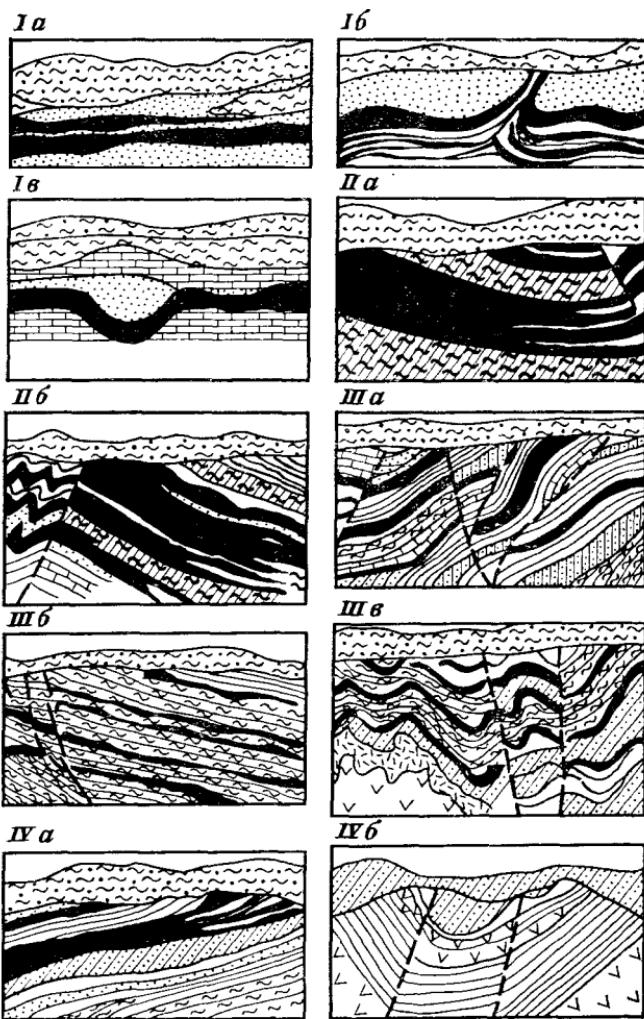


Рис. 28. Схематические геологические разрезы основных типов угольных месторождений (по П. Н. Панюкову):
 Ia—Ib — см. табл. 24

лением сдвигу этих пород, а также поверхностей ослабления и элементами их залегания, интенсивностью и характером трещиноватости.

3. Слабые глинистые породы ($R_c < 8$ МПа), набухающие и размокающие. Устойчивость бортов определяется сопротивлением сдвигу этих пород и их ослабленных контактов (в том числе трещиноватостью) с учетом влияния воды (набухание, размокание).

Таблица 23. Краткая характеристика горногеологических массивов

Тип массива	Подтипы массивов пород	Примеры угольных месторождений
I. Платформенный. Угольная залежь в толще несцементированных песчано-глинистых пород; залегание горизонтальное, тектонические условия спокойные, угли бурые	Ia. Простого фациально-литологического строения без вторичных нарушений угольных пластов Ib. То же, но с вторичными нарушениями угольной залежи Iv. Более сложного фациально-литологического строения с древними размывами угольной залежи или с карстовыми нарушениями	Райчихинское, Восточно-Уральское Днепровский бассейн, Ермоловское месторождение Подмосковный бассейн
II. Межгорных депрессий. Сложно построенный фациальный комплекс с многочисленными или мощными угольными пластами; породы полускальные и скальные, угли полублестящие и бурые	IIa. Простого складчатого строения, усложненные дизъюнктивами (надвигами небольших амплитуд), невысокая прочность и стойкость пород IIb. Более сложного фациального, литологического и тектонического строения; прочность пород и метаморфизм углей более высокие	Волчанско, Богословское, Веселовское, Ангренское Коркинское
III. Геосинклинальный. Мощная толща глинистых сланцев и песчаников с большим числом маломощных, но выдержаных угольных пластов; высокая прочность и степень метаморфизма углей (каменные и антрациты)	IIIa. Периферийных частей бассейнов геосинклинального типа; сложное тектоническое строение IIIb. Наиболее погруженных частей бассейнов геосинклинального типа с более высокой прочностью горных пород, несложное тектоническое строение IIIv. Сложного тектонического строения с магматическими внедрениями; непостоянство условий залегания углей и невыдержанность механических свойств пород	Западная окраина Кузбасса (Краснобродское, Н. Сергиевское и др.) Южная часть Кузбасса, Шахтинский и Несветаевский районы Донбасса Подосиновское на Урале
IV. Промежуточного типа. Сложное, невыдержанное строение и меньшая мощность угленосной толщи; породы плотные, сцементированные	IVa. С пологим и почти горизонтальным залеганием пород высокой прочности и выдержанности IVb. Инъекционные магматическими телами; условия залегания пород и углей весьма непостоянны	Приенисейская мульда Тунгусского бассейна, Кокуйское о. Сахалин (западное побережье)

4. Пески и другие обломочные несвязные образования, устойчивость которых определяется углом внутреннего трения, изменяющимся в пределах от 28 до 38°.

5. Илы и плывуны, обладающие низкой прочностью и устойчивостью, особенно в водонасыщенном состоянии.

Рудные месторождения более разнообразны по генезису, литологии и тектоническим условиям. На платформах обычно встречаются месторождения, перекрывающая толща которых представлена осадочными породами, а вмещающими являются как осадочные, так и породы кристаллического фундамента или его коры выветривания. Условия залегания пород весьма различные — от горизонтально залегающих (железорудные месторождения КМА, марганцевые месторождения Украины, Тихвинское бокситовое месторождение и другие) до сложноскладчатых (основная часть рудных месторождений). На рис. 29 приведен разрез Михайловского месторождения КМА, разрабатываемого открытым способом. Перекрывающая толща, определяющая условия устойчивости бортов карьеров и откосов внешних отвалов, представлена горизонтально залегающими песчано-глинистыми породами мезо-кайнозойского возраста, водонеустойчивыми и низкой прочности.

Большая группа рудных месторождений, например СУБР, приурочена к карбонатным (скальным и полускальным) породам: известнякам, доломитам, которые характеризуются интенсивной трещиноватостью и закарстованностью, а следовательно, значительной водопроницаемостью.

Однако большая часть рудных и нерудных месторождений связана с крепкими магматическими и метаморфическими породами, сильнодислоцированными, поэтому обладающими повышенной трещиноватостью. Эти породы устойчивы в выработках, и обычно они проходят и поддерживаются без крепления. Но в этих массивах часто встречаются ослабленные тектониче-

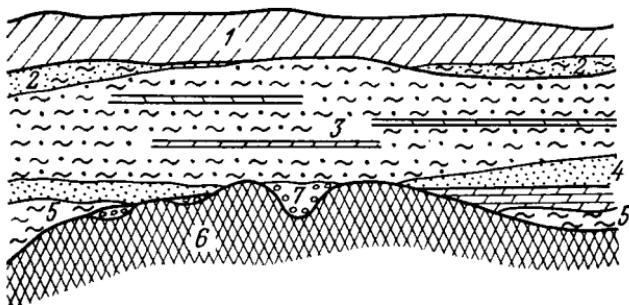


Рис. 29. Схематический геологический разрез Михайловского железорудного месторождения КМА:

1 — суглиники; 2 — пески и глины (К); 3 — глины, песчаники, известняки (I_3); 4 — пески и песчаники (I_2); 5 — глины (D); 6 — железистые кварциты; 7 — богатая руда

ские зоны, которые создают большие осложнения в работе горняков [7].

Н. И. Плотников [21] построил четыре типовые модели месторождений по их геологическому строению (геологической среде), которое определяет условия проходки горных выработок, их обводнение, характер и масштабы геологических процессов, возникающих при освоении (рис. 30). Первая модель характеризует месторождения, вмещающие породы которых представлены скальными разновидностями магматического и метаморфического происхождения. Это породы высокой прочности (коэффициент крепости по Протодьяконову более 10—12), трещиноватые, с тектоническими нарушениями. Сверху скальные породы перекрыты песчано-глинистыми отложениями четвертичного возраста (см. рис. 30, а). Этой моделью, по мнению ее автора, можно пользоваться при изучении некоторых рудных месторождений Урала, Центрального Казахстана, Средней Азии.

Вторая модель (см. рис. 30, б) отражает условия месторождений, сложенных более слабыми (полускальными) породами: серicitовыми и хлоритовыми сланцами, эфузивными образованиями. Устойчивость этих пород в бортах карьеров и подземных выработок низкая за счет наличия слабых неблагоприятно ориентированных контактов (выдержаных трещин, сланцеватости, тектонических зон). Представители этой группы — некоторые месторождения Урала и Казахстана.

Третья группа месторождений (см. рис. 30, в) приурочена к карбонатным породам (известняки, мраморы, доломиты, мергели), представители — бокситовые месторождения СУБРа. И, наконец, к четвертому типу (см. рис. 30, г) автор относит месторождения КМА, горные породы которых отличаются большим разнообразием, малой прочностью и низкой устойчивостью в бортах карьеров и подземных выработках.

Необходимо отдельно остановиться на рассмотрении месторождений, полезное ископаемое которых и вмещающие его породы представляют особый интерес в инженерно-геологическом аспекте. Это нерудные месторождения каменной, калийной и других солей, гипса и ангидрита, некоторых карбонатных пород. Интерес к этим месторождениям связан с водонеустойчивостью самого полезного ископаемого, которая определяет специфику его разработки, а также с прочностью и деформируемостью пород, входящих в так называемую водозащитную толщу. Эта толща предохраняет горные выработки, пройденные в теле добываемых воднорастворимых полезных ископаемых, от поступления в них воды.

На рис. 31 приводится разрез Старобинского месторождения, на котором показаны условия залегания продуктивной толщи, а также перекрывающих пород. Здесь, кроме сложно-

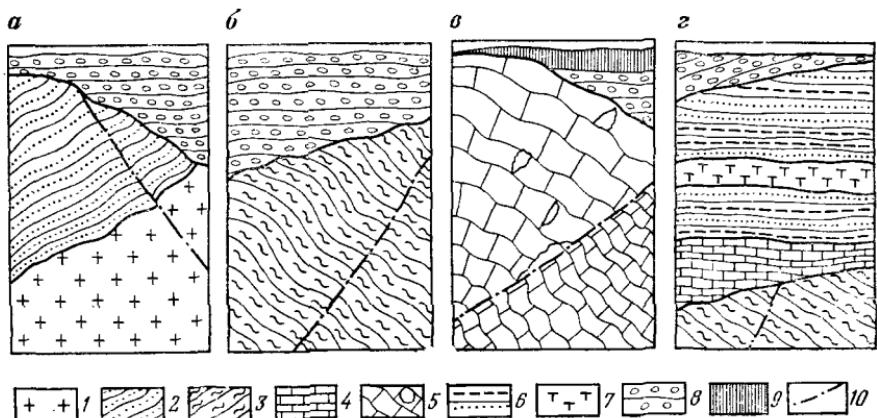


Рис. 30. Схемы геологических разрезов основных типов рудных месторождений (по Н. И. Плотникову):

1 — интрузивные породы; 2 — кварциты; 3 — сланцы; 4 — известняки; 5 — закарстованные карбонатные породы; 6 — песчано-глинистые породы; 7 — мергель; 8 — рыхлые отложения; 9 — покровные образования; 10 — тектонические нарушения

Геологический индекс	Литология	Мощность, м	Описание пород
Q	%%%%%%%%%	20-30	ледниковые отложения
P-N	~~~~~	10-80	песчано-глинистые отложения
K	50	пески мелкие, писчий мел
J	75	пески мелко- и среднезернистые, глины слюбистые
	~~~~~	230-460	надсолевая глинистомергельная толща
D ₃	~~~~~ К К К г г г	80-250	соленосная толща каменной и калийной соли, гипс, известняков, доломитов и глин
D ₂	~~~~~ .....	80-130	подсолевая толща песков, глин, песчаников, известняков и доломитов
PR	..... ..... .....	>400	песчаники, алевролиты, глины, вулканические туфы

Рис. 31. Геологическая колонка Старобинского месторождения калийных солей

стей, связанных с разнообразием слоистой толщи осадочных пород разной прочности и водообильности, возникает проблема водоустойчивости толщи, вмещающей подземные горные выработки.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие минералы в горных породах оказывают существенное влияние на поведение их при взаимодействии с горными работами?
2. Какие виды песков выделяют по граулеметрическому составу?
3. В чем видите смысл изучения структуры и текстуры горных пород?
4. Чем определяются условия залегания горных пород и их влияние на горные работы?
5. Чем определяется физическое состояние горных пород и необходимость его изучения?
6. Какими показателями оценивается плотность, пористость и влажность горных пород?
7. Какими показателями определяется состояние глинистых пород по плотности и влажности?
8. К чему приводит выветривание пород? Как можно оценить его влияние?
9. Какие важные свойства пород, необходимые для решения многих задач горного дела, определяет трещиноватость?
10. Какая связь существует между слоистостью и расслоением пород?
11. Что определяет водоустойчивость горных пород? Какими показателями она оценивается?
12. Что такое водопроницаемость горных пород? Как она оценивается?
13. Понятие о начальном гидравлическом градиенте. Каково его значение при решении задач дренирования и уплотнения пород?
14. Решение каких задач горного производства требует изучения прочности и деформируемости горных пород?
15. Какие особенности горных пород оказывают влияние на их прочность в образце и в условиях естественного залегания?
16. Что такое анизотропия пород по их прочности и деформируемости? Как можно ее оценить и какова ее роль?
17. Определите физическую сущность коэффициента структурного ослабления.
18. Назовите характерные значения угла внутреннего трения основных типов горных пород.
19. Какими показателями оценивается деформируемость различных горных пород? Как они определяются в лаборатории?
20. Что такое коагуляция? В каких породах она происходит и как прогнозируется?
21. Какими показателями оценивается реологическое поведение горных пород?
22. Какие вопросы возникают при инженерно-геологической оценке месторождений твердых полезных ископаемых?

## Глава 3

### ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

#### 3.1. ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Второй по значительности компонент природной обстановки, определяющий во многом инженерно-геологические условия месторождений полезных ископаемых,— подземные воды, т. е. воды, содержащиеся в горных породах и полезном ископаемом.

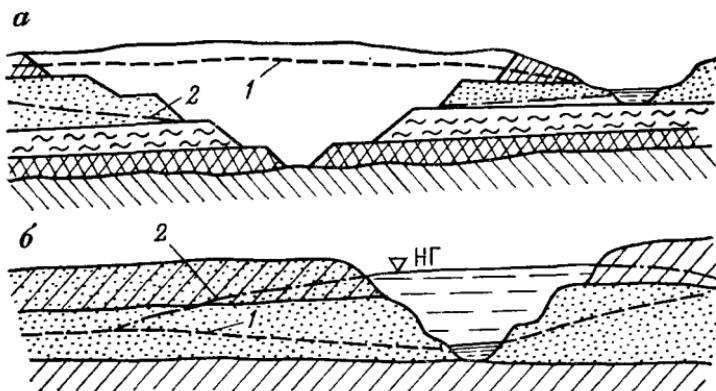


Рис. 32. Схемы взаимодействия между подземными и поверхностными водами в связи со строительством карьера (а) и плотины (б):  
1—2 — уровни подземных вод до и после строительства; НГ — напорный горизонт

Изучением проблем формирования условий залегания, режима, физических свойств, химического состава, движения, поисков и разведки подземных вод занимается специальная отрасль геологической науки — гидрогеология.

Гидрогеология месторождений твердых полезных ископаемых выделилась в отдельную отрасль геологической науки и подразделяется на три раздела: а) региональная гидрогеология месторождений, которая устанавливает общие закономерности формирования подземных вод; б) гидрохимические условия месторождений; в) гидрогеологические основы прогноза водопритоков в горные выработки и мероприятия по осушению месторождений.

Рассматривая подземные воды месторождений, необходимо отметить, что их невозможно отделить от поверхностных вод (а также атмосферных). Дело в том, что в современных условиях человеческая деятельность по своим масштабам приводит к быстрому проявлению взаимосвязи между различными природными водами. Так, например, проходка горной выработки сопровождается дренированием подземных вод и формированием депрессионной воронки, что приводит к вовлечению в этот процесс поверхностных вод (рис. 32, а). Большие плотины, создающие искусственные водохранилища, изменяют взаимосвязь подземных и речных вод (рис. 32, б). Таким образом, нарушение режима подземных вод горными работами неминуемо отразится на режиме поверхностных вод. Подземные воды определяют степень обводненности месторождений, свойства горных пород, напряженное состояние, а отсюда условия проходки горных выработок и их устойчивость, водопритоки и характер осушения.

Таблица 24. Влияние подземных вод на условия разработки месторождений

Основные проявления влияния подземных вод	Вид и характер влияния подземных вод	Критерии оценки влияния подземных вод
I. Снижение производительности горнотранспортного оборудования	<p>1. Снижение производительности проходческого оборудования из-за притока воды в забоях и деформаций пород и полезного ископаемого, а также за счет замерзания и наледей</p> <p>2. Снижение производительности буровых работ (или БВР) в обводненных породах</p> <p>3. Удлинение срока строительства капитальных выработок в водосодержащих породах в связи с применением специальных способов проходки и крепления</p> <p>4. Дополнительные объемы перекопки горной массы, попадающей в горные выработки под влиянием подземных вод</p> <p>5. Снижение производительности транспортных средств за счет деформаций путей и прилипания пород и полезного ископаемого к поверхностям вагонов, самосвалов и конвейеров</p> <p>6. Снижение производительности за счет ликвидации аварийных ситуаций, связанных с прорывами подземных вод в выработанное пространство, его затопление и заливание</p> <p>7. Снижение производительности водоотливного хозяйства (насосов, водопроводов и т. д.) в связи с коррозией агрессивными подземными водами</p>	<p>Удельный водоприток (количество воды на 1 м рабочего забоя), водоустойчивость пород и температура воздуха</p> <p>Степень обводненности и водопроницаемость горных пород</p> <p>Водопроницаемость и водоустойчивость горных пород; напор подземных вод</p> <p>Степень обводненности, водопроницаемости и водоустойчивости пород. Градиент водного потока</p> <p>Влажность и липкость горных пород</p> <p>Напор подземных вод, мощность и прочность изолирующих пород, водоустойчивость водовмещающих пород</p> <p>Характер и степень агрессивности подземных вод</p>
II. Увеличение потерь и степени разубоживания	<p>1. Потери полезного ископаемого в открытых выработках в связи с завалкой вскрытых запасов оползневыми накоплениями при деформировании пород внутренних отвалов или рабочих бортов под влиянием воды</p>	Водообильность, водопроницаемость и водоустойчивость горных пород; гидравлический градиент водоносного горизонта

Основные проявления влияния подземных вод	Вид и характер влияния подземных вод	Критерии оценки влияния подземных вод
II. Увеличение потерь и степени разубоживания	2. Потери полезного ископаемого в целиках под водными объектами и в качестве гидроизолирующих перемычек, водозащитных толщ и экранов 3. Разубоживание полезного ископаемого в связи с заложением выработки в результате водных прорывов и фильтрационных деформаций песчано-глинистых пород или заполнителя трещин твердых пород	Мощность и водопроницаемость пород, напор подземных вод, расстояние водного объекта от выработки, система разработки и др.
III. Ухудшение устойчивости горных выработок	1. Изменение состояния водоустойчивых пород (разуплотнение, растворение, разупрочнение) 2. Изменение напряженного состояния вокруг выработок за счет гидростатического и гидродинамического давлений, приводящее к оползням, оседанию земной поверхности, пучению и другим деформациям 3. Формирование порового давления водонасыщенных песчано-глинистых пород при росте нагрузки 4. Фильтрационные деформации, водные прорывы, оплыивание	Степень водообильности, водопроницаемость и водоустойчивость пород Водоустойчивость пород
IV. Снижение степени безопасности горных работ	1. Внезапные водопритоки по необнаруженным или искусственным трещинам, карстовым пустотам, тектоническим зонам, приводящие к затоплению выработок 2. Водные прорывы с выносом рыхлого материала 3. Обрушение непосредственной кровли под влиянием водного напора или разупрочнения пород 4. Разрушение временного или постоянного крепления выработок под влиянием водного напора или нарушения бетонных конструкций агрессивными водами	Мощность водоносных горизонтов, градиент водного потока Прирост давления, степень водонасыщения, плотность и прочность пород Водоустойчивость и водопроницаемость пород, величина водного напора Водообильность и водопроницаемость пород и характер их пространственной неоднородности Водоустойчивость пород и напор подземных вод Напор воды на кровлю, водоустойчивость пород кровли Водный напор, характер и степень агрессивности подземных вод

В связи с этим нельзя оценивать инженерно-геологические условия месторождений, не зная их гидрогеологических особенностей.

Влияние подземных вод на условия разработки месторождений твердых полезных ископаемых реализуется по четырем главным направлениям: а) снижение производительности горно-транспортного оборудования; б) увеличение потерь и степени разубоживания полезного ископаемого; в) ухудшение устойчивости горных выработок; г) снижение степени безопасности ведения горных работ.

Снижение производительности горно-транспортного оборудования наблюдается на всех обводненных шахтах, рудниках и карьерах. Масштабы его зависят от состава и состояния горных пород, от сезона работы и от мощности самого оборудования. Известны случаи замены более производительной системы с полным обрушением на менее производительную систему с закладкой выработанного пространства. Известно также, что на карьерах с фильтрующими забоями зимой производительность экскаваторов падает на 20—30 %, а налипание глин по рабочим органам экскаваторов и на транспортных средствах уменьшает производительность предприятий на 15—20 % [1]. При этом, чем выше производительность горно-транспортного оборудования (чем оно современнее), тем существеннее ее уменьшение за счет влияния воды.

Особенно важно влияние подземных вод на устойчивость пород вокруг горных выработок. С одной стороны, под воздействием воды разгруженные горные породы существенно меняют свою естественную прочность и деформируемость за счет размокания, растворения, разуплотнения, выщелачивания, что приводит к оползням, пучению, вывалам и другим видам нарушения устойчивости горных выработок. С другой стороны, вода действует как сила. Почти все породы, находящиеся под водой, испытывают гидростатическое давление величиной  $p_v = \gamma_v h_v$ , где  $h_v$  — высота столба воды над рассматриваемой плоскостью. Фильтрационный (движущийся) водный поток оказывает еще и гидродинамическое давление на породы и на крепь, которое зависит от гидравлического градиента этого потока. И наконец, поток подземных вод вызывает ряд механических и фильтрационных деформаций (прорыв глин, супфозию в песках, вынос рыхлого материала, плытуны, оплыивание, фильтрационный выпор и др.).

Для краткости и наглядности в табл. 24 приводятся основные виды отрицательных влияний подземных вод на горное производство.

Говоря о взаимодействии подземных вод с горными работами нельзя упускать из виду вопрос отрицательного влияния горного производства на природные воды. В горнодобывающих

районах проводятся гидрогеологические наблюдения, которые показывают, что на их территории происходят негативные процессы: снижение уровней подземных вод, сработка их запасов, иссушение пород, заболачивание, загрязнение как подземных, так и поверхностных вод, активизация карста, оживление оползней и т. д.

Все изложенное указывает на необходимость внимательного изучения условий взаимодействия горного производства с природными водами.

### 3.2. ВИДЫ ВОДЫ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

При рассмотрении водных свойств горных пород уже отмечалось, что их пустоты (поры, трещины, каверны и т. д.) частично или полностью заполнены водой. В зависимости от характера пустот и воды в них можно говорить о влажности, влагоемкости и водоносности горных пород, т. е. можно оценивать их состояние, свойства, устойчивость и обводненность.

Вода наиболее распространенное и наиболее ценное полезное ископаемое, имеющее ряд специфических особенностей. Максимальную плотность вода достигает при температуре 4 °С. При замерзании она расширяется почти на 11 %. Вязкость воды понижается при увеличении давления; растворяющая способность пресной воды высокая, электрические силы притяжения ионов к поверхности кристаллов в воде в 81 раз больше, чем в воздухе, т. е. диэлектрическая постоянная равна 81. Большую активность проявляет вода при взаимодействии с глинистыми минералами, что определяет природу свойств глинистых пород. Специфические особенности воды объясняются ее структурой. Как показывают современные исследования Д. Бернала, А. А. Ананяна, В. М. Вдовенко и других, в строении молекул воды определяющее значение имеют водородные связи.

Молекула воды состоит из иона кислорода с двумя ядрами водорода, внедренных в его электронное облако. Структура воды кристаллическая, в которой даже при 25 °С сохраняется структура льда.

Вода во многом зависит от состава и количества растворенных в ней минеральных веществ (или находящихся в виде нерастворимых коллоидных частиц).

В горных породах существуют вполне закономерные особенности распределения воды, которые приводят к изменению ее качественного состояния в зависимости от количества. Наиболее известна классификация видов воды (по состоянию) А. Ф. Лебедева (1919 г.), которая получила дальнейшее развитие в работах Б. В. Дерябина, П. А. Ребиндера, В. А. Приклонского, В. Д. Ломтадзе. Обычно выделяют две резко отличающиеся категории воды в горных породах: связанную и свобод-

с Таблица 25. Виды волы в горных породах (по В. Д. Ломтадзе)

Агрегатное состояние воды	Вид воды	Состояние города по степени изложности	Распространение вибраций воды	Подвижность воды	Сила, определяющая подвижность воды
Свободная	Гравитационная	Сильные вибрации или вибрации (полные или частичные) затопление пор водой	Водолестые горизонтальные зоны, контактные вибрации	ЛегкоПодвижная	Гравитационные
	Иммобилизованный		Зона капитального износа и усталости	Подвижная	Гравитационные колебания
	Фрикционный		В слабоводопроницаемых и водопроницаемых виброзонах	СлабоПодвижная	Гравитационные
	Аэроформованная		Слабые вибрации (частично или полностью водоненасыщенные)	МалоПодвижная	Собственное твердых частичек на границе раздела твердой и жидкой фаз
	Парообраз.	Двигательный	Воздушно-сухое	Зона вибрации	Подвижная
	в паром	шлаки с насыщенной атмосферой	Сильные вибрации (чистые водопроницаемые)	В любой горячий парогенератор	Разность упругости пара
	в состоянии		Затопленный в парах	Негорячий пар в замкнутом виде	
			Мерзлая (частичные или полные затопление пор)	В зоне действующего слоя и мицодистики изутильных пород	Гравитационные
			В виде кипучих криогенных, склонений, прослоек, сажи, пыли		воздуха

ную. Кроме того, по агрегатному состоянию, в котором вода может находиться в пустотах пород, различают парообразную, жидкую и твердую воду. Представление о видах воды и некоторых их свойствах можно получить из табл. 25.

### 3.3. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО УСЛОВИЯМ ИХ ЗАЛЕГАНИЯ

По условиям залегания в земной коре подземные воды могут быть временными (верховодка), грунтовыми и межпластовыми (рис. 33). В зависимости от характера занимаемых пустот в горных породах различают поровые, трещинные и карстовые воды.

#### 3.3.1. Верховодка

При инфильтрации через зону аэрации воды встречают на своем пути локальные водонепроницаемые или слабоводопроницаемые глинистые прослойки и линзы, на которых временно задерживаются, образуя своеобразные маломощные водоносные горизонты местного значения. Обычно это происходит в период обильных дождей и снеготаяния, а в засушливые периоды вода частично испаряется, частично стекает в нижележащие породы, и водоносный горизонт исчезает.

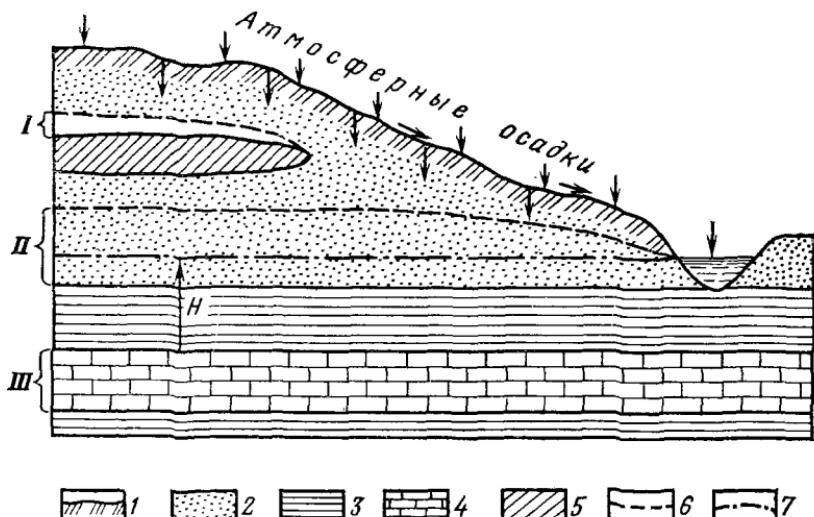


Рис. 33. Подземные воды по условиям их залегания:

1 — почвенно-растительный слой; 2 — пески; 3 — водоупорные глины; 4 — трещиноватые известняки; 5 — местный водоупор; 6 — уровень грунтовых вод; 7 — пьезометрический уровень напорных вод; I — верховодка; II — грунтовый водоносный безнапорный горизонт; III — межпластовые напорные воды с напором  $H$

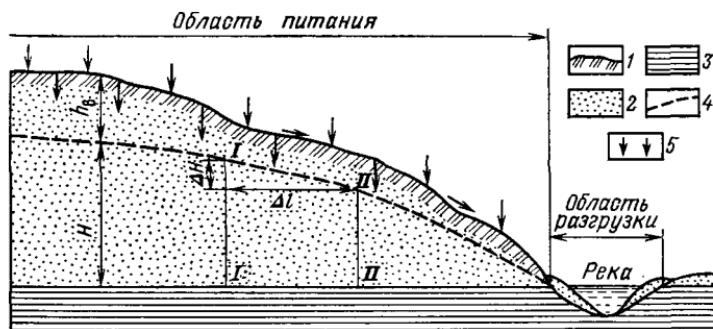


Рис. 34. Грунтовый водоносный горизонт:

1 — почвенно-растительный слой; 2 — водоемещающие породы; 3 — первый от поверхности выдержаный водоупорный слой; 4 — уровень грунтовых вод; 5 — атмосферные осадки.

$I = \frac{\Delta H}{\Delta l}$  — наклон (гидравлический градиент) грунтового потока между его сечениями I-I и II-II;  $h_B$  — глубина вскрытия подземных вод;  $H$  — мощность водоносного горизонта

данные скважин на местности для определения скорости потока:

1 — гидроизогипса и ее отметка; 2—3 — скважины центральная и наблюдательная

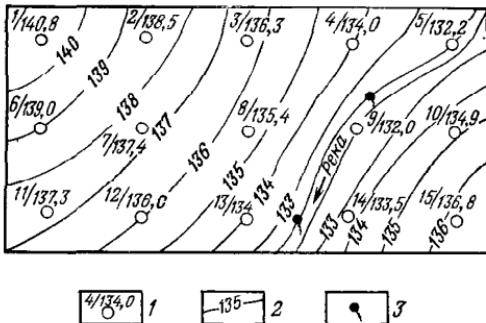
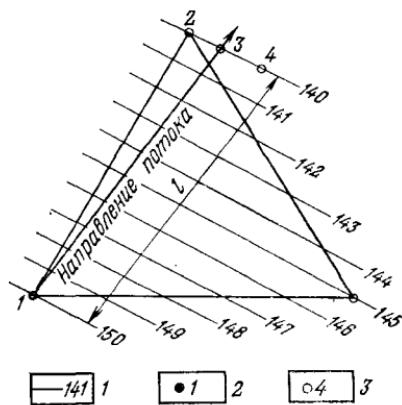


Рис. 36. Карта гидроизогипс:

1 — разведочная скважина (в числителе — номер скважины, в знаменателе — абсолютная отметка уровня воды); 2 — гидроизогипсы грунтового потока; 3 — источник (родник)

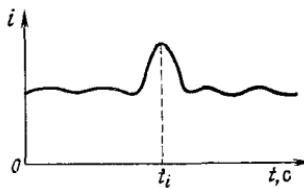


Рис. 37. Изменение интенсивности окраски ( $i$ ) воды в наблюдательных скважинах

К типу временных вод можно отнести подземные воды, формирующиеся в дюнных песках, в прибрежных районах поверхностных водоемов, а также воды заболоченных участков.

Верховодка часто служит источником водоснабжения отдельных хозяйств в сельской местности. Она вызывает некоторые трудности при строительстве наземных сооружений, трубопроводов, выемок.

При инженерно-геологических изысканиях в летние периоды верховодку часто не обнаруживают, поэтому ее отрицательное влияние в этих случаях приходит неожиданно.

### 3.3.2. Грунтовые воды

Подземные воды, залегающие на первом от поверхности, выдержанном по простиранию, водоупоре, называют грунтовыми. Вместилище этих вод — различные горные породы, где можно встретить поровые (чаще всего), трещинные и карстовые грунтовые воды.

Основные элементы грунтового водоносного горизонта показаны на рис. 34.

Грунтовые воды формируются за счет инфильтрации атмосферных и поверхностных вод, причем область питания совпадает с областью распространения водоносного горизонта. Мощность горизонта непостоянна и зависит от свойств водосодержащих пород, расстояния до области разгрузки, интенсивности питания и т. д. Поверхность воды (водное зеркало) свободная, безнапорная и имеет различный наклон на разных участках. Ее положение определяется гидроизогипсами грунтового горизонта, т. е. кривыми, соединяющими точки с одинаковыми абсолютными отметками установленного уровня воды.

Построение гидроизогипс производится по данным замеров уровня подземных вод в разведочных выработках, в колодцах или по их источникам (родникам). Пример такого построения приведен на рис. 35. Схема, на которой показаны гидроизогипсы, выработки, колодцы, источники, иногда элементы рельефа, обычно называется картой гидроизогипс (рис. 36). Она дает возможность определить направление грунтового потока, наклон водного зеркала и глубину его на разных участках, область питания и разгрузки горизонта, взаимоотношения с поверхностными водными объектами (они могут разгружать грунтовый горизонт, могут подпитывать его или и то и другое на разных участках). Положение гидроизогипс привязывается к строго определенному периоду замера отметок уровня воды (год, месяц, день).

Иногда представляет интерес скорость потока в условиях естественного залегания (действительная скорость  $v_d$ ): Для ее определения используют скважины или другие выработки, прой-

денные с поверхности и расположенные по схеме, показанной на рис. 35. В центральную скважину опускают красящее вещество или поваренную соль и определяют время  $t$  прохождения инородного тела до наблюдательных выработок (рис. 37). Замеряя расстояние  $l$  между этими двумя выработками, определяют действительную скорость, м/с грунтового потока по формуле

$$v_d = l/t.$$

В отличие от рассмотренной ранее, в соответствии с законом Дарси, скорость фильтрации  $v_\phi$ , которая была отнесена к площади всего сечения водоносного горизонта,  $v_d$  показывает движение воды в поровом пространстве, характеризуемом объемом пор водосодержащих пород  $n$ . В связи с этим  $v_\phi = v_d n$  (см. разд. 2.4).

Грунтовые воды во времени изменяют свой уровень, состав, температуру и расход под влиянием различных естественных и искусственных факторов. Совокупность происходящих изменений определяют режим этих вод, который имеет большое теоретическое и практическое значение. Наиболее существенное влияние на режим грунтовых вод оказывают метеорологические условия (атмосферные осадки, испарения, температура, атмосферное давление и т. д.); гидравлические условия (изменение режима поверхностных водоемов, питающих или дренирующих подземные воды (колебания в земной коре, поднимания и опускания отдельных участков земли); хозяйственная деятельность человека (строительство гидротехнических и гидромелиоративных сооружений, откачка воды и нефти из недр, добыча твердых полезных ископаемых, удобрение сельскохозяйственных земель, промстоки и др.).

Надо отметить, что с ростом технических возможностей человека изменения режима подземных вод за счет его деятельности становятся определяющими. Особенно велика роль человека на изменение режима подземных вод в горнодобывающих районах.

Безнапорными часто бывают межпластовые воды, залегающие между двумя водоупорными слоями. Они могут быть приурочены к различным породам (пескам, песчаникам, известнякам и т. д.), представляя собой поровые, трещинные и карстовые воды. Пример безнапорных межпластовых вод приведен на рис. 38. Для них характерно ограниченное питание в местах выхода водоносных пород на дневную поверхность или к водным объектам (поверхностным и подземным). Ограничена также и разгрузка этих вод, поэтому они отличаются замедленным водообменом (в отличие от грунтовых вод), что приводит к увеличению их минерализации.

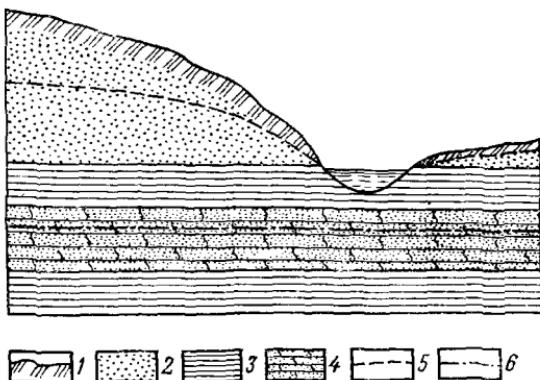


Рис. 38. Схема межпластовых безнапорных вод.

1 — почвенно-растительный слой; 2 — песок; 3 — водоупорные глины; 4 — трещиноватые песчаники; уровни подземных вод; 5 — грунтовых; 6 — межпластовых безнапорных

Безнапорные трещинные и карстовые грунтовые и межпластовые воды имеют большое распространение и представляют особый интерес в горном деле из-за большой водообильности месторождений, которую они обычно создают.

### 3.3.3. Артезианские (напорные) воды

Это межпластовые воды порового, трещинного, карстового или смешанного типов, формирующиеся в моноклинальных и синклинальных структурах. Элементы напорного водоносного горизонта показаны на рис. 39. Водосодержащими являются различные горные породы, залегающие между двумя водоупорами. Для них характерно то, что область питания незначительна по площади, поэтому поступление пресной поверхностной и атмосферной воды ограничено. Это приводит к замедлению процесса водообмена и, как следствие, к увеличению минерализации.

Главная характерная черта артезианских вод — наличие в них напора, т. е. отметка уровня воды при вскрытии устанавливается выше верхней границы водоносного горизонта. Величина напора характеризуется разностью отметок вскрытия горизонта и установившегося водоносного горизонта. Величина эта непостоянная и меняется в зависимости от условий залегания горизонта (см. рис. 39). Напор рассматривается как давление на водоупоры и очень часто определяет напряженное состояние вокруг горных выработок и условия их устойчивости. Правильное его определение и установление закономерностей

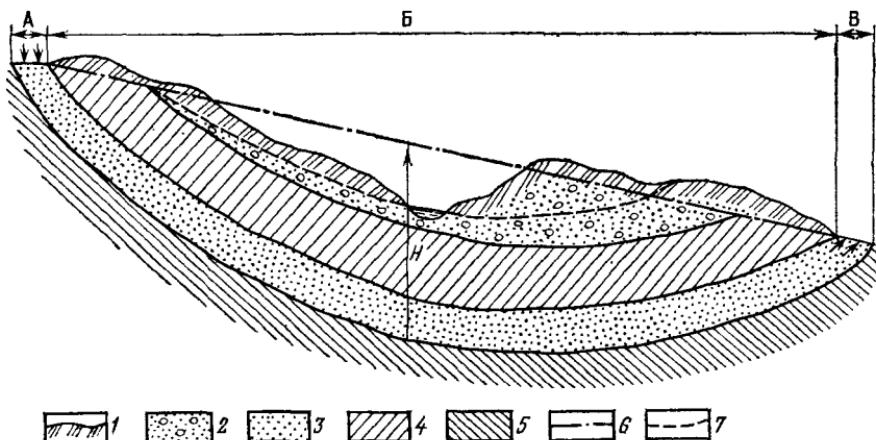


Рис. 39. Схема залегания напорного (артезианского) водоносного горизонта.

1 — почвенно-растительный слой; 2 — пески с галькой водоносные — грунтовые воды; 3 — водоодержащие породы — напорный горизонт; 4—5 — верхний и нижний водоупоры; 6 — пьезометрический уровень воды; 7 — уровень грунтовых вод.  
 Н — напор горизонта; А — область питания; Б — область напоров; В — область разгрузки горизонта

его изменения под влиянием различных естественных и искусственных факторов имеет большое практическое значение при проектировании, строительстве и эксплуатации горных выработок. Напорный горизонт может оказаться опасным даже в случае, когда горные работы не вскрывают его. Поэтому часто приходится вести водонижение напорных водоносных горизонтов только с целью снижения его напоров до безопасных величин, обеспечивающих устойчивость горных пород вокруг выработок и безопасность ведения горных работ.

Кривые, соединяющие точки с одинаковыми абсолютными отметками пьезометрического уровня, называют гидроизопьезами. Они строятся так же, как и гидроизогипсы. Линии равных напоров называют гидроизобарами.

Для решения практических задач по обеспечению устойчивости горных выработок, безопасности ведения горных работ и осуществления водонижения для территории шахтного (рудничного) поля или его части строят карты гидроизопьез, гидроизобар, а также прогнозные карты безопасных напоров, определяемых в зависимости от мощности и прочности изолирующих пород и размеров охраняемых выработок.

Часто подземные воды разных горизонтов связаны между собой (гидравлическая связь) за счет перетекания вод с одного горизонта в другой, или за счет перекрытия областей питания и разгрузки. В этом случае отметки установившихся уровней

этих горизонтов совпадают. Правильная оценка гидравлической связи между отдельными горизонтами имеет практическое значение при определении водопритоков в горные выработки и способов осушения месторождений полезных ископаемых.

Иногда в толщах осадочных пород встречаются изолированные линзы и прослои песка, в которых содержатся напорные воды. Наличие напора здесь объясняется формированием давления в порах за счет массы всех вышележащих пород. Для таких горизонтов характерен быстрый спад напора при их вскрытии отдельными скважинами.

### 3.3.4. Подземные воды зоны многолетней мерзлоты

В соответствии с классификацией Н. И. Толстикова, предложенной им еще в 1933 г., подземные воды, распространенные в мерзлой зоне литосферы, могут быть трех типов: надмерзлотные, мерзлотные и подмерзлотные, которые между собой гидравлически связаны и взаимодействуют с поверхностными водами (рис. 40).

Надмерзлотные воды залегают в толще пород, ограниченной снизу верхней границей многолетнемерзлых пород, т. е. это воды деятельного слоя (сезонного промерзания) и надмерзлотных островных таликов. Многолетнемерзлые породы служат водоупором, на котором и формируется надмерзлотный водоносный горизонт. В летний период года надмерзлотные воды по существу являются грунтовыми безнапорными водами, питающимися за счет атмосферных осадков, причем область питания совпадает с областью их распространения. На участках речных долин надмерзлотные воды питаются и поверхности

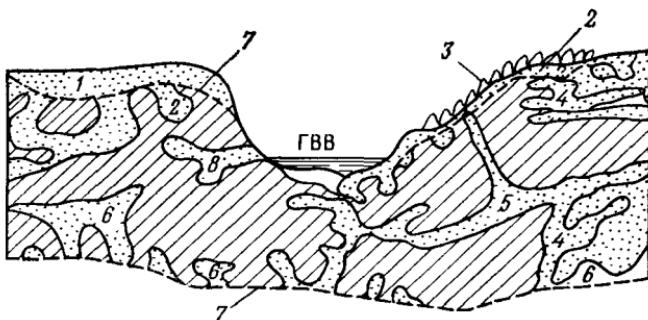


Рис. 40. Схема распространения подземных вод в зоне многолетней мерзлоты. Воды: 1 — надмерзлотные; 2 — над- и межмерзлотные; 3 — криогенных образований; 4 — межмерзлотные; 5 — внутримерзлотные водоносные горизонты; 6 — под- и межмерзлотные; 7 — нижняя граница надмерзлотных и верхняя граница подмерзлотных вод; 8 — регулирующие резервуары; ГВВ — горизонт высоких вод. Косой штриховкой показано распространение мерзлых пород, точками — талых

ными водами. В зимний период происходит постепенное промерзание сверху вниз, что приводит к «закупориванию» вод и созданию в них напора (за счет увеличения объема при замерзании), под влиянием которого происходит выпучивание с образованием бугров пучения или наледей.

Межмерзлотные воды залегают в толще многолетнемерзлых пород (см. рис. 40) и приурочены к таликам. При этом различают замкнутые и сквозные (под поверхностными водоемами и в зонах тектонических нарушений) талики, в которых встречаются воды разной минерализации и температуры, являющиеся надежным источником водоснабжения промышленных предприятий и населенных пунктов. Через сквозные талики осуществляется гидравлическая связь всех трех типов подземных вод, залегающих в многолетнемерзлых породах.

Подмерзлотные воды залегают ниже толщи мерзлых пород на глубине, зависящей от мощности этой толщи и увеличивающейся с юга на север до 600 м и более. В зависимости от условий залегания подмерзлотные воды могут быть безнапорными и артезианскими (чаще всего). Питание и разгрузка этих вод осуществляется через сквозные талики на локальных участках их распространения. Минерализация подмерзлотных вод очень разнообразна, от пресных до рассолов высокой концентрации, залегающих на глубинах более 500—1000 м. Пресные воды используются для водоснабжения, а соленые для лечебных целей.

При разработке месторождений твердых полезных ископаемых в зоне распространения многолетнемерзлых пород, содержащих подземные воды, возникают дополнительные сложности в борьбе с ними, а также проблемы нарушения естественного режима, хранения откачиваемых при осушении высокоминерализованных вод и рассолов, загрязнения (засоления) пресных вод, деградации мерзлоты, возникновения и развития разнообразных мерзлотных явлений и т. д.

### **3.4. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Подземные воды постоянно взаимодействуют с горными породами, в пустотах которых они находятся, а также с атмосферными и поверхностными водами, питающими их. В связи с этим происходит формирование их физических свойств и химического состава.

Физические свойства подземных вод характеризуются температурой, плотностью, цветом, прозрачностью, вкусом, запахом, электропроводимостью, радиоактивностью и т. д. Температура зависит от глубины залегания воды, условий их питания и разгрузки и поэтому она изменяется в широких пределах.

Различают весьма холодные воды с температурой до 4 °С, холодные — от 4 до 20 °С, субтермальные (теплые) — от 20 до 37 °С, термальные (горячие) — от 37 до 42 °С и гипертермальные (весьма горячие) — с температурой выше 42 °С (перегретые воды, имеют температуру более 100 °С).

Плотность химически чистой воды при температуре 4 °С принимается равной 1 г/см³ (1000 кг/м³). В зависимости от содержания и состава растворенных и нерастворимых в ней соединений плотность меняется, достигая 1,1—1,3 г/см³ и более. Известна тяжелая вода, у которой состав D₂O₆, плотность 1,11 (при 20 °С) и используется в качестве замедлителя нейtronов в атомных реакторах.

Цвет, прозрачность, вкус и запас подземных вод зависят от наличия в них различных механических примесей, органики и других растворенных соединений. Чистые воды бесцветны, прозрачны, без запаха и вкуса. В горнодобывающих районах в связи с дренированием подземных вод происходит их загрязнение, что приводит к появлению мутности, запаха, цвета, засоления.

Электропроводность вод — это их способность пропускать электрический ток. Величина ее зависит от состава и концентрации растворенных химических соединений, а также от температуры воды. Электропроводность часто используется для суждения о степени минерализации вод. Изменение электропроводности при добавлении химических соединений используется при определении направления и действительной скорости движения подземных вод.

Радиоактивность воды — свойство, обусловленное самопривольным распадом радиоактивных элементов (радона, радия, урана). В зависимости от содержания отдельных элементов радиоактивные природные воды делятся на 5 классов: 1) радионовые ( $Rn > 18,5 \cdot 10^3$  Бк/м³,  $Ra > 1 \cdot 10^{-11}$  г/л,  $U < 3 \cdot 10^{-5}$  г/л); 2) радиевые ( $Rn < 18,5 \cdot 10^3$  Бк/м³,  $Ra > 1 \cdot 10^{-11}$  г/л,  $U < 3 \times 10^{-3}$  г/л); 3) урановые ( $Rn < 18,5 \cdot 10^3$  Бк/м³,  $Ra < 1 \cdot 10^{-11}$  г/л,  $U > 3 \cdot 10^{-5}$  г/л); 4) урановорадиевые; 5) радонорадиевые.

Химический состав подземных вод определяется составом растворенных в них твердых веществ и газов. Первые находятся в диссоциированном состоянии, т. е. в виде ионов. Основные анионы подземных вод:  $HC\bar{O}_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , а катионы —  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ . Более редкими являются  $CO_3^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $CH^-$ ,  $K^+$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $H^+$  и др. В зависимости от содержания анионов различают: гидрокарбонатные, хлоридные и сульфатные воды. В каждой такой группе можно выделить по три вида в зависимости от содержания катионов  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ .

П. А. Удодов и И. П. Онуфриев, изучая химический состав подземных вод рудных месторождений Сибири, выделили 3 группы элементов по их распространению:

Таблица 26. Результаты анализа воды

Катионы	Содержание в			Анионы	Содержание в		
	мг/л	мг·экв/л	%		мг/л	мг·экв/л	%
Na ⁺	78	3,39	34	HCO ₃ ⁻	276	4,52	46
K ⁺	9	0,23	2	Cl ⁻	125	3,53	36
Ca ²⁺	89	4,44	44	SO ₄ ²⁻	83	1,73	17
Mg ²⁺	24	1,97	20	NO ₃ ⁻	5	0,08	1
Всего:	200	10,03	100		489	9,86	400

а) часто встречающиеся (от 0,000X до X мг/л): Cu, Ti, Mn, Pb, Zn, V, Cr, Ni;

б) редко встречающиеся (от 0,000X до 0, X мг/л): Ba, Zr, Ag, Be, P, Sr, As, Sn, Co, Mo, Si;

в) весьма редко встречающиеся (<0,000X мг/л): Cd, Bi, W.

Содержание отдельных ионов в воде определяют в результате химического анализа воды и выражают в различных формах. Иногда для наглядности используют различные графические построения (квадрат Н. И. Толстикова), а также обобщенные формулы, в частности, формулу Курлова, которая имеет следующий вид на примере анализа воды, приведенного в табл. 26:

$$CO_2 \ 1,5; \ H_2SO_4 \ 0,02; \ M2,3 \frac{HCO_3^{-} 46, \ Cl^{-} 36, \ SO_4^{2-} 17}{Ca^{2+} 44, \ Na^{+} 34 \ Mg^{2+} 20} \ t^{\circ} 8^{\circ} Q 10,$$

где M — общая минерализация воды в г/л; Q — дебит источника или горизонта в определенных условиях в м³/сут;

t — температура воды в °С (ионы, содержание которых менее 10 %, не вносятся в формулу).

В такой же форме выражают результаты определения микрокомпонентов, если их ионная структура установлена (Fe²⁺, Br⁻, I⁻, NH₄⁺ и т. д.), а в случае неясности нахождения содержание дается в виде весовой формы в расчете на чистый элемент в микрограммах в одном литре воды (например, Cu, Zn, Hg и т. д.).

Концентрация растворенных в воде твердых минеральных веществ, находящихся в виде ионов и коллоидов, определяет минерализацию воды. Обычно ее выражают в граммах абсолютно сухого остатка, полученного при выпаривании одного литра воды.

По степени минерализации различают воды пресные (до

Таблица 27. Виды минеральных вод

Название минеральной воды	Название компонентов	Содержание компонентов более, г/л
Углекислая	Свободная углекислота	0,750
Сероводородная	Сероводород, титруемый йодом	0,01
Литиевая	Li ⁺	0,001
Железистая	Fe ³⁺	0,01
Железистая	Fe ²⁺	0,01
Бромная	Br ⁻	0,005
Иодистая	I ⁻	0,001

П р и м е ч а н и е. Содержание R_п в радиоактивных водах более 13,5 Вк/м³.

1 г/л); солоноватые (от 1 до 10); соленые (от 10 до 50) и рас-  
солы (более 50 г/л).

Следует отметить, что термин «минеральные воды» отно-  
сится к водам, содержащим ряд специфических компонентов  
(табл. 27).

В зависимости от типа месторождения П. П. Климентов вы-  
делил три характерных случая взаимодействия подземных вод  
с полезным ископаемым:

1) месторождения, содержащие легкорастворимые соли, ко-  
торые приводят к формированию высокоминерализованных вод  
(солевые месторождения — хлориды и сульфаты натрия, калия,  
магния, кальция, карбонаты натрия, нитраты натрия и калия);

2) месторождения, содержащие минералы, которые при вы-  
ветривании (окислении) образуют легкорастворимые соли, при-  
водящие к образованию кислых вод (кислые воды зоны окис-  
ления сульфидных месторождений, содержат тяжелые ме-  
таллы);

3) месторождения, включающие подземные воды с повы-  
шенным содержанием редких и россыпных элементов.

Химический состав и минерализация воды определяют ее  
реакцию, жесткость и агрессивность, имеющих  
большое практическое значение. Вредное влияние подземных  
вод на некоторых месторождениях заключается не только  
в формировании больших водопритоков, напряженного состоя-  
ния, изменении свойств горных пород и ухудшении устойчи-  
вости горных выработок, что в значительной мере затрудняет и  
удорожает добычу полезного ископаемого, но еще и в корро-  
дирующем и агрессивном действии рудничных и шахтных вод  
на горное оборудование и бетонное крепление выработок.

Известно, что кислые воды сульфидных месторождений Ка-  
рабаш, Бява, Дегтярка и некоторых других, приносят большой  
ущерб горной промышленности. А для условий Донбасса на-

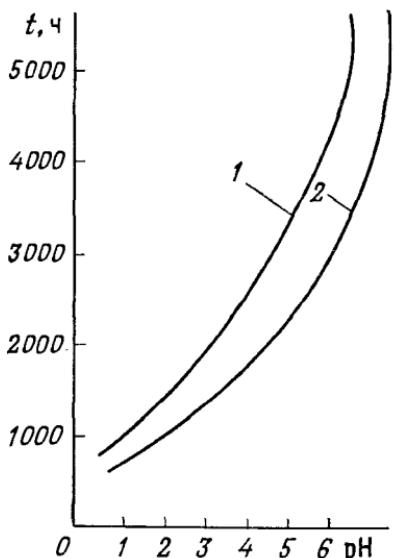


Рис. 41. Влияние кислотности шахтных вод Донецкого и Кизеловского угольных бассейнов на срок службы низконапорных (1) и высоконапорных (2) насосов

блюдения показали, что в шахтных водах при  $\text{pH} < 3$  роторы чугунных центробежных насосов разрушаются после 30—40 мин работы. Здесь намечен ряд мероприятий по борьбе с этими водами ( $\text{pH}$  от 6 до 1): предварительное осушение отдельных участков шахтных полей, защита от поступления атмосферных осадков, одновременная разработка нескольких высокосернистых и малосернистых угольных пластов, раздельная откачка кислых и щелочных вод. Для Кизеловского угольного бассейна А. В. Докукин показал, что допустимая кислотность рудничных вод с малой корродирующей способностью (срок службы насосов снижается на 5—6 %) характеризуется показателем  $\text{pH} \geq 6,5$ .

На рис. 41 показаны результаты влияния кислотности рудничных вод некоторых шахт Донбасса и Кизеловского угольных бассейнов на срок службы 120 высоконапорных насосов «Коммунист» за 6-летний период и 20 низконапорных насосов «Комсомолец» за 4-летний период.

Реакция воды ( $\text{pH}$ ) характеризуется содержанием водородных ионов ( $\text{pH} = -\lg \text{H}^+$ ). Нейтральной считается вода, у которой  $\text{pH} = 7$ , кислой —  $\text{pH} < 7$  и щелочной —  $\text{pH} > 7$ . Подземные воды обычно имеют слабо щелочную реакцию, но в районах угольных и сульфидных месторождений они характеризуются повышенной кислотностью за счет содержания свободной серной кислоты, образующейся при окислении сульфидов (в особенности пирита). Иногда на этих месторождениях  $\text{pH} < 3$ .

Жесткость воды зависит от содержания в ней растворимых соединений кальция и магния:  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 \times \text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$  и др. Различают: общую жесткость, определяемую содержанием всех этих соединений; устранимую (временную), зависящую от количества бикарбонатов кальция и магния  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ; неустранимую (постоянную), составляющую разницу между общей и временной; карбонатную (за счет всех карбонатов и бикарбонатов) и некарбонатную (разность между об-

щей и карбонатной). При кипячении жесткой воды бикарбонатные соединения переходят в труднорастворимые соли  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  и выпадают в осадок, что приводит к смягчению воды и образованию накипи на стенах котлов.

Для оценки жесткости природных вод применяют различные количественные показатели (немецкие, английские, американские, французские градусы жесткости). О. А. Алекин предлагает оценивать жесткость по содержанию в воде ионов кальция и магния. За 1 мг·экв/л жесткости он принимает 20,04 мг/л  $\text{Ca}^{2+}$  или 12,16 мг/л  $\text{Mg}^{2+}$  и классифицирует воды следующим образом: очень мягкие (до 1,5 мг·экв/л; до  $4^\circ$ , где градусы немецкие); мягкие (от 1,5 до 3 мг·экв/л; от 4 до  $8^\circ$ ); умеренно жесткие (от 3 до 6 мг·экв/л; от 8 до  $16^\circ$ ); жесткие (от 6 до 9 мг·экв/л; от 16 до  $24^\circ$ ); очень жесткие (более 9 мг·экв/л; от 16 до  $24^\circ$ ). Один немецкий градус равен 10 мг/л  $\text{CaO}$  или 7,2 мг/л  $\text{MgO}$ .

Для кислых шахтных вод Донбасса, по данным П. Я. Самойлович, постоянная жесткость достигает 53—71 мг·экв/л. Рост ее коррелируется с увеличением кислотности воды.

Наблюдения, проведенные на ряде угольных шахт, показывают определенную закономерность изменения кислотности шахтных вод в течение года (табл. 28), что объясняется изменением количества воды, поступающей с поверхности земли в разные периоды.

Интересно отметить, что в Кизеловском бассейне максимальная кислотность отмечена для шахтных вод на участках разработки мощных угольных пластов с падением  $30^\circ$  и более, а для Донбасса при разработке крутопадающих пластов средней мощности с содержанием серы более 3 %. На участках горизонтального залегания угольных пластов (Подмосковный бас-

Таблица 28. Кислотность шахтных вод по данным А. В. Докукина

Название шахт	Кислотность воды в зимний период рН	Кислотность воды в весенний период рН
Кизеловский угольный бассейн		
Им. В. И. Ленина	4,5	3,2
Им. В. М. Володарского	3,7	2,5
Им. Н. К. Крупской	3,8	1,8
Донецкий угольный бассейн		
«Никанор»	4,7	3,8
ОГПУ	4,5	3,2
№ 7	5,0	3,8
№ 153	4,4	3,3
«Канторная»	5,7	3,3

сейн) с высоким содержанием пирита не наблюдается формирование кислых шахтных вод, это объясняется малой скоростью движения подземных вод.

Агрессивность воды по отношению к бетонным сооружениям имеет большое практическое значение при оценке их устойчивости. При этом агрессивностью называют способность воды разрушать бетон путем химического воздействия солями и газами, содержащимися в ней. Различают общекислотную, углекислотную, выщелачивающую, сульфатную и магнезиальную агрессивность. Первые три вида агрессивности сводятся к разрушению поверхности корки бетона, образующейся при его затвердении ( $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$ ). Например, при взаимодействии карбонатной корки с водой, обладающей углекислотной агрессивностью, происходит ее растворение  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  или выщелачивание  $\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ . По существующим нормам общекислотная агрессивность определяется по величине  $\text{pH}$  (менее 5, иногда менее 7), углекислотная — по содержанию  $\text{CO}_2$  в зависимости от концентрации  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$  (если  $\text{CO}_2$  не превышает ее равновесную концентрацию в данных условиях, то вода не является агрессивной при любом содержании  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ ), а выщелачивающая — по содержанию  $\text{HCO}_3^-$  (вода агрессивна при  $\text{HCO}_3^- < 1,5 \text{ мг} \cdot \text{экв}/\text{л}$ ).

Сульфатная агрессивность проявляется в образовании двух соединений в порах цемента (гипса  $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и соли Де-Валя  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x_3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), которое происходит с увеличением объема, что приводит к увеличению напряженности внутри бетона и, как следствие, к его разрушению. Нормы допускают до  $250 \text{ мг}/\text{л}$   $\text{SO}_4^{2-}$  при концентрации  $\text{Cl}^- < 1000 \text{ мг}/\text{л}$ , а для высоких марок цемента содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  может достигать  $3000 \text{ мг}/\text{л}$ .

По результатам наблюдений в Донецком и Кизеловском угольных бассейнах установлено, что бетонные и железобетонные крепления горных выработок разрушаются под влиянием кислых шахтных вод при наличии в них сульфатов магния, кальция и натрия, а также углекислоты. При этом глубина разрушения бетона достигает от 30 до 150 мм.

### 3.5. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Гравитационное движение флюидов в среде, состоящей из пустот, размер которых значительно меньше размера потока, но гораздо больше размера молекул движущегося флюида, носит название фильтрации. В связи с этим теория фильтрации основывается на общих закономерностях гидравлики, хотя для реальной природной среды (горных пород) она имеет ряд своеоб-

разных особенностей. Критерием кинематической характеристики потока подземных вод служит скорость фильтрации  $v_\phi$ , представляющая собой отношение расхода  $Q$  за единицу времени к площади поперечного сечения  $F$ , т. е.

$$v_\phi = Q/(Ft).$$

Исходя из природы сил сопротивления, возникающих в фильтрационном потоке, Н. Н. Павловский в 1956 г. предложил различать два режима течения — ламинарный и турбулентный. Ламинарный режим имеет место при малых скоростях движения, когда между отдельными струйками не наблюдается гидравлическое перемешивание. Турбулентный (беспорядочный) режим наблюдается в больших пустотах (карстовые массивы) при значительных скоростях течения и для него характерно перемешивание отдельных струек. Этот накопленный опыт (см. работы известных гидрогеологов С. В. Троянского, Н. К. Гиринского, В. Н. Щелкачева и других) дает возможность считать, что для подавляющего большинства горных пород характерен ламинарный режим фильтрации. Следовательно, между расходом потока и его градиентом (падением) напора существует линейная связь, в соответствии с законом Дарси (закон линейной фильтрации), т. к.  $Q = kFIt$ , где  $Q$  — расход фильтрационного потока в  $\text{м}^3$  или  $\text{см}^3$ ;  $F$  — поперечное сечение потока в  $\text{м}^2$  или  $\text{см}^2$ ;  $I = \Delta H/l$  — градиент напора потока;  $\Delta H$  — потеря напора в м, см;  $l$  — длина пути фильтрации, м, см;  $t$  — время, за которое определено  $Q$ ;  $k$  — коэффициент фильтрации водоносных пород в  $\text{м}/\text{сут}$  или в  $\text{см}/\text{с}$ .

Применительно к решению задач по определению водопритоков в горные выработки С. В. Троянский указал на возможность использования закона ламинарной фильтрации Дарси для любых водоносных пород, в том числе трещиноватых и зарастанных.

Легко можно показать переход из общего выражения закона Дарси к записанному

$$v = \frac{K_\pi}{\eta} \frac{dp}{dl},$$

где  $K_\pi$  — коэффициент проницаемости среды;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости жидкости;  $p$  — давление в жидкости;  $\frac{dp}{dl}$  — градиент давления.

Переход к турбулентному режиму фильтрации может иметь место только в очень высокопроницаемых породах при резкой интенсификации водного потока, что в реальной обстановке встречается исключительно редко. Критическая скорость, представляющая собой верхнюю границу применяемости прямоли-

нейного закона Дарси, может быть определена по предложению В. А. Мироненко и В. И. Шестакова из выражения

$$v_{kp} = e/\bar{\alpha},$$

где  $\bar{\alpha} = \frac{I}{p} \sqrt{\frac{k}{vg}}$ ,  $e$  — коэффициент пористости водосодержащей породы;  $p$  — давление в потоке;  $\bar{\alpha}$  — коэффициент нелинейности фильтрации ( $\bar{\alpha}=0,1-0,3$  для песков);  $v=0,01 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Интерес для решения некоторых задач представляет нижняя граница применимости закона Дарси. В малопроницаемых породах возникает вязкоэластический режим течения (сопротивление в потоке зависит от вязкого трения и сцепления частиц воды), который возможен при градиентах выше начального градиента  $I_0$ . Последний определяется из выражения

$$I_0 = \frac{2\tau_0}{\rho_v r g},$$

где  $\tau_0$  — начальное сопротивление сдвигу;  $\rho_v$  — плотность воды;  $r$  — радиус сечения пор;  $g$  — ускорение свободного падения.

В этом случае (при  $I > I_0$ ) закон фильтрации описывается уравнением, предложенным С. В. Нерпиным в 1967 г.:

$$v_\Phi = k \left[ I - \frac{4}{3} I_0 + \frac{I_0}{3} \left( \frac{I_0}{I} \right)^3 \right].$$

Различные области фильтрации можно изобразить графически, как показано на рис. 42.

Для ведения гидрогеологических расчетов необходима фильтрационная схематизация, которая бы позволила установить характер процесса во времени (стационарная и нестационарная фильтрация), пространственную структуру потока и составить математическую модель.

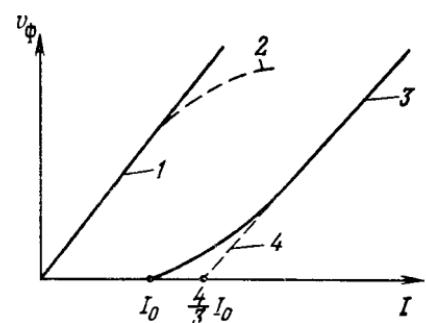


Рис. 42. Графическое изображение различных режимов фильтрации:

$$1 - v_\Phi = kI; 2 - v_\Phi = k\sqrt{I}; 3 - v_\Phi = k \left[ I - \frac{4}{3}I_0 + \frac{I_0}{3} \left( \frac{I_0}{I} \right)^3 \right]; 4 - v_\Phi = k \left( I - \frac{4}{3}I_0 \right)$$

Структура потока определяется характером сетки движения, состоящей из линий равных напоров и линий тока. Первые соединяют точки с одинаковым напором, а вторые показывают направление потока. В однородной среде линии потока перпендикулярны к линиям равного напора и совпадают с направлением максимального градиента. Практика показы-

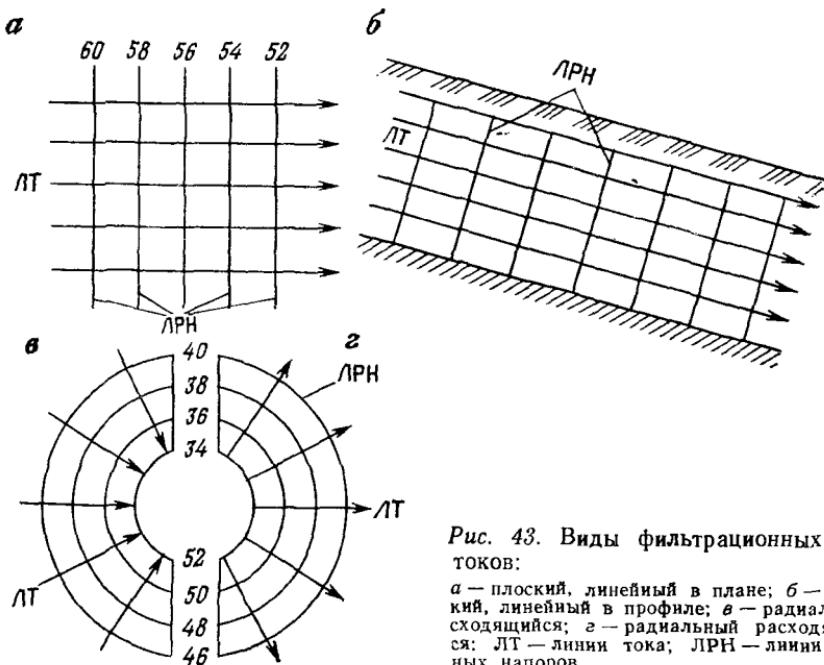


Рис. 43. Виды фильтрационных потоков:

а — плоский, линейный в плане; б — плоский, линейный в профиле; в — радиальный расходящийся; ЛТ — линии тока; ЛРН — линии равных напоров

вает, что в расчетах потоки принимаются плоскими в профиле и в плане (рис. 43) с изменением сетки движения в одной плоскости (в вертикальной для профильных потоков и в горизонтальной для потоков большой протяженности по сравнению с их мощностью).

В соответствии с законом Дарси удельный расход планового потока  $q$  в однородной среде (поток шириной в 1 м) представляет согласно Ж. Дююю:

$$q = kmI = TI,$$

где  $m$  — мощность потока;  $T$  — его проводимость.

Если поток приурочен к нескольким водоносным горизонтам одинаковой мощности, но разной водопроницаемости, то

$$T = k_1m_1 + k_2m_2 + k_3m_3 + \dots + k_nm_n.$$

Из приведенных закономерностей о движении подземных вод, которые лежат в основе расчета водопритоков к различным выработкам и сооружениям, видно, что фильтрационный поток характеризуется рядом параметров, из которых коэффициент фильтрации представляет наибольший интерес, поскольку он отражает водопроницаемость горных пород, обладающих разной степенью изменчивости и анизотропии (см. разд. 2.4).

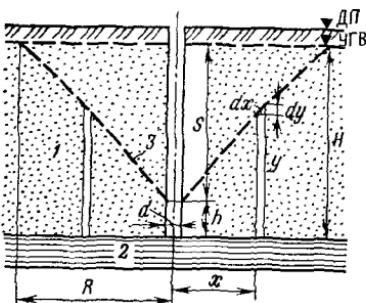


Рис. 44. Схема к расчету водопритока в грунтовом водоносном горизонте:

1 — водоносный горизонт; 2 — водоупор; 3 — депрессионная воронка

водоносному горизонту. Большое практическое значение для решения многих задач имеет вертикальная выработка круглого сечения под названием «вертикальный колодец», схема которого используется для расчета водопритока подземных вод к скважине, шахтному стволу, шурфу, котловану, карьеру и другим дренажным сооружениям. При этом, если выработка пересекает всю мощность водоносного горизонта и своим забоем опирается на подстилающий водоупор, то она называется совершенной. В противном случае несовершенной. Кроме того, если при таком понижении уровня воды в результате откачки величина водопритока постоянна, то режим фильтрации считается стабилизированным (установившимся).

Проведем расчет водопритока к вертикальному шахтному стволу, пройденному в грунтовом водоносном горизонте и опирающемуся своим забоем в водоупор (рис. 44). В основу расчета положим закон Дарси в знакомом виде

$$Q = kIf t.$$

Если посмотреть внимательно на расчетную схему, то мы убедимся, что сформировавшаяся депрессионная воронка вокруг дренирующей выработки характеризуется непостоянными значениями гидравлического градиента и сечения дренируемого радиального потока. Поэтому необходимо на некотором произвольном расстоянии  $x$  от оси колодца выделить бесконечно малое изменение сечения потока  $dx$  и для него в дифференциальной форме записать выражение (в соответствии опять же с законом Дарси) для определения водопритока, проходящего через него, а потом провести суммирование (интегрирование) по всему объему депрессионной воронки. Из расчетной схемы

Рассмотрим некоторые элементарные задачи определения водопритоков в дренирующие сооружения (горные выработки, водопонижающие скважины, водозаборные узлы и т. д.). В соответствии с законом Дарси, как нам уже известно, величина водопритока в единицу времени зависит от водопроницаемости, градиента и сечения потока. Однако на эту величину оказывают влияние формы и размеры дренирующей выработки, ее положение в пространстве и по отношению к водоносному горизонту.

на рис. 44 видно, что сечение представляет собой боковую поверхность цилиндра радиусом  $x$  и высотой  $y$ ,  $dF = 2\pi xy$ , а градиент составит отношение  $dy/dx$ . Из этой же схемы видно, что  $x$  будет изменяться от величины радиуса дренирующей выработки  $r$ , до значения радиуса сформировавшейся депрессионной воронки  $R$  (радиуса влияния дренирующей выработки), а  $y$  — от  $h$  до  $H$ . Поэтому закон Дарси после некоторого преобразования примет следующий вид

$$Q \int_r^R \frac{dx}{x} = 2\pi k \int_h^H y dy.$$

Возьмем табличные определенные интегралы

$$\int_r^R \frac{dx}{x} = \ln R/r \text{ и } \int_h^H y dy = \frac{H^2 - h^2}{2}$$

и запишем окончательно выражение для расчета количества воды  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\text{м}^3/\text{сут}$ , притекающего за единицу времени из грунтового водоносного горизонта мощностью  $H$ , м, водопроницаемостью, характеризуемой коэффициентом фильтрации  $k$ , м/сут в совершенную вертикальную выработку радиусом  $r$ , м при установившемся режиме фильтрации с понижением естественного уровня воды на величину  $S = H - h$  в виде

$$Q = \pi k \frac{H^2 - h^2}{\ln R/r}.$$

Если выработка пройдена в напорном (артезианском) водоносном горизонте, то таким же образом можно провести вывод расчетной формулы, но сечение потока (рис. 45) здесь составит  $2\pi M$ , где  $M$  — мощность напорного водоносного горизонта. Поэтому окончательная формула примет следующий вид:

$$Q = 2\pi k M \frac{H - h}{\ln R/r} = \frac{2\pi k M S}{\ln R/r}.$$

Приведенные две формулы для расчета водопритоков к вертикальным совершенным колодцам в грунтовом и артезианском водоносных горизонтах были получены впервые французским ученым Ж. Дюпюи. Эти формулы могут быть использованы и

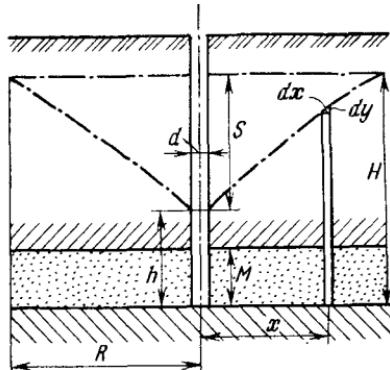


Рис. 45. Схема к расчету водопритока в напорном водоносном горизонте

при определении водопритоков в котлованы, карьеры, подземные выработки, которые приравниваются «большому колодцу», с радиусом  $r_k = \sqrt{F/\pi}$  или  $r_k = \frac{P}{2\pi}$ , где  $F$  — площадь выработок в водоносном горизонте;  $P$  — периметр карьера.

Здесь надо сделать два важных замечания, имеющих для практики осушения месторождений очень важное значение. Во-первых, формулы Дюпюи с учетом тех изменений и уточнений, которые внесли в них специалисты-гидрогеологи, могут быть использованы для прогнозов водопритоков в вертикальные выработки в период разведки месторождений и при проектировании горных предприятий в части дренирования подземных вод в период строительства и эксплуатации горных выработок. Во-вторых, они дают возможность решать обратную задачу, т. е. определять коэффициент фильтрации по наблюдениям за дренированием подземных вод горными выработками или водопонижающими скважинами. Полученные при этом характеристики водопроницаемости обладают высокой точностью и надежностью и используются для уточнения прогнозных расчетов или в качестве аналогов при проектировании новых предприятий. Легко убедиться в том, что для условий грунтовых вод

$$k = \frac{Q \ln R/r}{\pi (H^2 - h^2)},$$

а для артезианских колодцев

$$R = \frac{Q \ln R/S}{2\pi M S}.$$

Проводимые в период разведки месторождения опытно-фильтрационные работы (откачки, нагнетания, наливы), в силу

их кратковременности и многих неизвестных о геологическом строении и гидрогеологических условиях, дают менее точные сведения о водопроницаемости изучаемых пород.

Для плоского потока, формирующегося при дренировании подземных вод линейными совершенными дренами (реками, канавками, каналами, трещинами, штреками, рядом водопонизительных скважин и другими сооружениями, вытянутыми в плане),

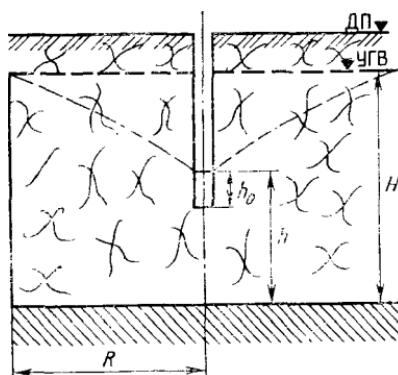


Рис. 46. Схема к расчету водопритока к несовершенному колодцу

у которых длина в 10 раз и более превышает ширину, можно использовать формулу Дюпюи для притока с одной стороны дрены

$$Q = Bk \frac{H^2 - h^2}{2R},$$

где  $B$  — длина дрены;  $h$  — глубина воды в дрене.

При расчете водопритоков в несовершенные выработки, не доходящие своим дном до водоупора (рис. 46), вводятся соответствующие поправки, которые приводятся в справочниках по осушению МПИ. Так, например, формула Дюпюи для несовершенного вертикального колодца приобретает вид

$$Q = \pi k \frac{H^2 - h^2}{\ln R/r} \sqrt{\frac{h_0 + 0,5r}{h}} \sqrt[4]{\frac{rh - h_0}{h}},$$

где  $h$  — расстояние от уровня воды в колодце до водоупора;  $H$  — первоначальная (естественная) мощность водоносного горизонта;  $h_0$  — высота столба воды в колодце.

Формула для расчета водопритока в горизонтальную несовершенную дрену типа галереи круглого сечения имеет следующий вид:

$$Q = \frac{2BkHA}{\ln R/r},$$

где  $A = \pi/2 + H/R$ ;  $H$  — расстояние от уровня грунтовых вод до центра круглого сечения дрены.

### 3.6. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОБВОДНЕННОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Для оценки влияния подземных вод на условия ведения горных работ, на устойчивость сооружений, а также для разработки мероприятий по ограничению этого влияния, большое значение имеют характер и степень обводненности месторождений. О степени обводненности судят по общему водопритоку в шахту или карьер, выраженному в кубических метрах в час и коэффициенту водообильности, представляющему собой отношение количества откачиваемой воды из горной выработки в кубических метрах к количеству добываемого полезного ископаемого в тоннах за определенный период времени (обычно за год). По этим показателям была предложена одна из первых классификаций угольных шахт М. В. Сыроватко (табл. 29).

Характеризуя рудные месторождения в гумидной и аридной зонах СССР, Н. И. Плотников и И. И. Гогинец [21] приводят следующие прогнозные величины водопритоков в горные выработки в зависимости от степени обводненности: I группа месторождений 50—100 (300)  $\text{м}^3/\text{ч}$ ; II — 200 (300) — 800 (1200);

Таблица 29. Классификация горных выработок по степени обводненности

Степень обводненности	Коэффициент фильтрации основного водоносного горизонта, м/сут	Общий водоприток, м ³ /ч	Удельный водоприток, м ³ /ч на 1000 м ² выработок	Коэффициент водообнливности, м ³ /т
Весьма обводненные	$>100$	$>1000$	$>4$	$>25$
Обводненные	5—100	300—1000	0,4—4	8—25
Умеренные обводненные	0,05—5	100—300	0,05—0,4	3—8
Слабо обводненные и необводненные	$<0,05$	$<100$	$<0,05$	$<3$

III — 2000—5000; IV — (за счет трещинно-карстовых и речных вод) — 8000—12000, редко до 32000 м³/ч.

Общую картину изменения показателей обводненности можно проследить на примере шахты «Ленинградская» (рис. 47), где водоносный комплекс приурочен к карбонатным породам ордовика слоистого строения с проводимостью в среднем от 10 до 150 м²/с.

Условия обводнения зависят от целого ряда природных факторов, но на них сказываются и некоторые техногенные особенности разведки, вскрытия и эксплуатации месторождения: тампонаж скважин, затопление старых шахт, система ведения работ и т. д. Основными природными факторами обводнения месторождений твердых полезных ископаемых следует считать: атмосферные осадки, орогидрографию местности, водопроницаемость вмещающих и покрывающих пород, тектоническую их нарушенность, глубину залегания полезного ископаемого. Очень часто главной причиной обводнения горных выработок является поступление воды за счет инфильтрации атмосферных и поверхностных вод, интенсивность которой также зависит от климатических условий района месторождения, рельефа местности, водопроницаемости покрывающих пород, глубины залегания полезного ископаемого.

Оценка источников водопритоков в шахту или карьер дает возможность улучшить эффект работы водозащитных сооружений, а также водоохраных мероприятий.

Влияние атмосферных осад-

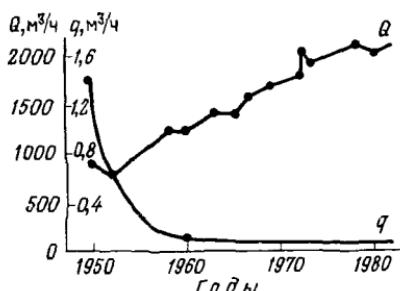


Рис. 47. Изменение показателей обводненности сланцевой шахты «Ленинградская».

Q — общая водоприток; q — удельный водоприток на 1000 м² отработанной площади

ков на водообильность шахт при сравнительно одинаковых прочих условиях можно показать на примере Донецкого и Карагандинского угольных бассейнов. Здесь подземные воды приурочены к трещиноватым песчаникам, сланцам и известнякам достаточно высокой водопроницаемости. Но несмотря на подобие водосодержащих пород, водоприток в шахты Карагандинского бассейна, где количество атмосферных осадков составляет около 270 мм в год, в 2—3 раза меньше, чем в шахты Донбасса, в районе которого выпадает атмосферных осадков 400 мм в год и испаряемость меньше.

Водопроницаемость перекрывающих пород и рельеф местности оказывают существенное влияние на изменение интенсивности инфильтрации в периоды сильных дождей и весеннего снеготаяния. Так под балками, оврагами и другими понижениями рельефа с маломощными покровами глинистых отложений притоки воды в эти периоды увеличиваются на 20—40 %, а иногда в 2—3 раза по сравнению со среднегодовым. Под относительно ровной поверхностью земли и при наличии более мощных толщ глинистых пород рост водопритоков весной составляет всего 10—15 % от среднегодового. О непосредственной связи водопритоков в шахту с атмосферными осадками можно судить по данным на рис. 48 [17]. Рельеф земной поверхности определяет на многих месторождениях характер и интенсивность разгрузки водоносных горизонтов, что, в конечном итоге сказывается на степени обводненности. Так, для некоторых подземных выработок, проходимых на водораздельных участках, где подземные воды дренируются местной гидрографической сетью, водопритоки в 10 раз меньше, чем на участках, залегающих на более низких отметках.

Особенно резко увеличиваются водопритоки в горные выработки при прохождении их в непосредственной близости с поверхностными водоемами. Это увеличение связано с более

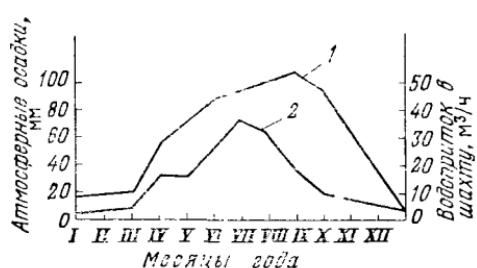


Рис. 48. Зависимость водопритоков в шахту (1) от количества атмосферных осадков (2)

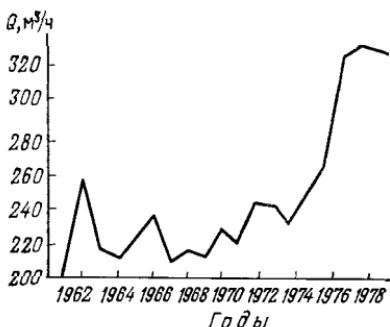


Рис. 49. График изменения водопритоков в Сибайский карьер

высокой водообильностью месторождения, формирующейся за счет питания водоносных горизонтов поверхностными водами. Естественно, что интенсивность этого питания зависит от литологического состава аллювиальных отложений и обнаженности коренных пород. Особо показательны в этом отношении результаты наблюдений за водопритоками в горные выработки в Кузбассе. Здесь вода проникает через трещиноватые песчаники, выходящие в речные долины и перекрытые песчано-галечным аллювием. На участках, удаленных от рек более чем на 0,5—1 км, водоприток составляет  $75,0-100 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при сокращении этого расстояния до 400—500 м водоприток возрастает до 250—300  $\text{м}^3/\text{ч}$ , а при расстоянии 250—300 м — до 500  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Для условий Донбасса Д. И. Щеголев выделил 3 группы шахтных полей:

а) шахтные поля в пределах водораздельных пространств со спокойным рельефом, слабой обнаженностью коренных пород, коэффициент водообильности здесь составляет 1,8—2,8;

б) шахтные поля, приуроченные к склонам водоразделов, где сильно развита овражно-балочная сеть и обнаженность коренных пород, в связи с этим, значительная; коэффициент водообильности шахт в этих условиях возрастает до 3,0;

в) шахтные поля, расположенные в долинах рек, где существует непосредственная связь между поверхностными и атмосферными водами и горными выработками, коэффициент водообильности для таких шахт резко увеличивается и достигает 30 (шахта Сутаган).

Необходимо отметить, что резкое увеличение водопритоков может произойти при подработке водного объекта, так как при этом может образоваться непосредственная гидравлическая связь между водоемом и подземной выработкой. Поэтому горные работы в непосредственной близости от рек и других поверхностных водоемов (а также под мощными грунтовыми водоносными горизонтами) ведутся в соответствии со специальными «Правилами», «Указаниями» или «Техническими условиями...».

Влияние поверхностных и атмосферных вод особо чувствительно сказывается на водопритоках в открытые горные выработки. На рис. 49 приводится график режима водопритоков в Сибайский карьер, из которого видно, что по мере увеличения его глубины количество воды постепенно растет, отражая особенности гидрогеологических условий. Но с 1975 г. водоприток в карьер стал расти в связи с дренированием поверхностных вод [21].

Глубина залегания полезного ископаемого (горных выработок) оказывает определенное влияние на характер и величину обводненности горных выработок. Во многом это связано с уменьшением пустотности (трещиноватости и пористости)

горных пород с глубиной, что приводит к снижению их водопроницаемости. Многие угольные и рудные шахты на глубине первых сотен метров оказываются безводными или водопритоки в них незначительны. Об этом же говорят и наблюдения за прорывами в выработанное пространство. Для Донбасса, например, результаты наблюдений показывают, что на верхних горизонтах шахт прорывы воды достигают 150—200 м³/ч, а на нижних они не превышают 30—40 м³/ч.

Глубина горных выработок сказывается и на характере изменения водопритоков под влиянием весенних паводков и атмосферных осадков. А. И. Кравцов отмечает, что при глубине выработок 80—200 м увеличение водопритока наблюдается через несколько дней после выпадения сильных дождей, а в Подмосковном угольном бассейне — через несколько часов. При глубине выработок 250—300 м увеличение притока наступает через два месяца, а для одной из шахт в Донбассе на горизонте 560 м увеличение водопритоков было слабо заметным.

Однако, на некоторых месторождениях наблюдались отклонения от указанной закономерности. Интенсивно в этом отношении Калангуйское флюоритовое месторождение в Восточном Забайкалье. Здесь, как показали исследования П. М. Большакова, увеличение водопритока связано с наличием региональных трещин, глубина которых доходит до 370 м (по наблюдениям), и могут ожидаться на глубинах более 500 м. На этом примере видна роль тектонической обработки горных пород. Тектонические трещины или зоны нарушения представляют собой вместилища и проводники больших количеств подземных вод, за счет которых часто происходят водные прорывы или формирование больших водопритоков. Часто они (трещины и зоны нарушения пород) осуществляют гидравлическую связь между отдельными водоносными горизонтами, между водоносными горизонтами и поверхностными водоемами, а также между горными выработками (старыми и новыми), с одной стороны, и подземными и поверхностными водами, с другой.

Иногда тектонические нарушения создают подпружинивание водоносных горизонтов, за счет чего у последних меняются напор, мощность, скорость движения и т. д. Влияние тектонических нарушений на условия обводненности шахт отмечалось на угольных шахтах, Донбасса, в Средней Азии, на рудных месторождениях Южного Урала, на сланцевых шахтах Эстонии и в других угольных и рудных районах. В некоторых случаях здесь при пересечении горными выработками тектонических нарушений водопритоки увеличивались в сотни раз. Так, в 1952 г. на одной из шахт Донбасса, при пересечении сбросовой трещины, приток воды достиг огромной величины 1100 м³/ч, а в Богословский карьер № 3 по трещине, соединяющей водоносный горизонт в девонских известняках с горизонтом подзем-

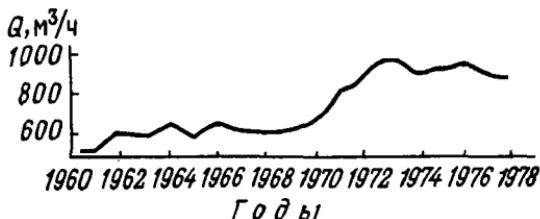


Рис. 50. График изменения водопритоков в рудный карьер при вскрытии тектонических нарушений

ных вод угленосной толщи мезозоя, приток составил 3500 м³/ч. Такой приток можно назвать катастрофическим.

Вскрытие тектонических нарушений открытыми горными работами приводит к резкому увеличению водопритоков в карьер. В монографии [21] приведен график изменения водопритока в рудный карьер (рис. 50), который в явно выраженной форме показывает влияние тектонических трещин в метаморфических породах вскрытых в 1969—1976 гг. и осуществляющих гидравлическую связь между подземными и поверхностными водами.

Надо отметить, что гидравлическая связь между отдельными водоносными горизонтами, между поверхностными и подземными водами и горными выработками очень часто осуществляется за счет искусственных пустот, остающихся при некачественном тампонировании разведочных, опытных и водопонижающих скважин. Примеры подработки таких скважин имеются на многих месторождениях. Особенно существенно их влияние на месторождениях, сложенных твердыми породами, в которых со временем не наступает самопроизвольный тампонаж за счет набухания, выдавливания и обрушения пород. При подработке подобных скважин для водопритоков характерна их неожиданность, которая приводит к нарушению ритма работы горного предприятия.

Особо следует отметить влияние на обводненность действующих горных выработок за счет вод, скопившихся в старых шахтах и карьерах (затопленные старые выработки). Водопритоки в этих случаях, как правило, носят катастрофический характер и сопровождаются выносом большого количества рыхлых пород. Иногда соседние старые выработки представляют собой единственный источник обводнения действующих шахт, что приводит к интенсификации процесса пучения глинистых пород почвы выработки. На Каширском месторождении горючих сланцев общий водоприток в шахту № 3, например, составляет 35 м³/ч, из которых больше половины за счет поступления шахтных вод из отработанного пространства закрытой соседней шахты № 1 [9].

### 3.7. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Подземные воды на месторождениях полезных ископаемых изучались Д. И. Щеголевым, С. В. Троянским, И. В. Сыроватко, С. П. Прохоровым, П. П. Климентовым, Н. И. Плотниковым, С. К. Абрамовым, М. С. Газизовым, Н. Г. Паукером, В. А. Мироненко, Ю. А. Норватовым и многими другими.

*Угольные месторождения* в зависимости от условий формирования и режима подземных вод, а также их водообильности разделены на семь основных групп, характерные особенности которых приведены в табл. 30. По условиям залегания здесь встречаются грунтовые, межпластовые и артезианские воды, которые заполняют поры, трещины и карстовые полости различных типов осадочных пород. Большое распространение, как видно из табл. 31, имеют подземные воды, приуроченные к неустойчивым рыхлым песчано-глинистым породам, проходка которых сопряжена со сложными и дорогостоящими мероприятиями по защите горных выработок от проникновения воды, а вместе с нею и песков-плынунов или глин. Эти породы имеют, как мы уже знаем, низкую водопроницаемость и водоотдачу, поэтому ожидаемые водопритоки в горные выработки незначительны, но из-за неустойчивости водосодержащих пород подобные водоносные горизонты рассматриваются как осложняющие условия освоения месторождений, в пределах которых они распространены. Сложными в эксплуатации оказываются месторождения, вмещающие породы которых содержат напорные воды трещинного или карстового типа. Здесь водопритоки в горные выработки велики (по шахте в целом они достигают до  $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и более) и поэтому водозащитные мероприятия представляют собой мощные дренажные и водоотводящие сооружения с высокопроизводительным насосным хозяйством. На таких шахтах часто имеют место прорывы глинистых пород, изолирующих напорные водоносные горизонты от горных выработок.

*Рудные месторождения* имеют свою гидрогеологическую специфику, которая определяет подход к их изучению и освоению. В связи с большим разнообразием Н. И. Плотников [21] предложил вне зоны мерзлоты выделить четыре типа рудных месторождений по рассмотренному ранее в разд. 2.8 геологическому строению, определяющему их обводненность, условия проходки и характер водозащиты. Для наглядности приведем характеристику гидрогеологических условий этих четырех групп месторождений в табл. 31.

Из приведенного краткого рассмотрения месторождений твердых полезных ископаемых с точки зрения их гидрогеологических условий видны те проблемы, с которыми обычно имеет

Таблица №3. Гидрогеологическая типизация узловых месторождений (по М. В. Сиротинко)

Но.	Место- рож- дение	Водоносные породы	Составной водоносный горизонт	Водоупоры з пахотой ж.к.	Узловые месторождения	Мероприятия по защите грунтовых вод от нефти
I	Долинодревесный комплекс склоновых террас	Третичные: 13- восточная и погружен- ная	20-30; 50-60; $K_{30} = 0,4-2,8$	Альбас, Кубанская, Ка- раганда и др.	Гидроизоляция при прохоже- нии склонов, отре- активные и водосточные свайки	
II	Нижнедвинской террасы, смешанная тектоническая бассе- нико-впадина	Пески	5-15; 25; $K_{30} = 2-3$	Восточно-Уральский буферный бассейн, Кубань-Кайское, Азар- штадское и другие бро- неглифные месторожде- ния	Предварительное осуще- ствление очистки, не в небольших нас- ыпях Азар-штаде	
III	Песчано-глинистые террасы	Платформенные напор- ные воды	20-30 (до 120 в трещиноватых песчаниках), $K_{30} = 5-7$	Подземный, прибрежный и др. Кизеловский, Кубань- Кайский и др.	Поверхностные и подзем- ные очистные, специаль- ные способы промывки	
IV	Карбонатные карсто- вые породы	Платформы (закар- стованные)	От 20-100 до 170-200; $K_{30} =$ - 8 (Кизеловский бассейн бассейна)	Кизеловский бассейн, Прикаспийский санда- чи и водосточные свайки	Гидроизоляция, отреак- тивные и водосточные свайки	
V	Третичные карсто- вые, залегающие пески	Алчимистские пес- ки, трещиноватые расходы	100-150; 200- 280; $K_{30} =$	Андреевское, Бутанай. Скважины откачки воды	Водоотводные свайки, откачки воды	
VI	Мощные стоячие воды в пах- отивной толще	Несколько слоев пес- чаных горизонтов в пах- отивной толще	$\div 2,8-3,2$ $K_{30} = 10-40$	Кубанская и Добсаса Ленгриеское, Кумык. - 3,0 (Ленгриеское, Кубанская и др.)	Свайки, обвалование территорий Поверхностные и подзем- ные очистные, Землеро- зработка	
VII	Мощные террасные воды	Платформенные воды террас	-	-	Не требуется выше при- ем гравитационных	

Примечание. № - коэффициент водоотдачи.

Таблица 31. Характеристика гидрологических условий рудных месторождений

Вид месторождения	Источник образования	Гидрологические водоразделы, км ²	Условия освоения	Характерные несто- рождения
I (см. рис. 30, а)	Глубинно-грунтовые и пр. пещерно-жильные воды, реки — поверхнос- тные воды	50–100, реже до 300	Обычные способы проходки, су- щественное влияние карь- ерных водосливов. Редко всту- пает необходимость отвода речных вод	Некоторые место- рождения Ура- л, Центрального Казах- стана, Средней Азии и др.
II (см. рис. 30, б)	Грунтовые, грунто-пру- тевые и грунто-жильные воды и поверхнос- тные воды	200–300, ин- огда до 800– 1200	Отрежимание отступов (провер- кастые или подземные), отвод поверхностных вод	Металлургия Ура- л, Казахстана и др.
III (см. рис. 30, в)	Грунтово-карстовые и по- верхностные воды	8 000–12 000, редко до 25 000–32 000	Сложные системы поверхности- го и подземного орошения, спе- циальные способы проходки гор- ных выработок, отвод или из- лияния речных вод	То же
IV (см. рис. 30, г)	Подземные воды сложного водораздельного комплекса	2 000–5 000	Сложные системы предваритель- ного, спрессажного, эксплуата- ционного и подземного орошения, специальные способы проходки и подземная горная выработка	Железорудные место- рождения КМА

дело горная практика при добыче полезных ископаемых. Они определяются геологическим строением месторождения, водопроницаемостью и водообильностью горных пород, условиями питания подземных вод (их связь с поверхностными бассейнами) и целым рядом техногенных факторов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем проявляется влияние подземных вод на условия разработки месторождений полезных ископаемых?
2. Назовите основные виды воды в горных породах.
3. Что такое поровые, трещинные и карстовые воды?
4. Дайте характеристику грунтовых вод.
5. В чем специфика напорных подземных вод?
6. Как залегают подземные воды в районах распространения вечно-мерзлых пород?
7. Какие воды Вам известны по общей минерализации, по химическому составу?
8. Какие виды агрессивности вод Вам известны? С какими соединениями, растворенными в воде, они связаны?
9. По каким законам происходит фильтрация подземных вод?
10. Как определяется коэффициент фильтрации водоносного горизонта, дренируемого шахтным стволом?
11. Каковы источники, формирующие водопритоки в горные выработки?
12. Дайте краткую характеристику гидрогеологических условий основных типов угольных и рудных месторождений.

## Глава 4 ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

### 4.1. ЕСТЕСТВЕННОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

В земной коре непрерывно происходят различные по своей природе геологические процессы, вызванные природными и техногенными факторами, определяющие геодинамическую обстановку отдельных территорий. Все эти процессы происходят в горных породах и подземных водах под влиянием силовых (энергетических) полей. Горные породы в условиях их природного залегания находятся под воздействием естественного напряженного состояния, с оценки которого можно начинать изучение различных геологических процессов, а также изменения его вокруг горных выработок в связи со строительством различных сооружений, при осушении или подтоплении территории, при проведении буро-взрывных работ и т. д. Свидетельством того, что горные породы в настоящее время находятся в напряженном состоянии, являются землетрясения, неотектонические движения, оползни и обвалы на естественных речных и морских склонах. Проявление напряженного состояния гор-

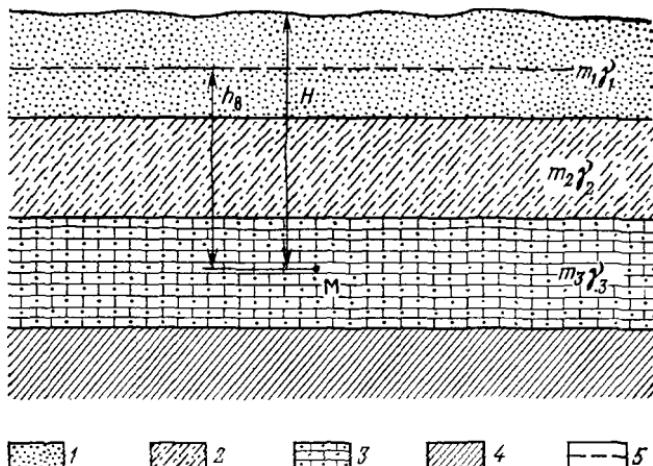


Рис. 51. Схема к определению природного давления от веса вышележащих пород:

1, 2 — водоносные песок и супесь; 3 — водоносный слабый песчаник; 4 — глинистый водоупор; 5 — уровень подземных вод

ных пород при их взаимодействии с различными поверхностными и подземными сооружениями наблюдается в разнообразных деформациях этих пород (уплотнение, разуплотнение, сдвиг и др.). Можно считать доказанным, что напряженное состояние пород в земной коре определяется действием двух независимых силовых полей — гравитационного и тектонического.

Гравитационное поле обусловлено действием всемирного тяготения и напряжения, возникающих на некоторой глубине  $H$  от поверхности земли, которые можно рассматривать как напряжения от веса вышележащих пород. Вертикальное давление толщи пород  $p_y$  на горизонтальную единичную площадку (рис. 51) можно выразить

$$p_y = \sum_1^n m_i \gamma_i - h_b \gamma_b,$$

где  $m_i$  — мощность  $i$ -го слоя в толще вышележащих пород с удельным весом  $\gamma_i$ ;  $n$  — число слоев в толще пород залегающих над точкой  $M$ ;  $h_b$  — высота столба воды над точкой  $M$  с удельным весом  $\gamma_b$ .

Если учитывать изменения плотности пород в зависимости от литологического состава и гидрогеологических условий и выразить ее некоторым средневзвешенным по мощности значением  $\gamma_{cp}$ , то можно записать:  $p_y = \gamma_{cp} H$ , где  $H$  — общая мощность вышелегающих пород.

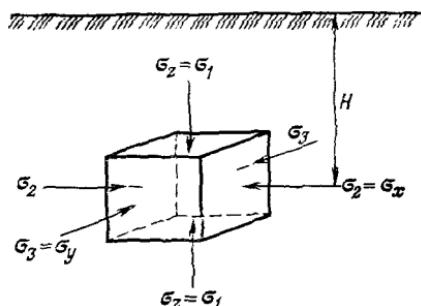


Рис. 52. Напряжения в элементарном объеме пород в условиях всестороннего сжатия

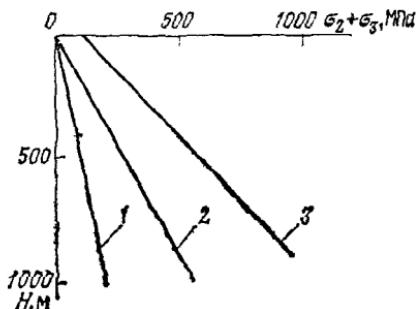


Рис. 53. Эпюры горизонтальных напряжений по данным расчета (1, 2) при  $\mu=0,25$  и  $\mu=0,50$  соответственно и по данным замеров (3)

Задача распределения напряжений в точке упругой изотропной толщи от веса вышележащих пород была решена швейцарским геологом А. Геймом (вторая половина XIX в) и академиком А. Н. Динником (1925 г.) в виде (рис. 52):

$$\sigma_z = \gamma_{cp} H; \quad \sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z,$$

где  $\sigma_z$  — вертикальная составляющая гравитационного поля;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — горизонтальные составляющие;  $\mu$  — коэффициент Пуассона горных пород.

По данным исследований свойств горных пород  $\mu$  изменяется от 0,1 до 0,5. В случае, когда  $\mu=0,5$   $\sigma_z=\sigma_x=\sigma_y$  или  $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ , что соответствует гидростатическому распределению напряжений в толще пород. Гипотеза о гидростатическом распределении напряжений в горных породах имеет принципиально важное значение. По своей физической природе коэффициент Пуассона не может быть больше 0,5, т. е. коэффициент бокового распора  $\xi=\mu/(1-\mu)$  не бывает больше единицы. При  $\mu=0,5$  следует предположить, что горные породы находятся в пластическом состоянии. Это можно допустить только для наиболее слабых осадочных пород (глин, аргиллитов, алевролитов, мергелей, песчаников, углей, слабых известняков) на глубинах, представляющих практический интерес. Градиент гравитационных напряжений составляет 0,025—0,032 МПа на каждый метр глубины.

Анализ многих аварий сооружений и непосредственные замеры напряжений в горных породах показали наличие аномальных напряжений, гораздо больших гравитационных. И. А. Турчанинов [27] приводит данные измерений напряжений (около 2000 опытов) на Кольском полуострове в недрах Хибинского щелочного массива на глубинах от 100 до 600 м в породах высокой прочности ( $R=120$ —220 МПа,  $\mu=0,26$ ). Горизонтальные

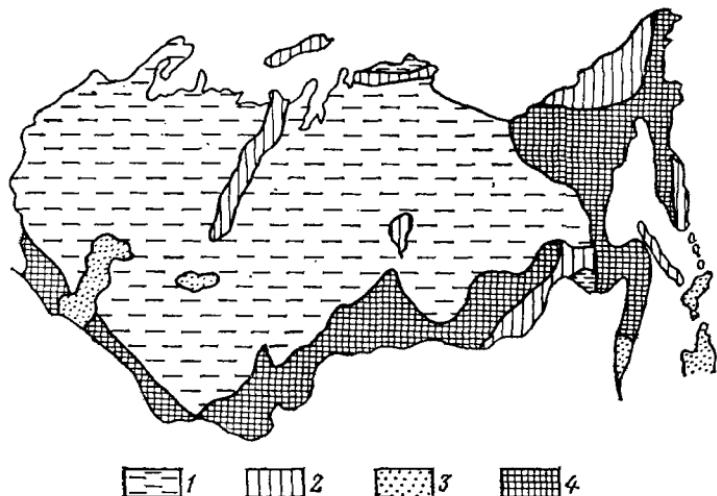


Рис. 54. Схема районирования территории СССР по величине касательных напряжений.

Значения  $\tau_t$ , МПа по районам: 1 — 5—15; 2 — 20—60; 3 — 35—95; 4 — 50—150

напряжения на глубине 100 м оказались в 60 раз больше гравитационных, а на глубине 600 м — в 12 раз. Имеются данные о наличии аномальных напряжений в кристаллических породах Балтийского щита на 17 рудниках Швеции, Норвегии, Финляндии (рис. 53), гранитах Португалии, метаморфических сланцах в районе Саяно-Шушенской ГЭС на р. Енисее, по данным В. М. Кутепова, а также в шахтах Донбасса, КМА и др. При этом установлено, что максимальные напряжения приурочены к зонам тектонических нарушений. На некоторых объектах замерены аномальные вертикальные напряжения. Таким образом, есть основание говорить о коэффициентах горизонтальной  $K_g$  и вертикальной  $K_v$  аномалий напряжений как соответствующих отношениях между фактическими и расчетными (по Диннику) напряжениями, т. е.

$$K_{g_x} = \sigma_x^{\phi} / \sigma_x^p; \quad K_{g_y} = \sigma_y^{\phi} / \sigma_y^p;$$

$$K_v = \sigma_z^{\phi} / \sigma_z^p.$$

Природа отмеченных аномалий довольно сложная и слабо изучена. Предполагается, что дополнительные (к гравитационным) напряжения имеют тектоническую природу и обусловлены наличием тектонического градиента, за счет которого появляются горизонтальные тектонические силы. М. В. Гзовский в 1972 г. выделил четыре типа районов на территории СССР

(рис. 54) по величине касательных напряжений тектонического происхождения:

- 1) наименее подвижные платформенные районы (максимальные  $\tau_t$  изменяются от 5,0 до 15,0 МПа);
- 2) более подвижные и сильно деформируемые районы (с  $\tau_t$  в пределах 20,0—60,0 МПа);
- 3) еще более подвижные районы (с  $\tau_t$  от 35,0 до 95,0 МПа);
- 4) наиболее подвижные и интенсивные деформируемые районы (с кратковременно действующими касательными напряжениями от 50,0 до 150,0 МПа).

Анализируя напряженное состояние пород, подверженных действию горизонтальных тектонических сил, И. А. Турчанинов [27] обособляет два возможных крайних случая.

1. Толща пород рассматривается как упругая, однородная, изотропная среда, в которой

$$\sigma_x = T_h; \quad \sigma_y = \mu T_h; \quad \sigma_z = 0;$$

где  $T_h$  — горизонтальная тектоническая сила.

2. Толща пород представлена несколькими слоями. Рассматриваемый слой имеет модуль упругости значительно ниже, чем у смежных слоев, а коэффициент поперечных деформаций, наоборот, значительно выше чем у смежных слоев. Кроме того, толща испытывает дополнительную вертикальную нагрузку возывающихся гор.

Тогда

$$\sigma_z = \frac{\mu}{1-\mu} T_h; \quad \sigma_x = T_h; \quad \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} T_h.$$

Г. А. Марков в 1977 г. показал, что при наличии тектонического силового поля величина контурных напряжений вокруг выработок зависит от их ориентировки.

## 4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ

В настоящее время принято выделять следующие процессы (слева) и явления (справа) в литосфере (по данным В. Д. Ломтадзе, 1977).

Деятельность поверхностных вод

Подмыв и разрушение берегов, морей, озер и водохранилищ; подмыв и разрушение речных берегов (эррозия); размыв склонов, овражно-балочные явления

Паводки на горных реках

Сели

Деятельность поверхностных и подземных вод

Заболачивание территории; просадочные явления

Деятельность подземных вод

Карст; плывуны; супфозия

Действие гравитационных сил

Оползни; обвалы

Деятельность ветра

Раззвевание и навевание

Промерзание и оттаивание  
Действие внутренних сил пород  
Действие внутренних сил земли  
Инженерная деятельность человека

Термокарст; морозное пучение; наледи  
Набухание; усадка; разуплотнение  
Сейсмические явления

Разрушение и уничтожение полезных площа-  
дей при разработке месторождений полезных  
ископаемых; оседание земной поверхности  
при значительных откатах подземных вод,  
нефти и газа; затопление и подтопление тер-  
риторий; вторичные засоления горных пород  
при орошении территории

В зависимости от характера энергии и места проявления вы-  
деляют эндогенные (глубинные) и экзогенные (поверхностные)  
процессы, которые тесно между собой связаны. Первые вызы-  
ваются внутренними силами Земли (энергией, выделяемой при  
развитии вещества Земли, действием силы тяжести и сил, воз-  
никающих при вращении Земли), а вторые — энергией солнеч-  
ной радиации, гравитационными силами и жизнедеятельностью  
растений и животных.

При освоении месторождений полезных ископаемых боль-  
шой интерес представляют такие природные процессы как тек-  
тонические (древние и современные) движения, сейсмические  
процессы и явления, карст, суффозия, плытуны, оползни, об-  
валы, эрозия, абразия, сели, мерзлотные проявления, выветри-  
вания и другие, которые в совокупности определяют геодина-  
мическую обстановку освоения месторождения и представ-  
ляют собой основной элемент его инженерно-геологических  
условий.

Оценка влияния геологических процессов и явлений на ин-  
женерно-геологические условия геологической среды невоз-  
можна без знания других ее элементов — горных пород и со-  
держащихся в них подземных вод, рельефа местности и напря-  
женного состояния. При этом исследования на месторождениях  
проводятся по трем направлениям: а) изучение природных гео-  
логических процессов и явлений; б) исследование вызванных  
деятельностью человека искусственных или активизации при-  
родных процессов; в) прогноз новых процессов и явлений  
в связи с освоением месторождения на базе анализа инженер-  
но-геологических условий данной территории и закономерностей  
возникновения и развития природных процессов.

В инженерной геодинамике, изучающей геологические про-  
цессы и явления, принято выделять инженерно-геологические  
процессы и явления, вызванные деятельностью человека  
(Г. Н. Каменский, 1936, И. В. Попов, 1959), а среди них горно-  
геологические, возникающие под влиянием горных работ  
(П. Н. Панюков, 1956).

#### 4.3. ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ

Перемещение (деформирование) горных пород под влиянием процессов, проходящих в земной коре, называют тектоническими движениями. Различают три типа таких движений: колебательные (эпейрогенические), складчатые и разрывные. Первый тип вызывается вертикальными напряжениями и выражается в образовании пологих поднятий и прогибов земной коры. Колебания происходят очень медленно и поддаются только инструментальным наблюдениям. Складчатые движения приводят к образованию складок различных размеров, которые носят общее название тектонических дислокаций. В результате складчатых движений происходит нарушение первоначального залегания горных пород. К третьему типу относят тектонические движения, в результате которых нарушается сплошность горных пород (дизъюнктивные тектонические нарушения). Нарушения могут образоваться со смещением отдельных блоков пород (трещины-диаклазы), или без смещения (трещины-паклазы).

Природа тектонических движений весьма сложная. Они проявлялись в древние геологические времена (о чем говорят древние тектонические структуры) и протекают в настоящее время (неотектонические движения). Специалисты-геотектоники связывают тектонические движения (за исключением колебательных) с изменением напряженного состояния в земной коре, где существуют зоны концентрации напряжения, сжатия и растяжения. Накопление напряжений происходит длительное время, что приводит к деформированию горных пород (дислокации) и в момент когда они превышают прочность пород (на разрыв или срез) происходят разрывные дислокации (нарушение сплошности). В связи с тем, что горные породы, в условиях их естественного залегания обладают ярко выраженной неоднородностью и анизотропностью прочности и деформируемости (см. гл. 2), следует предположить наличие в земной коре неоднородного поля напряжений и разные степени устойчивости в отдельных районах.

Тектонические движения представляют собой большой интерес для горной практики по двум главным направлениям. С одной стороны, они определяют прочность, деформируемость и водопроницаемость горных пород в условиях их естественного залегания (за счет трещиноватости, расслоения, тектонических зон, условий залегания), а с другой — создают дополнительное (к гравитационному) поле напряжений (см. разд. 4.1). Оценка устойчивости и крепления горных сооружений невозможна без знания характера тектонических особенностей изучаемого месторождения. Это имеет особое значение для районов герцинской и южноальпийской складчатости. Н. И. Николаев составил

карту новейших колебательных движений на территории СССР, на которой выделены как наиболее тектонически активные районы Кавказских гор, Тань-Шаня, Памира, Алтая, Саян, Дальнего Востока.

#### 4.4. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Совокупность явлений, связанных с землетрясениями и большими искусственными взрывами, носит название сейсмических. Это внезапные подземные толчки разной силы и колебания земной коры, которые часто нарушают устойчивость зданий, сооружений и горных пород. Известно, что только в течение нашего века в результате землетрясений погибло 800 тыс. человек. Землетрясение в Армении 1988 г. привело к гибели более 60 тыс. человек.

Землетрясения вызываются чаще всего тектоническими дислокациями, которые возникают в связи с изменением неустойчивого равновесного состояния горных пород в недрах земной коры. Индийские ученые Х. Гупта и Б. Растиги в 1979 г. отмечали, что землетрясение вызывается разрушением пород при сдвиге. Природа землетрясений стала более ясной в связи с изучением возбужденных землетрясений в районах крупных водохранилищ.

Как известно, при землетрясении возникают колебательные движения частиц среды, которые распространяются в виде сейсмических упругих волн. По характеру распространения эти волны делятся на прямые, отраженные и преломленные, а по виду деформации — на продольные, поперечные и поверхностные. Максимальную скорость имеют продольные волны  $v_p$ . Эта скорость связана с упругими характеристиками пород выражением С. В. Медведева:

$$v_p = \sqrt{\frac{E_d}{\gamma} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}},$$

где  $E_d$  — динамический модуль упругости;  $\mu$  — коэффициент поперечных деформаций;  $\gamma$  — удельный вес пород.

Максимальная скорость продольных волн изменяется от 2 (для осадочных пород) до 8 км/с (для ультраосновных изверженных пород).

Поперечные волны имеют меньшую скорость (в 1,5—2 раза меньше  $v_p$ ), а поверхностные, которые возникают в виде колебательных движений при выходе на поверхность продольных и поперечных волн, имеют еще меньшую скорость.

Сила землетрясения определяется количеством освобождающейся энергии в очаге, которая передается сейсмическими волнами на поверхность земли. Она оценивается в настоящее время

Таблица 32. Сравнительные данные о силе землетрясений

Сила землетрясения, баллы	Характеристика силы землетрясения	Сейсмическое ускорение, $\text{мм}/\text{с}^2$	Коэффициент сейсмичности $K_c$	Максимальное относительное смещение $x_0$ , $\text{мм}$
1	Незаметное	<2,5	<0,0003	—
2	Очень слабое	2,6—5	0,0003—0,0005	—
3	Слабое	5,1—10	0,0005—0,001	—
4	Умеренное	10—25	0,001—0,003	0,5
5	Довольно сильное	26—50	0,003—0,005	0,5—1,0
6	Сильное	51—100	0,005—0,01	1,1—2,0
7	Очень сильное	101—250	0,01—0,025	21—40
8	Разрушительное	251—500	0,025—0,05	4,1—6,0
9	Опустошительное	501—1000	0,05—0,1	8,1—16,0
10	Уничтожающее	1001—2500	0,1—0,25	16,1—32,0
11	Катастрофическое	2501—5000	0,25—0,5	>32,0
12	Сильно катастрофическое	>5000	>0,5	—

условной энергетической характеристикой, называемой магнитудой (С. В. Медведев, 1962):

$$M = \lg \frac{A}{A_0},$$

где  $A$  — максимальная амплитуда смещения частиц пород;  $A_0$  — амплитуда для некоторого эталонного землетрясения.

Магнитуда слабых землетрясений составляет 0—2, а очень сильных, катастрофических — более 8. Ташкентское землетрясение (1966 г.) имело  $M=5,3$ , Гоби-Алтайское (1957 г.) — 8,6, Армянское (1988 г.) — более 8.

Интенсивность землетрясений на поверхности оценивают и в баллах по величине сейсмического ускорения

$$a = \frac{4\pi^2 A}{T^2},$$

где  $A$  — амплитуда колебаний;  $T$  — период колебаний.

В табл. 32 приведены значения  $a$  для землетрясений разной балльности в соответствии с 12-балльной шкалой  $MSK=64$ , предложенной С. В. Медведевым, В. Шпонхойером (ГДР) и В. Карпиком (ЧССР).

Между магнитудой землетрясения и его балльностью в эпицентре в зависимости от глубины очага  $h$ , км существует следующая зависимость

$$I_3 = 1,5M - 3,5 \lg h + 3.$$

Влияние землетрясений на устойчивость сооружений можно оценивать коэффициентом сейсмичности (сопряжения)

$$K_c = a/g,$$

где  $g$  — ускорение свободного падения.

В связи с тем, что разрушительная сила землетрясений зависит не только от ускорения сейсмических волн, но также и от соотношения периодов колебаний горных пород и сооружений, С. В. Медведев предложил определять силу землетрясений сейсмометром. Основная часть прибора — это упругий сферический маятник, у которого период затухания колебаний  $T=0,25$ , как у обычных зданий. Сила землетрясения соответствует относительному смещению  $x_0$  такого маятника под воздействием колебаний горных пород, на которых построено здание (см. табл. 34).

Таблица 33. Данные о приращении сейсмичности в различных горных породах по С. В. Медведеву

Группа пород	Характерные горные породы	Скорость распространения продольных сейсмоволи, км/с	Приращение балльности землетрясений
Скальные	Гранит Известняки, сланцы, гнейсы Песчаники	5,6 3,5—4,5 2,2—3,0	0 0,2—0,4 0,5—0,8
Полускальные	Выветрелые известняки, сланцы, гнейсы Гипсы, мергели, аргиллиты Сцементированные пески	1,5—2,3 2,0—3,0 1,4—1,9	0,7—1,1 0,6—1,0 1,0—1,2
Крупнообломочные	Щебень и галька Гравий	1,3—2,1 1,1—1,9	0,9—1,3 1,0—1,5
Пески	Гравелистые и крупиозернистые Гравелистые и среднезернистые Гравелистые, мелкозернистые и пылеватые	1,1—1,6 1,0—1,4 0,7—1,2	1,2—1,4 1,3—1,6 1,4—1,6
Глинистые	Глины Суглинки Супеси	0,9—1,5 0,8—1,4 0,7—1,2	1,2—1,6 1,3—1,7 1,4—1,8
Насыпные породы и почвы маловлажные	—	0,2—0,5	2,3—3,0
Обводненные породы	Гравийно-галечные Песчаные Глинистые Насыпные породы и почвы	— — — —	1,6—2,0 2,0—2,4 2,4—2,8 3,3—3,9

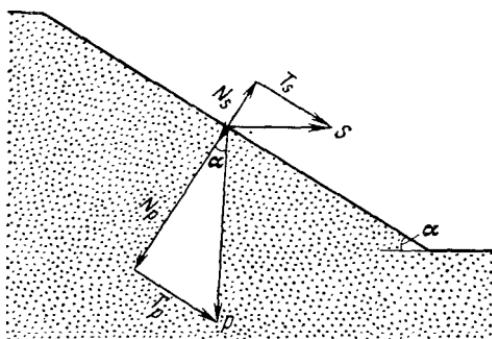


Рис. 55. Схема к расчету устойчивости песчаного откоса в сейсмическом районе

Сила землетрясения зависит во многом от геологического строения и гидрогеологических условий сейсмического района.

Если следом за С. В. Медведевым основными сейсмическими характеристиками горных пород считать скорость прохождения продольных волн  $v_p$  и сейсмическую жесткость  $q = v_p r$ , то можно понять почему балльность

землетрясения изменяется в различных породах. В табл. 33 приводятся данные о приращении балльности в различных породах по отношению к граниту, который принят в качестве эталона.

Как показали наблюдения, влияние грунтовых вод сказывается при глубине их залегания менее 10 м. При этом сила землетрясения увеличивается на один балл, если они залегают на глубине до 1 м.

В связи с изменением напряженного состояния в толщах горных пород при землетрясениях обычно активизируются древние оползни, а иногда возникают новые. Это влияние можно показать на простейшем примере устойчивости откоса сложенного песком.

Если для сухого песчаного откоса (рис. 55) условия продольного равновесия можно записать как

$$T_p = N_p \operatorname{tg} \varphi;$$

или  $p \sin \alpha = p \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi$ ,  
откуда  $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \varphi$  и  $\alpha = \varphi$ ,  
где  $\varphi$  — угол внутреннего трения песка.

При наличии сейсмической силы  $S$ , направленной горизонтально, оно записывается в виде

$$T_p + T_s = (N_p - N_s) \operatorname{tg} \varphi,$$

или

$$p \sin \alpha + S \cos \alpha = (p \cos \alpha - S \sin \alpha) \operatorname{tg} \varphi.$$

Если учесть, что  $p$  можно принять как инерционную силу и выразить через массу  $m$  и земное ускорение  $g$ , а  $S$  как сейсмическую инерционную силу, равную  $S = ma$ , то отношение

$$S/p = a/g = K_c.$$

Тогда можно окончательно записать

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \varphi - K_c}{1 + K_c \operatorname{tg} \varphi}.$$

Полученное выражение было предложено В. О. Щохером. Для случая отклонения выхода луча сейсмической волны от горизонтали на некоторый угол  $\beta$  оно принимает вид

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \varphi - K_c \cos (\varphi - \beta)}{\cos \varphi - K_c \sin (\varphi - \beta)}.$$

Потеря устойчивости водонасыщенного песка происходит за счет изменения напряженного состояния, которое можно оценить следующим образом. Сопротивление сдвигу  $\tau_{ef}$  водонасыщенного песка в точке  $M$ , (рис. 56) залегающей на глубине  $h$  от дневной поверхности в нормальных условиях представляет собой

$$\tau_{ef} = (\gamma_n h - \gamma_b h) \operatorname{tg} \varphi = \sigma_{ef} \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $\gamma_n$  и  $\gamma_b$  — удельные веса насыщенного песка и поровой воды;  $\sigma_{ef}$  — нормальное (эффективное) напряжение в скелете песка.

При сейсмическом воздействии частицы песка получают дополнительное усилие, которое они передадут поровой воде, заполняющей все пустоты между ними. Распространяясь во все стороны равномерно, оно приведет к новому условию прочности песка. Сопротивление сдвигу в этом случае  $\tau_c$  примет вид

$$\tau_c = (\sigma - \gamma_b h') \operatorname{tg} \varphi.$$

При некотором значении местного напора  $h'$ ,  $\tau_c$  может достичь значения, близкого к нулю, т. е. прочность песка будет потеряна. Этот эффект используется в практике строительства для уплотнения песков искусственными взрывами. Здесь иногда можно наблюдать выброс песка за счет большого  $h'$ , величину которого можно замерить в специально устроенном пьезометре (см. рис. 56).

На основании рассмотренных примеров можно понять потерю устойчивости откосов карьеров и отвалов, вызванную буровзрывными работами, а также прорывы плавунов в подземные горные выработки.

В. Н. Солоненко приводит

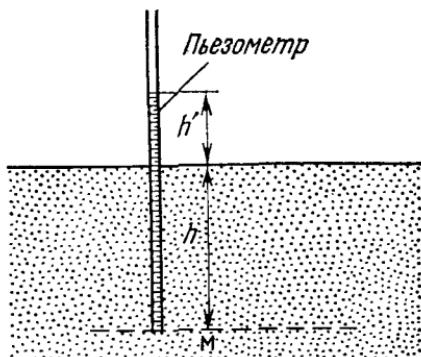


Рис. 56. Схема к расчету потери устойчивости водонасыщенного песка при сейсмическом воздействии

примеры больших человеческих жертв и материальных потерь, связанных не с самими землетрясениями, а с явлениями, вызванными ими (оползни, обвалы, сели и др.). Так, например, Чилийское землетрясение 1960 г. вызвало возникновение множества оползней и обвалов, которые принесли большой материальный ущерб и привели к человеческим жертвам. При этом, за счет запруживания речных долин образовались новые озера. Подобная картина наблюдалась в Дагестане во время землетрясения 1970 г.

При ведении взрывных работ на открытых рудниках известны случаи нарушения устойчивости их откосов за счет искусственного сейсмического воздействия. В подземных горных выработках землетрясения приводят к повышению горного давления, стрелянию горных пород и угля, отжиму глин, раскрытию трещин и т. д.

Наблюдения за некоторыми современными землетрясениями показывают, что наиболее сильные из них возникают в районах интенсивных неотектонических движений и на их силу оказывают влияние кроме отмеченных выше факторов, условия залегания горных пород, наличие зон разрывов, мощность рыхлых покровных пород. В пределах СССР выделяют следующие наиболее сейсмические области:

- а) альпийская горно-складчатая зона, в которую входят Карпаты, Крым, Кавказ, Памир;
- б) районы Тянь-Шаня и Прибайкалья, находящиеся между платформенными и горноскладчатыми зонами;
- в) районы Камчатки и Курильских островов, занимающие пограничную область между Тихоокеанской впадиной и материком.

Все изложенное указывает на большое значение геологических условий при оценке разрушительной деятельности землетрясений, что без сомнения следует иметь в виду при изучении сейсмических явлений.

Изучение территории месторождений полезных ископаемых и их микросейсмическое районирование проводится с оценкой следующих основных факторов:

- а) состава, мощности и свойств (в том числе сейсмических) горных пород;
- б) тектонических особенностей, в том числе современных тектонических движений (контрастность и активность);
- в) глубины залегания подземных вод;
- г) наличия древних оползней, обвалов или склонов, находящихся в предельном состоянии;
- д) наличия случаев горных ударов, выбросов и других динамических явлений в горных выработках.

#### 4.5. ОПОЛЗНИ

Эзогенные процессы, связанные с перемещением горных пород на естественных склонах и искусственных откосах под влиянием силы тяжести, носят название гравитационных движений. Они имеют большое распространение на морских и речных берегах, на склонах плотин, отвалов, терриконов, каналов и оказывают громадное влияние на устойчивость территорий и инженерных сооружений. Эти процессы многофакторны, поэтому их изучение (несмотря на длительную их историю) и оценка устойчивости склонов и откосов связаны со значительными трудностями. В горном деле гравитационные движения представляют собой практический интерес при ведении не только открытых разработок (борта карьеров, откосы отвалов, дамб и т. д.), но и подземных, так как часто горные выработки и наземные сооружения закладываются на склонах, подрабатывают естественные склоны, карьеры, насыпные сооружения и т. д.

Деформирование горных пород на склонах и откосах давно привлекает внимание исследователей различных областей знаний, поэтому в настоящее время существует много классификаций и типизаций, построенных на разных принципах, очень часто, противоречивых. На основе механизма склоновых процессов можно различать 3 их типа: а) оползни, представляющие собой скольжение горных пород по поверхности различной морфологии; б) обвалы — скатывание, опрокидывание, вываливание блоков скальных или полускальных пород на крутых склонах; в) осьпи — перемещение обломочного материала небольшой мощности по склону или откосу (рис. 57).

Изучая закономерности процесса перемещения горных пород на склонах, или оценивая их устойчивость, необходимо четко охарактеризовать природную обстановку оползневой территории: рельеф, геологическое строение, подземные и поверхностные воды, климатические условия, тектонические особенности, свойства горных пород. Все они в целом определяют обстановку или условия возникновения (развития) оползневого процесса.

Кроме того, нужна строгая оценка существующих и возможных его факторов (причин), которые вывели или могут вывести из состояния равновесия склона (откоса). Под фактором следует понимать процесс (изменение), который оказывает влияние на существующую обстановку. Факторов, как правило, много, поэтому гравитационные явления считаются многофакторными, но всегда существует один главный (основной) фактор, который определяет подход к изучению оползня и характер противооползневых мероприятий. Известно мнение ученых о том, что если удалось установить основную причину оползня

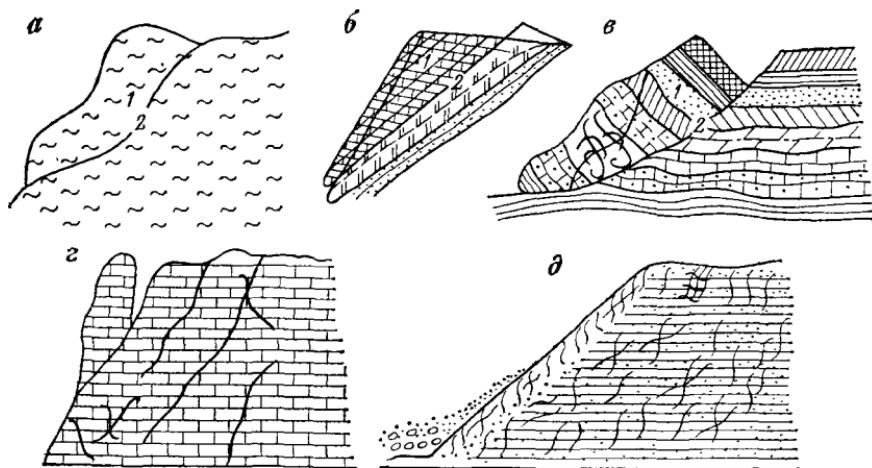


Рис. 57. Основные типы склоновых деформаций:

а, б, в — оползни соответственно асеквентный, консеквентный, инсеквентный; г — обвал; д — осыпь.  
1 — оползневое тело; 2 — плоскость скольжения

с достаточной надежностью, то вероятность нахождения правильного инженерного решения весьма высока.

Факторами (причинами) оползневого процесса могут быть: сейсмические толчки, абразия и эрозия склона, избыточное увлажнение за счет атмосферных, поверхностных или подземных вод, изменение напряженного состояния в связи с изменением режима подземных и поверхностных вод (создание гидростатического и гидродинамического давления), выветривание пород, изменение обстановки, вызываемые деятельностью человека (подрезка склонов, дополнительно загруженные сооружения, вырубка леса, изменение режима природных вод, взрывание) и т. д.

Исходя из опыта изучения оползневых явлений на искусственных откосах и природных склонах и имея в виду существующие разработки по этому поводу, можно выделить десять основных типов оползней по главной причине, вызывающей нарушение устойчивости. Каждый тип имеет разновидности и, кроме того, между отдельными типами могут существовать переходные оползни. Основная схема предлагаемой классификации представлена в табл. 34. Хотелось бы отметить, что эта классификация не может заменить характеристику и группировку оползней Ф. П. Саваренского, И. В. Попова, Е. П. Емельяновой, Г. С. Золотарева, В. Д. Ломтадзе и других по типичным признакам — морфологии, возрасту, литологии, скорости движения и т. д.

Таблица 34. Классификация оползневых явлений (по Иванову И. П., 1971)

Тип оползня	Причины образования оползня	Характерные разновидности
I. Абразионный	Проявляется на берегах морей и искусственных водохранилищ за счет разрушительной деятельности волн	Мелкие обрушения, глубокие вековые оползневые движения
II. Эрозионный	Вызывается боковой или глубинной эрозией	Мелкие (вызванные боковой эрозией), глубокие (вызванные донной эрозией)
III. Консистентный	Вызывается изменением консистенции пород в связи с дополнительным увлажнением	Сплывы, оплывины, поверхностные, циклические, контактные
IV. Пластический	Является результатом глубинной ползучести естественных склонов	Блоковые, контактные, с выпиранием
V. Сейсмический	Вызывается землетрясениями или взрывами и динамическими нагрузками	Тиксотропные, структурные, перенапряженные
VI. Дополнительно напряженный	Возникает в результате остаточных напряжений или неотектонических процессов	Горизонтально перенапряженные, неотектонические
VII. Гидронапряженный	Проявляется при изменении режима поверхностных и подземных вод	Взвешенные, гидродинамические, за счет порового давления
VIII. Суффозионный	Проявляется в результате выноса грунтовых частиц из песчано-глинистых отложений	Обрушения, циклические, провальные
IX. Антропогенный (техногенный)	Вызывается хозяйственной деятельностью человека	Нагруженные, переувлажненные, подработанные и др.
X. Полигенетический	Связан с воздействием комплекса причин (не всегда выясненных)	Возможны все перечисленные выше разновидности

Для специалиста такая классификация удобна тем, что по ней он сразу же получит представление об основных особенностях оползня и о характере необходимых противоползневых мероприятий.

Оценка условий устойчивости оползневых склонов, в конечном итоге, сводится к определению или прогнозу соотношения между удерживающими  $R_{уд}$  и сдвигающими  $R_{сдв}$  силами по характерной, наиболее вероятной, или существующей, поверх-

ности скольжения. Это соотношение принято называть коэффициентом устойчивости, или коэффициентом запаса, а иногда коэффициентом запаса устойчивости

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n R_{уд}}{\sum_{i=1}^n R_{сдв}}.$$

Переходя к раскрытию природы этих сил, это выражение для определения степени устойчивости квазиоднородной среды, в которой оползень происходит по плавной поверхности (рис. 58), можно записать в виде

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n N_i f + c L}{\sum_{i=1}^n T_i \pm \sum Q_i},$$

где  $N$  и  $T$  — нормальная и касательная составляющие веса расчетных блоков пород;  $c$  и  $f$  — сцепление и коэффициент трения пород по плоскости скольжения длиной  $L$ ;  $\sum Q$  — неучтенные в  $N$  и  $T$  силы.

Из записанного уравнения следует, что для количественной оценки устойчивости естественного склона или искусственного откоса используется очень ограниченное число параметров. Так участие горных пород представлено тремя показателями: плотностью (для определения веса блоков), сцеплением и трением. Поэтому значение этих величин очень большое. Сюда входят

все данные о составе, свойствах и состоянии горных пород и о тех возможных изменениях во времени под влиянием различных факторов, которые необходимо учитывать при прогнозных расчетах.

Исходя из физической сущности параметров, используемых для определения устойчивости, можно выделить две группы показателей. Одна из них характеризует плотность и прочность горных пород, а вторая — распределение напряжений по поверхности скольжения. Точность и надежность этих показателей и сложность определения разные.

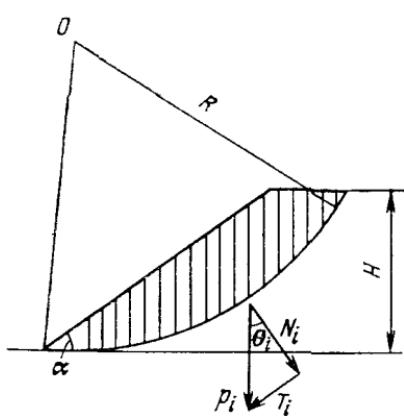


Рис. 58. Схема к расчету устойчивости откоса в однородной изотропной среде

При отсутствии осложнений, связанных с аномальными напряжениями, вторая группа показателей определяется на основе геометрических данных (высота откоса, угол его наклона, глубина залегания подземных вод и их напор, положение поверхности скольжения). Местоположение поверхности скольжения определяется геологическим строением склона и соотношением между удерживающими и сдвигающими усилиями. Характер поверхности скольжения определяет и метод расчета устойчивости. В связи с этим от степени точности изучения геологических особенностей и составления геологического разреза оползневого склона зависит надежность выбранной расчетной схемы (инженерно-геологической модели).

Показатели прочности горных пород, на величины которых сказываются состав, плотность, влажность, трещиноватость, особенности деформирования во времени и при конкретном строении толщи пород, являются наиболее сложным объектом изучения. Поэтому определение их по результатам крупномасштабных экспериментов моделей и путем обратных расчетов по наблюдениям за оползневыми деформациями (естественными или спровоцированными) представляет большой практический интерес. Многими авторами у нас и за рубежом показано, что основные ошибки при оценке степени устойчивости склонов и откосов связаны с неточностью исходных расчетных показателей прочности горных пород.

Динамика оползневого процесса, которая характеризует особенности его развития во времени определяется геологическими условиями и ходом процессов, изменяющих эти условия. Поэтому, изменение устойчивости есть процесс продолжительный, во время которого происходит изменение рельефа местности, степени выветрелости и трещиноватости пород, их влажности (и, как следствие этого, прочности), режима подземных и поверхностных вод, климатических и сейсмических условий и т. д. Все это, в конечном итоге, приводит к изменению степени устойчивости склона или откоса, которое может иметь циклический или односторонний характер.

Во времени можно выделить 3 основные этапа оползневого процесса: а) подготовка оползня (накопление изменений природных условий, коэффициент устойчивости стремится к единице); б) потеря устойчивости и проявление оползня (быстрое деформирование горных пород, коэффициент устойчивости равен единице); в) стабилизация оползневого процесса (коэффициент устойчивости становится больше единицы за счет изменения конфигурации склона и постепенного восстановления сцепления в глинистых породах и переупаковки в обломочных).

Продолжительность отдельных этапов зависит от многих факторов. После некоторой стабилизации оползневого процесса могут наступить новые подвижки, а может начаться период

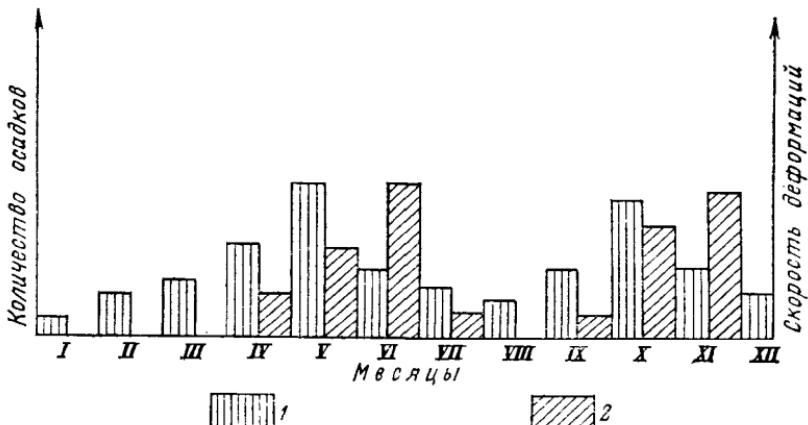


Рис. 59. Изменение количества атмосферных осадков (1) и скорости оползневых деформаций (2)

длительной подготовки к потере устойчивости, медленное движение оползневых масс (реологический процесс), или подвижки, связанные с сезонными колебаниями влажности пород, сейсмическими воздействиями, подрезкой и загрузкой склона и т. д. На рис. 59 показаны типичные картины изменения скорости деформации оползневого склона, вызванного атмосферными водами.

В связи с изложенным возникает вопрос о современных и древних оползнях, о степени угрожаемости нарушения устойчивости территории и сооружений. Возраст оползней и состояние равновесия пород в склонах представляет практический интерес при инженерно-геологических прогнозах.

Оползни имеют большое распространение на территории СССР, а также других стран. Наибольший интерес представляют оползневые районы на склонах речных долин крупных рек (Волги, Камы, Вятки, Днестра, Енисея, Ангары и других), на Кавказском и Крымском побережьях Черного моря, на склонах и предгорьях Северного Кавказа, в Закавказье, Средней Азии, на берегах озера Байкал. Оползни наблюдаются на откосах угольных и рудных карьеров, на склонах дорожных и железнодорожных выемок, на насыпях, дамбах, плотинах. Им посвящена специальная литература.

#### 4.6. КАРСТ

Карстовый процесс, заключающийся в растворении и выщелачивании воднорастворимых горных пород поверхностными и подземными водами, в результате которого образуются различ-

ные пустоты в толще этих пород, имеют большое значение при оценке инженерно-геологических условий территорий и, в том числе, месторождений полезных ископаемых. Карст возникает в районах распространения известняков, доломитов, мергелей, мелов, гипсов, ангидритов, каменной и калийной солей. И хотя карбонатные породы относятся к трудно растворимым в воде из-за большого их распространения, карстовые формы в них представляют наибольший практический интерес и сам процесс здесь лучше изучен. В пределах Русской платформы карстовые формы наблюдаются в карбонатных и гипсонасных породах карбонового и пермского возраста в пределах западного и северо-западного крыла Московской синеклизы, в известняках и доломитах с линзами гипса карбонового и девонского возраста южного ее крыла, в карбонатных породах девона, перми и мела Прибалтики, в карбоновых карбонатных породах и в пермских известняках, гипсах и ангидритах Горьковского и Казанского Поволжья, в карбонатных, сульфатных и соляных отложениях карбона и перми Предуралья, в известняковых, доломитовых и гипсонасных породах карбонового и пермского возраста Самарской Луки.

Карст имеет большое распространение на Урале в карбонатных породах протерозойского, ордовикского, силурийского, девонского и карбонового возраста. Здесь большую известность получил СУБР, а также Кизеловский и Магнитогорский районы. Карстовыми являются также Крым, Кавказ, Среднерусская, Приволжская и Волынская возвышенности, Закарпатье (соляной карст в неогеновых отложениях). На Сибирской платформе карст приурочен к растворимым породам верхнего до-кембия и нижнего палеозоя, в которых преобладают известняки, но имеются и гипс, ангидрит, каменная соль (Алданский щит, долина р. Лены, Приангарье, солянокупольные структуры Келлпендейки и Хатанского прогиба). Карст обнаружен во многих районах Средней Азии, на Дальнем Востоке и Северо-Востоке СССР.

По данным Н. В. Родионова, карстовые проявления имеют определенную связь с древними и современными тектоническими процессами.

Необходимо особо отметить, что для многих угольных и рудных месторождений характерно развитие карстового процесса во вмещающих или перекрывающих породах, а иногда в самой рудной залежи (гипсовой, соляной).

К наиболее сложным железорудным месторождениям, приуроченным к карстующимся породам, относят Тагарское, Коршуновское, Сухаринское.

Карстовые явления характерны для Кизеловского, Подмосковного, Донецкого и некоторых других угольных бассейнов, для Прибалтийского бассейна горючих сланцев, бокситовых

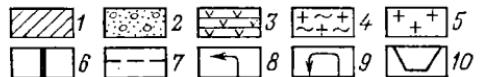
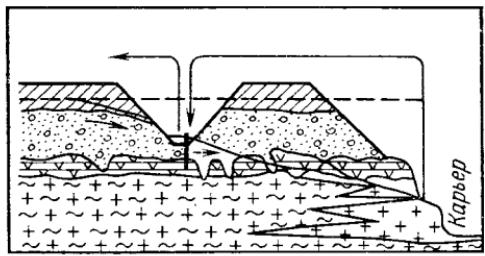


Рис. 60. Схематический геологический разрез Домбровского калийного месторождения:

1 — суглинок; 2 — галечник; 3 — гипсовая «шляпа»; 4 — некондиционная залежь; 5 — промышленная залежь; 6 — водонепроницаемая перемычка; 7 — уровень подземных вод; 8 — откачка пресных вод; 9 — подача рассолов; 10 — кольцевая дренажная траншея

обратно в траншею, где они смешиваются с пресными водами, идущими в карьер.

Иногда выделяют псевдокарст в глинистых (глиняный карст) и мерзлых (термокарст) породах. При растворении и выносе различных солей гипса, карбонатов, содержащихся в глинистых породах или таянии льда, в них происходит образование понижений в рельефе, напоминающих карстовые воронки. Эти процессы имеют большое практическое значение, но природа их отличается от природы собственно карста.

Формы, образующиеся в результате карстового процесса, могут быть поверхностными (карры, воронки, слепые балки, овраги, котловины, поноры, колодцы и т. д.) и глубинными (каверны, галереи, пещеры). Все эти формы имеют большое значение при определении водообильности месторождений, устойчивости горных выработок, способов их проходки и крепления и степени трудности разработки пород. Ведение горных работ оказывает влияние на карстовый процесс интенсифицируя его за счет изменения режима подземных вод, затопления выработок, загрязнения поверхностных и подземных вод, взрывных работ (увеличение трещиноватости) и др.

В связи с этим изучение карстовых форм и закономерностей карстового процесса необходимо для общей оценки инженерно-геологических условий, для составления прогнозов водопритоков в горные выработки и поведения пород окружающих их, а также для обоснования мероприятий по ограничению вредного влияния карста.

(СУБР) и полиметаллических (Благодатского и других) месторождений.

Большие сложности создает карстовый процесс при разработке калийных месторождений. На рис. 60 приведен схематический геологический разрез Домбровского калийного месторождения в Предкарпатье, по Г. В. Короткевичу (1970), разрабатываемого открытым способом. Пресные воды отводятся кольцевой траншееей, а для уменьшения интенсивности растворений соляного пласта, рассолы, попадающие в карьер, возвращаются с пресными водами, идущими в карьер.

Карстовые формы встречаются на разных глубинах. П. П. Климентов отмечает, что крупные карстовые пустоты размером в поперечнике от 0,5 до 10 м наблюдаются на некоторых месторождениях на глубине 300—500 м, а более мелкие формы (до 0,5 м в поперечнике) встречаются в доломитизированных известняках на глубине 750—800 м. На некоторых месторождениях на глубине до 130 м обнаружены карстовые пещеры высотой 20—25 м, заполненные песчано-глинистыми отложениями с обломками известняков.

Закарстованность горных пород определяет условия обводнения месторождения, количество и характер водопритоков в горные выработки. Она определяет взаимосвязь между поверхностными и подземными водами. Для некоторых месторождений основные источники формирования водопритоков — поверхностные и атмосферные воды, поглощаемые карстовыми воронками, каналами и пещерами, имеющими выход на земную поверхность. Особое отрицательное влияние на ведение и на безопасность горных работ оказывают водные прорывы в карстовых районах шахтного поля. По данным И. П. Плотникова, на одной шахте СУБР притоки воды при прорывах изменялись от 100 до 4300 м³/ч, а максимальный водоприток достигал более 15 000 м³/ч. При этом депрессионная воронка имела радиус в несколько километров.

Оценка пустотности горных пород  $K_n$ , % за счет карстовых форм по предложению Ф. П. Саваренского количественно может быть выполнена по формуле:

$$K_n = \frac{V_1}{V} \cdot 100,$$

где  $V_1$  — объем пустот в данном объеме пород  $V$ .

Иногда для этого можно использовать определение площади поверхностных карстовых форм  $F_k$  и вычислить степень карстовой пораженности  $B$  как отношение:

$$B = \Sigma F_k / F_t,$$

где  $F_t$  — площадь изучаемой территории.

Замер объема карстовых пустот представляет определенные трудности, поэтому изучение их ведется комплексно. Для этого используют геоморфологические, гидрологические и гидрогеологические наблюдения, непосредственные замеры пустот в обнажениях или при проходке горных выработок, суммарную оценку по геофизическим и опытно-фильтрационным работам. Косвенные указания о степени закарстованности можно получить при бурении скважин по выходу керна и провалам бурового инструмента.

Чтобы оценить угрожаемость карстового процесса, необходимо определить его интенсивность, т. е. развитие во времени.

Для этой цели можно использовать предложение Н. В. Родионова о показателе активности карстового процесса  $A$  (в %) как отношение объема растворенной породы за 1000 лет  $V_k$ , к общему объему карстующихся пород  $V_n$ , т. е.

$$A = \frac{V_k}{V_n} \cdot 100,$$

По исследованиям этого автора получены следующие величины  $A$ , %: для горной части Крыма 0,08, для района Сочи 0,49, для Средней Азии 0,0001, для бассейна р. Северный Донец (мергельно-меловая толща 0,2. По данным Г. Г. Скворцова для гипсов Башкирии  $A = 1,67 \%$ .

При загрязнении поверхностных вод различными промышленными отходами может произойти резкое изменение скорости растворения и выноса карстующихся пород. В таких случаях правильнее определять показатель современной активности процесса  $A_c$  как отношение

$$A_c = \frac{V'_k}{V_n t} \cdot 100,$$

где  $V'_k$  — объем растворенных пород за промежуток времени наблюдения  $t$ .

Такой подход следует использовать, видимо, всегда при изучении соляного и гипсового карста при обводнении горных выработок на месторождениях химического сырья, а также территорий, сложенных относительно легко растворимыми породами или подверженных воздействию агрессивных промстоков.

И. А. Саваренский в 1967 г. предложил оценивать устойчивость карстовых территорий по среднегодовому числу провалов на площади в 1 км² (табл. 35). Пример оценки карста в районе г. Дзержинска показан на рис. 61.

Большое значение при освоении месторождений полезных ископаемых имеет характер и степень заполнения карстовых

Таблица 35. Классификация карстовых территорий по степени их устойчивости

Категория территории	Характеристика степени устойчивости	Среднее число провалов на 1 км ² в год
I	Очень неустойчивая	>1
II	Неустойчивая	0,1—1,0
III	Недостаточно устойчивая	0,05—0,1
IV	Пониженная устойчивость	0,01—0,05
V	Относительно устойчивая	<0,01
VI	Устойчивая	проводов не образуется

Рис. 61. Графики распределения (I) и повторяемости (II) карстовых про-валов (1) и воронок (2)

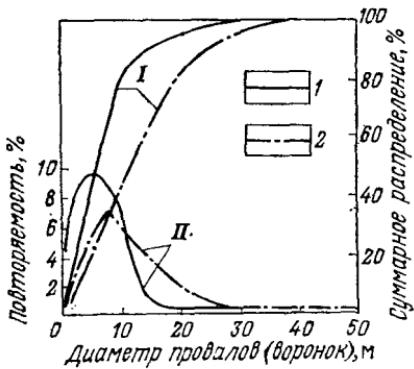
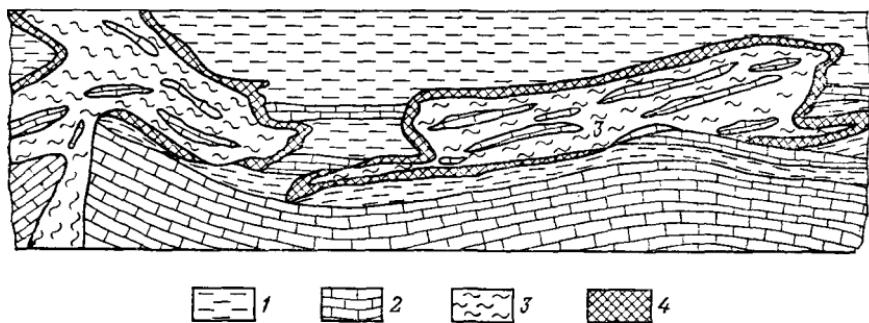


Рис. 62. Характерные карстовые формы в промышленном пласте на сланцевой шахте «Ленинградская»: 1 — сланец; 2 — известняк; 3 — глина; 4 — сланец измененный



пустот, а также состав и состояние заполнителя. А. Е. Ферсман еще в 1952 г. выделял два главных процесса, приводящих к заполнению карстовых пустот: образование первичных отложений (сталактиты, сталагмиты, остатки растворяемых пород) и проникновение в свободные полости осадков более позднего времени.

С заполнителем карстовых пустот связаны фильтрационные свойства пород, дальнейшее развитие карста, устойчивость горных выработок, а это определяет способы проходки горных выработок (осушением, цементацией, замораживанием) и их поддержание. В этом отношении интерес представляют Ленинградское и Эстонское месторождения горючих сланцев, где карстовые пустоты заполнены глиной (это заполнение происходит *in situ*, из-за специфики процесса). Такое заполнение ограничивает водопритоки в горные выработки, не создает довольно неоднородное поле горного давления и разубоживает полезное ископаемое. В связи с этим изучение заполнителя при оценке карста представляет большой практический интерес. На рис. 62 приведены характерные формы карста в промышленном пласте сланца на Ленинградском месторождении.

#### 4.7. ПЛЫВУНЫ И СУФФОЗИЯ

Плывунами обычно называют водоносные тонко- и мелкозернистые пылеватые пески, которые при вскрытии приходят в движение (как тяжелые вязкие жидкости), поэтому требуют применения специальных способов проходки и крепления вскрывающих их выработок.

При вскрытии плывунов, происходит быстрое (иногда катастрофическое) заполнение горных выработок водонасыщенным песком с последующей потерей устойчивости вмещающих их пород. Иногда при больших напорах воды в движение могут прийти и более крупнозернистые пески и даже галечники, однако в этих случаях происходит быстрое рассеивание давления воды из-за хорошей водопроницаемости содержащих воду пород и процесс перемещения затухает. В связи с этим принято различать истинные и псевдоплывуны. Давление плывунов на крепление приводит к искривлению шахтных отвалов, буровых скважин и других выработок, и часто к разрушению крепления и прорыву.

Изучением плывунов занимались многие специалисты: геологи, строители и горняки. На основе их исследований можно сделать некоторые обобщения о плывунах, их свойствах, способах оценки и борьбы с ними.

Признаками истинных плывунов являются: содержание глинистых частиц менее 3 %, при преобладании песчаных частиц размером 0,25—0,05 мм и пылеватых, высокая пористость (43—45 %), наличие органических веществ и микроорганизмов, низкая водопроницаемость и водоотдача, малое сопротивление сдвигу (угол трения меньше 5—8°).

Природа поведения плывунов объясняется гидродинамическим давлением поровой жидкости, специфическим составом и состоянием водонасыщенных песков. В. В. Радиной в 1972 г. было установлено формирование избыточного порового давления в жидкой фазе плывунов за счет накопления газообразных продуктов жизнедеятельности микроорганизмов.

Если записать закон Кулона с учетом давления в порах плывунов как

$$\tau_{ef} = \sigma_{ef} \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $\sigma_{ef} = \sigma - u$ ;  $\sigma$ ,  $\sigma_{ef}$ ,  $u$  — соответственно полное нормальное напряжение, эффективное напряжение в скелете, поровое давление в жидкой фазе.

При некотором  $u = \sigma$  наступит потеря устойчивости плывуна, т. е.  $\tau_u = 0$ .

Если в естественных условиях вода, содержащаяся в плывуне, имела некоторый напор  $H$ , то при вскрытии слоя горной выработкой формируется перепад напора  $\Delta H = H - h$ , который со-

здаст гидродинамическое давление  $D = \frac{\Delta H}{l} \gamma_b = I \gamma_b$  на единицу площадки, где  $I_b$  — гидравлический градиент.

Таким образом сопротивление сдвигу плынуна примет вид

$$\tau = (\gamma_{cp}z - I \gamma_b) \operatorname{tg} \phi,$$

где  $z$  — глубина залегания рассматриваемого сечения слоя плынуна;  $\gamma_{cp}$  — средний удельный вес вышележащих пород.

Здесь в роли порового давления выступает гидродинамическое давление, но оно может быть вызвано и другими причинами (в частности, жизнедеятельностью микроорганизмов). Основная особенность заключается в малой скорости рассеивания этого давления из-за незначительной водопроницаемости и водоотдачи пылеватых песков, что и приводит к потере их устойчивости.

В практике горного дела известно много случаев прорывов плынунов в подземные выработки, которые приносили не только огромный ущерб, но приводили к катастрофам. При этом причины могут быть разными: пересечение выработкой тектонических нарушений, большой напор подземных вод в плынунах, опускание кровли выработок, применение взрывных работ и др. Иногда прорывы плынунов сопровождаются нарушением устойчивости наземных сооружений или образованием воронок на земной поверхности. Большая катастрофа произошла на буроугольной шахте в районе г. Моста (ЧССР) в результате прорыва и выноса около 90000 м³ песка в горные выработки на глубине 100 м.

Н. Г. Трупак описал прорыв, который произошел на шахте № 1 КМА, после очередного взрыва шпуров в откаточном штреке на глубине 145 м, на ликвидацию последствий которого было затрачено около 4-х месяцев (для этого была сооружена цементная перемычка через скважину, пробуренную с поверхности, расход цемента 54 т). Геологическая обстановка прорыва приведена на рис. 63. Большие прорывы плынунов происходили в шахтах Подмосковного угольного бассейна. Так, на шахте № 10 произошел прорыв, в результате которого в течение нескольких часов была затоплена площадь выработки около 200 м², а на поверхности земли образовалась воронка диаметром 6 м и глубиной 2,2 м (П. П. Климентов, 1966).

Проходка шахтных стволов, подземных выработок, метро в песках, плынунах осуществляется после предварительного их замораживания или принудительного осушения.

Суффозия представляет собой процесс выноса мелких частиц из обломочных или трещиноватых (закарстованных) пород фильтрационным потоком. Возможность проявления и интенсивность суффозии характеризуют фильтрационную устойчивость горных пород в условиях их естественного залегания. Под

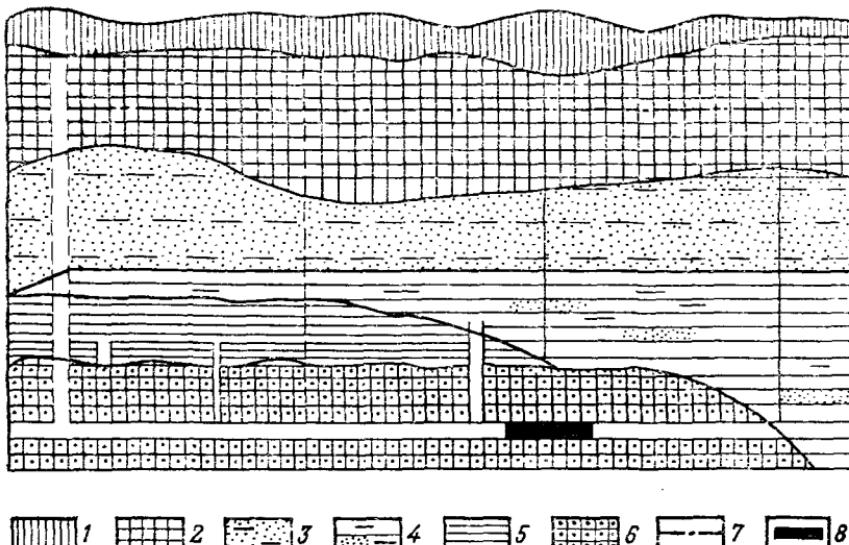


Рис. 63. Геологический разрез участка прорыва:

1 — суглиники; 2 — мел; 3 — пески (мелового возраста); 4 — глина с прослойками песка (юрского возраста); 5 — железистая руда; 6 — железистые кварциты; 7 — уровень подземных вод; 8 — бетонная перемычка

влиянием этого процесса происходит увеличение пористости (пустотности) и водопроницаемости пород, что может привести к нарушению их устойчивости вокруг выработок и увеличению водопритоков. Очень часто вынос мелких частиц приводит к кольматации водозаборных сооружений (скважин, дренажных канав, дренажных призм на откосах и т. д.). Из специальной литературы известно, что при строительстве первых линий метро в Москве откачиваемой водой было вынесено за один только год около  $6000 \text{ м}^3$  тонкопесчаноглинистого материала, а замоскворецкий дренаж вместе с откачиваемой водой в период с 1937 по 1960 гг. вынес  $10,7$  тыс.  $\text{м}^3$  дисперсных частиц (Г. С. Золотарев, 1983).

Суффозия проявляется при определенном сочетании трех критических условий: скорости фильтрационного потока, степени неоднородности водоносных пород и места выноса мелких частиц. Она может возникать в пределах одного слоя, на границе между двумя слоями, в заполнителе трещин и карстовых пустот, на контакте пород с дренажными фильтрами. Поэтому существуют различные критерии оценки возможности возникновения процесса.

Некоторые исследователи, например В. С. Истомина, А. Н. Патрашева, Н. М. Бочков считают, что суффозия в слое

водоносного песка может возникнуть, если его коэффициент неоднородности  $K_d = \frac{d_{60}}{d_{10}}$  (см. 2.2.1) больше 20 и градиент потока  $I > 5$ .

Возможность возникновения супфозии из одного слоя песка в другой оценивают по формуле Л. И. Козловой

$$v = 0,26d_{60}^2 \left( 1 + 1000 \frac{d_{60}^2}{D_{60}^2} \right),$$

где  $v$  — скорость выноса частиц из размывающегося более мелкозернистого песка;  $d_{60}$  и  $D_{60}$  — контролирующие диаметры частиц, мм более мелкого и более крупного песков.

Иногда определяют критический градиент, при котором начинается вынос из песчаного слоя, в зависимости от его пористости  $n$  и плотности минеральной части  $\rho_m$ , г/см³ по формулам Е. А. Замарина

$$I_{kp} = (\rho_m - 1)(1 - n) + 0,5n$$

и К. Терцаги

$$I_{kp} = (\rho_m - 1)(1 - n).$$

Специальные опыты, проведенные по изучению размываемости и выноса глинистого заполнителя из трещин нижнемеловых известняков показали, что критические градиенты составляли: вдоль трещин 31 и вкrest трещин 20.

На бортах карьеров дренирующих подземные воды из песков, иногда происходят провалы, которые объясняются супфозией. Однако, это не всегда соответствует истине. На Лебединском карьере КМА при дренировании пионерным котлованом мощного водоносного горизонта, приуроченного к пескам мелового возраста, подобные провалы были вызваны сосредоточением фильтрации по трещинам слабосцементированного песчаника, т. е. подземным размывом при градиентах 0,2—0,3.

#### 4.8. СЕЛЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Сели представляют собой бурные водные потоки, переносящие большое количество грязекаменного материала. Часто они возникают внезапно и приводят к катастрофическим последствиям и материальному ущербу. Обычно сели формируются в долинах горных рек, однако селеподобные явления имеют место в горнодобывающих районах, где происходит складирование пустых пород и отходов переработки полезного ископаемого, в связи с чем необходимо рассмотреть некоторые особенности этого природно-техногенного явления.

Для возникновения селевых потоков необходимо, с одной стороны, наличие больших накоплений песчано-глинистого или крупнообломочного материала на склонах различных поверхностных водотоков, а с другой — паводок высоких скоростей с большой энергией размыва и переноса рыхлого материала. Накопление рыхлого материала происходит в естественных условиях за счет выветривания горных пород на склонах речных долин и оврагов, а также при искусственном складировании на склонах или в руслах рыхлых вскрышных пород в виде отвалов и гидроотвалов, пустотных пород, вмещающих полезное ископаемое, пород в виде терриконов, а также разнообразных шламо-, хвосто- и золохранилищ, которые создают новый техногенный рельеф в районах горных предприятий. Что же касается водного паводка, то его образование связано с ливневыми дождями или с прорывом вод поверхностных водоемов, чаще всего искусственного происхождения.

На территории СССР зарегистрировано 1634 крупных селя, из которых 491 — в Киргизии, 354 — в Грузии, 105 — в Казахстане, 75 — в Таджикистане, 188 — на Северном Кавказе, 104 — в Карпатах (Г. С. Золотарев, 1983). Один из наиболее крупных селей произошел в 1973 г. в Казахстане в долине р. Малая Алматинка в результате прорыва вод моренного озера. Объем грязекаменного материала составил 3,4 млн. м³, скорость селевого потока — 4—11 м/с, а расход его достигал 5,180 м³/с.

Механизм движения селевых потоков зависит от состава, размеров и формы обломочного материала и его водонасыщенности, а также от морфологии долины реки или оврага и характера водного потока. По составу обычно различают каменные (с размерами обломков до 50 м и более), грязевые (в основном песчано-глинистый материал) и грязе-каменные сели.

В соответствии с существующей инструкцией средняя скорость селевого потока может быть определена по эмпирической формуле

$$v_{cp} = 1,14 \sqrt{h_{cp}} \sqrt[3]{iw},$$

а расход селя  $Q_c$  при прорывах препятствующих запруд из выражения

$$Q_c \approx 6Q_b,$$

где  $h_{cp}$  — средняя глубина потока;  $i$  — уклон русла;  $w$  — коэффициент текучести селевой массы;  $Q_b$  — максимальный расход водного потока.

Для решения практических задач большое значение имеет вопрос о прогнозировании селевых потоков, который включает комплекс прогнозных оценок: место возможного возникновения селя, состав породного материала, условия возникновения

водного потока, механизм, масштаб, скорости селевого потока и т. д. Прогнозирование такого многофакторного явления требует надежной информации о геологических, климатических, гидрологических, геодинамических и геоморфологических условиях территории, а также о техногенных факторах, имеющих отношение к ее селеопасности.

В качестве селезащитных мероприятий применяют: регулирование стока вод (ливневых, талых), а также паводков в результате прорыва естественных и искусственных запруд (оползневые массы, ледниковые массивы, дамбы, плотины и т. д.); укрепление склонов речных долин и оврагов, а также откосов отвалов (одернование, лесопосадки, покрытия откосов, подпорные стенки и т. д.) с целью уменьшения интенсивности выветривания, образования осыпей, оплывания, сползания и обвалов породных масс; селезадерживающие инженерные сооружения (плотины, сквозные барражи, задерживающие наносы и пропускающие воду, селедуки, селенаправляющие лотки).

#### 4.9. ЗАБОЛАЧИВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ

В горнодобывающих районах часто наблюдается явление заболачивания за счет подтопления подземными водами или затопления поверхностными и откачиваемыми водами, а также промстоками разного происхождения. Вместе с тем происходит осушение естественных болот, что меняет гидрологический и гидро-геологический режимы больших территорий. Отметим здесь, что заболоченные территории занимают около 10 % всей площади страны и имеют большое распространение на северо-западе и севере европейской части СССР в Белорусском Полесье и в Прибалтике, в Западной и Восточной Сибири. Как заболачивание, так и осушение приводят к изменению инженерно-геологических условий, что выражается в активизации некоторых геологических процессов и в нарушении устойчивости зданий и сооружений. Все это дает основание ознакомить, в краткой форме, специалистов-горняков с основными особенностями болот и процессов заболачивания и осушения территорий.

Болотом обычно называют избыточно увлажненные участки земной поверхности с обводненным торфом мощностью более 0,3—0,5. Заболоченными считаются территории, увлажненные подземными, атмосферными или техногенными водами, покрытые влаголюбивой растительностью, иногда маломощным слоем торфа. Благоприятны для образования болот и заболачивания широкие поймы с незначительными продольными уклонами, основания пологих склонов надпойменных речных террас, где выклиниваются водоносные горизонты, равнинные участки, на которых из-за плохой дренируемости скапливаются атмосферные и техногенные воды.

Большое значение для формирования болот и заболоченных территорий имеет геологическое строение. Наличие выдержаных слоев низкой водопроницаемости (глин, суглинков), залегающих непосредственно под почвой, служат экраном, на котором задерживаются проникающие через почву атмосферные и поверхностные (в частности, откачиваемые) воды. Когда на земной поверхности залегают слои песков, супесей и других водопроницаемых пород, заболачивание возможно при подтоплении подземными или затоплении поверхностными и атмосферными водами в условиях отсутствия или затрудненного дrenирования накапливающихся вод.

По условиям питания различают низинные, верховые и смешанного питания болота. Низинные занимают участки старых открытых водоемов, а верховые располагаются на междуречных равнинных пространствах. К ним можно отнести и заболоченные участки, образовавшиеся в результате сбрасывания техногенных вод и промстоков.

Примеры современного искусственного заболачивания территории за счет их затопления и подтопления можно найти во многих горнодобывающих районах. На рудниках КМА они приурочены к участкам гидроотвалов, в Кузбассе — к участкам гидроотвалов, шламохранилищ и золоотвалов, на калийных комбинатах — к зонам избыточного увлажнения хранилищ солеотходов. При разработке месторождений подземным способом заболоченными оказываются мульды сдвижения, русла отведенных за пределы шахтного поля рек, а также овраги, частично занятые под терриконы и хранилища жидких отходов после переработки полезного ископаемого. На основании имеющихся наблюдений можно выделить несколько типов заболоченных территорий по источнику их увлажнения (табл. 36) и охарактеризовать последствия заболачивания. Необходимо иметь в виду, что сам процесс формирования болот довольно длительный, но его вредное влияние оказывается в самом начале, когда происходит избыточное увлажнение территорий, сопровождаемое изменением свойств почв и горных пород, условий взаимодействия различных сооружений с их основаниями, а также ухудшением обстановки жизнедеятельности растительного и животного мира.

Иссушение почв и горных пород происходит в связи с дренированием подземных вод при разработке месторождений полезных ископаемых и активной эксплуатации мощных водозаборных сооружений. Чаще это явление наблюдается в засушливых районах, в которых испарения преобладают над увлажнением, однако и в увлажненных районах происходит осушение болот, которое приводит к изменению гидрологического режима местности. В результате иссушения большие площади обрабатываемых земель оказываются непригодными для эксплуатации.

Таблица 36. Заболоченные территории в горнодобывающих районах

Источник избыточного увлажнения	Участки земли, подверженные заболачиванию	Влияние заболачивания на окружающую среду
Гидроотвалы вскрышных пород	Прилегающие к дамбам обвалования, пониженные формы рельефа при подъеме грунтовых вод	Снижение устойчивости откосов дамб за счет переувлажнения их основания. Ухудшение проходимости. Вывод из оборота земельных и лесных угодий
Шламо-, хвосто- и золохранилища	Те же участки, овражная сеть вблизи храилищ, площади, прилегающие к поврежденным пульп- и водоводам	То же, что и в районах гидроотвалов, но кроме того, здесь происходит загрязнение природных вод и разевание сухой пыли (пылезагрязнение)
Откачиваемые из шахт и рудников воды	По пути следования до поверхностных водотоков, в районе очистных сооружений, пониженные формы рельефа (естественные и искусственные)	Загрязнение грунтовых и поверхностных вод, уничтожение земельных площадей, ухудшение свойств почв и грунтов
Земная поверхность опускается ниже уровня подземных вод	Мульды сдвижения и оседания земной поверхности	Выход из оборота земельных и лесных угодий; изменение свойств пород и связывание с этим снижение устойчивости
Искусственное орошение	Орошаемые площади, участки повреждения каналов, степные блюдца и др.	Ухудшение плодородия почвы, изменение свойств пород и режима вод

ции, леса и луга гибнут. Явления заболачивания и иссушения земель, как видно, сопутствуют всегда горным работам, поэтому их надо изучать и прогнозировать в самом начале периода освоения месторождения и до окончательной рекультивации местности.

#### 4.10. МЕРЗЛОТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

В районах распространения многолетнемерзлых пород протекают особые геологические мерзлотные процессы, оказывающие большое влияние на условия разработки месторождений, освоения территории и на устойчивость сооружений. К этим процессам относят: морозное пучение, термокарст, солифлюкция, наледи и др.

Морозное пучение наблюдается в песчано-глинистых пылеватых породах и заключается в образовании различных

по размеру бугров (пучин) за счет увеличения объема пород при замерзании воды, содержащейся в их порах. Пучины достигают высоты до 50 см (чаще 20—30 см) и протяженности до 10 м и более. Наблюдаются они на поверхности земли, полотне дорог, откосах выемок и насыпей. Благоприятными условиями для возникновения морозных пучин являются: а) наличие в зонах глубокого промерзания глинистых пылеватых (пучинистых) отложений; б) увлажнение промерзающих пород за счет поверхностных и подземных вод.

Морозное пучение оказывает отрицательное влияние на поверхностные сооружения не только образованием специфических форм, но и созданием дополнительных напряжений (давление пучения), которые необходимо учитывать при расчете устойчивости этих сооружений, а также при подборе крепления в промерзающих породах.

Более крупные бугры пучения (от 2 до 30 м высотой), которые иногда называют буграми-могильниками, гидролаколитами, торфяными буграми или булгунняхами образуются при наличии водоносного талика над многолетнемерзлыми породами. При промерзании деятельного слоя этот талик оказывается «закупоренным» и в нем возникает напор вод, под влиянием которого начинается поднятие замерзших пород.

Термокарстовые явления происходят при оттаивании мерзлоты под влиянием естественного или искусственного повышения температуры. Они проявляются в образовании понижения на земной поверхности, в деформациях земляных сооружений и зданий. На откосах отвалов, дамб и плотин в результате оттаивания происходят оползни и солифлюкционные подвижки. Под некоторыми наземными сооружениями (зданиями) с теплым технологическим процессом формируются чаши протаивания, в пределах которых происходят неравномерные осадки (просадки), в результате чего здания разрушаются. Примеров аварий зданий и сооружений довольно много в Норильске, Магадане, Воркуте и других городах.

При ведении отвальных работ в зимнее время в отвалы обычно попадают мерзлые породы и снег, которые летом тают и приводят к оползневым деформациям откосов.

Прогноз деградации мерзлоты имеет большое практическое значение при освоении месторождений в области распространения многолетнемерзлых пород.

Наледи представляют собой скопление льда на земной поверхности или искусственных откосах за счет замерзания поверхностных или подземных вод, а также за счет вод, откачиваемых из горных выработок и выбрасываемых промышленными предприятиями. По размерам наледи очень разнообразные. Высота их достигает 10 м (чаще 1—5 м), а по занимаемой площади они бывают очень малые (до 10 м²) и весьма большие

(более 1 км²). Наиболее крупная — большая Мамская наледь в Якутии объемом около 200 млн. м³. Наледи могут образоваться и в подземных условиях под торфяными залежами или в местах выхода подмерзлотных вод. Это так называемые гидролакколиты высотой 10—30 м и диаметром до 100 м.

Наледи нарушают нормальные условия ведения открытых горных работ, эксплуатации земляных сооружений, шоссейных и железных дорог, в связи с чем изучение закономерностей их образования представляется необходимым для прогноза их возникновения и развития вблизи эксплуатируемых сооружений.

Мерзлотные явления осложняли проходку и поддержание горных выработок при освоении угольных месторождений Воркутинского бассейна, на Чукотке, на о. Шпицберген и др.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое аномальные природные напряжения в горных породах?
2. Назовите основные геологические явления.
3. Как оцениваются сейсмические явления?
4. Что такое оползень? Каковы причины его возникновения?
5. Что такое карст? Как оценивается закарстованность территорий?
6. Какие пески обладают свойствами плытвина?
7. В каких породах проявляется супфозия? По каким причинам?
8. Где и когда возникают сели?
9. С чем связано заболачивание в горнодобывающих районах?
10. Какие мерзлотные явления Вам известны?

## Часть II

# Инженерно-геологическая оценка взаимодействия геологической среды работами и сооружениями

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ И СООРУЖЕНИЙ С ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ

### 5.1. СПЕЦИФИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Осваиваемый объект — месторождение полезных ископаемых — (шахтное или карьерное поле) представляет собой некоторую часть природной (экологической) системы, которая в период разведки и проектирования находится во взаимодействии с ней, определяемом сложным комплексом естественных (а иногда и искусственных) факторов. В результате этого взаимодействия создается та природная обстановка, которую мы оцениваем инженерно-геологическими условиями. Равновесие этой обстановки — динамическое, о чем свидетельствуют протекающие в ней естественные процессы, среди которых особый интерес для нас представляют геологические процессы и явления, характеризующие геодинамическую ситуацию и в значительной мере определяющие степень устойчивости (чувствительности) исследуемого объекта к новому внешнему воздействию, а также вид и масштабы наступающих изменений.

Внешнее воздействие при разработке месторождений полезных ископаемых проявляется в большом разнообразии в отличии от воздействий при строительстве большинства наземных инженерных сооружений.

Однако специфику взаимодействия горных работ с природной обстановкой определяют три основные особенности:

1. Формирование сфер влияния значительных размеров, что приводит к изменению естественного напряженного и физического состояния огромных объемов горных пород разного генезиса, литологии, строения, состояния и свойств. Современный средний карьер глубиной 200 м, длиной 4 км и шириной 2 км создает прибрежную зону горных пород объемом более 0,5 млрд. м³ вокруг шахтного ствола глубиной 1000 м. При расчете давления на крепь рассматривают объем горных пород более  $3 \cdot 10^8$  м³, а в процессе посадки кровли над очистным пространством средней угольной шахты в течение года деформируется 10 млн. м³ пород непосредственной и основной кровли. Построение инженерно-геологической модели такой сферы взаимо-

действия на современном уровне знаний потребует большой схематизации.

2. Образование больших площадей искусственных обнажений горных пород. Они представляют собой конструктивный элемент горных сооружений, на которых происходят различные изменения под влиянием атмосферных агентов, поверхностных и подземных вод, температуры и техногенных факторов. На бортах современного карьера, параметры которого приведены выше, образуются новые обнажения общей площадью более 10 млн. м² (10 км²). Не менее значительны по площади обнажения внутренних и внешних отвалов. Большие площади искусственных обнажений создаются и в подземных выработках.

3. Небольшой срок службы большинства горных выработок. Это позволяет рассматривать их как временные сооружения, требующие обеспечения устойчивости с незначительными ее запасами с использованием реологических свойств горных пород, что возможно при большой тщательности их изучения и высокой точности определения расчетных показателей.

Существенно и разнообразие наступающих изменений в разные периоды освоения месторождения. Наиболее значительные изменения разных видов происходят в период подготовки месторождения к вскрытию, строительства основных и очистных выработок и размещения отходов горного предприятия. На рис. 64

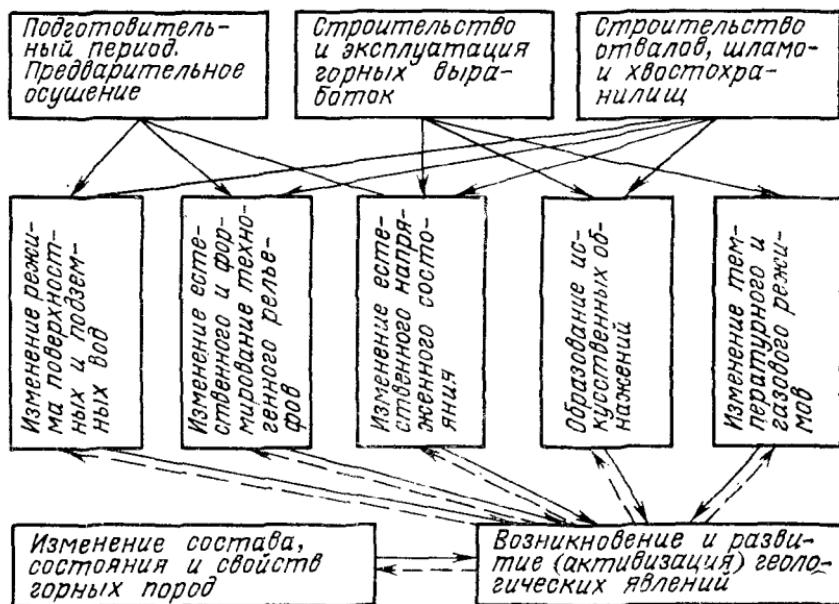


Рис. 64. Схема взаимодействия горных работ с геологической средой

показана принципиальная схема взаимодействия горных работ с отдельными элементами инженерно-геологических условий.

Предварительное осущение первоочередных участков проходки капитальных выработок (шахтных стволов, магистральных штреков, разрезных траншей и т. д.) приводит к формированию депрессионных воронок с радиусами в несколько километров, которые при дальнейшей разработке месторождения увеличиваются до нескольких десятков километров. В пределах снижения уровней подземных вод происходит нарастание гравитационного давления (за счет снятия взвешивающего давления воды), в результате которого начинается процесс уплотнения (деформирования) горных пород.

Взаимодействие горных выработок с окружающими их геологическими условиями во многом определяется формой, размерами, ориентировкой в пространстве, глубиной от земной поверхности, назначением, технологией и скоростью проходки, а также другими особенностями изучаемых выработок. Остановимся на рассмотрении открытых и подземных горных работах.

## **5.2. ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Разработка месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом приводит к существенным изменениям всех элементов инженерно-геологических условий. Рельеф местности изменяется за счет карьера, отвалов, хвосто- и шламохранилищ, что приводит к созданию больших площадей искусственных обнажений (откосы и бермы карьера, тела насыпей, площади гидроотвалов, хвосто- и шламохранилищ), к изменению напряженного состояния (разгрузка и нагрузка), оседанию земной поверхности, а также к изменению гидрографии (коррекция речных русел, подпор рек и временных потоков, заболачивание и т. д.), режима подземных вод и температуры горных пород.

Основываясь на результатах исследований и наблюдений на ряде угольных (Подмосковный, Кузнецкий, Днепровский и другие бассейны) и рудных (КМА, Соколовско-Сорбайское, Керченское, Криворожское, Никополь-Марганцевое и других) карьерах, можно построить обобщенную физическую модель изменения инженерно-геологических условий территории, которая будет представлять собой базу для проведения инженерно-геологических оценок и прогнозов. На такой модели можно выделить: этапы освоения месторождения, первичные изменения инженерно-геологических условий (некоторых элементов), возникновение процессов под влиянием природных и техногенных факторов. В табл. 37 сделана попытка наглядно показать происходящие изменения и их природу на разных этапах освоения месторождения. Как видно из этой таблицы, все изменения,

Таблица 37. Изменения инженерно-геологических условий территории месторождений, разрабатываемых открытым способом

Номер этапа	Название этапа освоения месторождения (технологический процесс)	Изменения элементов инженерно-геологических условий	Процессы, возникающие под влиянием изменений
I	Предварительное осушение месторождения	Изменение напряженного состояния горных пород за счет снижения гидростатического давления дренированием подземных вод	Уплотнение глинистых пород, оседание земной поверхности, иссушение земель
II	Строительство карьеров и внешних отвалов. Прокладка транспортных коммуникаций. Дренаж подземных вод	Формирование нового (техногенного) рельефа, приводящего к изменению напряженного состояния и температуры, к созданию искусственных обнажений	Выветривание горных пород, разуплотнение (набухание), гравитационные явления на откосах, эрозия на искусственных обнажениях, фильтрационные деформации, заболачивание, подтопление, разведение, оттаивание и замерзание
III	Разработка (добыча) полезного ископаемого, строительство внешних и внутренних отвалов, шламо- и хвостохранилищ	Формирование нового техногенного рельефа, увеличение площади искусственных обнажений, увеличение внешних давлений, изменение температуры	То же, что и на II этапе, но с более высокой интенсивностью за счет фактора времени. Загрязнение подземных вод растворами шламо- и хвостохранилищ. Потери и разубоживание полезного ископаемого
IV	Строительство сооружений для ограничения интенсивности изменений и процессов	Изменения напряженного состояния, техногенного рельефа и характера поверхностного и подземного стока	—
V	Рекультивация	Изменения техногенного рельефа, создание нового почвенно-растительного слоя, изменение режима поверхностных и подземных вод	Уплотнение отвалов

происходящие в результате ведения открытых горных работ, рассматриваются в инженерной геологии. Они характерны и для некоторых других видов сооружений, но наблюдаются там в меньшем масштабе. В частности, изменение рельефа местности с образованием искусственных обнажений горных пород наблюдается в меньших масштабах на железнодорожных и автодорожных трассах и в гидротехническом строительстве.

Основные процессы, происходящие на бортах карьеров, связаны с изменениями состава и физико-механических свойств горных пород под влиянием природных и техногенных факторов. В зависимости от геологического строения месторождения в прибрежной части карьера происходят изменения пород в результате их разуплотнения, набухания и выветривания. При этом, для глинистых пород и пород на глинистом цементе практический интерес представляет набухание, а для скальных и полускальных — выветривание.

Оценку изменений горных пород во времени можно провести по результатам лабораторных исследований образцов горных пород, отобранных при инженерно-геологической съемке бортов карьеров разного срока обнаженности. Для скальных и полускальных разностей используются показатели, характеризующие степень выветрелости (по плотности, прочности, трещиноватости, расслоению). По полученным данным устанавливают количественные зависимости степени изменения исследуемых показателей с глубиной и во времени.

Опыт исследований на угольных и рудных карьерах показывает, что наступающие изменения в результате выветривания сказываются на устойчивости откосов отдельных уступов бортов. Глубина проникновения существенных изменений составляет 2—5 м, а потенциальная поверхность скольжения, как известно, проходит на глубине более 10 м от откосного обнажения, даже при небольшой глубине карьера, поэтому борт в целом не уменьшает свою устойчивость. Однако осыпание и оплывание выветрелых пород приводит к разрушению межуступных берм и сдавливанию (а иногда и страиванию) уступов, что сказывается на условиях устойчивости и безопасности и на производительности горно-транспортного оборудования.

В бортах карьеров, сложенных целиком или частично глинистыми породами, изменения происходят в более короткие промежутки времени и главным образом под влиянием атмосферных и подземных вод. В этих изменениях большую роль играет напряженное состояние пород. Рассмотрим на примере карьеров КМА изменение юрских глинистых пород, залегающих в нижней части борта.

За исходное положение (нулевой этап) примем естественное состояние глин, определяемое условиями их формирования и поддерживаемое природным давлением вышележащей толщи. В этом случае максимальное главное напряжение  $\sigma_z$ , возникающее от природного давления  $p_0$ , составляет

$$\sigma_z = \gamma h - \gamma_b h_b,$$

где  $h$  и  $h_b$  — глубина залегания глины от поверхности и напор подземных вод, замеренных на этой глубине;  $\gamma$  и  $\gamma_b$  — средний удельный вес вышележащих пород и подземных вод.

По данным геологоразведочных исследований, проведенных до начала подготовительных работ, юрские глины в пределах Лебединского месторождения испытывали природное давление на разных его участках от 1,0 до 1,5 МПа, а в районе Михайловского месторождения от 1,0 до 2,0 МПа. Под влиянием этих давлений сформировалось естественное физическое состояние глин, которое характеризуется естественной влажностью, природной плотностью, исходной прочностью и деформируемостью.

Первое изменение геологической обстановки (начало первого этапа) происходит в период подготовки месторождения к вскрытию в результате водопонизительных работ. Понижение уровня подземных вод приводит к изменению природного напряженного состояния. На этом этапе главное максимальное напряжение увеличится до значения

$$\sigma_{z_1} = \gamma h - \gamma_b (h_b - S),$$

где  $S$  — снижение уровня подземных вод.

В некоторых случаях  $\Delta\sigma_z = \sigma_{z_1} - \sigma_{z_0}$  может составить 0,5—1,0 МПа для рассматриваемых условий. При росте гравитационного давления могут произойти изменения плотности и влажности глинистых пород, а, следовательно, их прочности в результате разрушения структурных связей и отжима поровой воды. Для возникновения первого процесса (первый этап) необходимо, чтобы величина давления после водонижения оказалась выше структурной прочности пород, а для развития процесса уплотнения потребуется создание соответствующего градиента фильтрации. Как показала в своих исследованиях Р. Э. Дашко, градиент начала фильтрационной консолидации  $I_{\text{нфк}} = 10 \sqrt{M_c}$ , (где  $M_c$  — содержание глинистой фракции в породе, %). Для рассматриваемых нами глинистых разновидностей величина данного градиента изменяется от 14 до 30.

Из сравнительного анализа данных изучения юрских глин Лебединского месторождения КМА можно сделать вывод о том, что в результате значительного снижения уровня подземных вод возникает возможность преодоления структурной прочности и развития деформаций ползучести. Фильтрационная консолидация в этих условиях не проявится из-за небольшого градиента фильтрации и малой продолжительности действия нового давления в связи с наступлением второго этапа — вскрытия работ



Рис. 65. Схема к выделению характерных участков борта.  
I—III — участки разной степени набухания глинистых пород

(строительства разрезной траншеи, пионерного котлована, карьера первой очереди).

Второй этап в освоении карьерного поля приводит к созданию прибортовой зоны и нового напряженного состояния пород в результате разгрузки вскрышными работами. Этот этап характеризуется большой продолжительностью, которая зависит от глубины залегания рудной залежи, принятой системы вскрытия, производительности горнотранспортного оборудования и т. д. Для конкретности производимых оценок прибортовую зону будем рассматривать относительно наиболее вероятных поверхностей скольжения борта в целом и уступа в глинистых породах (рис. 65). Эти две поверхности вместе с откосом в глинах дают возможность выделить для дальнейшего изучения три участка, в которых произошло изменение естественного напряженного состояния в разной степени.

Для того, чтобы выделенные участки получили количественную оценку, введем два количественных показателя (см. разд. 2.4).

1. Степень разгрузки пород  $K_{\sigma} = \frac{\sigma_e - \sigma_0}{\sigma_e}$ , где  $\sigma_e$  и  $\sigma_0$  — напряжения в изучаемой точке до и после вскрытия пород выработкой;

2. Показатель возможности набухания  $K_n = \frac{\sigma_n - \sigma_0}{\sigma_n}$ , где  $\sigma_n$  — давление набухания в направлении действия  $\sigma_0$ .

Первый участок приурочен к откосной поверхности, где произошла полная разгрузка глин и созданы условия для максимального взаимодействия их с подземными и атмосферными водами, солнечной радиацией, температурой воздуха, движением воздушных масс, технологическими процессами и т. д. Для него характерны максимальные значения  $K_{\sigma}$  и  $K_n$ , указывающие на наибольшие возможности изменения физического состояния пород и развития различных гравитационных процессов. Мощность участка (глубина интенсивного проникновения внешнего влияния) незначительная и по наблюдениям на Лебединском и Михайловском карьерах составляет менее 1,0 м, чаще 0,2—0,5 м.

Как мощность, так и состояние измененных глинистых пород зависят от сезона года и даже от погоды. Об этом можно судить по изменению влажности, которая варьирует от предела усадки до предела текучести. В границах этой мощности происходит максимальное набухание, нарушение структурной связности за счет физического выветривания, что, в конечном итоге, приводит к эрозии, оплыvанию, осыпанию, раззвеванию, т. е. к таким процессам, которые постоянно обновляют откосную поверхность и тем самым создают условия для постоянного ее перемещения в глубь откосного массива.

Скорость перемещения зависит от большого числа факторов (состава и состояния глин, градиента температурных изменений, характера атмосферных осадков, угла откоса, экспозиции борта, мощности глин, технологических воздействий и т. д.), поэтому в настоящее время можно определить ее на базе наблюдений за изменением профиля откоса и ширины предохранительных берм. При прочих равных условиях она гораздо больше в песчаных глинах. Во времени эта скорость падает в связи с накоплением в нижней части уступа разрушенного глинистого материала. Необходимо отметить, что даже при отсутствии других, более крупных оползневых деформаций, развивающиеся гравитационные процессы на откосной поверхности приводят к общему падению устойчивости борта в целом, а также к технологическим осложнениям в результате разрушения межступенных берм. На многих участках нерабочих бортов карьеров подобная ситуация уже имеет место.

Второй участок заключен между первым и наиболее напряженной поверхностью скольжения откоса глинистого уступа. Для него характерны условия:

$$\sigma_0 < \sigma_n; \quad K_\sigma < 1; \quad K_n < 1,0.$$

Это значит, что разгрузка здесь значительная и возможности набухания глин больше, так как  $\sigma_0 < \sigma_n$  (см. разд. 2.4). Но на этом участке, в отличие от первого, невозможно возникновение поверхностных деформаций за счет изменения глин в результате непосредственного воздействия агентов физического выветривания. Главный процесс, приводящий к изменению естественного физического состояния глинистых пород на этом участке — их набухание в условиях разгрузки. Разупрочнение здесь происходит практически за счет набухания, но при наличии цементационных связей растворимых в воде соединений оно может быть значительно больше. Для юрских глин Лебединского карьера нами были проведены испытания в лабораторных условиях, которые показали закономерное изменение прочности в зависимости от нормального давления в откосе (табл. 38).

Принимая условно коэффициент устойчивости откоса уступа, пройденного в глинах естественной прочности за единицу, при расчете с включением показателей набухших глин, были получены значения этого коэффициента в пределах 0,5—0,7, указывающие на существенное влияние набухания на устойчивость откосов, сложенных глинистыми породами.

Третий участок в пределах юрских глин приурочен к потенциальной поверхности скольжения всего борта. В нижней части борта он совпадает с двумя рассмотренными ранее участками,

Таблица 38. Результаты определения сопротивления сдвигу юрских глин Лебединского карьера КМА при их набухании

Название глин	Напряжение в откосе $\sigma_0$ , МПа	Влажность при сдвиге $W$ , %	Сцепление $c$ , МПа	Угол внутреннего трения $\phi$ , градус
Пылеватая	0,5	25	0,25	13
	0,4	26	0,22	12
	0,3	26,5	0,21	11
	0,2	29	0,12	9
	0,1	30	0,10	8
	0,05	33	0,07	6
	0,025	34	0,03	2
Песчаная	0,1	22	0,12	21
	0,05	24	0,05	20
	0,025	30	0,01	17

в связи с чем здесь не обсуждается. Основная же его часть характеризуется условиями:

$$\sigma_e > \sigma_0 > \sigma_n; \quad 0 \leq K_e < 1; \quad K_n \leq 0,$$

т. е. имеет место разгрузка, но набухание не происходит, так как  $\sigma_0 > \sigma_n$ . Поэтому в пределах этой основной части можно говорить только о некотором разуплотнении за счет упругих деформаций пород, которые в данном конкретном случае не имеют практической значимости. Однако во многих полускальных породах разгрузка горными работами приводит со временем к изменению их физического состояния, которым нельзя пренебречь. В них происходит расширение трещин, расслоение, разуплотнение, которые прослеживаются на значительных глубинах под откосной поверхностью. Растет водопроницаемость, что сказывается на формировании водопритоков в горные выработки.

Разупрочнение водонасыщенных глинистых пород при разгрузке в результате набухания наблюдается в условиях наличия двух факторов — разгрузки до остаточного давления ниже давления набухания и дополнительного увлажнения. Отсутствие одного из этих факторов не дает возможности проявления процесса набухания и, следовательно, уменьшения прочности. Уменьшение прочности, которое проявляется в пределах  $\sigma_0 < \sigma_n$  может быть выражено коэффициентом разупрочнения  $K_p$  как отношение общих сопротивлений сдвигу при данном нормальном напряжении до набухания  $\tau_\sigma$  и после набухания при этом же напряжении  $\tau'_\sigma$  или

$$K_p = \tau'_\sigma / \tau_\sigma.$$

Очевидно, при свободном набухании, когда  $\sigma_0 \approx 0$ , сопротивление сдвига будет очень незначительным и практически им можно пренебречь, тогда  $K_p \approx 0$ . При  $\sigma_0 > \sigma_n$  набухание и разупрочнение в грунте не наступит и  $K_p = 1$ .

Исследование изменения прочности при сдвиге на большом количестве различных глинистых пород показало, что сопротивление сдвига после набухания может быть выражено следующей аналитической зависимостью:

$$\tau'_{\sigma_i} = (\sigma_n \operatorname{tg} \varphi_e + c_e) \sqrt{\sigma_i / \sigma_n},$$

где  $c_e$  и  $\varphi_e$  — показатели сопротивления сдвига грунта естественной влажности и плотности;  $\sigma_i$  — нормальное напряжение, при котором происходит набухание и определение сопротивления  $\tau'_\sigma$ .

При оценке давления набухания встает вопрос о максимальной его величине и о анизотропности набухания. Здесь однозначно доказано, что максимальные значения набухания и давления набухания характерны для направлений, нормальных к наслоению. Чаще всего это направление вертикальное, поскольку, в основном, приходилось исследовать толщи глин горизонтального или слабонаклонного залегания.

Влияние набухания глинистых пород на изменение степени устойчивости откосов можно рассмотреть для двух характерных случаев: а) при оценке общей устойчивости откосов в зависимости от их высоты, мощности и условий залегания глин; б) при оценке местной устойчивости отдельных уступов, сложенных глинами, нарушение которой со временем приведет к снижению устойчивости постоянного борта карьера в целом. Изучая условия устойчивости бортов карьеров КМА, Никопольского марганцевого бассейна, Соколовского и Сарбайского месторождений, а также некоторых угольных бассейнов было установлено большое различие в степени влияния набухания и многофакторность его проявления.

Рассматривая борт карьера с точки зрения его устойчивости как некоторое геологическое тело, ограниченное искусственным откосным обнажением и наиболее вероятной (наиболее напряженной) поверхностью скольжения, можно оценить возможное влияние набухания. Для этого сопоставляют значения нормальных к наслоению напряжений в различных участках поверхности скольжения с величинами давления набухания глинистых пород в этих же участках и степенью разупрочнения в результате набухания при указанных нормальных напряжениях.

По результатам выполненного анализа можно сделать несколько важных практических выводов.

1. В нижней части откоса, сложенного набухающими глинистыми породами, формируется участок разупрочнения, размеры которого зависят от высоты, угла откоса и от давления набухания.

2. В наиболее часто встречающихся глинистых породах с давлением набухания не более 0,5 МПа, участок возможного разупрочнения занимает от 5 до 20 % длины круглоцилиндрической поверхности скольжения при глубинах карьера более 100 м и распространяется на всю эту поверхность в откосах высотой менее 50 м.

3. Если принять в качестве критерия предельно устойчивого борта карьера заданной глубины и определенного геологического строения его угол наклона, то можно количественно оценить взаимосвязь между частью поверхности скольжения, в пределах которой возможно разрушение, величиной давления набухания и углом откоса (борта). На рис. 66 приведен график для глубоких карьеров с предельными углами наклона бортов от 5 до 35°. Борта сложены глинами (целиком, только в нижней части или в основании) весьма широкого диапазона свойств, выраженных величинами давления набухания от 0,1 до 1,0 МПа. Для практических целей зависимость, увязывающую параметры карьера в указанных пределах, можно принять линейной:  $y = Kx$ , где  $x$  — предельный угол наклона борта в градусах или радианах;  $y$  — отношение общей длины поверхности скольжения  $l_0$  к ее части, где возможно набухание  $l_i$ ;  $K$  — угловой коэффициент, зависящий от величины давления набухания.

4. Из установленной зависимости уменьшения сопротивления сдвигу набухающих глин от величины нормальных напряжений

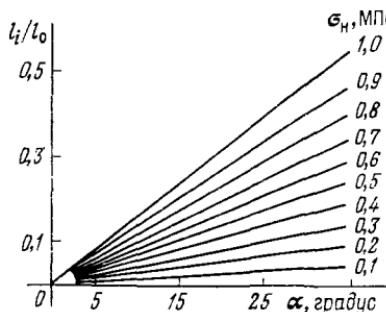


Рис. 66. Номограммы для определения длины участка набухания ( $l_i$ ) откосов с разными углами заложения ( $\alpha$ ), сложенных глинами с давлением набухания  $\sigma_n$  ( $l_0$  — общая длина наиболее вероятной поверхности скольжения)

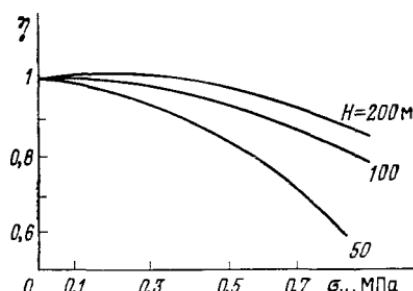


Рис. 67. Графики изменения расчетного коэффициента устойчивости ( $\eta$ ) бортов карьеров разной высоты  $H$  в связи с набуханием глин, обладающих разными значениями давления набухания  $\sigma_n$

жений, при которых наблюдается набухание, видно, что основная часть разупрочнения (до 80 %) происходит при нормальных напряжениях, составляющих 40—60 % от давления набухания. А это означает, что для карьеров глубиной более 100 м, у которых борта целиком, в нижней части или в основании сложены глинистыми породами и предельные углы наклона не превышают  $30^\circ$ , существенное разупрочнение будет иметь место в нижней части поверхности скольжения (не зависящего от ее формы), составляющей в среднем от 3 до 10 % всей ее длины, что для практических расчетов не является существенным фактором, уменьшающим степень устойчивости борта (это обстоятельство часто приводит к заблуждению, и многие специалисты считают, что набухание не дает практического снижения устойчивости откосов). При наличии сильнобабувающих глин (содержащих минералы групп монтмориллонита) следует проводить специальные целенаправленные исследования с учетом напряженного состояния и особенностей набухания и разупрочнения подобных глин. На рис. 67 приведены графики, построенные по результатам расчетов изменения степени устойчивости бортов за счет разупрочнения глин при набухании.

А теперь обратимся к оценке влияния разупрочнения в результате набухания на устойчивость отдельных уступов, высота которых в глинистых породах составляет при различных технологиях вскрышных работ от 10—12 до 20—25 м. Характерная особенность таких откосов — проникновение процесса разупрочнения по всей призме обрушения, а в отдельных случаях и за ее пределы в глубь массива глинистых пород. В связи с этим параметры постоянных уступов карьеров определяются с учетом уменьшения прочности слагающих их пород. Для откосов высотой 10, 20 и 30 м, сложенных целиком набухающими глинами, наиболее напряженная поверхность скольжения находится в зоне интенсивного набухания при давлениях набухания глин от 0,1 до 0,3 МПа. При расчетах приняты следующие параметры: 1)  $H=10$  м,  $\varphi=14^\circ$ ,  $c=0,02$  МПа,  $\rho=2 \cdot 10^3$  кг/м³,  $\alpha=45^\circ$ ; 2)  $H=20$  м,  $\varphi=14^\circ$ ,  $c=0,03$  МПа,  $\alpha=36^\circ$ ; 3)  $H=30$  м,  $\varphi=10^\circ$ ,  $c=0,04$  МПа,  $\alpha=25^\circ$ . Предельный угол, рассчитанный по результатам исследования разупрочнения глинистых пород, уменьшается соответственно на 12, 8 и  $5^\circ$ , что по технологическим условиям недопустимо.

Особо неблагоприятно оказывается деформирование глинистого уступа на устойчивость борта, когда он занимает нижнюю его часть. В этом случае происходит разрушение транспортных берм, сдавливание и строительство уступов, подработка более устойчивых пород. Все эти явления нарушают условия работы горно-транспортного оборудования, уменьшают безопасность труда и ставят под угрозу устойчивость всего борта или значительной его части.

В связи с этим приходится рассматривать и решать задачу обоснования мероприятий по ограничению развития набухания глинистых пород в уступах. Отвод карьерных вод и дренирование водоносных горизонтов, за счет которых происходит дополнительное увлажнение пород, не решает эту задачу до конца, хотя замедляет ход набухания. Поверхности откосов и транспортных берм, как известно, находятся постоянно под влиянием атмосферных осадков. Наиболее эффективной оказывается каменная пригрузка откосов, препятствующая или ограничивающая набухание. К этому мероприятию прибегают на многих рудных и угольных карьерах, но без достаточного его обоснования по времени и параметрам. Пригрузка частично увлажняет откосов ускоряет их деформирование по поверхности скольжения, проходящей через набухшие глины. Поэтому первое условие строительства пригрузок — выбор времени его осуществления — до начала увлажнения или в период высыхания глин после неглубокого проникновения воды в глубь глинистого массива. Критерий оценки состояния глинистых пород — их влажность, определенная по пробам, отобранным при бурении с откосной поверхности или с бермы уступа.

Расчет высоты и толщины каменной пригрузки должен учитывать наличие избыточного давления набухания, действующего по наиболее напряженной поверхности скольжения. Под термином «избыточное или действующее давление набухания» следует понимать разницу между величинами давления набухания глинистой породы на рассматриваемой элементарной площадке и давления от вышележащих пород уступа, действующего на этой же площадке, т. е.

$$\sigma_d = (\sigma_n - \gamma h_0) \cos \theta,$$

где  $h$  — высота столбика глинистых пород, залегающего между поверхностью скольжения и откосом в данной точке;  $\theta$  — угол наклона касательной к поверхности скольжения в этой точке.

Для полного ограничения набухания необходимо, чтобы высота пригрузки  $h_0$  (назовем ее эквивалентной высотой) составляла в данной точке

$$h_0 = \sigma_d / \gamma_k,$$

где  $\gamma_k$  — удельный вес каменной пригрузки.

В связи с тем, что интенсивное набухание и разупрочнение происходит только до некоторой части давления набухания, можно для практических расчетов с определенной долей запаса принимать

$$h_0 = 0,6 (\sigma_d / \gamma_k).$$

Решение этой задачи можно провести еще и следующим образом. Представим потенциальную потерю сопротивления гли-

нистых пород на площадке длиной  $\Delta l_n$  и шириной 1,0 м за счет набухания как

$$T \Delta l_n = \Delta l_n (\sigma_n \operatorname{tg} \varphi_n + c_n);$$

а увеличение сопротивления за счет пригрузки на участке длиной  $\Delta l_n$  как

$$\Delta T_n = \Delta l_n \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_n.$$

Тогда можно определить допустимую величину разупрочнения за счет набухания из условия

$$(1,2 \div 1,5) \Delta T_n \leq T_n,$$

где  $c_n$  и  $\varphi_n$  — показатели сопротивления сдвигу набухших глин;  $\varphi_n$  — угол трения пригрузки.

Для принятия более рациональных решений с точки зрения объемов каменных пригрузок и технико-экономических показателей ее построения следует иметь в виду влияние величины угла откоса уступа перед началом пригрузки. Как показывают наши исследования, наиболее выгодны уступы с углами откосов 50—70°, которые можно оформлять существующей технологией открытых работ до начала строительства пригрузочных призм. С уменьшением угла откоса от 40 до 20° происходит резкое увеличение объема пригрузки. Более крутые откосы нижних уступов дают экономический эффект еще из-за уменьшения объема земляных масс, которые нужно отработать и вывезти на отвалы, где они займут лишние площади земельных угодий.

### 5.3. ОПОЛЗНЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА БОРТАХ КАРЬЕРОВ

Формирование откосных поверхностей и нового напряженного состояния горных пород при открытой разработке месторождений создает благоприятные условия для возникновения целого ряда деформаций, среди которых решающее значение для освоения минеральных ресурсов имеют гравитационные склоновые деформации. В настоящее время в технической литературе существует несколько классификаций явлений, происходящих на бортах карьеров, в основу которых положены принципы инженерно-геологических типизаций оползневых явлений. Обычно принято выделять четыре вида деформаций в зависимости от типа пород, в которых они проявляются, и характера перемещения: осьпи, обвалы, оплывины, оползни с последующим более детальным разделением по их морфологии, геологическому строению, причинам, вызывающим их и т. д. Наиболее подробно оползневые явления, составляющие более 80 % всех нарушений устойчивости откосов карьеров, рассмотрены в работах Г. Л. Фисенко, П. Н. Панюкова, Ю. Н. Малюцицкого,

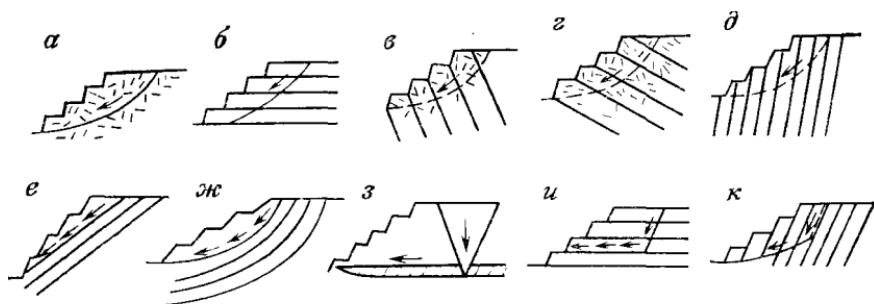


Рис. 68. Основные формы оползневых деформаций на бортах карьеров:  
а — асеквентные; б—д — инсеквентные; е, ж — консеквентные; з—к — смешанные

Н. Н. Кубаева, М. Е. Певзнера, В. Г. Зотеева, А. М. Демина и др. Для выбора надежной расчетной схемы бортов карьеров особое значение приобретает морфология оползней, зависящая от геологического строения месторождения и некоторых технологических факторов.

На рис. 68 приведены схемы оползней, встречающиеся довольно часто на угольных и рудных карьерах. В первую очередь это оползни в осадочных толщах, в которых морфология оползневых тел определяется литологией и условиями залегания горных пород. Анализ наблюдений за деформациями бортов карьеров показывает, что все их морфологическое разнообразие можно свести к известным трем типам: инсеквентных, консеквентных и асеквентных оползней с переходами между ними. Асеквентные оползни встречаются только в пределах отдельных уступов, сложенных однородными литологическими разностями. Они могут иметь место в бортах, сложенных трещиноватыми породами, которые можно рассматривать как квазиоднородную квазисыпучую среду, деформирующуюся по круглоцилиндрической, или близкой к ней, поверхности скольжения (рис. 68, а).

Наибольшее распространение имеют инсеквентные оползни, поскольку месторождения, вскрыша которых представлена толщей осадочных пород, встречаются очень часто (все угольные месторождения, а также многие железорудные, марганцевые, полиметаллические). Поверхность скольжения, как правило, круглоцилиндрическая, выходящая на откосное обнажение или через его основание в зависимости от геологического строения борта в нижней его части (см. рис. 68, б—д). Механизм деформирования слоистой толщи в откосах определяется условиями залегания пород различной прочности и деформируемости. Лабораторными и модельными исследованиями, а также наблюдениями в природной обстановке установлено, что ме-

низм деформирования слоистой среды имеет свои специфические особенности. Особенно ярко выражена эта специфика при деформировании склонов и откосов, сложенных несколькими литологическими разностями с различными механическими свойствами. Оползневой процесс здесь протекает в результате чередования ползучести, концентрации и релаксации напряжений на различных участках поверхности, которое приводит к перенапряжению и последовательному разрушению пород в них. При этом, в начале процесса разрушаются более хрупкие разновидности, а в конце — наиболее пластичные. Как правило, первые являются наиболее прочными [9].

Условия деформирования группы слоев горного массива давно привлекали внимание геологов, занимающихся вопросами изучения механизма образования геологоструктурных форм в земной коре. В связи с этим возникли понятия о компетентных (крепких, плотных) и некомпетентных (мягких, пластичных) слоях горного массива. Большой интерес вызывают более новые исследования слоистой среды при больших давлениях и высоких температурах с целью изучения механизма формирования будинажа, а также исследования условий образования складчатых структур.

Для консеквентных оползней (см. рис. 68, *е*, *ж*) очень важное значение имеет построение модели с фиксированием слабого контакта и с учетом прочности по нему. Эта задача решается в результате детального изучения геологического разреза и его тектонических особенностей в региональном и локальном масштабах. В горной практике открытых работ известно много случаев, когда эти ослабленные места в геологическом разрезе остаются необнаруженными, и прогноз ведется по схеме инсеквентного или асеквентного оползня. Особенно это часто случается в породах невысокой степени литификации, в глинистых толщах и в районах древних оползней (склоны рек, балок, оврагов, старых карьеров).

Изучению оползневых явлений в трещиноватых скальных и полускальных породах посвящены работы Г. Л. Фисенко, Н. Н. Кубаева, В. Т. Сапожникова, А. Б. Фадеева, Ю. И. Туриццева, В. Г. Зотеева, Э. Л. Галустяна и др. В исследованиях В. Г. Зотеева особое место занимает проблема формирования трещин разгрузки под влиянием глубоких карьеров при разработке железорудных месторождений. Он установил, что развитие оползневых деформаций происходит при сдвиге по трещинам с последующим опрокидыванием и изгибом субвертикальных блоков, т. е. поверхность скольжения «унаследует» нарушения сплошности пород. Подобный механизм оползневых явлений наблюдался и на угольных карьерах Кузбасса В. Е. Ольховатенко. Таким образом, консеквентные оползни распространены на бортах карьеров, поэтому оценка сопротив-

ления сдвигу по ослабленным контактам (зонам) приобретает большое практическое значение.

Такая оценка дает надежные результаты только при натуральных исследованиях, поэтому здесь уместно привести рекомендации Э. Л. Галустяна [5] по установлению предельной высоты откосов, устойчивость которых определяется сопротивлением по слабому контакту (трещине). Эти рекомендации можно использовать для решения обратной задачи — нахождения параметров сопротивления сдвига.

1. Вертикальный откос подсекает слабый контакт, падающий в сторону карьера под углом  $\beta$ :

$$H_{90} = (2c'/\gamma) [\operatorname{tg} \beta + \operatorname{ctg}(\beta - \varphi')].$$

2. Откос под углом  $\alpha$  подрезает поверхность ослабления, падающая в сторону карьера под углом  $\beta$ :

$$H = (2c'/\gamma) [1 + \operatorname{ctg} \beta \operatorname{ctg}(\beta - \varphi') / (\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \alpha)].$$

3. Откос, у которого  $\alpha = \beta$ :

$$H = [(2c/\gamma) \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2)] / (1 + \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \psi'),$$

где  $\operatorname{tg} \psi'$  — коэффициент сдвига по трещине;  $c'$  и  $\varphi'$  — параметры сдвига по трещине;  $c$  и  $\varphi$  — параметры сдвига пород в призме обрушения.

Оползневые явления, происходящие по сложным поверхностям скольжения и занимающие промежуточное положение между консеквентными и асеквентными или между консеквентными и инсеквентными оползнями, имеют значительное распределение на бортах карьеров и очень сложны для исследования и прогнозов (см. рис. 68, з—к). Это связано со сложностью определения местоположения поверхностей скольжения и оценкой сопротивления пород сдвигу по ним. Наиболее интенсивны по своей морфологии и масштабам оползни в горизонтально и слабонаклонно залегающих толщах осадочных пород. Описание таких оползневых явлений дано в работе [9].

#### 5.4. УСЛОВИЯ И ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ

В результате взаимодействия горных работ с природной средой возникают различные процессы, изменяющие ее и ведущие к нарушениям (деформации), которые оказывают вредное влияние на технологический процесс, устойчивость сооружений, безопасность труда, технико-экономические показатели предприятия и т. д., т. е. на рациональное использование природных, технических и людских ресурсов. При ведении открытых горных работ основным проявлением всего комплекса изменений природной обстановки следует считать гравитационные яв-

ления на их бортах и откосах отвалов (последние представляют собой специфические земляные сооружения и рассматриваются отдельно). Для правильной оценки происходящих изменений, а также для их прогноза при геологических исследованиях необходимо определить условия, в которых возникают все изменения и факторы, способствующие их возникновению и развитию.

Наиболее обоснованным является подход Е. П. Емельяновой, в соответствии с которым выделяют: объект процесса, условия (обстановка), в которых развивается процесс, факторы (причины) процесса, агенты, под влиянием которых появляются или изменяются факторы, механические силы, участвующие в процессе [по 9]. При изучении закономерностей возникновения и развития процессов на бортах карьеров такой подход принципиально правилен потому, что это изучение начинается еще тогда, когда объектом является разведуемое месторождение, характеризующееся присущими ему природными условиями разной степени сложности и чувствительности и внешним воздействием. В отличие от естественного оползневого склона или от деформированного откоса здесь нельзя начинать с выявления причин нарушения устойчивости (аварии сооружения), а необходимо оценить существующие природные условия в аспекте их взаимодействия с горными работами без нарушения нормального хода этих работ с обеспечением устойчивости строящихся сооружений. Таким образом оценка условий ведется с целью предотвращения возможного возникновения оползневых деформаций искусственных сооружений.

Если надежно оценить существующие условия, названные инженерно-геологическими, точно предвидеть и количественно описать взаимодействие между ними и проектируемыми горными работами и сооружениями, то можно сохранить необходимую устойчивость новой системы, обеспечить ей нормальную эксплуатацию. Основные компоненты условий, набор которых при решении разных задач может меняться, известны. Они представляют собой некоторую объективную реальность, в которой происходят различные природные процессы. Некоторые авторы неправильно называют эти условия статической системой до их взаимодействия с инженерными сооружениями.

Общие и частные классификации месторождений полезных ископаемых строятся на учете особенностей именно этой системы, и надо отметить, что в них довольно полно рассматриваются все элементы, имеющие отношение к ее будущему функционированию. Случай необнаружения слабых прослоев, неточного определения показателей трещиноватости и прочности пород, а также сейсмичности относятся уже к качеству и детальности инженерно-геологических исследований. Если поставить вопрос о количественной оценке участия любой харак-

теристики инженерно-геологических условий, то можно утверждать, что она возможна с самой высокой степенью надежности.

Математическую модель устойчивости будущего борта карьера можно представить в виде:

$$Y(\alpha, H) = F \left( \sum_1^n \Pi_i + \sum_1^m \Phi_i \right),$$

где  $\alpha$  и  $H$  — параметры борта карьера;  $\Pi_i$  — доля участия в балансе устойчивости любого элемента природной обстановки;  $\Phi$  — доля участия отдельных факторов;  $n$  и  $m$  — числа учитываемых элементов природной обстановки и факторов;  $F$  — некоторая зависимость, управляющая данной функцией.

Сумму участия природных элементов можно представить в виде ряда

$$\sum_1^n \Pi_i = \Pi_r + \Pi_\gamma + \Pi_\phi + \Pi_t + \Pi_v + \Pi_c + \Pi_h,$$

где  $\Pi_r$  — доля участия геологического строения;  $\Pi_\gamma$  — доля участия естественного напряженного состояния;  $\Pi_\phi$  — показатель, учитывающий влияние прочности горных пород;  $\Pi_t$  — доля участия трещиноватости, слоистости и других нарушений горных пород;  $\Pi_v$  — доля участия подземных вод;  $\Pi_c$  и  $\Pi_h$  — показатели, учитывающие участие в формировании напряженного состояния сейсмичности и неотектонических процессов.

Как видно, в это выражение входит вся информация, полученная в период геологических исследований и являющаяся базой для инженерно-геологических оценок и прогнозов. Геологическое строение определяет морфологию деформаций откосов, а, следовательно, модель (расчетную схему). Трещиноватость и слоистость уточняют эту схему и определяют значения расчетных показателей прочности, а три остальных слагаемых определяют характер и величины напряжений по наиболее вероятной поверхности скольжения. Для месторождений с простыми инженерно-геологическими условиями задача устойчивости решается на базе информации первых членов приведенного выражения.

Очень часто принципиально неправильно причиной возникновения оползня называют литологическое строение, в частности, наличие глинистых пород, трещиноватость и слоистость пород, их невысокую прочность.

Факторами, или причинами, оползневого явления следует называть (по принятой систематизации Е. П. Емельяновой) те изменения инженерно-геологических условий, которые происходят в результате взаимодействия горных работ и инженерных

сооружений с природной обстановкой. Все они прямо или косвенно вызываются техногенным воздействием, но по своей физической сущности могут быть разбиты на природные и искусственные. Раскроем приведенное выше выражение участия факторов в общем балансе устойчивости бортов в виде следующей суммы:

$$\sum_1^m \Phi_i = \Phi_p + \Phi_n + \Phi_c + \Phi_v + \Phi_t,$$

где  $\Phi_p$  — изменение рельефа местности;  $\Phi_n$  — изменение напряженного состояния вокруг выработок;  $\Phi_c$  — изменение состава, состояния и свойств горных пород;  $\Phi_v$  — изменение режима поверхностных и подземных вод;  $\Phi_t$  — температурные изменения.

Каждое слагаемое (изменение) представляет собой производный ряд воздействий и процессов, протекающих во времени и в пространстве. Например, изменение напряженного состояния — результат проведения горных работ (изменения рельефа местности за счет строительства карьера, отвалов и других сооружений), работы горно-транспортного оборудования, дренирования подземных вод, производства буровзрывных работ. С одной стороны, изменения состава, состояния и свойств пород происходят под влиянием выветривания, разуплотнения, набухания, размокания, супфозии, искусственной трещиноватости, расслоения и т. д. С другой стороны, изменения и вызывающие их процессы взаимосвязаны и взаимообусловлены. Без изменения рельефа нет существенного изменения напряженного состояния, а без этого не могут происходить изменения свойств пород в бортах карьеров. В связи с этим встает вопрос о ведущих факторах, которые непосредственно вызывают оползневые деформации или даже об одном главенствующем факторе.

Исходя из специфики формирования баланса устойчивости бортов карьеров в условиях развития горных работ, углубления выработок, дренирования и других технологических процессов, необходимо выделять главенствующий элемент природных условий и ведущий фактор, который и следовало бы назвать причиной оползневых деформаций. На ограничение доли участия в подготовке к нарушению устойчивости этого фактора и следует направить соответствующие мероприятия. Бороться со всеми факторами, подготавливающими оползень на открытых разработках невозможно и экономически нецелесообразно. Но если в скальных породах имеются выдержаные трещины, определяющие устойчивость отдельных уступов, то можно предотвратить их влияние анкерным креплением. В начале этой главы мы уже рассмотрели влияние на устойчивость изменения естественного состояния глинистых пород и способы его ограничения.

Для решения практических задач необходим анализ участия отдельных составляющих баланса устойчивости бортов карьеров. Такой анализ можно провести, используя строгие аналитические детерминированные модели. Статистические подходы здесь малопродуктивны, они дают более грубые результаты.

Один из коренных вопросов, возникающих при оценке и прогнозе условий устойчивости бортов карьера (также, как и естественных склонов) — это вопрос о роли воды в оползневом процессе. Правильная количественная оценка этой роли дает возможность решить задачу о влиянии дренажных мероприятий на рост степени устойчивости откосов. Практика строительства противооползневых сооружений показывает, что отвод поверхностных и подземных вод не всегда дает желаемый эффект. Влияние воды на устойчивость склонов и откосов можно рассматривать по двум направлениям: изменения напряженного состояния и уменьшения прочности пород (В. А. Мироненко обос浓ляет еще деформации в откосах в результате растворения, выщелачивания и суффозии).

В первом случае влияние воды наблюдается за счет гидростатического и гидродинамического давлений, в связи с изменением плотности водосодержащих пород при их дополнительном увлажнении или дренировании, при подрезке откосов эрозионными и абразивными процессами или выносе рыхлых пород фильтрационным потоком. Уменьшение прочности пород может произойти при их водонасыщении, набухании, растворении, выщелачивании, размягчении, суффозии.

Количественная оценка влияния природных вод по заданному направлению может быть проведена с помощью расчетов коэффициента устойчивости откоса (борта, склона) при прочих равных условиях. Нами были проведены расчеты увеличения плотности неводонасыщенных пород для откосов высотой 10—30 м, увлажняемых атмосферными или промышленными водами, в зоне аэрации. Результаты проведенных расчетов для однородного откоса, прочность пород которого  $\phi=20^\circ$  и  $c=-0,02$  МПа, показали, что в рассматриваемых пределах изменения плотности коэффициент устойчивости падает до 30 % для откоса высотой в 10 м и до 15 % для откосов высотой 20 и 30 м. Наблюдения, однако, показывают, что изменение плотности за счет дополнительного водонасыщения составляет 0,1—0,2 г/см³ и тогда реальное снижение степени устойчивости составит не более 10—5 % для рассматриваемых высот откосов.

Для оценки влияния изменения плотности песков при их дренировании на устойчивость откоса можно воспользоваться результатами расчетов Е. П. Емельяновой, из которых следует, что для естественных оползневых склонов в районе городов Киева и Одессы за счет дренирования можно достичь умень-

шения природной нагрузки не более, чем на 2,5 %, а отношение между сдвигающими и удерживающими силами изменится на 0,5—3,0 %.

Наиболее существенно влияние на устойчивость откосов гидростатического и гидродинамического давлений. Но и здесь надо подходить с количественной мерой, зная заранее положение наиболее вероятной поверхности скольжения и депрессионной кривой в приоткосной зоне. Как известно, в условиях фильтрующего откоса влияние подземного потока в пределах расчетного блока можно учесть одной объемной силой, направленной по нормали к плоскости скольжения и снижающей величину нормальных эффективных напряжений

$$F_{\Phi i} = \gamma_b h_i a_i \cos \theta_i,$$

где  $h_i$  — расстояние по вертикали между поверхностью скольжения и депрессионной кривой в середине расчетного блока шириной  $a_i$ ;  $\theta_i$  — угол наклона поверхности скольжения в пределах расчетного блока;  $\gamma_b$  — удельный вес воды.

В случае круглоцилиндрической поверхности скольжения выражение для коэффициента устойчивости фильтрующего откоса приобретает вид

$$\eta_{\Phi} = \left[ \sum_i^n (N_i - F_{\Phi i}) \operatorname{tg} \varphi_i + \sum_i^n c_i l_i \right] / \sum_i^n T_i,$$

где  $N_i$  и  $T_i$  — нормальная и касательная составляющие веса расчетного блока (без учета взвешивания);  $c$  и  $\varphi$  — сцепление и угол внутреннего трения пород, через которые проходит поверхность скольжения в пределах блока;  $l_i$  — длина поверхности скольжения в пределах расчетного блока.

Как видно из приведенных известных выражений, влияние фильтрационного потока на величину коэффициента устойчивости зависит от значения  $h_i$  и числа блоков, у которых  $h_i > 0$ . Эти параметры определяются мощностью и градиентом фильтрационного потока (которые, в свою очередь, зависят от водопроницаемости горных пород), условиями дренирования и питания подземных вод, параметрами борта и положением наиболее напряженной поверхности скольжения.

На рис. 69 приведены характерные случаи, наблюдаемые на некоторых угольных и рудных карьерах. Первый случай (см. рис. 69, кривая 1) имеет место на большинстве современных карьеров, на которых осуществляется дренирование подземных вод поверхностным или подземным способом. Здесь затопленная часть расчетной призмы и градиент фильтрационного потока незначительны, поэтому уменьшение коэффициента устойчивости измеряется первыми несколькими процентами. Для Лебединского карьера КМА при высоте борта

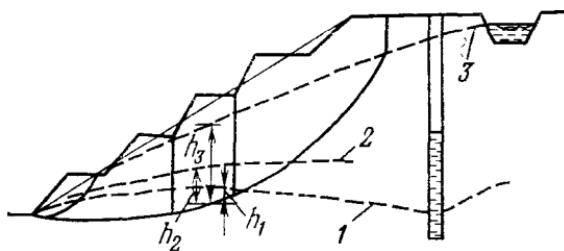


Рис. 69. Положение депрессионных поверхностей подземных вод в прибортовой зоне в зависимости от способа дренирования:

1 — водонапряжение скважинами; 2 — прибортовая зона дренируется откосом; 3 — то же при наличии волоотводного канала

в 100 м и генеральном угле его наклона в 27—30° снижение степени устойчивости за счет гидростатического и гидродинамического давлений составило 3—4 %, для Сарбайского карьера при подобных параметрах его борта — 4—5 %, для Михайловского карьера КМА — 2—4 %. Подобные значения получены и для некоторых других карьеров. Хотелось бы обратить внимание на тот факт, что проскок воды через дренажные системы и выход ее на откосную поверхность может привести ко многим осложнениям, связанным с изменением состояния и свойств водосодержащих и подстилающих пород, вскрытых горными работами, но природа этих осложнений иная и подход к ее оценке должен быть другой.

Второй случай (см. рис. 69, кривая 2) характерен для карьеров, борта которых сложены устойчивыми скальными и полускальными породами или малообводненными толщами песчано-глинистых пород. Здесь имеет место открытый водоотлив поступающих через откос вод и депрессионная поверхность является непостоянной, следящей за горными работами до вскрытия водоупора. После вскрытия водоупора она устанавливается в приоткосной зоне и меняет свое положение под влиянием атмосферных осадков или некоторых искусственных факторов. Мощность затопленной части откоса и градиент потока и здесь незначительны. Обычно расстояние между двумя интересующими нас поверхностями не превышает 10 м (чаще оно меньше), а градиент составляет не более 0,05—0,1. Расчеты показывают, что изменение степени устойчивости бортов карьеров не превышает 5—6 %. Интересно отметить, что для естественных склонов, где ситуация примерно такая же, по расчетам Е. П. Емельяновой, влияние подземных вод как фактор напряжения (гидростатическое и гидродинамическое) приводит к уменьшению расчетного угла склона не более, чем на 1°.

Рассматривая эти два случая, близких по условиям учета влияния фильтрационного потока подземных вод, необходимо

обратить внимание на кроющуюся опасность неправильной оценки роли подземных вод как дополнительного напряжения. Во-первых, это относится к оценке устойчивости уступа или группы уступов, залегающих на водоупоре, на котором формируется фильтрационный поток. Как видно из рис. 69 и как показывают наблюдения, в пределах нижнего уступа влияние воды гораздо сильнее, поскольку обводненная его часть занимает иногда больше половины прогнозной призмы скольжения. Градиенты потока в непосредственной близости к откосной поверхности достигают 0,3—0,6, реже 1,0. В этой ситуации уменьшение коэффициента устойчивости под влиянием гидростатического и гидродинамического давлений может составить 30—50 %, чем пренебрегать нельзя. Во-вторых, при выходе воды на откос, сложенный несвязанными породами, могут иметь место фильтрационные деформации: выпор и оплывание. В. А. Мироненко [1] показал, что в условиях затопления откоса равновесие определяется равенством

$$(\gamma' \cos\alpha - \gamma_b I) \operatorname{tg}\phi = \gamma' \sin\alpha,$$

где  $\gamma'$  — удельный вес взвешенной породы;  $\alpha$  — угол фильтрующего затопленного откоса;  $\phi$  — угол внутреннего трения водосодержащих пород;  $I$  — градиент фильтрационного потока.

На фильтрующем незатопленном откосе происходит одновременно выпор и снос частиц в виде оплывания откоса с формированием языка оплывания длиной

$$l_{\text{опл}} = X [\gamma' / (\gamma' + \gamma_b)] \operatorname{tg}\phi,$$

где  $X$  — величина, зависящая от удельного расхода воды,  $q$ ,  $\text{м}^2/\text{сут}$ , стекающей по откосу потока и от среднего диаметра зерен песка  $d$ , см:

$\sqrt{q/d}$	0	20	50	100	150	200
$X$	1	0,75	0,49	0,30	0,21	0,16

Устойчивость уступа еще больше нарушается, если верхняя часть его сложена связанными породами. Последствия подобных «локальных» деформаций — сдавливание уступов, подработка и перекрытие транспортных берм, увеличение объема экскавации, разубоживание и захоронение полезного ископаемого.

Третий случай, показанный (см. рис. 69, кривая 3) наблюдается на некоторых карьерах, вдоль бортов которых имеются естественные или искусственные водотоки или водоемы, питающие дренируемый приоткосный массив горных пород в пределах верхних уступов или большей части борта. Источниками питания могут служить реки и ручьи (в естественных и искусственных руслах), временные водотоки по балкам и оврагам, водохранилища, гидроотвалы, шламохранилища, карьер-

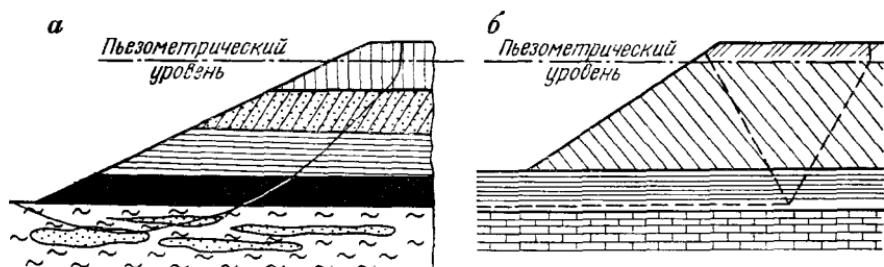


Рис. 70. Схематические разрезы бортов карьеров, устойчивость которых существенно зависит от влияния напорных вод, приуроченных к лизам песка (а) и к трещиноватым известнякам (б)

ные водоотводящие каналы, заболоченные участки, массивы отвалов и др. Эти источники приходилось наблюдать на многих карьерах, в технической литературе приводится много примеров затопления шахт и карьеров их водами. Напряженное состояние, создаваемое в этом случае фильтрационным потоком подобно тому, которое имеет место во многих земляных плотинах. Градиенты потока здесь достигают 0,5 и более, а приоткосная призма (между поверхностями откоса и скольжения) в большей своей части находится под воздействием гидростатического и гидродинамического давлений. Расчеты показывают, что коэффициент устойчивости может изменяться на 40—50 %. Нередко оползни происходят именно под влиянием воды, проникающей из поверхностных искусственных источников в уже сдrenированный массив борта.

Приведем два примера, где вопрос об учете гидростатического давления решается нестандартно. На рис. 70, а показан схематический разрез борта карьера, сложенного глинистыми породами, в основании которого залегают пластичные плиоценовые глины большой мощности, содержащие песчаные линзы и прослойки с напорными водами. Положение этих водосодержащих песков незакономерное, залегают они на разных глубинах и, как правило, на расстоянии более 10 м от поверхности скольжения. Однако, на одном из участков после очередного неожиданного оползня возникла ситуация, приведенная на рис. 70, а. Несколько линз, содержащих напорные воды (напор более 1 МПа), оказались на глубине 8—15 м, т. е. в зоне поверхности скольжения. В этих условиях эффективные напряжения меньше расчетных, что приводит к уменьшению коэффициента устойчивости в 1,5—2,0 раза.

На рис. 70, б приведена схема еще одного характерного случая, где напорные подземные воды оказывают своеобразное влияние на устойчивость борта карьера, в основании которого залегают пластичные глины юрского возраста мощностью 12—

15 м, представляющие собой верхний водоупор напорного водоносного горизонта.

В естественных условиях глины плотные ( $\rho = 2,10 \div 2,20 \text{ г/см}^3$ ), водонасыщенные, с углами внутреннего трения  $8 \div 10^\circ$  вкрест слоистости и  $3 \div 5^\circ$  по наслоению и со сцеплением, соответственно, от  $0,08 \div 0,12$  до  $0,03 \div 0,05 \text{ МПа}$ . Однако, в непосредственной близости к границе с известняками прочность характеризуется углом трения  $1 \div 2^\circ$  и сцеплением  $0,01 \div 0,03 \text{ МПа}$ . Формально здесь напор подземных вод не оказывает существенного влияния как фактор напряжения, поскольку уменьшение величины эффективных нормальных напряжений по плоскости скольжения не сказывается на сопротивлении по ней за счет трения из-за малого значения угла внутреннего трения. Понятно, что если  $\varphi \approx 0$ , то при любом значении эффективных напряжений общая сумма произведений  $\sum_1^n (N_i - F_i) \operatorname{tg} \varphi_i = 0$ . Однако влияние напорного водоносного горизонта на условия устойчивости нерабочего борта и тем более внутренних отвалов весьма существенно. Это связано, во-первых, с созданием в естественной обстановке тонкого слоя переувлажненных и размягченных глин на контакте с водоносным горизонтом и, во-вторых, с созданием нового напряженного состояния при вскрытии глинистого слоя, которое приводит к его набуханию и разупрочнению, а иногда и прорыву.

## 5.5. ОПОЛЗНЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ОТКОСАХ ОТВАЛОВ

Особое место при разработке месторождений открытым способом занимает проблема размещения горных пород вскрыши и отходов производства. Как показывает анализ данных землемерности открытых разработок в стране, отвалы, хвосто- и шламохранилища занимают до 70 % и более всей площади, отведенной под горное предприятие (сам карьер при этом занимает от 20 до 40 %) [26]. В современном карьерном хозяйстве различают: внутренние и внешние отвалы вскрышных пород, вынимаемых экскаваторами; гидроотвалы, укладка пород в которых производится намывом; хвостохранилища для укладки хвостов (отходов) обогатительных фабрик; золоотвалы; шламонакопители; шламоотстойники и др. Все эти земляные сооружения имеют одну общую специфическую особенность — они строятся из нарушенных пород без специальных мероприятий формирования нового их состояния. Основной фактор, влияющий на это состояние, — уплотнение под весом вышескладируемых отложений. В настоящее время на угольных и рудных карьерах страны высота отдельных ярусов отвалов изменяется от 10 до 70 м, а углы их откосов от  $25 \div 40^\circ$  (малые углы и

Таблица 39. Основные факторы, определяющие условия устойчивости отвалов

Факторы	Детализация фактора	Характеристика факторов и отвалов	Код фактора
I. Литологический состав пород	1. Скальные и полу-скальные 2. Песчано-глинистые (природные и искусственные образования) 3. Соляные (водно-растворимые)	a. Водоустойчивые б. Водонеустойчивые а. Песчано-гравийные б. Песчано-супесчаные в. Глинисто-суглинистые а. Галитовые б. Гипсо-ангибитовые	IIa IIб I2a I2б I2в I3a I3б
II. Состав и состояние пород основания	1. Прочные скальные 2. Слабое песчано-глинистое органоминеральное 3. Основание, включающее слабый слой, зону, контакт 4. Искусственное	a. Водоустойчивые б. Водонеустойчивые а. Фильтрующие б. Водоупорные а. Выдержаные трещины б. Тектоническая глинка в. Слабый глинистый слой а. Скальная масса б. Песчано-гравийные в. Гидроотвал из естественных и искусственных пород	IIIa IIIб II2a II2б II3a II3б II3в II4a II4б II4в
III. Рельеф занимаемой территории (основания)	1. Равинный 2. Склоновый (косогорный) 3. Овражно-балочный	а. Отвалы на пологом горизонтальном основании а. Отвалы на наклонном основании б. Отвалы на крутом основании а. Отвалы на склонах б. Отвалы русловые а. Внешние отвалы б. Внутренние отвалы а. Из природных образований б. Хвостохранилища в. Шламохранилища г. Золоотвалы д. Шламонаполнители	III1a III2a III2б III3a III3б IV1a IV1б IV2a IV2б IV2в IV2г IV2д V1a V2б V3a
IV. Состояние пород в отвалах	1. Естественной влажности 2. Гидроотвалы	а. Из природных образований б. Хвостохранилища в. Шламохранилища г. Золоотвалы д. Шламонаполнители а. Одногрунтовые б. Многогрунтовые	IV2б IV2в IV2г IV2д V1a V2б V3a V4a; V4б V5a V6б V7a V7б V8a
VI. Строение тела отвала	1. Однородное 2. Квазиоднородное 3. Слоистое		VII1 VII2 VII3

высоты характеризуют отвалы из слабых глинистых пород). Общая высота отвалов из песчано-глинистых пород уже давно перешла 100-метровый рубеж, а для Талдинского угольного месторождения Кузбасса, где максимальная глубина карьера составит 560 м, рекомендуется отсыпать отвалы высотой в 280 м при результирующем угле откоса — 23°.

Устойчивость внутренних и внешних отвалов определяется характером основания (литология пород, условия их залегания, прочность, обводненность) составом и состоянием пород отвала, высотой и углами откосов уступов (ярусов) и отвала в целом, технологией отвалообразования (табл. 39). Оползневые явления происходят очень часто и приводят к потерям и разубоживанию полезного ископаемого (оползни на внутренних отвалах), выходу из нормального производственного процесса горно-транспортного оборудования, а также нарушению устойчивости прилегающих к отвалам территорий и сооружений (оползни на внешних отвалах, складируемых на слабом основании). Морфология оползней, их динамика и масштабы зависят от характера основания и пород отвала. На рис. 71 приведены схемы оползней откосов внутренних и внешних отвалов, из которых можно сделать заключение о характере поверхностей скольжения и морфологических особенностях оползневых тел в зависимости от типа оснований отвалов.

На основании изучения оползневых явлений на отвалах угольных и рудных карьеров можно составить ранжированную схему основных факторов, определяющих устойчивость отвалов, методику ее изучения, оценки и прогноза (см. табл. 39).

Гидроотвалы представляют собой особый класс гидротехнических сооружений. Г. А. Нурок предлагает относить к этому типу сооружений:

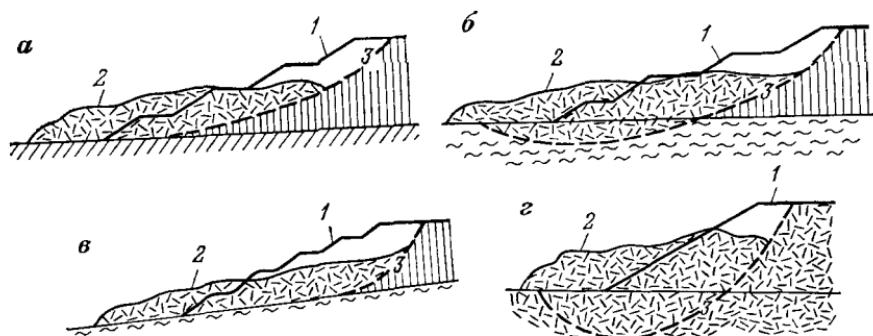


Рис. 71. Профили оползневых участков отвалов, отсыпаемых на прочном (а) и слабом (б) основаниях, на слабом контакте (в) и на гидроотвале (г):

1 — профиль откоса отвала; 2 — откосная поверхность после оползня; 3 — поверхность скольжения

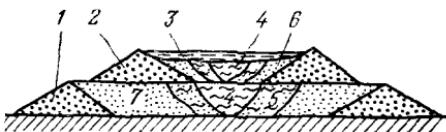


Рис. 72. Схематический разрез гидроотвала двустороннего намыва.

1 и 2 — дамбы обвалования; 3 — прудок; 4 — глинистое ядро; 5, 6 и 7 — промежуточная, суглинистая и песчаная зоны

золоотвалы, намывные сооружения из золошлакового материала — отходов ТЭЦ, работающих на твердом топливе.

Строительство гидроотвалов и дальнейшее их использование в качестве оснований, месторождения строительного материала или рудных и угольных залежей, а также для целей рекультивации существенно зависят от скорости консолидации намываемых осадков и перехода их в горную породу. Процесс консолидации в пределах прудковой зоны (глинистого ядра) происходит очень медленно. На рис. 72 приведен схематический разрез гидроотвала двустороннего намыва, из которого видно расположение различных зон по гранулометрическому составу намытых осадков.

А. М. Гальперин [6], длительное время изучавший гидроотвалы в горнодобывающих районах, отмечает, что в прудковой зоне формируется тонкодисперсная порода мощностью свыше 50 м, которая десятилетия находится в неконсолидированном состоянии и поэтому непроходима даже для специальных болотоходных машин. В связи с этим большое значение приобретает вопрос оценки и прогноза консолидации гидроотвалов и обоснование мероприятий по ее ускорению. Сложность этого вопроса заключается прежде всего в большой пространственной и временной неоднородности гидроотвалов по составу, свойствам и напряженному состоянию намытых осадков.

Ю. И. Кутепов на базе исследований гидроотвалов в Кузбассе выделяет в глинистой и суглинистой зонах (по глубине) три подзоны, отличающиеся по физическому состоянию отложений в них (в качестве критерия, характеризующего это состояние, им принят показатель консистенции  $I_L$ ): а) текучей ( $I_L > 0,75$ ); б) мягкопластичной ( $0,5 < I_L < 0,75$ ) и тугопластичной ( $0,25 < I_L < 0,5$ ) консистенции [9].

Особо следует остановиться на сооружениях из отходов химического сырья. Как известно, эти отходы не только занимают большие площади, но и существенно изменяют состав подземных и поверхностных вод за счет проникновения в них соединений из отходов, и реагентов флотации. На калийных предприятиях в результате обработки руды в отходы попадают га-

собственно гидроотвалы, образующиеся в результате складирования (намыва) вскрышных пород, разрабатываемых гидромеханизацией;

шламохранилища (хвостохранилища), в которых намываются продукты отходов переработки твердых полезных ископаемых;

литовая рыхлая масса и соляно-глинистая пульпа с примесями химических реагентов. Галитовые отходы складируют на поверхности в виде солеотвалов высотой более 100 м при угле откоса 40—50° в начале осыпки и 20—25° после длительного воздействия атмосферных осадков. Эти отвалы занимают громадные площади и являются, по-существу, постоянным источником засоления почв, пород, подземных и поверхностных вод.

По химическому составу солеотходы характеризуются преобладанием  $\text{NaCl}$  (85—95 %) и примесями  $\text{KCl}$  (3—9 %),  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ . Жидкая фаза представляет собой насыщенный хлоридно-натриевый рассол, плотностью 1,23 г/см³. Из этой массы в теле солеотвала формируется особая порода высокой плотности и прочности. Исследования показали, что в разных зонах по глубине рассолосодержание изменяется от 6 до 12 %, пористость — от 25 до 40 % (в последствии происходит заполнение пор и омоноличивание), угол внутреннего трения — 40—60°, сцепление — от 0,15 до 1,0 МПа и более [9]. Оползневые явления на откосах солеотвалов происходят главным образом из-за наличия слабых пород в их основании (чаще всего торфяные залежи или заболоченные земли) или по слабому контакту, каким является глинистый экран под телом солеотвала.

Шламохранилища, в которых складируются соляно-глинистые отходы, подобны гидроотвалам по способу строительства, но в их основании, в обязательном порядке, строится непроницаемый экран. Специфичен и их состав. Подаваемые в шламохранилища гидротранспортом шламы представляют собой суспензию глинистых и карбонатных частиц в концентрированных рассолах, состав которых зависит от технологии производства и состава исходной руды; рассолы комбинатов «Белорускалий» и «Уралкалий» хлоридно-натриевые — с минерализацией 190—250 г/л. На других месторождениях химического сырья состав более сложный. Во всех рассолах содержатся токсичные вещества.

Размещение солеотходов представляет большой практический интерес не только с точки зрения рационального использования земель, но и главным образом из-за значительного засоления природных вод и почв. Поэтому вопрос сводится не столько к строительству непроницаемых экранов, которые не оправдывают своего назначения, сколько к уменьшению площадей, занимаемых солеотходами. Это можно достигнуть за счет: а) селективной отработки рудоносной залежи; б) заливки выработанного пространства солеотходами; в) увеличения высоты солеотвалов; г) совместного складирования галитовых отходов и глинистых шламов; д) строительства шламохранилищ на солеотвалах; е) складирования галитовых отходов на участках старых шламохранилищ [9].

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие геологические процессы возникают на открытых разработках под влиянием техногенного воздействия?
2. Какие существенные изменения геологических условий (рельефа, горных пород, природных вод) происходят при разработке месторождений открытым способом?
3. Почему происходят оползни на бортах карьеров? Назовите основные виды деформаций на бортах карьеров и откосах отвалов.
4. В чем проявляется влияние подземных вод на возникновение и развитие оползневых явлений?
5. Какая геологическая информация необходима для построения расчетной модели борта карьера?
6. Какие свойства горных пород определяют условия устойчивости откосов?
7. Как оценивается влияние набухания глинистых пород на оползневой процесс?
8. В чем проявляется влияние трещиноватости горных пород на устойчивость бортов карьеров?

## Глава 6

### **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ С ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ**

Специфика взаимодействия горных работ, подземных выработок и наземных сооружений с природной средой, существенно отличается от тех взаимодействий, которые изучаются в инженерной геологии при оценке и прогнозе геологических условий для строительства гидротехнических, гражданских, промышленных и других сооружений. В связи с этим остановимся более подробно на основных вопросах, имеющих важное практическое значение в работе горного инженера.

#### **6.1. ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Проходка подземных выработок приводит к резкому изменению напряженного состояния вмещающих их горных пород, что представляет собой первопричину всех последующих изменений естественной обстановки и возникновения различных явлений. При этом, в зависимости от гидрогеологических условий и технологии строительства подземных сооружений, нарушение природного напряженного состояния могло произойти до начала проходки в результате водопонизительных работ. Однако, в любом случае природные напряжения определяются геологическими условиями, как гравитационные, возникающие под действием давления вышележащих пород с учетом гидростатического давления, или как гравитационные и тектонические (см. разд. 4.1). Формирование нового напряженного состояния вокруг подзем-

ных выработок оценивается методами теории упругости и непосредственными замерами.

Напряжения в различных точках вокруг выработки принято показывать в виде отношения  $\gamma H/R_c$ , называемого коэффициентом концентрации напряжений, который имеет (теоретически) максимальное значение, равное 3, на контуре выработки при боковом распоре  $\xi=0$  (безраспорная среда).

Таким образом, вокруг горных выработок образуется зона опорного давления, которое оценивается двумя количественными показателями: величиной возникающих напряжений (коэффициентом концентрации) и размерами в пространстве. Эти показатели зависят от природных и техногенных факторов, среди которых горные породы, естественное напряженное состояние, форма, размеры и взаимное влияние горных выработок занимают особое место. В связи с этим точность и надежность определения их невысокая.

Из аналитических решений известно о том, что на расстоянии более трех радиусов выработки практически можно пренебречь изменениями напряженного состояния, ибо оно составляет не более 10 %. Измерения, проведенные в угольных шахтах и подземных рудниках, показывают, что, как коэффициент концентрации, так и размеры зоны его проявления изменяются в значительных диапазонах, не поддающихся точному прогнозу. Например, для условий Донбасса, В. Л. Свержевский считает, что максимальное нормальное напряжение вокруг одиночных горизонтальных выработок составляет (2,6—2,9)  $\gamma H$ , а при наличии влияния очистных работ (4—5)  $\gamma H$ .

А. А. Борисов [3] по данным натурных наблюдений и моделирования эквивалентными материалами показал, что параметры опорного давления изменяются в широких пределах в зависимости от строения и свойств пород кровли и почвы, размеров выработок, системы разработки, скорости подвигания очистных работ, глубины захвата и т. д. Максимальные значения опорного давления достигают  $(1,5 \div 5) \gamma H$ , расстояние от забоя до максимума давления изменяется от 0 до 15 м и более. И. А. Турчанинов [27] рекомендует максимальное значение коэффициента концентрации 2,75 и ширину зоны влияния —  $3,3 R$ , где  $R$  — радиус выработки. Все эти данные относятся к месторождениям, где нет дополнительных тектонических напряжений.

Искусственные обнажения горных пород и концентрация напряжений в них вокруг выработок определяют характер и масштабы наступающих изменений, без знания которых трудно прогнозировать условия устойчивости сооружений и различные явления, сопутствующие горным работам. Действительно, когда делаются попытки количественной оценки устойчивости кровли или почвы подземных выработок по данным геологоразведочных исследований, неточность и ненадежность получаемых

результатов часто объясняется несовершенством методов оценки, неточностью расчетных схем и расчетных показателей и т. д., к которым следует добавить незнание и неучет тех изменений состояния горных пород, которые возникают вокруг выработок и подготавливают условия для различных явлений. Среди них наибольшее значение имеют: искусственная (техногенная) трещиноватость, расслоение пород кровли, набухание глинистых пород и пород на глинистом цементе, размягчение пород на карбонатном и глинистом цементе, оттаивание мерзлых пород, изменение химического состава пород и подземных вод. Все эти техногенные изменения можно считать результатом техногенного выветривания под влиянием нового напряженного состояния, в том числе и от буровзрывных работ (БВР) и оборудования, подземных (шахтных, рудничных) вод и шахтного (рудничного) воздуха. Наряду с этим изменяется режим подземных и поверхностных вод.

В конечном итоге напряженное и физическое состояние горных пород вокруг выработок определяет характер и масштабы горного давления, которое можно рассматривать как некоторое избыточное давление между величиной действующего напряжения и прочностью пород по определенной площадке деформирования, действующее на крепь (при наличии такой) или вызывающее различные деформации контуров выработки. Отсюда логично возникает и вопрос об устойчивости пород, под которой понимают сохранение первоначального их положения вокруг выработки в конкретной горно-технической обстановке. Критерий оценки устойчивости — величина смещения контуров выработки и давления на крепь. В механике грунтов существует понятие «оползневое давление», представляющее разницу между суммой сдвигающих и удерживающих сил по плоскости (поверхности) скольжения оползневого тела или на каком-то участке ее, т. е.

$$p_{\text{оп}} = \sum T_i - \sum (N_i \operatorname{tg} \phi_i + c_i l_i),$$

где  $T_i$  и  $N_i$  — касательная и нормальная составляющие веса пород расчетных блоков, опирающихся на плоскости скольжения;  $c_i$  и  $\phi$  — сцепление и трение горных пород в основании расчетных блоков длиной  $l_i$ .

По аналогии с этим можно, например, определить разницу между нормальным напряжением от веса вышележащих пород, рассчитанных с учетом коэффициента концентрации и прочностью пород на одноосное сжатие (с учетом масштабного эффекта), т. е.

$$\Delta p = K \gamma H - R_c.$$

Из этого следует, что величина горного давления является непостоянной и во многом зависит от прочности пород или по-

лезногого ископаемого, изменяющейся под влиянием горных работ.

Искусственная трещиноватость, формирующаяся вокруг горных выработок, наблюдалось и документировалась многими авторами (геологами, маркшейдерами, горняками). В. Л. Свержевский [23] предложил название «трещины горного давления», тем самым определил причину их возникновения. По результатам своих наблюдений в шахтах Донбасса на глубинах от 150 до 1000 м он сделал вывод о том, что искусственные трещины в углях и вмещающих алевролитах, песчаниках и аргиллитах образуются в условиях когда их прочность меньше давления от вышележащих пород. Эти трещины характеризуются рядом особенностей, о которых шла речь в гл. 2.

Глинистые породы и породы на глинистом цементе под влиянием разгрузки и дополнительного увлажнения разуплотняются и в том случае, когда залегают в непосредственной почве и кровле или входят в состав промышленного пласта и в них создаются искусственные обнажения. Изменения их состояния происходят довольно быстро, и в дальнейшем именно они определяют устойчивость выработок, давление на крепь, характер и интенсивность деформаций. Как показывают наблюдения в подземных выработках, деформации пород проявляются в условиях, которые по прогнозным оценкам (с учетом естественной прочности) были выделены как благоприятные, а выработки — устойчивые.

Приведем пример оценки изменения состояния глин верхненюрского возраста, залегающих в почве промышленного пласта на Кашпирской сланцевой шахте. В естественном состоянии глины почвы характеризуются высокой плотностью (2,1—2,2 г/см³), низкой влажностью (15—17 %) и значительной прочностью (сопротивление одноосному сжатию составляет 6—8 МПа). Содержание глинистой фракции изменяется от 10 до 25 %, пылеватой — от 60 до 75 %; имеется большое количество карбонатов, которые создают цементационные связи. Увлажнение глинистых пород происходит за счет шахтных вод, которые формируются в результате протекания воды из выработанного пространства соседней шахты и дренирования шахтным стволов вышележащих водоносных комплексов. По количеству откачиваемой воды (около 35 м³/ч) шахту следует отнести к практически необводненной, однако, для дополнительного увлажнения воды оказалось достаточно. Изменение состояния глин в почве выработок происходит с разной интенсивностью в горизонтальном и вертикальном направлениях в зависимости от близости источника увлажнения и «возраста» выработок.

Обработка результатов инженерно-геологической съемки позволила выделить в пределах шахтного поля три типа почв по состоянию слагающих их глинистых пород.

1. Почвы новых выработок, к которым шахтные воды еще не подошли (падение промышленного пласта незначительное, горные работы ведутся по падению). Здесь глины находятся в естественном состоянии, их влажность 15—17 %, а прочность на сжатие 6—8 МПа.

2. Второй тип почв характеризуется значительным изменением глинистых пород. Влажность их достигает 20—25 %, прочность изменяется в широких пределах от 1 до 5 МПа, а в результате деформации появляется густая сеть трещин разной ориентировки. Изменение естественной влажности наблюдается до глубины 1 м. Обычно это выработка со сроком службы более одного года, в которых пройдены водосборники и водоотводящие канавки, которые представляют собой источники дополнительного увлажнения. На участках с таким типом почвы происходят первые деформации выдавливания (пучения).

3. Почвы характеризуются более высокой влажностью, превышающей 25—30 %, интенсивной трещиноватостью и незначительной прочностью — менее 1,0 МПа. Изменение естественного состояния глин достигает на разных участках глубины более 2—3 м. В почвах этого типа формируется искусственный водоносный горизонт за счет шахтных вод, который увлажняет глинистые породы. Процессы увлажнения, деформирования, трещинообразования и расслоения здесь взаимосвязаны и взаимообусловлены. Они наблюдаются в наиболее старых выработках, расположенных в северной части шахтного поля, находящегося под воздействием вод, перетекающих с отработанного пространства соседней шахты. К этому же типу отнесены и почвы выработок на участке околовольчьего двора, которые находятся под воздействием подземных вод, дренируемых шахтным стволом и вод центрального водосборника.

Оценка физического состояния и степени разупрочнения глинистых пород, залегающих в почве подземных выработок, дала возможность провести районирование шахтного поля по степени угрожаемости нарушения устойчивости за счет пучения. Таким образом, оценка условий устойчивости выработки и классификации глинистых пород по степени пучения на основе их естественной прочности нельзя признать ненадежными. Мало того, по результатам шахтных наблюдений и исследований можно сделать вывод о том, что нарушение устойчивости подготовительных подземных выработок происходит чаще в связи с изменением состояния и свойств вмещающих пород и полезного ископаемого в результате их взаимодействия с горными работами (под влиянием нового напряженного состояния и шахтных вод). Эти изменения, по своему участию в общем балансе устойчивости выработок, перекрывают влияние неточности расчетных схем, неполного учета реологических свойств, а также некоторых технологических факторов. Все это, в конеч-

ном итоге, указывает на решающую роль мероприятий, направленных на сохранение природного состояния вмещающих пород в период строительства и эксплуатации горных выработок. Своевременное облегченное крепление и отвод подземных вод дают значительный эффект в этом направлении.

Изменение состава, состояния и свойств пород, вмещающих горные выработки, под влиянием подземных вод происходит еще в результате растворения и выщелачивания воднорасторимых соединений, а также механического выноса отдельных частиц (суффозия). Это особенно важно для засоленных и соленосных пород, соляных месторождений, а также для рыхлых несвязных обломочных отложений.

## 6.2. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ

В горной и геологической литературе детально рассматриваются явления, возникающие в результате взаимодействия горных работ с вмещающей средой, дается различное их толкование, классификации, оценки и прогнозы. Многие авторы считают их результатом горного давления, другие же рассматривают более широкий комплекс явлений, куда входят и деформации горных пород под воздействием горного давления. Явления, возникающие под влиянием давления горных пород, называют по-разному: геологическими, инженерно-геологическими, горно-геологическими, механическими и просто деформациями, вызванными горным давлением.

Началом систематического изучения явлений, сопровождающих горным работам, можно считать последнюю четверть XIX в. (К. Грибнак, 1875; Г. Романовский, 1898), но особое внимание они стали привлекать в начале нашего века (Б. И. Бокий, 1903; М. М. Протодьяконов, 1907; П. М. Леонтовский, 1912, 1913; и др.). Основными объектами исследований и наблюдений были «обрушения и оседания пород» на шахтах Донбасса и рудниках Кривого Рога. Горно-геологическими явлениями П. Н. Панюков в 1956 г. назвал совокупность разнообразных видов деформаций пород в горных выработках, возникающих в начале в непосредственной близости от искусственного обнаружения, а затем распространяющихся в глубь массива.

Среди наиболее важных явлений, возникающих в подземных выработках, тогда же были выделены: отжим угля, пучение, горные удары, внезапные выбросы угля и газа, сдвижение горных пород, прорывы плавунов и подземных вод. Название «горно-геологические явления» имеет одну очень важную особенность: оно определяет приуроченность явлений к горным работам. В табл. 40 приводится последняя классификация этих явлений П. Н. Панюкова применительно к угольным шахтам.

Таблица 40. Классификация горно-геологических явлений при подземной разработке угольных месторождений, по П. Н. Панюкову

Группа явлений	Причины возникновения	Вид проявления
I. Гравитационные	Проявления горного давления	Различные формы сдвигов горных пород Деформации подземных сооружений (выработок, целиков и пр.) Пучение литифицированных глинистых пород Отжим пород в зоне опорного давления Горные удары Внезапные выбросы угольной пыли и газов Деформации породных отвалов Фильтрационный выбор
II. Гидродинамические	Нарушение гидрологического режима	Прорывы подземных вод и плыунов Суффозионный размыв пород Депрессионные деформации пород в поле водопонижения Выщелачивание легкорастворимых пород Пучение глинистых пород при их набухании Проявление тиксотропных свойств истинных плыунов
III. Гидрохимические	Нарушение влажностного режима, химического состояния поровой воды и минерального состава пород	Деформации горных пород в поле водопонижения
IV. Геотермические	Нарушение температурного режима горных пород	Деформация горных пород при их замораживании или оттаивании

Как видно из табл. 40 и как подчеркивал сам автор, наибольшее практическое значение имеет первая группа явлений — гравитационные. М. В. Сыроватко в 1960 г., а позже и Б. В. Смирнов [4] отнесли к горно-геологическим только явления первой группы. Эти авторы дают детальное описание выделяемых ими явлений на примере разработки угольных месторождений. При разработке рудных месторождений особое значение имеют явления, связанные с деформациями пород кровли, реже — почвы, а также горные удары, стреляние, водные прорывы.

Горно-геологические явления в подземных выработках рассматриваются с большой детальностью в специальных курсах (механика горных пород, строительство подземных сооружений и др.), поэтому здесь мы более подробно остановимся на тех из них, которые имеют подчеркнутую геологическую природу и весьма трудно изучаются и прогнозируются.

Наиболее сложными и многофакторными можно считать выдавливание пород почвы капитальных и подготовительных выработок, вывалы пород из кровли очистных забоев (реже под-

готовительных выработок), прорывы напорных вод, плыуны, горные удары, стреляние. Эти явления во многом определяют характер крепления и мероприятий по охране горных выработок. Они оказывают непосредственное влияние на условия безопасности горных работ, на производительность горно-транспортного оборудования и себестоимости продукции, а также на качество и полноту выемки полезного ископаемого.

Пучение (выдавливание) почвы горных выработок наблюдается почти на всех угольных шахтах и во многих подземных рудниках. Так, в Донбассе оно отмечено в 54 % штреков, находящихся в зоне влияния очистных выработок, в Кузбассе — около 27 %, а в Печорском угольном бассейне — более 17 % [4]. Большое распространение пучение почвы имеет на шахтах Подмосковного бассейна Артемовского (Дальний Восток), Ахалцхского (Кавказ), Кызыл-Кийского и Ангаренского (Средняя Азия) месторождений. Отмечают выдавливание породы на некоторых подземных рудниках. На ликвидацию последствий пучения на шахтах расходуются большие материальные средства и людские ресурсы. Ремонт и поддержание выработок с пучащими почвами составляет значительную долю работ на угольных шахтах, оцениваемую в миллионах рублей в год для некоторых бассейнов страны. В соответствии с определением в Терминологическом словаре «Горное дело» под пучением горных пород следует понимать вязко-пластическое течение в виде выдавливания в выработку под действием горного давления.

Пучение проявляется чаще в глинистых породах, но в связи с ростом глубины работ в этот процесс вовлекаются и более прочные разновидности осадочных пород: песчаники, глинистые и углистые сланцы, алевролиты. Основная причина возникновения деформаций в почве горных выработок — это несоответствие прочности пород новому напряженному состоянию (опорному давлению), формирующемуся при проходке данной выработки или при дополнительном воздействии соседней, чаще всего очистной выработки. Отсюда сразу можно сделать вполне определенный вывод о той значительной сложности оценки и прогнозирования пучения, которая отличает изучение этого явления от подобных ему явлений в основаниях различных сооружений.

С одной стороны, эта сложность связана с неопределенностью оценки (количественной) напряженного состояния. Проблема опорного давления (величина, зона распространения, динамика формирования и изменения и т. д.) недостаточно изучена, даже в относительно простых геологических условиях, где имеют место только гравитационные напряжения. С другой стороны, в общем балансе устойчивости почвы участвуют прочность толщи неоднородных, слоистых и трещиноватых пород, обладающих природной изменчивостью и подверженных изме-

нениям в пространстве и во времени в новых техногенных условиях.

К этому надо добавить влияние крепления выработок, которое предназначается для управления горным давлением. По данным, приведенным в работе И. Л. Черняка [29], можно убедиться в том, что на некоторых шахтах Донбасса около 90 % закрепленных штреков в зоне влияния очистных работ на глубинах 500—800 м деформируется. О роли крепления в изменении масштабов и динамики пучения можно судить по измеренным величинам давления деформирующихся пород на крепь подготовительных выработок вне зоны влияния очистных работ, которые варьируют в пределах от 0,02 до 0,8 МПа для глубоких шахт Донбасса.

Характер, масштабы и интенсивность пучения пород почвы зависят от большого числа факторов, которые имеют геологическую или техногенную природу.

Среди геологических факторов наиболее существенными являются: 1) геологическое строение, литология и условия залегания полезного ископаемого и смещающих горных пород, мощность и выдержанность отдельных слоев; тектоническая обработка, палеорельеф и современная гипсометрия почвы промышленного пласта, глубина залегания полезного ископаемого; 2) состав, текстура, структура и структурные связи полезного ископаемого и вмещающих пород; 3) гидрогеологические условия месторождения (шахтного поля), обводненность, водопроницаемость, мощность водоносных горизонтов, величины напоров, состав подземных вод; 4) физико-механические свойства полезного ископаемого и вмещающих пород; влажность, плотность, трещиноватость, водоустойчивость, теплоемкость, температуропроводность, прочность, деформируемость, реологические особенности.

Из техногенных факторов наибольшее значение имеют: 1) глубина выработки; 2) положение выработки по отношению элементов залегания промышленного пласта и пород почвы; 3) положение выработки относительно очистных работ или других выработок; 4) размеры и форма выработки; 5) размеры целиков; 6) технология и скорость проведения горных работ; 7) конструкция и податливость крепи.

Роль литологического состава пород (в конечном итоге — это состояние и свойства этих пород) можно показать на примере Центрального района Донбасса при постоянной глубине капитальных выработок и разном креплении (рис. 73). Здесь показаны в процентах протяженности нарушения крепления выработок в песчаниках, песчаных и глинистых сланцах спустя 5—10 лет после его установления. Отметим, что при прочих равных условиях в сланцевых глинах нарушений в три раза больше, чем в других породах. Если проанализировать данные

наблюдений в этом же районе для более глубоких горизонтов, то можно убедиться в том, что пучение имеет место во всех подготовительных закрепленных выработках, в почве которых залегают глинистые и песчано-глинистые сланцы с прочностью на сжатие от 15 до 40 МПа.

Что же касается более слабых глинистых пород, то пучение в них наблюдается на глубинах менее 100 м. На шахте «Лесная» в Подмосковном угольном бассейне пучение почвы штрека, сложенной глинами мощностью 2,6 м происходило на глубине 58 м от поверхности.

Глубина выработок при оценке их устойчивости — определяющая. На примере Донбасса видно, что для глубины 300—500 м нарушение крепей подготовительных выработок в два раза меньше, чем на глубинах 500—800 м (по протяженности), а интенсивность пучения возрастает в 3,5—4,2 раза. Вместе с тем следует отметить, что глубину правильно оценивать не в абсолютных, а в относительных величинах в сравнении с прочностью вмещающих пород. Это особенно важно для сравнительно небольших глубин в зоне выветривания (до 200—300 м), где с глубиной из-за быстрого возрастания прочности пород улучшаются условия устойчивости выработок. Заметим, что здесь отношение  $\gamma H/R_c$  с глубиной убывает.

Для оценки и прогноза условий возникновения пучения и динамики его развития большое значение имеет механизм деформирования пород почвы. Как известно, под механизмом любого явления понимают последовательность состояний и промежуточных процессов, в результате которых оно возникает. Изучение его проводится по натурным наблюдениям и на моделях.

Для условий Подмосковного и Донецкого бассейнов наиболее полно механизм пучения рассмотрен в работе И. Л. Черняка [29], в которой проведен анализ и более ранних исследований А. П. Максимова, Ю. З. Заславского, М. А. Комиссарова. Для глинистых пород со сцеплением 0,25—1,00 МПа, которые моделировались глинистыми пластами, установлено, что деформации в почве происходят по сетке поверхностей сколь-

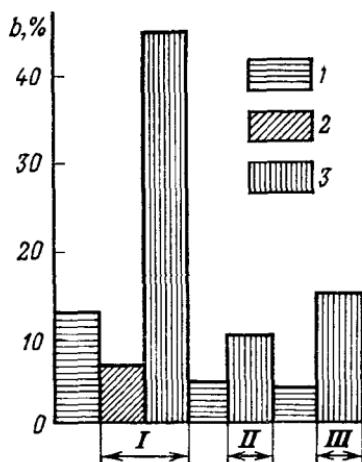


Рис. 73. Диаграмма, отражающая зависимость протяженности калильных выработок ( $b$ ) от характера крепи:

1—3 — крепи соответственно прочная, монолитная и сплошная. Породы в почве: I — глинистые сланцы; II — песчанистые сланцы; III — песчаники

жения, близкой к теоретической сетке предельного напряженного состояния в нагруженном основании, с выделением трех характерных зон: активного давления, радиальных перемещений и пассивного отпора. По наблюдениям в шахтных условиях часть поверхностей была наклонена под углом 40—45° и направлена в сторону штрека, а другая часть, направленная в сторону очистной лавы, имела наклон 60°. Целики угля рассматриваются как штампы, из-под которых в выработанное пространство выдавливаются более слабые породы.

Почвы выработок, сложенные глинистыми и песчанистыми сланцами, характеризуются сравнительно быстрым затуханием деформаций в течение 6—9 месяцев. Смещения наблюдаются на глубинах от 3 до 5 м ниже отметки почвы выработок. Характер деформаций в этих породах рассматривается по-разному. А. П. Максимов считает, что они вязко-пластичные, М. А. Комиссаров относит их к псевдо-пластическим, образовавшимся в результате расслоения.

И. Л. Черник выделяет три типа деформации и три зоны деформирования: упруго-вязких, длительного и условно-мгновенного разрушений. Для первого типа предполагается отсутствие процесса разрушения, так как напряжение на контуре выработки не превышает предел длительной прочности пород. Затухание деформаций наблюдается через 150—300 сут; величина смещения не превышает 50 мм и достигает глубины 4—5 м. Деформации второго типа, длительного разрушения, имеют место в случае, когда напряжения на контуре выработки больше предела длительной прочности, но меньше мгновенной прочности пород. Зона разрушенных пород наблюдается на расстоянии 2 м от контура выработки, а далее предполагается зона ползучести: смещение пород составляет 70—200 мм. Деформации полностью прекращаются через 300—500 сут. И, наконец, деформации условно-мгновенного разрушения (третий тип) происходят в том случае, когда напряжения на контуре выработки превышают мгновенную прочность пород. Глубина проникновения этих деформаций около 2 м, смещение более 200 мм. Ниже происходят деформации ползучести.

Рассмотрим особенности процесса выдавливания пород почвы подготовительных и капитальных выработок в породах, которые не подвергались до сих пор детальному исследованию. Продуктивная толща представлена чередованием почти горизонтально залегающих сланцевых и глинистых слоев верхне-юрского возраста и имеет среднюю мощность около 10 м. Выше залегают песчаники и песчано-глинистые породы юрского; мелового и неогенового возраста, которые перекрываются аллювиальными песками, галечниками и делювиальными суглинками. Подземные воды порового и трещинного типов приурочены к пескам, песчаникам и сланцам всего разреза.

Таблица 41. Состав и основные физико-механические свойства глии почвы промпласта

Название и положение слоя глии в почве	Содержание фракций, %			Предел текучести, %	Число пластичности, %	Естественная влажность, %	Плотность породы, г/см ³	Прочность на одноосное сжатие, МПа	Угол внутреннего трения, градус
	>0,05 мм	0,05—0,002 мм	<0,002 мм						
Глина карбонатная, залегающая между IV и V слоями сланца	20	69	11	65	30	16	2,03	5,5—8,0	16—18
Глина карбонатная, залегающая между V и VI слоями сланца	5	74	21	61	23	16	2,10	5,0—6,4	16—26
Глина известковистая под VI слоем сланца	14	73	13	53	18	15	2,17	5,0—6,0	20—26
Глина с прослойками сланца	13	65	22	44	12	18	1,88	8,0—9,0	20—26
Глина сапропелевая	16	59	25	47	17	18	2,06	4,0—5,0	—

Инженерно-геологическая характеристика глин, залегающих в почве выработок, приведена в табл. 41. При дополнительном увлажнении в разрушенном состоянии глины набухают и размокают. Сланцевые слои, залегающие в почве выработок, имеют мощность до 15 см и примерно в два раза более высокую прочность, чем глины.

Пучение в горных выработках стало проявляться в самом начале эксплуатации сланца на глубинах 120—150 м. Оно оказывало влияние на выбор размеров камер и предохранительных целиков, на способы дренирования подземных вод, а также на производительность шахты. С развитием горных работ в южном направлении, где глубина залегания промышленного пласта постепенно возрастает и уже достигла более 250 м, проблема устойчивости горных выработок приобретает решающее значение. Удалось выявить основные закономерности процесса пучения, его механизм и динамику, и на этой базе предложить модель процесса и мероприятия по ограничению его интенсивности (табл. 42).

Съемка всех деформированных участков показала, что пучение пород почвы происходит с формированием призмы выдавливания по поверхности скольжения, имеющей криволинейный характер. В зависимости от состояния пород, продолжительности эксплуатации выработки и степени влияния очистных и других работ по соседству, призма выдавливания может иметь

Таблица 42. Можеть пропущена пучения

Номер этапа	Технологические процессы	Изменение состояния и свойств материала	Причины возникновения изменений	Меры по предотвращению
0	Печь пакетной автоматики (пакетный автомат)	При работе пакетной автоматики (пакетного автомата) в печи пакетной автома- тике в пакетах пакетов	При работе пакетной автоматики в печи пакетов	Печь пакетной автоматики
1	Процесс кипяч- ных выпаровок – дражек (затемни- вания, сушки и за- варки)	Состав пакетов из кипятка – дражек (затемни- вания, сушки и за- варки)	Состав пакетов из кипятка – дражек (затемни- вания, сушки и за- варки)	Состав пакетов из кипятка – дражек (затемни- вания, сушки и за- варки)
II	Процесс горячей выпарки варочных масс	Изменение насту- пившего состояния жидкого варочного материала варки	Гидравлическое давление горячей выпарки варочных масс	Гидравлическое давление горячей выпарки варочных масс



симметричный или асимметричный характер, различную форму и размеры. Призмы с треугольной формой сечения имеют высоту до 0,5—0,7 м, а с трапециевидной — от 0,5 до 2,7 м. Такой вид форм пучения почвы выработка дает основание утверждать, что в данных условиях происходит выдавливание пород из-под целиков (бортов выработки), как из-под гибкого фундамента или оползня. Этую закономерность можно положить в основу построения расчетной модели устойчивости подготовительных выработок с выделением в ней трех характерных зон: активного давления, радиального перемещения и пассивного отпора. Более детально результаты выполненных исследований изложены в монографии [9].

Особое препятствие к нормальной и безопасной работе по выемке полезного ископаемого — вывалы пород в призабойном пространстве. Они всегда обладают некоторым эффектом случайности и неожиданности, резко замедляют темпы очистных работ, снижают производительность труда, повышают зональность, в ряде случаев приводят к травматизму. Вывалы часто являются причиной пересмотра проектных решений по креплению и способу (технологии) выемки. Но для большинства шахт вывалы проявляются в виде локальных обрушений на фоне общей устойчивости непосредственной кровли. С увеличением глубины разработки растет и частота проявления вывалов, меняются их размеры и форма. Лавинное сплошное вывалообразование указывает на наличие пород ложной кровли не обнаруженных ранее и неучтенных в проекте в части управления кровлей. В связи с этим проблема вывалообразования представляет особый интерес при оценке и прогнозе устойчивости непосредственной кровли выработок. Необходимо отметить, что вывалы происходят иногда и в незакрепленных подготовительных выработках, но их отрицательное значение здесь гораздо меньше.

Процесс вывалообразования не имеет строгого и однозначного определения. В терминологическом словаре «Горное дело» (1981 г.) вывал определяется как местное выпадение части пород или полезного ископаемого, выделившейся от массива. Г. Л. Фисенко считает вывалы проявлениями горного давления, а В. Л. Свержевский [23] выделяет два типа вывалов: обрушение блоков пород, ограниченных трещинами скольжения, под влиянием их собственного веса и обрушение блоков, ограниченных трещинами горного давления. Б. П. Овчаренко считает, что процесс вывалообразования имеет подготовительную и окончательную фазу, но сам вывал происходит под влиянием собственного веса выпадающего блока (объема) пород. По мнению этого автора, устойчивость кровли нарушается, если вывал составляет хотя бы небольшой объем пород из обнаженной кровли. Н. С. Булычев рассматривает три формы потери устойчи-

чивости обнаженных пород, в том числе вывалообразование под действием собственного веса обрушающихся пород, иначе, вес пород над выработкой превышает их сопротивление отрыву, в результате чего блок породы отделяется от массива и падает в выработку.

Для того, чтобы понять природу вывалов необходимо исходить из двух основных положений. С одной стороны, надо иметь в виду условия предельного состояния пород непосредственной кровли, а с другой — изменчивость геологических условий рассматриваемого участка шахтного поля (месторождения). Это тот подход, в результате которого можно показать значимость данной проблемы и пути ее исследования. Известно, что устойчивость непосредственной кровли оценивается на базе построения различных моделей. После известной модели М. М. Протодьяконова, предложенной в 1933 г., о своде обрушения В. Д. Слесаревым в 1948 г. была предложена модель о предельных пролетах эквивалентной балки, которая была экспериментально подтверждена А. А. Борисовым в 1964 г. В качестве обобщающего критерия определения устойчивости породных обнажений Г. А. Крупенников в 1961 г. предложил условие

$$K_{co}R_c \geq K_k \gamma H,$$

где  $K_{co}$  и  $K_k$  — коэффициенты структурного ослабления и концентрации напряжений в окрестности выработки.

Кроме предложенных расчетных методов оценки непосредственной кровли, существует ряд эмпирических зависимостей, построенных на базе шахтных наблюдений и исследований, проводимых О. Якоби, В. Т. Давидянцем, К. И. Ивановым, А. А. Орловым, С. И. Малининым, В. Л. Свержевским, Б. П. Овчаренко, Б. В. Смирновым и др., которые используются в разных бассейнах страны.

Оценка устойчивости непосредственной кровли, независимо от применяемого критерия, производится с целью расчета нагрузок на крепь и выбора вида надежного крепления призабойного пространства (или подготовительных и капитальных выработок), обеспечивающего устойчивость на период работы. При этом используются данные о геологическом строении, гидрогеологических условиях, прочности и деформируемости пород с учетом трещиноватости и слоистости, полученные в результате разведочных работ и шахтных наблюдений. Проявление вывалов в обнажениях пород кровли, определенных как устойчивые, связано с одной главной причиной — наличием природной неоднородности пород кровли по составу, строению и прочности.

Наблюдения в угольных и сланцевых шахтах показывают, что кроме отдельных случайных отклонений от принятых

технологических условий, все вывалы приурочены к участкам с осложненными геологическими условиями. Поэтому и принято говорить о случайности и неожиданности вывалов из кровли, но это связано только с незнанием (часто со сложностью установления) существующих закономерностей изменения природных условий. Произвести точный расчет устойчивости и применить надежную крепь, обеспечивающую абсолютное отсутствие вывалов, видимо, возможно только для пород изотропных и однородных в условиях хорошо известного напряженного состояния.

В реальных геологических ситуациях полное отсутствие вывалов без выявления закономерностей изменений в строении кровли может быть достигнуто таким креплением и такой технологией ведения очистных работ, которые окажутся невыгодными в экономическом плане. Нельзя ориентироваться на случаи, которые могут иметь место раз в год или только на отдельных участках шахтного поля.

Таким образом, вывалообразование — процесс избирательный, зависящий от геологической обстановки, в которой ведутся очистные работы или строятся и поддерживаются подготовительные и капитальные выработки. В связи с этим его прогноз возможен на базе установления закономерностей изменения геологических условий в пределах шахтного поля и взаимообусловленности с ними проявления вывалов при конкретных технологиях и способе управления горным давлением.

Вывалы имеют различную форму и размеры в зависимости главным образом от типа пород, слагающих непосредственную кровлю, от их прочности, трещиноватости и слоистости. В условиях Донбасса, по данным Л. В. Свержевского, [23] вывалы имеют форму конусов, пирамид или куполов, ограниченных частично или целиком трещинами скольжения, с диаметром основания до 1—1,5 м высотой 0,4—0,5 м (иногда до 1 м). На глубинах более 700—800 м высота вывалов достигает 2—3 м. В основном, вывалы происходят из нерасслаивающихся аргиллитов и алевролитов. Если породы слоистые, то высота вывалов не превышает 0,2—0,3 м. Автор отмечает изменение высоты вывалов в зависимости от конструкции выемочных комбайнов. Так, при выемке угля широкозахватными комбайнами высота вывалов не превышает 0,8 м, а при выемке узкозахватными комбайнами (до 3,5 м) — на глубинах до 110 м. Между высотой вывалов и отношением  $\gamma H/R_c$  установлена линейная корреляционная связь, которая рекомендуется автором для предварительного прогнозирования высоты вывалов при выемке угля узкозахватными комбайнами. Б. П. Овчаренко приводит результаты анализа нарушений устойчивости кровли по 4400 лавам в шахтах Донбасса, на основе которых он делает вывод о том, что устойчивость пород кровли зависит от петрографического типа и мощности первого слоя. Сочетание типов пород

первого и второго слоя выражается количественной зависимостью через прочность и деформируемость пород в виде:

$$K_{yc} = \alpha F(R_c, E) [m_{yc}/(m_{yc} + m_{kp})],$$

где  $\alpha = 19,7$  — параметр, зависящий от трещиноватости  $F(R_c, E) = R_c^{2/3}/E^{1/2}$  для всех видов типов структур кровли;  $m_{yc}$  — мощность первого (нижнего слоя);  $m_{kp}$  — параметр, зависящий от строения кровли.

Водные прорызы имеют различное происхождение и представляют собой причину затопления и засыпания песком и глиной горных выработок на многих угольных и рудных месторождениях. В горной практике принято рассматривать такие грозные явления как внезапные прорызы плывинов и глин, которые по существу возникают вследствие прорывов подземных или поверхностных вод в выработанное пространство. Подобные явления имеют место и на карьерах, но из-за больших объемов выработанного пространства и обнаженности горного массива они теряют часть своей энергии. В связи с этим правильнее изучать гидрогеологическую обстановку шахтного поля с учетом следующих двух факторов, определяющих потенциальную возможность, характер и масштабы прорывов: а) источник воды (водоем, водоносный горизонт), от которого зависит водообильность месторождения или отдельных его участков, а также вид прорыва (вода, пульпа, плывин, песчано-глинистая смесь и т. д.); б) причина прорыва и пути следования воды из водяного объекта до горной выработки, которые определяют скорость поступления воды и характер явления, связанного с прорывом.

В табл. 43 сделана попытка оценить обстановку, в которой формируется потенциальная возможность проявления водного прорыва и на этой основе провести прогноз его характера и масштаба. Источниками поступающей воды могут быть поверхностные водоемы (реки, озера, водохранилища, гидроотвалы), из которых может поступать не только вода, но и рыхлый песчано-глинистый материал (речной аллювий, озерный ил, складируемые в гидроотвале отложения), а также водоносные горизонты, приуроченные к различным породам. Среди них наибольшую опасность представляют карстовые воды, содержащиеся в больших пустотах и поровые — в рыхлых обломочных породах (песках, галечниках, коре выветривания).

Эти массивы пород имеют высокую водопроницаемость, что обеспечивает поступление большого количества воды за короткие промежутки времени (иногда измеряемое минутами). Вместе с тем, водоносные горизонты представляют собой источники большого количества рыхлого материала, который приходит в движение вместе с водой. Это пески-плывуны и рыхлый заполнитель некоторых карстовых пустот. Поэтому подземные

Таблица 43. Характеристика водных прорывов в горных выработках

Источник воды	Причина водного прорыва	Проявление прорыва в горных выработках	Примеры проявления прорывов
1. Поверхностные водоемы (реки, озера, водохранилища, гидроотвалы)	Искусственная трещиноватость при подработке	Затопление водой	Кузбасс, Донбасс, Кизеловский бассейн
	Тектоническая зона	Затопление водой, занесение рыхлым материалом из тектонической зоны	Печорский бассейн, Львовско-Волынский бассейн и др.
	Разрушение водонепроницаемых завес (перемычек)	Затопление водой и пульпой	СУБР, ЮУБР
	Растворение пород	Затопление рассолом	
2. Закарстованный массив	Деградация вечной мерзлоты	Растворение целиков	Березниковский калийный рудник
	Искусственная трещиноватость	Затопление выработок	Угольные месторождения Забайкалья, Воркута
	Тектоническая зона		
	Разрушение водонепроницаемых завес		
3. Массив трещиноватых пород	Искусственная трещиноватость	Затопление водой	СУБР, ЮУБР, СОБР
	Тектоническая зона	Затопление водой	Прибалтийский сланцевый бассейн
	Разрушение слоя изолирующих глин	Затопление пульпой	Миргалимсайское полиметаллическое месторождение
	Разрушение водонепроницаемых завес и перемычек	Затопление водой	
4. Рыхлые обломочные породы	Незатампонированные скважины		
	Гидрогеологическое ожидание	Затопление водой	Подмосковный, Кузнецкий, Донецкий, угольные бассейны
	Прорыв слоя глинистых пород	Затопление водой или пульпой	
	Искусственная трещиноватость	Затопление водой с глинистой массой	
	Незатампонированная скважина	Затопление водой	
	Разрушение водонепроницаемых сооружений		
	Тектоническая зона (трещина)	Затопление водой	
		Затопление водой, занесение плавуном, глинистой пульпой, песчано-глинистой смесью	Кузнецкий, Днепровский и Подмосковный бассейны, КМА

воды, содержащиеся в карстовых пустотах и в порах рыхлых обломочных пород, представляют собой потенциальный источник катастрофических прорывов по объему, составу и скорости поступления воды. И. И. Плотников, анализируя данные по водопритокам в рудники СУБРа, показал, что они на 90 % формируются за счет речных вод, питающих карстовые водоносные горизонты. Подземные воды, приуроченные к трещиноватым горным породам, могут быть источником водных прорывов разного масштаба и характера в зависимости от степени их водопроницаемости и заполнения трещин рыхлыми отложениями. Чаще всего из трещиноватого массива поступает относительно чистая вода, но известны случаи, когда вода размывает и выносит рыхлый материал из трещин и слабых песчаников.

Второй фактор, определяющий пути поступления воды из источника в горную выработку, характеризуется большим разнообразием в зависимости от геологической обстановки, технологии горных работ, размеров и назначения горных выработок, времени их поддержания и т. д. Остановимся на наиболее часто встречающихся случаях в горной практике (см. табл. 46). Осуществление гидравлической связи между источником воды и горной выработкой происходит чаще всего за счет искусственной трещиноватости, образующейся в результате горного давления (см. разд. 2.3) или буровзрывных работ в породах, вмещающих горную выработку и изолирующих ее от ближайшего источника воды (подземного или поверхностного).

Эти трещины в зависимости от размеров выработки, управления горным давлением и крепления, технологии разработки полезного ископаемого, литологии и свойств вмещающих пород имеют разную протяженность и раскрытие, без заполнителя. Их прогнозирование можно проводить на базе специальных наблюдений в аналогичных горно-геологических условиях. Они обеспечивают такой состав воды, который формируется в самом источнике, но иногда в слабых песчаниках, алевролитах и аргиллитах движущийся водный поток по искусственным трещинам размывает их стеки и выносит рыхлый песчано-глинистый материал в выработки. Гидравлическая связь может быть осуществлена и по тектоническим нарушениям разного характера, пересекающим горные выработки и водосодержащую толщу или толщу пород, пересекающую полезное ископаемое и выходящую под поверхность водоем. Иногда это зоны, заполненные частично рыхлыми породами, легко размываются водным потоком, устремляющимся в горную выработку. В связи с этим чаще всего по таким зонам в выработанное пространство поступает пульпа разной плотности.

Особо следует выделить случаи выхода горных работ в «гидрогеологические окна» в обломочных породах.

Известно, что в геологическом разрезе осадочных пород наблюдаются частые изменения мощностей и условий залегания, пережимы, выклинивания и другие формы неоднородности геологического строения. При разработке угольных месторождений встречаются случаи выхода водосодержащих песков непосредственно в почву или кровлю угольного пласта (рис. 74), неожиданное вскрытие которых горными работами приводит к быстрому заполнению выработки плытуном.

К опасным явлениям приводят водные прорывы при разрушении глинистых водоупорных слоев, изолирующих водоносные горизонты от горных выработок. Чаще всего это связано с давлением напорных подземных вод, залегающих в почве или кровле подземных выработок. В горной практике обычно рассматривают совместное проявление плытунов и разрыв изолирующих глин, поскольку напорные воды залегают в песках или слабых песчаниках, но известны случаи, когда эти воды содержатся в твердых трещиноватых или закарстованных породах, и в результате разрушения глин в выработку поступает глинистая пульпа.

Возникновение водного прорыва, при наличии изолирующего глинистого экрана, обусловлено действием гидростатического давления, определяемого величиной водного столба, приложенного к почве или кровле слоя глин (рис. 75). Устойчивость этого слоя обеспечивается при некоторой величине водного столба, называемой безопасным напором, и зависящей от мощ-

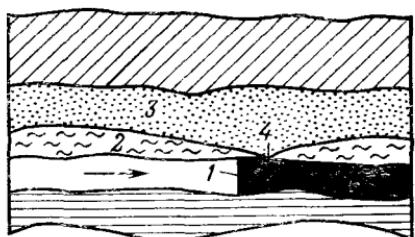


Рис. 74. Пример вскрытия «гидрогеологического окна» горной выработкой:

1 — угольный пласт; 2 — водоупорные глины; 3 — водоносные пески; 4 — «гидрогеологическое окно». Стрелкой показано направление проходки горной выработки

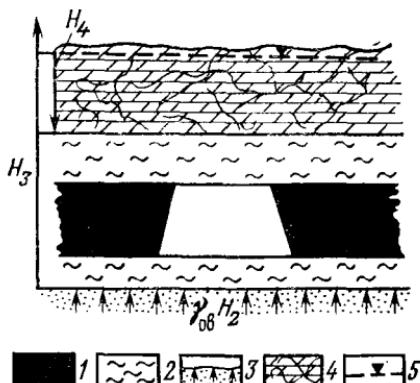


Рис. 75. Схема к расчету безопасного напора для обеспечения устойчивости подземной выработки:

1 — угольный пласт; 2 — под- и надугольные водоупорные глины; 3 — соответственно напорный и безнапорный водоносные горизонты; 5 — уровень безнапорных вод

Таблица 44. Расчетные формулы для определения величины безопасного напора подземных вод

Автор	Расчетная формула	Условия применения
В. Д. Слесарев	$H_{без} = \left( 2R_p \frac{m^2}{l^2} + \gamma m \right) / \gamma_b$	Водоносный горизонт залегает в почве подземной выработки
В. Д. Слесарев	$H_{без} = \left( 2R_p \frac{m^2}{l^2} - \gamma m \right) / \gamma_b$	Водоносный горизонт залегает в кровле подземной выработки
В. Д. Слесарев	$H_{без} = \frac{\gamma}{\gamma_b} m$	Водоносный горизонт залегает в почве выработки значительных размеров (карьеры, котлованы)
Н. Г. Паукер	$H_{без} = \frac{2R_{пр}m}{K\gamma_b l} + \frac{\gamma}{\gamma_b}$	Водоносный горизонт залегает в почве выработки
В. А. Мироненко	$H_{без} = \frac{m}{\gamma_b} \left( \gamma + \frac{2c}{l - \xi m f} \right)$	Водоносный горизонт залегает в почве выработки и водоупорный пласт работает на срез под влиянием гидростатического и гидродинамического давлений
И. П. Иванов	$H_{без} = K_0 \frac{m}{\gamma_b} \left( \gamma + \frac{2}{r} \times \right. \\ \left. \times (\sigma_x f + c) \right)$	Для случаев оценки возможности прорыва воды через забой шахтного ствола или котлована при $H > H_{без}$ , когда в глине происходит сдвиг

Примечание.  $R_p$  — сопротивление растяжения;  $R_{пр}$  — сопротивление прорыву;  $f$  — коэффициент внутреннего трения;  $\xi$  — коэффициент бокового распора;  $m$  — мощность глины;  $l$  — длина пролета;  $r$  — радиус;  $K=3-4$ ;  $K_0=0,5-0,7$ .

ности, плотности и прочности изолирующих глин, а также от формы и размеров охраняемой выработки. Для расчета безопасного напора предложен ряд аналитических и эмпирических формул, которые приведены в табл. 44.

По результатам расчетов строят специальные карты условий безопасности от водных прорывов и дают рекомендации по водозащите горных выработок, которые сводятся, в основном, к расчету водопонизительных сооружений, обеспечивающих безопасный напор воды на водоупорные глины.

Нарушение устойчивости выработок может произойти и при напорах меньше безопасного в результате деформирования водоупорных пород под влиянием горного давления (пучение

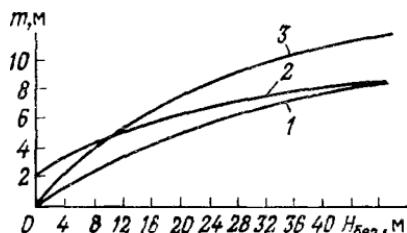


Рис. 76. Графики расчетных величин безопасных напоров ( $H_{без}$ ) в почве (1) и кровле (2) штреков и в почве лав (3) для условий Подмосковного угольного бассейна (по М. В. Сыроватко)

в почве, вывалы из кровли и т. д.). В связи с этим часто приходится снижать напор воды до максимально возможной величины (а не только до безопасной по приведенным формулам и табл. 47). Это, с одной стороны, увеличивает степень устойчивости выработок, а с другой — уменьшает объемы воды и пород (плыунов и глин), попадающих в выработанное пространство. Поэтому окончательное решение о дренировании подземных вод принимается на базе общей оценки устойчивости охраняемой выработки.

Для условий Подмосковного угольного бассейна, где происходят частые прорывы подземных вод в подготовительные и очистные выработки, были рекомендованы рассчитанные по формулам В. Д. Слесарева при  $R_p = 0,05—0,06$  МПа величины безопасных напоров в почве и кровле в зависимости от мощности водоупорных экранирующих глин и ширины выработки (для штреков 3,6 м по низу, а для лав — 6,3 м в предзабойном пространстве) и составлены прогнозные графики, представленные на рис. 76.

В горной практике известно большое количество прорывов воды в результате разрушения водоупорных глинистых слоев при подземной разработке угольных месторождений Подмосковного, Днепровского, Львовско-Волынского, Кузнецкого, а также Лангренского, Шурабского, Черновского, Ермолаевского и некоторых других месторождений. Например, в Подмосковном бассейне к концу 60-х годов И. А. Быбочкин зафиксировал более 1300 прорывов воды из песков и известняков, залегающих в почве и кровле толщ, вмещающих угольный пласт. Максимальный приток воды при этом составлял от 150—200 (из надугольных песков) до 800—1000 м³/ч (из известняков), а максимальный объем вынесенного песка от 500 до 3000 м³. На Лангренском (Казахстан) буроугольном месторождении максимальный объем плыунов из надугольных песков и слабых песчаников юрского возраста достигал 2000 м³ с заполнением штрука на участке длиной до 50—70 м. Прорывы здесь происходили в местах малой мощности или выклинивания водоупорных глин, а также при пересечении выработками малоамплитудных тектонических нарушений. Иногда продолжительность прорыва составляла всего 20—30 мин, хотя подготовка к нему, выражаящаяся в накоплении воды, формировании трещин и

вывалов или в пучении почвы, может происходить в течение многих месяцев.

На Шурабском месторождении в Средней Азии прорывы плыунов происходят из-за разрушения экранирующих глин — «кошма» (юрского возраста) мощностью до 2 м, залегающих в почве и кровле разрабатываемого угольного пласта. Подземные воды приурочены к слабым песчаникам (в подугольных они напорные). Частые прорывы плыунов имели место при разработке Черновского угольного месторождения в Забайкалье, где в их формировании принимают участие надугольные пески юрского возраста и вовлекаемые в прорыв четвертичные песчаногалечные отложения. Водоупорным экраном здесь служат перекрывающие уголь аргиллиты, которые деформируются в результате действия нового напряженного состояния вокруг выработок. Трещины в кровле — первые пути, по которым устремляется вода с песком. Объем плыунов достигает 300—500 м³, выработки на расстоянии 50—100 м от очага прорыва заполняются песком-плыуном, а на земной поверхности образуются провальные воронки.

Подобные примеры прорывов воды можно привести для ряда рудных месторождений, где причиной окончательного разрушения водонепроницаемых пород могут оказаться буровзрывные работы.

Особого рассмотрения требуют прорывы при разработке месторождений, расположенных в зоне многолетней мерзлоты. На общем фоне благоприятных гидрогеологических условий ведения горных работ из-за низкой обводненности горных пород (так как вода в них находится в твердом состоянии) здесь могут происходить водные прорывы из поверхностных водоемов или из талых зон, содержащих минерализованные воды. Известно, что под поверхностными водоемами, являющимися плохим проводником тепла, подземные воды сохраняют положительные температуры, поэтому породы, содержащие эти воды, проницаемы и служат средой, осуществляющей гидравлическую связь водоемов (реки, озера, моря) с подземными выработками.

Примерами проявления водных прорывов по этой причине могут служить Бакачачинское и Черновское угольные месторождения в Забайкалье и Воркутинское угольное месторождение. На первом произошел прорыв воды из двух озер, расположенных на участке шахтного поля при ведении горных работ на глубине 250 м. На Черновском месторождении под влиянием вод р. Жерейки мерзлые породы перешли в талое состояние, что и послужило причиной прорыва речных и озерных вод в горные выработки, проходимые на глубине 60 м. При проходке шахтных стволов на Воркутинском месторождении имели место прорывы воды из аллювия р. Воркуты (шахтный ствол находился на расстоянии 600 м от реки). Минерализованные

воды могут находиться в жидким состоянии при довольно низких температурах (насыщенный рассол из поваренной соли замерзает при температуре  $-22^{\circ}\text{C}$ ), поэтому они не только сами могут затопить шахту, но и осуществить связь поверхностных вод с горными выработками.

Водные прорывы имеют катастрофические последствия при разработке соляных месторождений. Горные работы здесь ведутся при такой системе водозащиты, которая исключает не только прорывы, но и любое поступление воды. И тем не менее, в нашей и зарубежной практике разработки таких месторождений известны случаи поступления пресных поверхностных и подземных вод, которые привели к полной ликвидации шахт и даже к уничтожению самого месторождения. Начальная причина проникновения воды — искусственная трещиноватость или активизированное горными работами тектоническое нарушение, а иногда плохо затампонированная разведочная скважина. Но в данных геологических условиях, когда само полезное ископаемое, а часто и вмещающие его горные породы легко растворимы, вода сама пробивает себе пути проникновения в выработанное пространство и с каждым часом их становится все больше. Пример воздействия пресных грунтовых вод, проникших в солевую толщу, — один из калнийных рудников Березинского месторождения на Урале.

При разработке месторождений подземным способом имеет место явление, известное под названием прорыва глин, которое по своей природе в некоторых случаях близко к прорывам воды, поскольку источником энергии является вода, создающая дополнительное гидродинамическое давление. Хорошо изучено это явление на шахтах Кузнецкого угольного бассейна, разрабатывающих мощные крутопадающие пласты (мощность 6,5 м, углы падения более  $60^{\circ}$ ). Начало исследований было положено в Кузнецком научно-исследовательском угольном институте (КузНИИ) Г. Ф. Михеевым. Преобладающее большинство прорывов наблюдалось в Прокопьевско-Киселевском районе, где по данным А. П. Широкова, Ю. Н. Кулакова и других исследователей за 30 лет произошло более 120 прорывов, обусловленных большой мощностью крутопадающих угольных пластов и наличием толщи песчано-глинистых отложений в местах выхода этих пластов.

Представление о механизме прорыва глин в горные выработки можно получить из схемы, показанной на рис. 77. Исследования показывают, что объем пород, заполняющих выработку, зависит от угла падения и мощности разрабатываемого пласта, а также от состава и состояния перекрывающих отложений и вмещающих пород. При этом, на динамику процесса большое влияние оказывают гидрогеологические условия — мощность водоносного горизонта, величина напора воды, водопрони-

цаемость пород, гидравлическая связь с поверхностными водоемами и другими подземными водами. На геологические условия накладывается влияние техногенных факторов — система и технология отработки, степень сдренированности или искусственной обводненности рыхлых пород, предохранительные мероприятия.

На примере изучения прорывов глин на шахтах Кузбасса выявлены следующие основные закономерности.

1. Прорывы глин происходят при отработке угольных пластов мощностью более 5 м.

2. Предельный угол падения пластов, опасных по прорывам глин, составляет  $55^{\circ}$ ; чем выше этот угол, тем чаще происходят прорывы.

3. Слабая, неустойчивая кровля пласта препятствует прорывам, так как при этом происходит естественная забутовка выработанного пространства. Не происходят прорывы и в случае залегания в кровле крепких песчаников, если мощность непосредственной кровли менее 3 м.

4. Прорывы преобладают в выработках, пройденных щитовым способом (95 % наблюдаемых случаев) и их число незначительно (2—3 %) при камерной и столбовой системах.

Явления прорывов глин наблюдаются и в других угольных бассейнах, а также при разработке рудных месторождений. Примером может служить рудник Темир-Тау на железорудном месторождении Горной Шории, для которого характерны мощные рудные залежи (от 2 до 30 м) крутого падения ( $70$ — $90^{\circ}$ ), перекрытые песчано-глинистой толщой и выветрелыми породами мощностью 15 м и более. Прорывам здесь содействовало насыщение рыхлых пород атмосферными и тальными водами. Водонасыщенная жидккая масса двигалась по горным выработкам

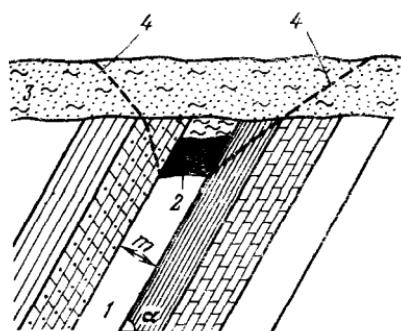


Рис. 77. Схема формирования прорыва глин в горную выработку:

1 — очистное пространство; 2 — предохранительный целик угля; 3 — песчано-глинистые отложения; 4 — границы конуса обрушения

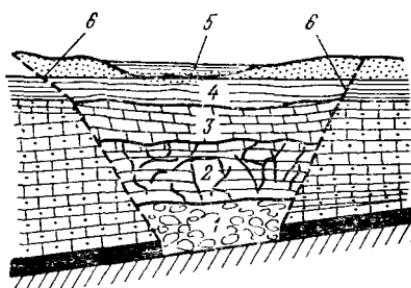


Рис. 78. Схематический разрез мульды сдвижения под водным объектом:

1—3 — зоны соответственно обрушения, водопроводящих трещин и плавного прогиба; 4 — водонепроницаемые глины; 5 — водоем; 6 — границы мульды сдвижения

в сторону шахтного ствола и несмотря на перекрытие ее путей бетонными и железобетонными перемычками, в конечном итоге был приостановлен выпуск руды из камер. На земной поверхности в зоне прорывов образовывались понижения, в которых скапливалась атмосферная вода, способствующая более интенсивному развитию прорывов.

Оседание земной поверхности над подземными горными выработками происходит в результате двух процессов: 1) сдвижения горных пород над выработанным пространством; 2) уплотнения пород в связи с ростом эффективного давления в результате снятия гидростатического взвешивания при дренировании подземных вод.

Первый процесс весьма сложный и многостадийный и представляет собой объект специальных исследований и наблюдений специалистов, маркшейдеров, горняков и строителей. В результате сдвижения подработанной толщи происходит изменение условий залегания пород, растет трещиноватость, падает прочность и увеличивается водопроницаемость, что в конечном итоге ухудшает устойчивость подрабатываемых зданий и сооружений, увеличивает вероятность водных прорывов, особенно в случаях подработки водных объектов (рек, озер, болот, водоносных недренированных горизонтов).

Основные элементы зоны (мульды) сдвижения показаны на рис. 78 для условий угольной шахты. Как видно из приведенной схемы, следует различать границы мульды сдвижения, максимальную амплитуду оседания и различные подзоны по вертикали разной степени нарушения природного состояния горных пород. Эти элементы зависят от целого ряда природных (условия залегания пород, состав, строение и свойства, гидрогеологические условия, глубина залегания, мощность пласта и т. д.) и техногенных (система и технология разработки, метод управления горным давлением, скорость продвигания забоя и т. д.) факторов.

При подработке водных объектов возникает вопрос о безопасной глубине ведения горных работ, которая определяется для конкретных условий с учетом различного набора факторов. Например, Н. Ф. Шалагинов в результате статистической обработки данных наблюдений на угольных шахтах и исследований на моделях предлагает следующую форму для определения безопасной глубины подработки небольших водотоков и водоемов

$$H_6 \geq \frac{38Hm}{8h_r + h_c + 0,34H},$$

где  $H$  — глубина разработки;  $m$  — мощность вынимаемого угольного пласта;  $h_r$  — суммарная мощность глин;  $h_c$  — суммарная мощность глинистых сланцев.

Для многих угольных месторождений по данным наблюдений рекомендуется определять безопасную глубину подработки в зависимости от мощности разрабатываемого угольного пласта, т. е.

$$H_6 \geq K m,$$

где  $K$  для различных месторождений изменяется от 20 (для Печорского бассейна) до 150 (для Донбасса).

Во ВНИМИ были проведены специальные исследования с учетом изменения водопроницаемости пород, залегающих между водным объектом и выработанным пространством. Водонепроницаемыми считаются породы, у которых  $k < 10^{-4}$  м/сут. Под безопасной глубиной понимается такая глубина, при которой зона водопроводящих трещин, образующаяся над выработкой, не достигает нижнего контура водного объекта (рис. 78). Как показали исследования Ф. П. Стрельского, высота зоны водопроводящих трещин может быть надежно определена наблюдениями за изменением напоров в подрабатываемых водоносных пластах и сравнением водопоглощающей в скважинах до и после подработки. В «Указаниях по определению оптимальных условий выемки угля под водными объектами» рассматриваются две группы объектов: а) залегающих на водонепроницаемых глинах, отделяющих источник воды от коренных водопроницаемых пород; б) залегающих на водопроницаемых породах. Для этих двух групп безопасная глубина может быть определена по графикам, приведенным на рис. 79.

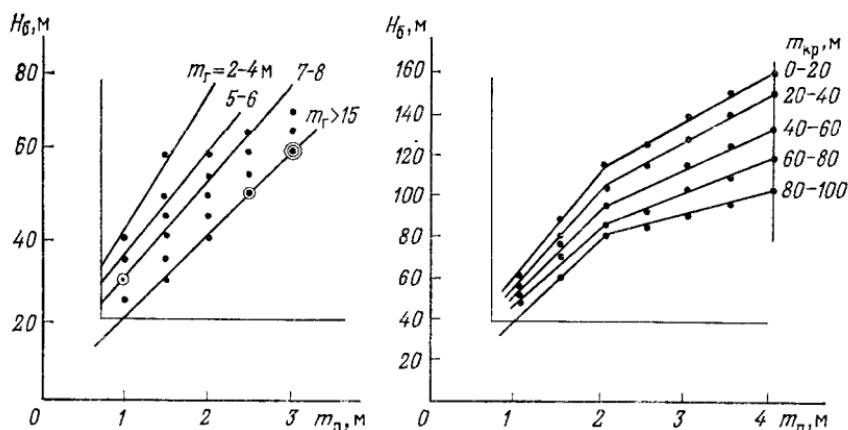


Рис. 79. Графики для определения безопасной глубины горных работ ( $H_6$ ) под водными объектами в зависимости от вынимаемой мощности пласта ( $m_n$ ) и мощности глин ( $m_r$ ) или средней мощности ( $m_{ср}$ ) аргиллитов, алевролитов и глинистых сланцев в процентах от мощности подрабатываемой толщи коренных пород

Необходимо отметить, что изучение проблемы определения безопасной глубины подработки водных объектов дало возможность извлечь большое количество угольных запасов из предохранительных целиков под водными объектами в Кузнецком, Донецком, Кизеловском, Печорском и Львовско-Волынском угольных бассейнах. Известны подобные работы в Канаде, Великобритании, Японии. Вместе с тем нельзя считать проблему окончательно решенной. Все еще происходят водные прорывы, которые иногда имеют катастрофический характер. Особо опасны прорывы при подработке морских акваторий.

Кроме водных объектов подземными горными работами подрабатываются различные здания и сооружения (железные и автомобильные дороги, насыпи, отвалы, карьеры и т. д.), устойчивость которых изучается и прогнозируется специализированными организациями. Для каждого угольного или рудного бассейна разработаны «Технические условия», определяющие условия ведения горных работ под этими объектами с учетом геологического строения перекрывающей толщи, мощности, угла падения и глубины пласта (залежи), а также ряда техногенных факторов.

Значительные осложнения подземные работы создают при обеспечении устойчивости бортов карьеров, попадающих в зону мульды сдвижения. В Криворожском рудном бассейне, на Тырныаузском полиметаллическом месторождении, на Урале и некоторых других месторождениях разработка полезного ископаемого происходит подземным и открытым способами, в связи с чем борта карьеров оказываются под влиянием процесса сдвижения пород, залегающих над подземными выработками и в бортах (рабочих или постоянных).

В результате изменения условий залегания и трещиноватости пород, а также режима подземных вод, в пределах мульды сдвижения создается новая, неблагоприятная обстановка для возникновения оползневых явлений на отдельных участках бортов. Это связано в первую очередь с формированием ослабленных зон, являющихся потенциальными поверхностями скольжения, разупрочнением за счет нарушения сплошности пород (искусственная трещиноватость и расслоения) и создания гидродинамического давления дренируемых вод подземными выработками и бортом. Надо отметить, что прогноз устойчивости подработанных бортов карьеров и определение их параметров возможны только на базе анализа результатов наблюдений за процессом сдвижения пород и формирования нового их состояния.

Осадение земной поверхности в результате водопонижения получило большое распространение при разработке месторождений полезных ископаемых. Оно наблюдается также на территориях крупных промышленных центров, где происходит интен-

сивная откачка подземных вод промышленного и бытового водоснабжения; при эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, где максимальные амплитуды оседаний достигают 12—15 м и более. В результате оседания земной поверхности происходят деформации наземных сооружений, заболачивание территорий, разрушение крепи шахтных стволов с последующими прорывами воды и другими вредными явлениями.

Сущность этих явлений заключается в деформировании толщи пород, выходящей из-под влияния гидростатического давления при дренировании подземных вод. Из изложенного ранее (см. разд. 4.1.) мы уже знаем, что в элементарном объеме породы, находящейся на глубине  $h$  от земной поверхности, и под воздействием столба воды высотой  $h_b$  возникают гравитационные напряжения всестороннего сжатия  $\sigma_z$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$ , определяемые из выражения:

$$\sigma_z = \gamma_{cp}h - \gamma_b h_b; \quad \sigma_x = \sigma_y + \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z,$$

где  $\gamma_{cp}$  — среднее значение удельного веса вышележащей толщи пород;  $\gamma_b$  — удельный вес воды;  $\mu$  — коэффициент Паусона горных пород.

Дренирование подземных вод, которое проводится с целью улучшения условий горных работ и считается основным мероприятием по обеспечению устойчивости выработок, увеличивает эффективные сжимающие напряжения ( $h_b = \sigma_{zef} = \gamma_{cp}h$ ), что и приводит к сжатию сдrenированных пород. На рис. 80 показана схема к определению вертикальных сжимающих напряжений до и после водонижения и эпюры этих напряжений для конкретного участка месторождения. Дополнительное уплотняющее давление представляет собой разницу между давлениями на данной глубине после и до водонижения, т. е.

$$\Delta\sigma_{zi} = \sigma_{zef} - \sigma_{zi} = \gamma_{cp}h_i - \gamma_{cp}h_{bi} + \gamma_b h_{bi} = \gamma_b h_{bi}.$$

Определение прогнозной величины оседания земной поверхности производится на базе основного закона механики грунтов — закона уплотнения и теории консолидации (см. разд. 2.6).

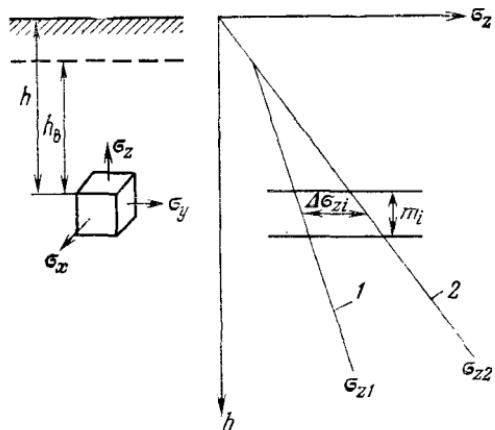


Рис. 80. Схема к расчету вертикальных сжимающих напряжений и построения эпюры до (1) и после (2) водонижения

Если исходить из предположения компрессионного сжатия (сжатия без боковых деформаций) конечная осадка пород мощностью  $m_i$  составит:

$$S_{ki} = \frac{e_{i1} - e_{i2}}{1 + e_{i1}} m_i,$$

а конечная величина оседания земной поверхности

$$S_k = \sum_1^n \frac{e_{i1} - e_{i2}}{1 + e_{i1}} m_i,$$

где  $n$  — число расчетных слоев в пределах сжимаемой толщи;  $e_{i1}$  и  $e_{i2}$  — коэффициенты пористости сжимаемого слоя, соответствующие напряжениям  $\sigma_{zi}$  и  $\sigma_{zicf}$ , снимаемым с компрессионной кривой для данной породы.

Расчет осадки в этих условиях можно провести и на базе обобщенного закона Гука при допущении, что боковые деформации отсутствуют, и горизонтальные напряжения равны между собой. Тогда

$$S_{ki} = \frac{\Delta \sigma_{zi} m_i}{E_i} \left( 1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \right), \text{ а}$$

$$S_k = \sum_1^n \beta \frac{\Delta \sigma_{zi} m_i}{E_i},$$

где  $E_i$  — модуль общих деформаций уплотняемой породы;  $\beta = \frac{2\mu^2}{1 - \mu}$ .

Более точно расчет величины оседания проводится с учетом горизонтальных напряжений и деформаций, т. е. для условий двух- и трехмерного сжатия по выражениям, полученным из обобщенного закона Гука:

$$S_{ki} = \left( \Delta \sigma_{zi} - \frac{\mu_i}{1 - \mu_i} \Delta \sigma_{yi} \right) \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} m_i;$$

$$S_k = [\Delta \sigma_{zi} - \mu_i (\Delta \sigma_{xi} + \Delta \sigma_{yi})] \frac{m_i}{E_i}.$$

При прогнозе оседания земной поверхности в результате уплотнения глинистых пород возникают осложнения, связанные с их фильтрационными и реологическими свойствами, которые определяют мощность сжимаемых пород (а, следовательно, величину конечной осадки), природу процесса уплотнения и скорость его протекания (консолидации). Ранее (см. разд. 3.5) мы уже отмечали значение начального градиента фильтрации, величина которого зависит от состава и плотности глинистой породы и иногда достигает 30—70. Для возникновения фильтрации в такой глине, подстилающей дренируемый водоносный

горизонт в зоне мощностью 2 м необходим напор воды в поровом пространстве глин (поровое давление) соответственно 30—70 м.

Если, в соответствии с теорией фильтрационной консолидации допустить, что изменение давления за счет водонапорного снижения вызывает такое же давление в поровой воде рассматриваемой глины, т. е.  $\Delta\sigma_z = u$ , то уплотнение за счет отжима воды начнется при понижениях воды на 30—70 м и захватит, как показывают наблюдения, только верхнюю часть слоя глин мощностью до 1,0 м (обычно мощность сжимаемого слоя составляет  $m_c = h_b/I_0$ ). В этом случае говорят о том, что коэффициент порового давления  $a = \Delta\sigma_z/u$  близок к единице. Однако наблюдения многих исследователей показывают, что для большинства глинистых пород (и особенно для плотных) этот коэффициент меньше единицы, а иногда не превышает 0,1—0,2 [8]. Отсюда следует, что процесс уплотнения не будет возникать во многих глинистых разновидностях или будет иметь место только на границе между водоносным горизонтом и слоем глин и то, при давлениях меньше  $\Delta\sigma_z$ , определенных по эпюрам на рис. 80. А это предполагает специальные исследования и наблюдения на моделях и в натуре.

Возникновение процесса уплотнения в глинистых породах и его величина зависят еще от их структурной прочности  $R_{стр}$ , определяемой по компрессионным кривым (она соответствует давлению начала уплотнения и для разных глинистых пород составляет от 0,05 до 1,0 МПа). В случае, если  $\Delta\sigma_z < R_{стр}$  уплотнения не происходит.

Таким образом, процесс уплотнения глинистых пород с позиции теории фильтрационной консолидации можно рассматривать только в слабых разновидностях с невысоким содержанием глинистой фракции, залегающих на небольших глубинах от земной поверхности, на дне водоемов, а также в гидроотвалах разного способа складирования. Начальный градиент фильтрационной консолидации, по исследованиям Р. Э. Дашко  $I_{вfk} = 10 \sqrt{M_c}$ , где  $M_c$  — содержание глинистой фракции в %, что определяет границы ее изучения. В рамках этой консолидации можно прогнозировать продолжительность процесса уплотнения и степень его завершенности (степень консолидации), представляющую отношение величины осадки на изучаемый момент времени к конечному ее значению. Исходной дифференциальное уравнение для решения поставленных задач имеет вид:

$$C_V \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{\partial H}{\partial t},$$

где  $C_V = \frac{k(1+e)}{a\gamma_b}$  — коэффициент консолидации глины;  $k$  — коэф-

фициент фильтрации;  $a$  — коэффициент сжимаемости;  $H = \frac{\Delta \sigma_z}{\gamma_b}$  — напор поровой воды в глине;  $Z$  — длина пути фильтрации;  $t$  — время уплотнения.

Решения этого уравнения с помощью рядов Фурье при граничных условиях: 1)  $H = \frac{\Delta \sigma_z}{\gamma_b} - t = 0$ ;  $0 \leq Z \leq m$ ; 2)  $H = 0$ ,  $t \neq 0$ ,  $Z = m$ , получают выражение для осадки в заданный момент времени в виде:

$$S_t = \frac{a \delta z m}{1 + e} \left( 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1,2,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^2} e^{-i^2 T_u t} \right),$$

в котором первый множитель составляет величину конечной осадки, а второй зависит только от показателя  $T_u = \frac{\pi^2 C_v t}{4m^2}$ , называемого фактором времени (при фильтрации воды из глины вверх и вниз  $T_u = \frac{\pi^2 C_v t}{m^2}$ ).

Степень уплотнения (консолидации)  $u = S_t / S_k$  изменяется от 0 (при  $t=0$ ) до 1 (при  $t \rightarrow \infty$ ). Значения ее могут быть получены по расчетным величинам  $T_u$ , а время достижения конечной осадки из приведенного выражения для  $T_u$  или по результатам компрессионных испытаний глин, используя выражение

$$\frac{t_1}{t_2} = \left( \frac{m_1}{m_2} \right)^2,$$

где  $t_1$  — время уплотнения лабораторного образца высотой  $m_1$ ;  $t_2$  — время уплотнения слоя глин мощностью  $m_2$ .

В первом случае можно воспользоваться приведенными данными для  $T_u$  и  $u$ :

$T_u$	...	0,02	0,08	0,17	0,31	0,49	0,71	1,0	1,40	2,09	—
$u$	...	0,1	0,2	1,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Рассмотрим некоторые примеры оседания земной поверхности в результате водонаполнения при разработке угольных и рудных месторождений.

Пример 1 относится к Подмосковному угольному бассейну при строительстве «Козельских» шахт № 1 и 2. Гидрогеологический разрез участка шахты № 2 показан на рис. 81. Надугольная толща мощностью 30—40 м сложена песками и глинами тульской свиты, перекрытой четвертичными отложениями, а в основании угленосных отложений на глубину до 40 м залегают трещиноватые упинские известняки. Подземные воды залегают в надугольных песках (надугольный водоносный горизонт) и в трещиноватых известняках (подугольный напорный горизонт). Коэффициенты фильтрации и первоначальные напоры соответственно равны 8 м/сут, 12—18 м и 18 м/сут, 22 м. Водонаполнение началось в районе окрестного двора скважинами из обоих водоносных горизонтов и за 2 года и 9 месяцев было откачано: из

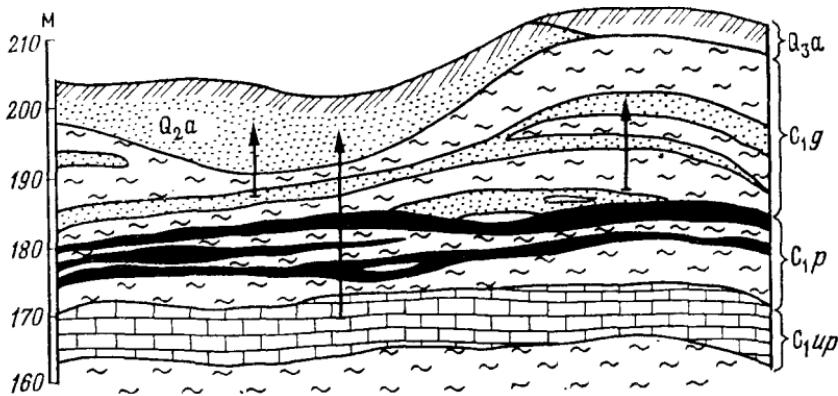


Рис. 81. Гидрогеологический разрез на участке строительства шахты № 2 «Козельской» (Подмосковный бассейн)

надугольных песков — около 1,5 млн. м³ и из известняков — более 3 млн. м³ воды (при работе семи водопонизительных скважин за 1 год было откачано 2 млн. м³ воды).

В результате водопонижения в надугольных песках сформировалась депрессионная воронка глубиной 14—15 м, радиусом 700—800 м и площадью 120—150 тыс. м². В упинских известняках напор был снижен на 18—20 м, воронка имела радиус 2,3—2,5 км, площадь 350—400 тыс. м². Оседание земной поверхности было обнаружено при повторном нивелировании устьев дренажных скважин и максимальная его величина составила 0,87 м в районе наибольшего снижения напоров воды. Скорость оседания составляла от 20 до 36 см в год при скорости снижения напоров от 6—10 м в песках до 8—17 м в известняках. Интересно отметить, что отношение величины оседания земной поверхности к снижению напоров воды изменялось от 0,032 (по отношению к напорам в известняках) до 0,051.

Пример 2 относится к Яковлевскому железорудному месторождению КМА, на котором строительство шахтного ствола подготавливалось предварительным водопонижением в пределах мощной толщи осадочных пород (рис. 82). Прогноз ожидаемого оседания земной поверхности был проведен в 1960 г. Н. Н. Кацнельсоном, Н. М. Никольской, И. П. Ивановым и показал существенное значение проблемы влияния начального градиента глинистых пород юрского возраста. Если принять во внимание, что их мощность более 100 м, а снимаемый напор воды достигает 500 м, то при среднем модуле деформации более 50 МПа, осадка только в пределах этой толщи без учета начального градиента составит около 10 м.

Однако детальное изучение фильтрационных и деформационных свойств всей дренируемой толщи дало возможность построить более точную физическую модель и провести более точную оценку процесса уплотнения в результате водопонижения. В связи с высокими значениями начального градиента (до 50 м и более) большая часть толщи глин была исключена из расчетов. Прогнозная величина оседания земной поверхности за счет суммарной осадки всей толщи осадочных пород составила около 1 м. Впоследствии расчеты проводились в ИГД, во Всесоюзном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте по осушению месторождений полезных ископаемых, специальным горным работам, рудничной геологии и маркшейдерскому делу (ВИОГЕМ) и были получены значения того же порядка, а специальные наблюдения в период осушения участка строительства подтвердили прогнозы.

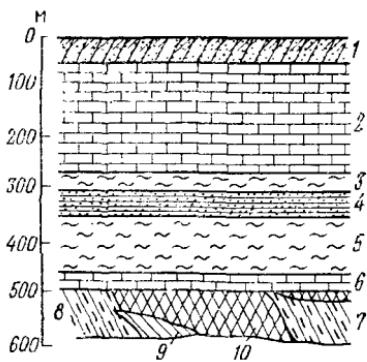


Рис. 82. Схематический геологический разрез Яковлевского железорудного месторождения КМА:

1 — песчано-глинистые отложения; 2 — меломергельная толща ( $K_2$ ); 3 — песчано-глинистые породы ( $K_3$ ); 4 — песчаники ( $I_3$ ); 5 — глинистая толща ( $I_5$ ); 6 — известняки ( $C_1$ ); 7 — кварц-биотитовые сланцы; 8 — кварц-слюдистые сланцы; 9 — железистые кварциты; 10 — железная руда (богатая)

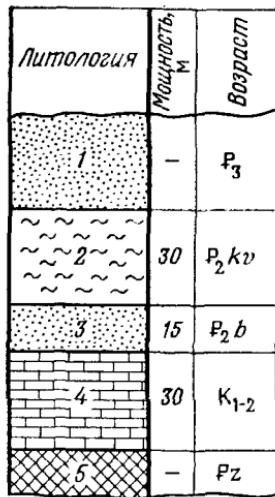


Рис. 83. Разрез дренируемой толщи Белозерского железорудного месторождения:

1, 3 — водоносные пески; 2 — глинистые породы; 4 — мергельно-меловая толща; 5 — кристаллический фундамент

Пример 3 — Белозерское железорудное месторождение, геологический разрез сжимаемой толщи которого показан на рис. 83. Она залегает на глубине около 300 м, а напор воды в батских песках (слой 3) достигает 250—300 м. Снижение напора воды на 200 м привело к уплотнению песчано-глинистой и мергельно-меловой толщ, в результате которого произошли деформации вертикальных стволов, потребовавшие выполнения специальных конструктивных мероприятий. Суммарная осадка при этом составила около 3,0 м.

Специальные исследования и наблюдения, проведенные на этом месторождении под руководством В. А. Мироненко, показали сложность прогнозирования процесса уплотнения в реальных природных условиях. В частности, основная часть осадки произошла за счет уплотнения относительно водоупорной мергельно-меловой толщи, у которой коэффициент сжимаемости  $a = -0,03 \text{ МПа}^{-1}$ , что привело к отжатию большого количества порово-трещинной воды (водоотдача этих пород оказалась на порядок выше, чем у песков). Из общего объема откачиваемой воды в 2—3 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$  больше половины составляла отжатая вода. Кроме того, здесь подтвердилась еще одна важная особенность, о которой речь шла ранее. Водоупорные глины (слой 2) практически не участвовали в процессе уплотнения из-за высокого начального градиента фильтрации, достигавшего значения 70. Действительно, если учесть, что снижение напора воды в песках составило 200 м, то мощность сжимаемой толщи глин, прилегающей к границе с песками (дренами)  $m_c = 200 : 70 < 3 \text{ м}$ . Таким образом, для составления надежной расчетной модели процесса уплотнения необходимо определять напоры воды и их изменение не только в водоносных горизонтах, но и в ограничивающих их водоупорных породах. При расчете водопритоков в дренажные системы необходимо

димо учитывать дополнительное количество воды, поступающей за счет отжатия из водоупорных пород.

Анализ результатов выполненных исследований и наблюдений процесса оседания в результате дренирования подземных вод дает возможность сделать несколько важных теоретических и практических выводов.

1. Снижение напоров подземных вод в результате их дренирования приводит к изменению естественного гравитационного напряженного состояния пород (водоносных и водоупорных).

2. В водоносных породах в результате откачки быстро происходит рост эффективных напряжений, а в глинистых водоупорных формируется поровое давление, величина и скорость рассеивания которого зависят от ряда факторов и прогнозируются весьма сложно.

3. Деформации в горных породах, находящихся под воздействием нового напряженного состояния, имеют разную природу: а) упругие, протекающие мгновенно под влиянием эффективных напряжений в минеральном скелете, а также за счет упругого сжатия воды; б) остаточные, возникающие в результате закрытия трещин или уплотнения с отжатием поровой жидкости, подчиняющееся закономерности фильтрационной консолидации и ползучести системы минеральный скелет — вода.

4. Снижение напоров воды в относительно водоупорных породах, т. е. рассеивание порового давления и рост эффективных напряжений, наблюдается при градиентах, превышающих начальные для этих пород. Точное определение величин снижения напоров возможно только в натурных условиях. Мощность пород, подвергающихся уплотнению на границах с водопроницаемыми слоями — дренами, определяется как частное от деления величины снижения напора воды в водоносном горизонте на величину начального градиента  $m_c = \Delta H/I_0$ . Р. Э. Дацшко предлагает определять эту мощность исходя из величины не всего снижения напора, а возникшего порового давления, которая для некоторых глин значительно ниже [8]. При определении условий возникновения остаточных деформаций следует исходить еще из наличия в сжимаемых породах структурной прочности, до преодоления которой деформации имеют упругий характер.

5. При прогнозировании скорости оседания (консолидации) необходимо исходить из наличия для разных пород, по крайней мере, двух этапов: фильтрационной консолидации (первичной) и реологической за счет ползучести скелета (вторичной).

6. При уплотнении относительно водоупорных глин происходит отжатие большого количества воды, которое следует учитывать при прогнозных оценках водопонизительных и водоотводящих систем.

7. Наблюдения за осадками, возникающими в результате дренирования подземных вод дают надежную информацию для определения деформационных свойств пород, вовлекаемых в процессы дренирования и оседания.

Динамические явления в подземных выработках происходят в определенных геологических условиях и представляют собой особую форму проявления горного давления. Среди них большое значение имеют горные удары и внезапные выбросы угля, пород и газа. Эти явления имеют сложную природу, поэтому их прогнозирование не всегда надежно. В последние 20—30 лет изучение динамических явлений проводится на многих угольных шахтах и рудниках, опубликовано много научных работ, ведомственных «Указаний», «Правил» и других материалов, которые позволяют предусматривать необходимые мероприятия, обеспечивающие безопасность ведения горных работ. В связи с этим и, исходя из назначения учебника, здесь остановимся совсем кратко на рассмотрении динамических явлений.

Горные удары представляют собой опасные явления, возникающие в угольных пластах и горных породах, вмещающих горные выработки, в результате развития в них упругих деформаций и мгновенного разрушения. Они сопровождаются сильным звуковым эффектом и мощной воздушной волной (иногда пучением в почве и выдавливанием пород в выработку). Впервые в практике горного дела в СССР горные удары были отмечены на шахтах Кизеловского угольного бассейна в 1944 г. К настоящему времени это явление представляет опасность на многих угольных шахтах и рудниках в разных странах мира. В нашей стране горные удары происходят на угольных шахтах Кизеловского, Донецкого, Кузнецкого бассейнов, Шурабского, Воркутинского, Ткибульского и других месторождений, а также на рудниках Кривбасса, Хибин, Кольского полуострова, Урала, Коунрада и др. Наиболее сильные горные удары произошли на соляных рудниках. Например, в 1958 г. горный удар на калийном руднике в ГДР был зарегистрирован сейсмическими станциями в Москве, Турции, Испании [27]. Известны случаи проявления горных ударов и в карьерах (Мраморные карьеры в штате Вермонт, США).

Горные удары возникают в определенных геологических условиях под влиянием техногенных факторов. Наиболее благоприятны следующие геологические условия: полезное ископаемое и вмещающие породы высокой прочности, тектоническая нарушенность (складки, дизъюнктивы), высокий уровень естественного напряженного состояния (большие глубины, аномальные тектонические напряжения). В зависимости от геологических условий Г. Л. Фисенко и И. М. Петухов выделяют три типа горных ударов, для которых предлагаются опреде-

Таблица 45. Основные типы горных ударов, по И. М. Петухову и Г. Л. Фисенко

Тип горного удара	Геологическая обстановка	Критерии прогноза горного удара
I. В выработках, пересекающих удароопасный пласт угля или слоя породы по всей мощности	Большая однородность, упругость и мощность вмещающих выработку пород (угля) Прочность пород непосредственной кровли и почвы существенно больше прочности полезного ископаемого Мощные слои прочных пород в основной кровле Дизьюнктивные тектонические нарушения Достаточная однородность и упругость угля (породы)	$\epsilon_{\text{упр}}/\epsilon_{\text{общ}} > 0,7$ $R_c < K\gamma H/1 + \tan \phi$
II. В выработках, пройденных внутри однородного мощного пласта угля или слоя породы	Достаточная глубина залегания полезного ископаемого Мощные, упругие и прочные угольные пласти или песчаники подстилаются или перекрываются плотными глинами, глинистыми сланцами, аргиллитами	$\sigma_{\text{max}} = \gamma H (2,2l/x^2 + 1) \times \cos^2 \beta$ $\epsilon_{\text{упр}}/\epsilon_{\text{общ}} > 0,7$ $H > R_c/K\gamma$
III. В выработках, расположенных в прочных упругих породах или угля, залегающих среди более пластичных пород, склонных к выдавливанию	Достаточная глубина залегания полезного ископаемого для возникновения выдавливания	

П р и м е ч а н и е.  $\epsilon_{\text{упр}}$  и  $\epsilon_{\text{общ}}$  — относительные упругая и общая деформации;  $R_c$  — прочность массива;  $K$  — коэффициент концентрации;  $\phi = 45 + \Psi/2$ ;  $\beta$  — угол падения пород основной кровли;  $l$  и  $x$  — соответственно ширина зоны зависания пород и опорного давления.

ленные критерии прогноза (табл. 45). При этом учитываются и технологические факторы: форма горных выработок, взаимное их расположение в данном пласте, а также в других разрабатываемых пластах, наличие целиков, изрезанность отрабатываемого участка, дополнительные нагрузки от буровзрывных работ и др.

Основная причина горных ударов — высокая концентрация потенциальной энергии упругого сжатия пород и полезного ископаемого вокруг выработок, приводящая к формированию в них предельного напряженного состояния. Силовые воздействия определяются гравитационными и тектоническими напряжениями, гидродинамическим давлением подземных вод, сей-

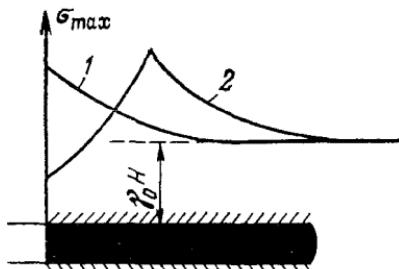


Рис. 84. Эпюры напряжений вокруг выработки при стрелянии (1) и горном ударе (2)

деформирования пород на данном участке, находящихся в предельно напряженном состоянии.

Предвестником горного удара часто считают стреляние пород и угля. Однако стреляние имеет самостоятельное значение и проявляется в наиболее прочных и упругих скальных породах в виде откола, а не лавинообразного разрушения, характерного для горного удара. В зависимости от свойств пород и способности их релаксировать, концентрирующиеся напряжения вокруг выработки могут иметь место стреляние или горный удар. Об этом можно судить, как показал Г. Л. Фисенко, по характеру распределения напряжений вблизи стенок горной выработки (рис. 84). Более прочны и упруги (более жестки) породы не склонные к деформациям ползучести, в результате которых происходит релаксация напряжений, поэтому максимальная их концентрация наблюдается у стенки выработок, т. с. в пределах небольшого объема пород (угля), который откалывается (при условии  $R_c \leq K_\gamma H$ ) и отскакивает на значительное расстояние от стенки.

Выбросы пород, угля и газа или газодинамические явления характеризуются быстрым разрушением пород в призабойном участке выработки, сопровождающимся дроблением разрушаемой породы и выделением большого количества газа (метана, азота, углекислого газа). Поскольку выбросы связаны с наличием газа, то они имеют место на угольных и соляных шахтах. Известно, что в порах 1 м³ угля может адсорбироваться до 40 м³ природных газов, которые при вскрытии угольного пласта высвобождаются, создавая большое внутреннее давление, которое участвует в формировании напряженного состояния краевой части угольного пласта. Разрушение пласта может произойти путем отрыва части его при условии, если давление газа  $q \geq R_p - \gamma h \sin \beta$  или путем сдвига в прочных углях, где предельное состояние записывается в виде:

$$\delta_1 = R_c \left(1 - \frac{q}{R_p}\right) + (R_s - q) \operatorname{tg} \omega,$$

смическими импульсами и т. д. Что же касается самого механизма проявления, то, по исследованиям И. М. Петухова, горный удар представляет собой следствие нарушения системы полезное ископаемое — вмещающие породы и возникает в том случае, когда скорость деформации, определяемая нарастанием напряжений, превышает максимальную скорость пластического

где  $h$  — высота блока обрушения по нормали к пласту;  $\beta$  — угол падения пласта;  $\sigma_1$  — главное максимальное напряжение;  $R_b$  — удельное боковое сопротивление угля выдавливанию;  $\omega = 45^\circ - \varphi/2$ .

Краткое рассмотрение динамических явлений в подземных выработках не дает полного представления о них, но вполне определенно показывает их геологическую природу, а, следовательно, необходимость детального изучения геологических условий как среды, в которой под влиянием горнотехнических факторов возникают те или иные явления. Прогноз потенциального вида явлений (горные удары, стреляния, выбросы, газовыделения и т. д.) может быть сделан по результатам геологических исследований и построений инженерно-геологических моделей.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие изменения геологических условий происходят под влиянием подземной разработки месторождений?
2. В каких геологических условиях чаще происходит пучение почвы выработок?
3. Как влияет трещиноватость и слоистость горных пород на устойчивость кровли выработок?
4. В каких условиях возможны водные прорывы?
5. Какие явления связаны с водными прорывами?
6. Как определяется безопасный напор подземных вод?
7. С какими процессами связано оседание земной поверхности в районе шахт и рудников?
8. Как прогнозируется величина оседания земной поверхности в результате дренирования подземных вод?

# Часть III

## Инженерно-геологическое обоснование мероприятий по улучшению условий ведения горных работ и охране природной среды

---

### Глава 7

#### ЗАЩИТА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ОТ ВОДЫ

##### 7.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВОДОЗАЩИТНЫМ МЕРОПРИЯТИЯМ

Из рассмотрения геологических процессов и явлений, возникающих при разработке месторождений полезных ископаемых, можно сделать заключение о существенном влиянии подземных и поверхностных вод на условия их развития. Это влияние велико на производительность и сроки работы горно-транспортного оборудования, на степень безопасности труда горняков, на срок службы крепления выработок и т. д. В связи с этим одно из главных мероприятий по улучшению условий разработки месторождений предусматривает дренирование подземных и отвод поверхностных вод, направленные на защиту горных работ и сооружений от вредного их влияния.

Проблема защиты месторождений возникла в связи с подземной разработкой полезных ископаемых, залегающих ниже уровня подземных вод и привлекла внимание широкого круга специалистов. В настоящее время она стала более сложной и ответственной в связи с углублением подземных и открытых горных работ, увеличением числа шахт и рудников, применением высокопроизводительного горно-транспортного оборудования, а также из-за новых экологических требований о рациональном использовании и охране природных вод. Водозащитные мероприятия требуют надежного научного обоснования в каждом конкретном случае исходя из реальных природных условий, способа, системы и технологии разработки месторождения, прогноза возможных изменений природной обстановки и ожидаемого эффекта от применения этих мероприятий. На основании всего это правильнее рассматривать и решать задачи защиты горных работ от влияния воды, а не осушения месторождений (горных пород), при котором центр тяжести проблемы смещается в сторону достижения более высокой степени дренирования вод.

Ю. А. Норватов на базе анализа результатов более 25-летнего опыта исследований и наблюдений за дренированием подземных вод при разработке угольных и рудных месторождений формирует следующие его задачи [17]: 1) обеспечение нормальных условий эксплуатации горно-транспортного оборудования; 2) обеспечение устойчивости горных выработок и безопасности горных работ; 3) снижение влажности полезного ископаемого.

Современные строительные нормы и правила (СНиП 2.06.74—85 «Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод» — предусматривает выполнение следующих требований.

1. Предотвращать притоки воды в выработки, нарушающие условия нормальной разработки месторождения.

2. Предупреждать прорывы воды в выработки.

3. Препятствовать опасному разрушению водой горных пород, окружающих выработки.

4. Обеспечивать организованный отвод поверхностных и рудничных вод к местам их сброса.

5. Не допускать угрожающего водоснабжению истощения ресурсов подземных вод и их загрязнения, засорения, нарушения режима и размыва берегов поверхностных водных объектов, эрозии почвенного слоя и опасных последствий деформаций горных пород и сооружений в районе защищаемых выработок в результате понижения уровня подземных вод.

6. Предусматривать сооружения, устройства и мероприятия по регулированию притока к выработкам, напора подземных вод и поверхностного стока в районе разрабатываемого месторождения, по отводу откачиваемых рудничных вод и охране окружающей среды.

Рассмотрим эти основные требования с учетом инженерно-геологических условий месторождений и с целью постановки задач перед защитой. Первое требование о предотвращении водопритоков, способствующих нарушению нормальных условий разработки месторождения, направлено на преодоление трех основных причин ухудшения условий работы: а) большое количество воды, поступающее из водоустойчивых пород в выработку, мешает организации водоотвода параллельно с процессом разработки и снижает производительность оборудования; б) водосодержащие породы водонеустойчивы (плывины, легкорастворимые породы, пески, песчаные глины, слабые карбонатные породы и песчаники) и их деформации неизбежны во время вскрытия горными работами; в) в стенах выработок вскрываются водонеустойчивые водонепроницаемые породы (глины, породы на глинистом цементе, воднорастворимые породы), которые при дополнительном увлажнении разупрочняются и деформируются. Все эти случаи требуют организации

водозащитных мероприятий до начала горных работ с целью ограничения (случай а) или полного перехвата воды, поступающей в выработку (случай б и в).

Второе требование направлено на предупреждение водных прорывов, последствия которых мы рассмотрели в предыдущей главе. Надежность и эффективность мероприятий, обеспечивающих выполнение этого требования во многом зависят от точности определения величин безопасных напоров в каждой конкретной геологической обстановке, взаимно действующей с конкретными горными работами. В связи с многофакторностью этого взаимодействия и сложностью определения искомых параметров часто принимаются решения о максимальном снижении водных напоров, что естественно не всегда оправдано и сопряжено с большими изменениями режима подземных и поверхностных вод и значительными материальными затратами.

Третье требование предусматривает улучшение условий устойчивости горных выработок за счет снятия вредного влияния воды как дополнительного давления и фактора, ухудшающего свойства горных пород. Это требование может быть предъявлено к подземным и открытым горным выработкам, к поверхностным сооружениям и отвалам. Обоснование необходимости и надежности выполнения данного требования весьма сложное из-за трудности точного определения степени влияния подземных вод на устойчивость горных пород в качестве среды и основания для выработок, а также степени улучшения условий в результате защиты от воды.

Все остальные требования имеют организационно-предупредительный характер и направлены на обеспечение минимального изменения природной обстановки под влиянием строительства и функционирования водозащитных мероприятий. Следует отметить, что на многих шахтах и рудниках эти требования не находят своей реализации, что приводит к опасным последствиям как по направлению обеспечения устойчивости подземных и поверхностных сооружений, так и в экологическом плане (загрязнение природных вод, активизация поверхностных процессов и др.).

Мероприятия, направленные на защиту горных работ от подземных вод по своему назначению могут быть двух категорий: водоотводящие (дренажные) и препятствующие поступлению воды в выработки. По месту нахождения (строительства) мероприятия могут быть подземными и поверхностными (мелкими и глубинными), а по времени их строительства и эксплуатации — предварительными (до начала горных работ) и сопутствующими горным работам.

Дренажные мероприятия приводят к осушению горных пород или снижению напоров подземных вод (или к тому и другому вместе) с удалением из недр большого количества

подземных вод со всеми вытекающими отсюда последствиями (осушение и иссушение пород и почв, снижение уровней подземных вод, смешение вод разной минерализации и химического состава, изменение режима и качества поверхностных вод и др.). В настоящее время именно эти мероприятия имеют преобладающее значение на горнодобывающих предприятиях. В качестве дренажных сооружений применяются подземные выработки, водопонизительные скважины разной глубины, иглофильтровые установки, канавки, каналы, зумпфы, комбинированные системы из скважин и подземных выработок.

Мероприятия, препятствующие поступлению воды в горные выработки, принципиально отличаются от дренажных по характеру влияния на природную обстановку. Их назначение не допустить воду в выработку и обеспечить устойчивость разрабатываемых пород, поэтому вызываемые ими изменения имеют локальное распространение и как правило кратковременное существование. Это различные противофильтрационные завесы, осуществляемые глинистым, цементным или другим тампонажем водопроницаемых пород (трещиноватых, закарстованных, крупнообломочных), искусственным замораживанием (песков-плывунов), строительством водонепроницаемых бетонных или глинистых стенок-экранов, свайных и шпунтовых завес и др.

Поскольку эффективность защиты горных выработок от воды и обоснование защитных мероприятий во многом зависят от характера, размеров, положения в пространстве и назначения охраняемого объекта, рассмотрим более детально проблему защиты применительно к различным способам разработки месторождений и по отношению к наиболее ответственным сооружениям.

## 7.2. ЗАЩИТА КАРЬЕРОВ ОТ ВОДЫ

Изучение гидрогеологических условий карьерных полей с целью обоснования и проектирования мероприятий по защите карьеров от влияния подземных и поверхностных вод, а также работы защитных мероприятий и изменений режима этих вод, связанных с разработкой месторождений, проводится многими крупными научно-исследовательскими и проектными организациями, такими как Подмосковный научно-исследовательский угольный институт (ПНИУИ), Ленинградский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горный институт имени Г. В. Плеханова (ЛГИ), Украинский научно-исследовательский и проектный институт угольной, рудной и газовой промышленности (Укрниипроект), Государственный институт по проектированию шахт (Гипрошахт), Государственный союзный институт по проектированию

предприятий горнорудной промышленности (Гипроруда) и др. Накоплен значительный опыт в организациях, осуществляющих строительство и эксплуатацию водозащитных сооружений и на горнодобывающих предприятиях. Богатый опыт имеется и в ГДР, ПНР, НРБ, ФРГ, США, Франции и других странах.

### 7.2.1. Определение водопритока в карьер

Выбор способа защиты и видов защитных сооружений зависит в первую очередь от геологических условий разрабатываемого месторождения, водопроницаемости и водоустойчивости горных пород, глубины карьера, системы и технологии разработки, его водообильности, которая, по данным И. С. Газизова, изменяется от 1,0 до 27,7 м³/т. Принципиальная схема проектирования, защиты карьеров от воды приведена на рис. 85. Она предусматривает защиту от поверхностных вод, перехват подземных вод дренажными и барражными сооружениями, организацию откачки и отводы карьерных вод, формирующихся за счет атмосферных осадков, проскака воды из дренажных горизонтов и других источников.

Поверхностный приток воды в карьер формируется за счет поверхностного стока дождевых и талых вод открытых водоемов (озера, пруды, болота, водохранилища, отвалы) и водотоков (реки, ручьи, каналы, канавы, траншеи), расположенных в пределах карьерного поля, т. е.

$$Q_p = Q_d + Q_t + Q_l + Q_o + Q_p,$$

где  $Q_d$ ,  $Q_t$ ,  $Q_l$  — притоки за счет дождевых, талых и ливневых вод;  $Q_o$  и  $Q_p$  — водопритоки за счет поверхностных водоемов и водотоков.

Приток за счет дождевых вод  $Q_d = 1000 h_d a F_d$ , м³/сут, где  $h_d$  — среднесуточное количество осадков за год, мм;  $F_d$  — водосборная площадь карьера, полосы шириной 0,5—1,0 км вокруг карьера, км²;  $a$  — коэффициент поверхностного стока, определяемый по СНиП;  $a = 0,8—0,9$  для площадей, занятых глинистыми и скальными породами и  $a = 0,5—0,7$ , если с поверхности залегают песчаные породы.

Приток за счет талых вод  $Q_t = \alpha \beta h_c F_d / t_c$ , где  $\beta = 0,5$  — коэффициент, учитывающий степень удаления снега вокруг карьера;  $h_c$  — годовое количество твердых осадков, м;  $t_c$  — продолжительность интенсивного снеготаяния в период половодья, ч.

Для районов с ливневым характером дождей определяют приток ливневых вод:

$$Q_l = \alpha q_l K_l F_d,$$

где  $q_l$  — средняя интенсивность выпадения ливневого дождя, м³/(ч · км²), определяемая по соответствующим нормам для

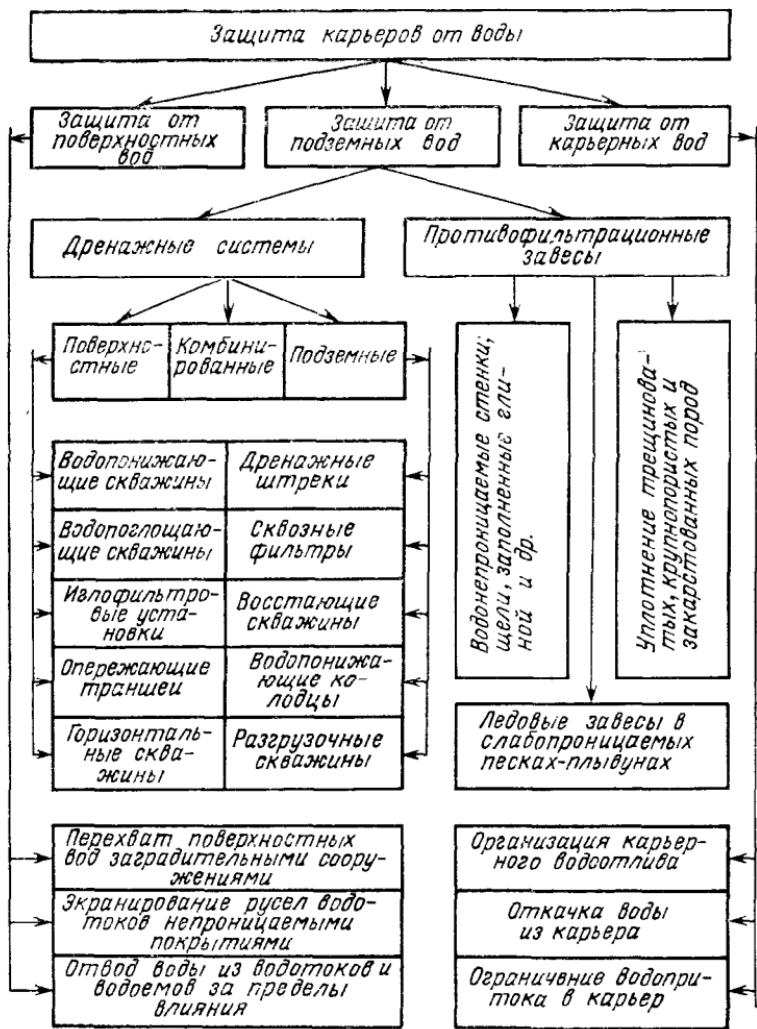


Рис. 85. Принципиальная схема защиты карьеров от воды (по М. С. Газизову с некоторыми дополнениями)

рассматриваемого географического района;  $K_d$  — коэффициент распространяемости ливня, изменяющийся от 1 для малых  $F_d$  и достигающий 0,8 при  $F_d > 50 \text{ км}^2$ .

Показанные три составляющие поверхностного притока воды в карьер имеют принципиальное значение для открытых разработок месторождений. Дело в том, что практически защита горных работ и сооружений от этих вод малоэффективна и они часто являются причиной затопления и заилиения карье-

ров, а также крупных оползней на бортах и отвалах, эрозионных размывов откосов и дорог, повреждения горно-транспортного оборудования. В работе С. К. Абрамова, М. С. Газизова, В. И. Костенко «Защита карьеров от воды» приведен пример последствий летнего ливня на Рачихинских угольных карьерах на Дальнем Востоке, которые привели к ущербу в 2 млн. руб. Поэтому обычно хорошая дорогостоящая защита от подземных вод на карьерах не всегда обеспечивает безопасность горных работ, а следовательно, она не всегда оправдана. Более рационален вариант эффективной водозащиты от атмосферных осадков за счет средств мероприятий защиты от подземных вод с безопасным допуском открытого водоотлива (проскока дренажных систем).

Водопротоки за счет поверхностных водоемов  $Q_o$  и водотоков  $Q_p$  следует рассматривать как часть объема подземных вод, гидравлически связанных с этими объектами (об этом см. ниже) или как часть поверхностного стока при выходе вод из водоемов во время паводков, при строительстве искусственных запруд или по другим причинам. В том случае, если поверхностные водные объекты находятся в пределах карьерного поля или в непосредственной близости к его бортам и отвалам, рассматривают вопрос об отводе этих объектов за пределы карьерного поля, о строительстве водонепроницаемых (экранированных) русел (каналов) или завес. Следует подчеркнуть, что проблема дальнейшего режима поверхностных водоемов и водотоков должна решаться с учетом экологических требований в данном природо-хозяйственном районе.

Основные сооружения защиты от поверхностных вод — канавы и дамбы, которые в зависимости от рельефа местности и формы карьера в плане могут быть линейными или кольцевыми (полукольцевыми), расположенными вдоль нерабочих бортов (сооружение длительного срока службы), а в случае необходимости перед фронтом горных работ. Высота дамб и глубина канав, а также их откосы и сечения, определяются расчетом, исходя из климатических и гидрологических условий местности и решаемой инженерной задачи. С целью ограничения поступления воды из поверхностных водоемов и водотоков и максимального сохранения их естественного режима строят водонепроницаемые стенки — экраны из глинистого материала или завесы за счет тампонирования водонепроницаемых пород глинистым или цементным раствором. При коррекции русел из берега и дно покрываются водонепроницаемым экраном (рис. 86).

Подземный водопроток в карьер определяется несколькими методами в зависимости от сложности гидрогеологических условий месторождения. Коротко рассмотрим основные из них.

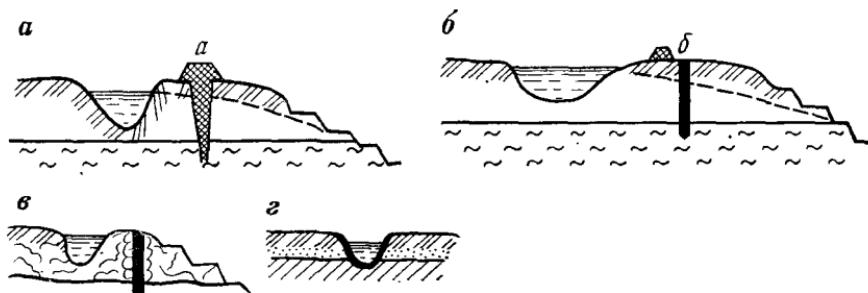


Рис. 86. Схемы защитных сооружений карьеров от поверхностных вод:

а — водонепроницаемая завеса и дамба из глин; б — шпунтовая стенка, стена в грунте; в — тампонажная завеса в трещиноватых породах; г — русло реки, облицованное водонепроницаемым покрытием

1. Метод гидрогеологических аналогий дает возможность прогнозировать суммарные водопритоки в карьер на ранних стадиях изучения месторождения и проектирования. Аналог подбирается по мощности, водопроницаемости и напорам водоносных горизонтов, коэффициенту водообильности, величине снижения уровней подземных вод и по некоторым характеристикам карьера. В практике гидрогеологического прогнозирования получили применение следующие формулы для определения ожидаемого притока в карьер  $Q_k$ .

В безнапорных водах:

$$Q_k = Q_a \frac{(2h_k - S_k) S_k}{(2h_a - S_a) S_a};$$

$$Q_k = Q_a \frac{k_k (2h_k - S_k) S_k}{k_a (2h_a - S_a) S_a}.$$

В напорных водах:

$$Q_k = Q_a \frac{S_k}{S_a};$$

$$Q_k = Q_a \frac{k_k m_k H_k}{k_a m_a H_a},$$

где  $Q_a$  — приток в карьер-аналог;  $h_k$  и  $h_a$  — мощности безнапорных водоносных горизонтов проектируемого карьера и его аналога;  $S_k$  и  $S_a$  — понижения уровня воды для тех же случаев;  $k_k$  и  $k_a$  — коэффициенты фильтрации водоносных горизонтов на проектируемом карьере и его аналоге;  $H_k$  и  $H_a$  — напоры воды;  $m_k$  и  $m_a$  — мощности напорных водоносных горизонтов.

Весьма приблизительно можно дать прогноз о водопритоке в новый карьер по коэффициенту водообильности карьера-аналога  $K_{\text{во}}$  по выражению

$$Q_{\text{k}} = K_{\text{во}} \frac{D_{\text{k}}}{t_{\text{д}}},$$

где  $D_{\text{k}}$  — проектная добыча;  $t_{\text{д}}$  — продолжительность периода добычи.

*Пример.* На угольном месторождении открытым способом разрабатывается участок первой очереди, в пределах которого на всю мощность ( $S=h=23$ ) дренируется безнапорный водоносный горизонт в песках с  $k=5$  м/сут. Суммарный водоприток на момент строительства разрезной траншеи составил  $850 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Необходимо определить ожидаемый водоприток при строительстве подобной разрезной траншеи для другого участка месторождения, в пределах которого мощность водосодержащего песка составляет  $16 \text{ м}$ , а коэффициент фильтрации  $7 \text{ м}/\text{сут}$ .

Для решения задачи в данном случае можно использовать формулу для безнапорных вод, откуда

$$Q_{\text{k}} = 850 \cdot \frac{7 \cdot (2 \cdot 16 - 16) \cdot 16}{5 \cdot (2 \cdot 23 - 23) \cdot 23} = 580 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

2. Метод водного баланса применяется для карьеров со сравнительно простыми гидрогеологическими условиями при наличии информации об области питания и разгрузки водоносных горизонтов, дающей возможность определить приток за счет статических запасов  $Q_{\text{ст}}$ , срабатываемых в пределах депрессионной воронки и динамического пополнения запасов осушаемого водоносного горизонта  $Q_{\text{дин}}$  путем инфильтрации, переливания из других горизонтов, конденсации и т. д. Эти две составляющие общего водного баланса определяют следующим образом:

$$Q_{\text{ст}} = \frac{\mu h_{\text{ср}}}{t} (F_{\text{k}} + 0,33PR);$$

$$Q_{\text{дин}} = \frac{OF_{\text{г}}K_{\text{с}}}{365},$$

где  $\mu$  — коэффициент водоотдачи пород (см. 2.3);  $h_{\text{ср}}$  — средняя мощность дренируемого безнапорного водоносного горизонта, м;  $F_{\text{k}}$  — площадь карьера,  $\text{м}^2$ ;  $P$  — периметр по контуру карьера, м;  $R$  — радиус депрессионной воронки от контура карьера, м;  $t$  — время проходки карьера (траншеи), сут;  $F_{\text{г}}$  — площадь питания дренируемого водоносного горизонта,  $\text{м}^2$ ;  $O$  — годовое количество атмосферных осадков (без ливней и талых вод), в метрах водного столба;  $K_{\text{с}}$  — коэффициент подземного стока или просачивания с другого водоносного горизонта.

3. Методы аналитические и моделирования — основные при прогнозе водопритоков в горные выработки и расчете дренаж-

ных систем. Им предшествует обоснование расчетной гидродинамической модели на основе детальной информации о гидрогеологических условиях и проектируемом карьере. Для более простых гидрогеологических условий обычно применяют аналитические методы, а для более сложных — математическое моделирование.

Общий водоприток в карьер формируется за счет притока из отдельных водоносных горизонтов, вскрываемых горными работами. Для условий установившейся фильтрации в безнапорных водах можно использовать расчетную схему «большого совершенного вертикального колодца», приведенный радиус которого

$$r_k = \sqrt{F/\pi},$$

где  $F$  — площадь карьера при отношении его длины к ширине менее 10 на отметке середины водоносного горизонта.

Тогда (см. разд. 3.5)

$$Q_k = \frac{\pi k (H^2 - h^2)}{\ln R/r_k}.$$

В случае наличия связи подземных вод с поверхностным водотоком, находящимся на расстоянии  $L$  от центра карьера, общий водоприток в карьер составит:

$$Q_k = \frac{\pi k (H^2 - h^2)}{\ln \frac{R_t}{r_k}}.$$

Представляет интерес продолжительность периода до начала взаимодействия водоема с карьером  $t \geq (L - r_k)^2/a$ , где  $a$  — коэффициент уровнепроводности.

Водоприток из напорного водоносного горизонта мощностью  $m$  и напором  $H$ , полностью вскрываемого карьерами определяют по формуле:

$$Q_k = \frac{\pi k (2Hm - m^2 - h^2)}{\ln \frac{R_t}{r_k}}.$$

$$R_t = r_k + 1,5\sqrt{a't}; \quad a' = km/\mu',$$

где  $\mu'$  — коэффициент упругой водоотдачи;  $t$  — продолжительность напорного режима фильтрации.

В связи с учетом влияния воды на работу вскрытых экскаваторов необходимо знать удельный водоприток  $q$  на 1 лм по фронту откоса:

$$q = \frac{Q_k}{2\pi r_k}.$$

Более строгие решения задач о водопритоках с учетом строения толщи вскрышных пород, числа водоносных горизонтов, водопроницаемости пород, режима фильтрации и условий ведения горных работ приводятся в следующих работах [14, 17, 25 и др.].

Переходя к обоснованию защитных мероприятий от подземных вод, кроме знания общего и удельного водопритоков в карьерах, необходимо оценить влияние подземных вод на устойчивость откосов уступов и борта в целом и на производительность горно-транспортного оборудования. Практически это сводится к отдельному рассмотрению защитных мероприятий, рабочего и нерабочего бортов карьера. На рабочих бортах ведется защита с целью главным образом обеспечения условий оптимальной производительности механизмов (откосы уступов имеют определенные технологические параметры, борт из-за широких рабочих берм положе чем это требуется по условиям устойчивости), а на бортах длительного срока службы — для сохранения их устойчивости при максимальном влиянии подземных вод.

Ранее (см. главы 3, 4 и 5) были рассмотрены различные процессы, возникающие на откосах под воздействием воды и приводящие к нарушению их устойчивости (набухания, растворение, выщелачивание, супфозия, плывуны, оплывания и т. д.), поэтому для нерабочих бортов вопрос о необходимости водозащитных мероприятий решается однозначно и обоснованию подлежит выбор наиболее эффективных из них в конкретной гидрогеологической и технологической обстановке.

### 7.2.2. Водозащита нерабочего борта

Сооружение защиты нерабочих бортов от подземных вод могут быть трех видов: дренажные системы, заградительные водонепроницаемые завесы и откосные дренажно-пригрузочные устройства (ДПУ).

*Дренажные системы.* Основное назначение дренажной системы — осуществлять перехват подземного потока к карьеру и тем самым свести к минимуму влияние подземных вод на устойчивость нерабочего борта как дополнительных гидростатического и гидродинамического давлений и как фактора, вызывающего изменения состояния пород в откосах (см. гл. 5 и 5). В связи с этим система должна быть постоянно действующей и обеспечивать прием максимального объема воды с учетом всех источников питания дренируемых водоносных горизонтов. В зависимости от водообильности прибортовой территории и геологического строения на основе гидрогеологических и экономических расчетов выбирают тип дренажной системы: поверхностная, подземная или комбинированная. Поверхност-

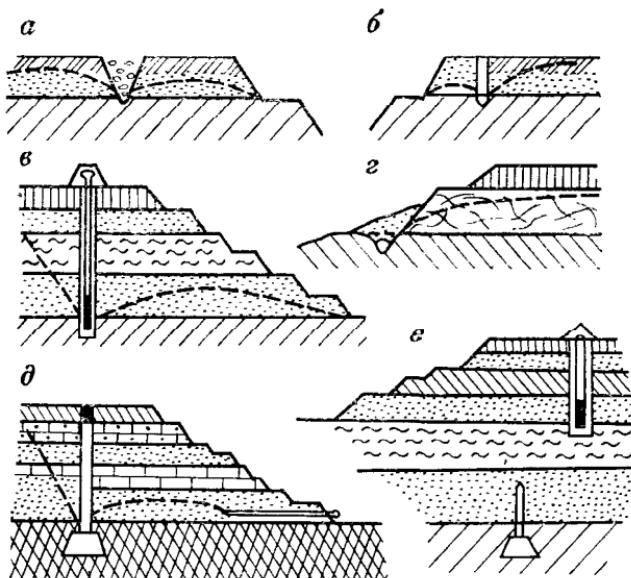


Рис. 87. Дренажные сооружения для защиты нерабочих бортов от подземных вод:

а — траншея; б — иглофильтровая установка; в — водопонизительная скважина с глубинным насосом; г — откосный открытый дренаж; д — подземный дренаж со сквозным фильтром; е — комбинированный дренаж (поверхностный с подземным)

ная состоит из водопонизительных скважин разной глубины, дренажных траншей, приоткосных дренажных канав и горизонтальных скважин, а подземная — из дренажного или водосборного штреков, водопоглощающих (водоспускающих) скважин и водоприемной шахты (рис. 87).

Рекомендации о применении различных способов дренирования подземных вод в зависимости от геологических условий приведены в табл. 46 [17].

В зависимости от положения борта в пласте дренажная система может быть линейной, полукольцевой или кольцевой, состоящей из одного или двух рядов водопонизительных или водоспускающих скважин (однорядная и двухрядная система). Линейные водопонизительные системы применяют для перехвата одностороннего подземного потока к нерабочему борту со стороны водоема или по водоносному горизонту, падающему в сторону карьера, а также в случаях защиты удлиненных выработок. Кольцевые дренажные системы проектируются при необходимости защищать от подземных вод весь карьер или его часть, находящиеся в пределах водоносной толщи.

Дренажные сооружения и системы в целом проектируются на базе гидрогеологических расчетов. Односторонний приток

Таблица 46. Применяемые способы дренирования подземных вод на месторождениях, разрабатываемых открытым способом (по Ю. А. Норватову)

Категория сложности условий разработки	Геологическое строение месторождения	
	Преобладают песчано-глинистые породы	Скальные и полускальные водоустойчивые породы
I. Простые	Дренирование подземных вод при величине водопритока до 200 м ³ /ч осуществляется открытым водоотливом. В начальной стадии возможно временное использование водопонизительных скважин с суммарным дебитом до 400 м ³ /ч	Дренирование подземных вод производится открытым водоотливом или небольшим числом водопонизительных скважин с суммарным дебитом до 500 м ³ /ч
II. Сложные	Применяются водопонизительные скважины и подземные дренажные выработки с общим расходом воды от 200 до 1000 м ³ /ч	Применяется глубинный дренаж (скважина и дренажные подземные выработки) с суммарным дебитом от 500 до 3000 м ³ /ч
III. Особо сложные	Для осушения пород вскрыши (несколько водоносных горизонтов, общий водоприток в карьер более 1000 м ³ /ч) применяют водопонизительные скважины и подземные дренажные выработки. Со дна карьера разгрузочными скважинами дренируется напорный водоносный горизонт	Общий водоприток в карьер превышает 3000 м ³ /ч и его отвод осуществляется всеми дренажными сооружениями (скважинами, подземным комплексом, открытым водоотливом). Напорный водоносный горизонт, залегающий в почве полезного ископаемого, дренируется разгрузочными скважинами

воды в траншею, канаву или приоткосный дренаж, прорезающие весь водоносный безнапорный горизонт, определяются исходя из известной формулы Дюпюи (см. разд. 3.5):

$$Q = B_k \frac{H^2 - h^2}{2R},$$

где  $B$  — длина дрены;  $R$  — радиус депрессии или расстояние до поверхности источника питания;  $H$  — мощность водоносного горизонта до водопонижения;  $h$  — глубина воды в дрене.

Водоприток в скважину определяется в зависимости от характера дренируемых водоносных горизонтов для условий уставновившейся фильтрации по схеме «вертикального колодца» (см. разд. 3.5), но здесь необходимо иметь в виду взаимодействие соседних скважин, которое приводит к уменьшению водопритока определенного для одиночной выработки, а следовательно к отклонению от необходимого понижения уровня дренируемого водоносного горизонта, на величину  $\Delta S = S_c - S_0$ , где  $S_0$  — пони-

жение уровня воды между скважинами;  $S_c$  — понижение в скважине. Но

$$\Delta S_c = \frac{Q_c}{2\pi k m} \ln \frac{R_p}{r_c},$$

где  $R_p = \frac{l}{2\pi}$  — приведенный радиус влияния скважин с расходом  $Q_c$  и радиусом фильтра  $r_c$  при одинаковом расстоянии между водопонизительными скважинами в ряду  $l$ .

Исходя из необходимого  $S_c$  определяется оптимальное расстояние между водопонизительными скважинами, а следовательно и общее их число в системе.

Для того, чтобы запроектировать дополнительные горизонтальные скважины по захвату воды, прошедшей через дренажную систему водопонизительных или водопоглощающих скважин и выходящей на откосы уступов нерабочего борта (так называемый «проскок»). Определяют дебит горизонтальной скважины по формуле П. М. Беспалова:

$$Q_{rc} = \frac{1,16 k H L V (H/R')^3}{(L/l)^{0,57}},$$

где  $R' = R - L/2 + 40,8\sqrt{100H}$ ;  $R$  — радиус влияния дренажной системы;  $L$  — длина скважины, м;  $l$  — расстояние между скважинами в ряду, м;  $H$  — мощность водоносного горизонта, м.

Столб воды между двумя горизонтальными скважинами, имеющий максимальную величину  $h_x$  в середине между ними может быть определен для различных точек отстоящих на расстоянии  $x$  от относительной поверхности по формуле:

$$h_x = \frac{0,008 H}{\sqrt[3]{\frac{Q_{rc}}{xl}}}.$$

Исходя из допустимого значения  $h_x$  для обеспечения устойчивости пород в откосе и зная производительность горизонтальных скважин, определяют расстояние между ними и их число на конкретном участке нерабочего борта карьера.

Водопонизительные скважины, оборудованные глубинными насосами, широко применяются на угольных и рудных карьерах в безнапорных и напорных водоносных горизонтах. Их глубина ограничивается напором применяемых насосов, величина которого для современных конструкций превышает 500 м (ЭЦВ 14-120-540). В последнее время применяются станки нефтяного производства (Уралмаша), которые позволяют осуществлять бурение глубоких скважин с начальным диаметром 1000 мм и конечным — 400 мм. Водопонизительные скважины

оборудуются фильтрами разных конструкций: дырчатыми, каркасно-стержневыми, щелевыми с проволочной обмоткой и гравийной обсыпкой. Диаметр фильтровой колонны на 50 мм больше диаметра погружного насоса, который для разных конструкций составляет 140—480 мм. Наиболее широкое применение нашли центробежные погружные насосы. Стоимость дренирования подземных вод водопонизительными скважинами, по данным А. А. Рудычева, складывается из расходов на их бурение (30 %), оборудование трубами, фильтрами и насосами (32 %) и на эксплуатацию (38 %). Через 3—5 лет необходима декольматация фильтров.

Водопоглощающие скважины и сквозные фильтры, используемые для перепуска воды из верхних водоносных горизонтов в нижние или в подземные дренажные выработки, бурят и оборудуют фильтрами также как и водопонизительные. Диаметр их должен быть более 75—100 мм. Их преимущество заключается в том, что они дренируют водоносные горизонты мощностью более 15—20 м (в том числе и низкой водопроницаемости) и не требуют индивидуального насосного оборудования.

Горизонтальные скважины, представляющие самотечные дрены, получили значительное применение на карьерах КМА в начале 60-х годов для перехвата вод проскока через дренажную систему. Они проходятся гидравлическим или механическим способом, имеют диаметр от 108 до 390 мм и глубину в откосный массив от 50 до 150 м. Ими перехватывается поток воды и отодвигаются границы депрессионной воронки за пределы наиболее опасной оползневой поверхности. Они могут применяться и в сочетании с открытым дренажем борта в любых водосодержащих породах. Исследования П. М. Беспалова показывают, что наибольший эффект горизонтальные скважины имеют при их проходке перпендикулярно фронту борта и при отношении их длины к расстоянию между ними от 1,0 до 4,0 МПа. По затратам на дренирование они в 1,5 раза дешевле водопонизительных скважин и в 3 раза — подземного дренажного комплекса. Широкое применение горизонтальные скважины нашли на карьерах КМА, Никополь-марганцевого бассейна, на некоторых угольных разрезах. Средний уклон в сторону карьера должен составлять около 0,003.

Главнейший элемент подземной дренажной системы — штрек, проходится по полезному ископаемому или ниже его в относительно устойчивых породах и служит как осушительной, так и водоприемной (из выше- и нижезалегающих водоносных горизонтов при помощи скважины) выработкой. Он имеет сечение 4—5 м² и располагается в плане с таким расчетом, чтобы сквозные фильтры, перепускающие воду в него, находились за пределами наиболее вероятной оползневой призмы в борту. Уклон штрека выбирают с таким расчетом, чтобы

вода шла по нему самотеком к центральной насосной станции. Подземный дренажный комплекс применяют на большинстве рудных карьеров, где подземные воды приурочены к трещиноватым и закарстованным породам, а также на многих угольных месторождениях. Как правило, на первом этапе вскрытия карьерного поля разрезными траншеями или пионерными котлованами дренирование осуществляется водопонизительными скважинами, которые впоследствии добуруиваются и переоборудуются в сквозные фильтры на дренажные штреки.

Недостаток подземной дренажной системы — ее высокая строительная стоимость за счет капитальных вложений и отсутствие мобильности (в случае неоднородности пород по водопроницаемости и водообильности нельзя менять положение дренажного штрека как это делается с водопонизительной скважиной, оборудованной индивидуальным насосом).

*Противофильтрационные (барражные) завесы (ПФЗ) на нерабочем борту карьера.* Для защиты некоторых объектов в горнодобывающих районах от влияния подземных вод при одновременном сохранении в значительной степени естественного их режима за его пределами или для охраны природных вод от загрязнения промстоками в последние годы стали рассматриваться возможности строительства локальных водозащитных сооружений, преграждающих доступ подземной воды к горным работам или загрязняющих веществ к водоносным горизонтам. Водонепроницаемые завесы давно строятся с целью уменьшения потерь воды из водохранилищ, каналов и котлованов, а также при строительстве подземных сооружений в водоносных породах (в особенности в трещиноватых, закарстованных и песках-плывунах). В работе карьерного поля ПФЗ могут сочетаться с открытым карьерным дренажом или с защитой водопонизительными скважинами и подземной системой.

Основные требования к ПФЗ следующие [25]:

- а) низкая водопроницаемость, для временных  $k \leq 10^{-2}$  м/сут, а для постоянных  $k \leq 10^{-4}$  м/сут;
- б) противофильтрационные свойства должны сохраняться на весь проектный период работы ПФЗ и быть однородными по всему ее телу;
- в) ПФЗ должны быть устойчивыми к фильтрационным и другим деформациям и трещиностойкими;
- г) материалы, из которых строятся ПФЗ, должны быть стойкими к агрессивному воздействию подземных вод и загрязняющим компонентам, а также не быть источником загрязнения воды.

По своим конструктивным особенностям ПФЗ делятся на 3 группы: траншевые (инфузионные), инъекционные и ледопородные. По занимаемому положению в плане они могут быть линейными, кольцевыми и полукольцевыми. Траншевой тип

находит наибольшее применение, поскольку он принципиально не отличается от завес, ограничивающих наступление вод из поверхностных водоемов (см. рис. 86). По способу выполнения различают собственно траншейные, свайные и тонкие щелевые завесы. Первые в виде непрерывных или секционных сооружений из твердеющих (бетон, гиоцемента) и нетвердеющих (глинистых) материалов применяются в песчаных водоносных горизонтах, имеют толщину от 0,5 до 2,5 м (в зависимости от применяемого землеройного оборудования). Свайные ПФЗ строят из пересекающихся набивных свай в нескальных породах (до глубины 40—50 м) диаметром 0,6—1,0 м из твердеющих материалов.

Устойчивость стенок скважин и стенок траншей обеспечивается активным раствором из бентонитовых глин. Расстояние между скважинами принимается равным 0,7—0,8 диаметра свай.

Тонкие щелевые завесы (5—20 см) устраивают в песчано-глинистых водосодержащих породах без крупнообломочных включений на глубину до 20 м, путем заполнения щелей твердеющим цементоглинистым раствором, щели проходят механическим или гидравлическим способами. Иногда на стенах щелей прокладывают полосы из полиэтиленовой пленки или просмоленной мешковины. Щелевые ПФЗ получили широкое применение в гидротехническом строительстве у нас и во многих странах мира. На открытых разработках они внедрены в ПНР при защите карьера от подземных вод, получающих питание со стороны р. Вислы. Существует еще разновидность щелевых ПФЗ — скважинно-щелевые, которые сооружаются специальными буровыми станками ударного и вращательного действия. Коэффициент фильтрации заполнителя завес по рекомендациям СНиП не должен превышать  $5 \cdot 10^{-3}$  м/сут.

Проектируя ПФЗ инфузионного типа, необходимо оценивать не только их устойчивость как инженерного сооружения, но и возможность ухудшения устойчивости отдельных уступов или борта карьера в период их строительства и эксплуатации. Дело в том, что траншеи, канава, щели и другие нарушения сплошности прибортового или приоткосного массива горных пород могут оказаться ослабленными участками в зоне наиболее напряженной (потенциально опасной) оползневой поверхности, что приведет к неблагоприятному изменению отношения между сдвигающими и удерживающими силами. К подобному изменению приведет и возрастание водного напора в этой зоне.

На рис. 88 приведены схемы проектов неудачного расположения ПФЗ с точки зрения обеспечения устойчивости нерабочего борта. Одно из главных требований при строительстве инфузионных завес сводится к дискретному (пунктирному) выполнению отдельных этапов их сооружения (короткие участки

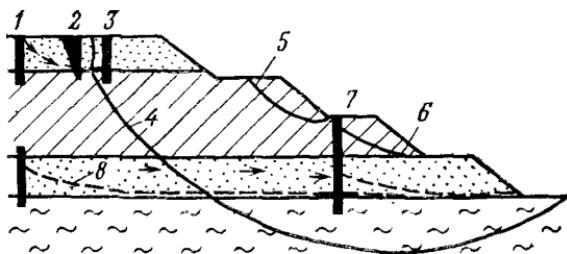


Рис. 88. Схематический разрез борта карьера с ПФЗ:

1 — наиболее благоприятное расположение ПФЗ (с точки зрения обеспечения устойчивости откосов); 2 и 3 — неудачно расположенные щелевые и траншейные ПФЗ; 4, 5 и 6 — потенциальные, наиболее опасные поверхности скольжения борта в целом и отдельных его уступов; 7 — щелевая ПФЗ, оказывающая неблагоприятное влияние на устойчивость уступов (подрезка и врезка) и борта (гидростатическое и гидродинамическое давление); 8 — положение депрессионной поверхности воды за ПФЗ

подготовки щелей, заполнение и переход к новому участку, удаленному на некотором расстоянии от заполненного). При защите нерабочего борта в верхней его части ПФЗ должны располагаться за пределами потенциальной оползневой призмы.

Инъекционные ПФЗ получили наибольшее распространение в строительной практике, в том числе и в горном деле (Донбасский, Кузбасский, Подмосковный, Львовско-Волынский угольные бассейны, КМА и др.). Их сооружение приводит не только к резкому снижению водопроницаемости горных пород, но и к их упрочнению (особенно при строительстве цементационных завес). Суть сооружения этих завес заключается в уплотнении (тампонировании) пористых, трещиноватых и закарстованных пород нагнетанием цементного, глинистого, силикатного растворов, смол, битумов или смесей из этих соединений. Нагнетание производится через специальные скважины, пробуренные с земной поверхности или с межступных берм.

К тампонажным материалам предъявляют определенные требования, от которых во многом зависит качество завес: водоустойчивость, быстрое твердение, адгезия к уплотняемым породам, низкая водопроницаемость. Проникновение различных растворов (глубина и скорость) в различных породах зависит от их водопроницаемости. Так, цементные растворы находят применение в крупно- и грубозернистых песках и гравийно-гальечных породах с коэффициентом фильтрации более 50 м/сут, а в трещиноватых породах, при ширине трещин более 2 мм — 0,10 м/сут. Радиус проникновения цементного раствора в зависимости от среды изменяется от 1 до 2 м. Скорость движения подземных вод в трещиноватых породах не должна превышать

600 м/сут. Состав и конструкция цементного раствора выбираются с учетом назначения ПФЗ, типа пород, их водопроницаемости и химического состава подземных вод (особое внимание следует обращать на агрессивность этих вод).

Глинистый тампонаж применяется в тех случаях, когда не требуется упрочнения водосодержащих пород, подземные воды агрессивны по отношению к бетону, водосодержащие породы обладают высокой водопроницаемостью за счет крупных пор, трещин, карстовых пустот. Для повышения качества глинистых завес применяется 15 %-ный раствор из бентонитовых глин, нагнетаемый при давлениях до 20 МПа.

Битумизация выполняется горячим и холодным способами в закарстованных, трещиноватых и гравелистых породах при значительной водопроницаемости и больших скоростях движения подземных вод. В нашей горной практике горячая битумизация была впервые применена на СУБРе при проходке наклонного ствола в закарстованных известняках, водоприток из которых составлял более 1500 м³/ч. Битумный раствор представляет собой смесь из нефтепродуктов, парафина, песка, глины, цемента.

Смолизация представляет собой процесс нагнетания раствора из синтетических смол с отвердителем и применяется в тонкотрециноватых породах и песках с коэффициентом фильтрации от 0,2 до 50 м/сут. Радиус проникновений раствора в мелкозернистые пески с  $k=10$  м/сут по наблюдениям института ВИОГЕМ (г. Белгород) составил 4 м. При этом, в результате смолизации, коэффициент фильтрации уменьшился до  $(1-0,4) \cdot 10^{-3}$  м/сут, а прочность на одноосное сжатие достигла 5,5 МПа.

Силикатизация (одно- и двухрастворная) применяется в песках с коэффициентом фильтрации от 0,5 до 80 м/сут с целью повышения их прочности и уменьшения водопроницаемости. При этом, в более водопроницаемых песках ( $k=2-80$  м/сут) рекомендуется применять двухрастворную силикатизацию — поочередное нагнетение растворов силиката натрия (жидкого стекла) и хлористого кальция, а в песках с  $k$  менее 2 м/сут — однорастворную из жидкого стекла с добавкой фосфорной и кремнефтористо-водородной кислоты (СНиП 2.06.14—85).

В практике строительства ПФЗ часто применяют комбинированные растворы из цемента, глины, смолы, и т. д., а также комбинированные по тампонажному материалу завесы (на отдельных участках водозащиты).

Выбор расстояний между тампонажными скважинами, обеспечивающими непрерывность и однородность завес, а также нормальную технологию строительства, производятся на базе специальных опытных работ. Для предварительных оценок

в СНиП рекомендуется следующая' формула определения радиуса (в м) распространения тампонажного раствора:

$$r_i = \sqrt{\frac{q_i t}{\pi h_i \alpha e}},$$

где  $q_i$  — расход раствора,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $t$  — продолжительность нагнетания, ч;  $h_i$  — мощность закрепляемого слоя пород, м;  $e$  — коэффициент пористости пород;  $\alpha$  — коэффициент неравномерности распространения трещин и пор в горной породе.

Расчеты ПФЗ в конкретных гидрогеологических условиях предусматривают определение расхода воды в карьер, поступающей через завесы, мощности водного потока у внешней и внутренней стенок ПФЗ, ширины завесы и некоторых других параметров, обеспечивающих ее устойчивость и эффективность. В качестве примера приведем только некоторые рекомендации. Более подробно эти вопросы рассмотрены в специальной гидрогеологической литературе.

Величина удельного водопритока (в  $\text{м}^3/\text{сут на 1 м длины борта}$ ) в карьер в условиях плоскопараллельной фильтрации за счет пропуска воды через ПФЗ инфузионного типа, сооруженной в безнапорном водоносном горизонте, определяется по формуле:

$$q = \frac{k (h_e^2 - h_0^2 - 2J_0 h_{cp} \delta)}{2 [L + \delta (\beta - 1)]},$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации водоносного горизонта,  $\text{м}/\text{сут}$ ;  $h_e$  и  $h_0$  — глубины потока на контурах питания и откоса, м;  $\delta$  — ширина ПФЗ, м;  $h_{cp} = \frac{h_e + h_0}{2}$ ;  $\beta = k/k_{PfZ}$ ;  $k_{PfZ}$  — коэффициент фильтрации ПФЗ;  $J_0$  — начальный градиент фильтрации.

Мощность водоносного потока у внутренней и внешней стенок ПФЗ на расстоянии  $x$  от фильтрующего откоса карьера можно определить следующим образом:

$$h_1 = \sqrt{h_e^2 - \frac{(h_e^2 - h_0^2 - 2J_0 h_{cp} \delta)}{R + \delta (\beta - 1)} (L - x)};$$

$$h_2 = \sqrt{h_0^2 + \frac{(h_e^2 - h_0^2 - 2J_0 h_{cp} \delta) x}{R + \delta (\beta - 1)}}.$$

В условиях напорного горизонта

$$q = \frac{k_1 m (H_e - H_0 - I_0 \delta)}{R + \delta (\beta - 1)};$$

$$h_1 = H_e - \frac{(H_e - H_0 - I_0 \delta)(L - x)}{R + \delta(\beta - 1)};$$

$$h_2 = H_0 + \frac{(H_e - H_0 - I_0 \delta)x}{R + \delta(\beta - 1)},$$

где  $H_e$  и  $H_0$  — напоры на контурах питания и откоса, м;  $m$  — мощность напорного водоносного горизонта, м;  $R$  — расстояние между фильтрующим откосом и областью питания, м.

На практике обычно задаются величиной допустимого удельного водопритока или значениями мощности потока, а определяют необходимую ширину ПФЗ или ее водопроницаемость по приведенным формулам. Эффективность ПФЗ определяется отношением  $q/q_0$ , где  $q_0$  — удельный водоприток к откосу карьера без завесы.

*Дренажно-пригрузочные устройства* (ДПУ) на откосах рабочего борта имеют различное назначение в зависимости от осуществляющей водозащиты за контуром карьера. При отсутствии водозащитных сооружений в слабоводообильных и слабоводопроницаемых породах дренирование подземных вод ведется открытым водоотливом, т. е. откосами карьера и тогда ДПУ играют самостоятельную роль водоприемных и водоотводящих сооружений карьерного водоотлива. Это водооткосные канавы или щели, рассчитанные на прием максимального количества воды с учетом поверхностных и атмосферных вод. В зависимости от водопроницаемости и водоустойчивости вмещающих пород и выходных гидравлических градиентов канавы сооружаются с покрытием, каменным заполнителем, порфирированной трубой и пригрузкой, обеспечивающих нормальный отвод воды к центральному водоотливу, отсутствие фильтрационных деформаций и ограничение степени разупрочнения водоустойчивых пород (ранее в главах 2, 3 и 4 были рассмотрены вопросы прогноза изменения свойств водонеустойчивых пород и определения параметров необходимых пригрузочных призм).

Чаще всего дренажно-пригрузочные мероприятия представляют собой дополнение к работающим водозащитным системам и предназначены для перехвата проходящего к карьеру через эти системы «прискока» воды и ограничения ее отрицательного влияния. Это горизонтальные скважины, щели, пригрузочные призмы (см. рис. 87).

### 7.2.3. Водозащита рабочего борта

Как уже отмечалось в начале главы, водозащитные мероприятия на рабочем борту предназначаются главным образом для обеспечения нормальной работы горно-транспортного оборудования. Конечно, воды, выходящие на откос, могут нарушить его устойчивость, но это нарушение, в связи с постоянным об-

новлением фронта работ, сказывается только на производительности оборудования. Иногда возникает необходимость осушения полезного ископаемого. Особенности водозащиты рабочего борта характерны и для начального этапа строительства разрезных траншей. Защита рабочих бортов от влияния подземных вод считается наиболее сложной гидрогеологической работой на карьере, поскольку на его площадках имеется тяжелое оборудование с большой производительностью в сдренированных породах и фронт горных работ постоянно меняется, входя в новые нестационарные гидрогеологические условия. Поэтому здесь принято говорить о скользящих системах водозащиты.

Обоснование типа и конструкции водозащитных мероприятий на рабочем борту начинается с оценки его инженерно-геологических условий (геологическое строение, водопроницаемость и водоустойчивость горных пород, водоприток из отдельных водоносных горизонтов) и их влияния на производительность применяемого оборудования при проектной системе разработки. На месторождениях, сложенных скальными и полускальными трещиноватыми и закарстованными породами, схема водозащиты зависит от водообильности водосодержащих пород. При незначительных водопритоках дренирование производится открытым водоотливом при помощи канав и щелей, пройденных вдоль фильтрующего откоса. При больших водопритоках организуется опережающее поверхностное водонижение скважинами, а в случае больших глубин и наличия нескольких водоносных горизонтов большой водообильности — опережающий подземный дренаж. В песчано-глинистых породах опережающий дренаж подземных вод имеет повсеместное применение и реализуется поверхностным и подземным способами.

Основа для проектирования водозащитных мероприятий в песчано-глинистых толщах вскрышных пород — расчет удельного водопритока к фронту работы вскрышного оборудования, который ориентировочно может быть определен исходя из общих рекомендаций по оценке водопритоков в карьер (см. разд. 7.2.1) и сравнения ее с критической (допустимой) для данного типа вскрышного оборудования. Последняя определяется исходя из масштаба деформаций опливания водосодержащих пород, который оценивается длиной языка опливания  $l_{опл}$ , м, определяемой для различных экскаваторов следующим образом [1]:

а) для экскаваторов типа ЭКГ

$$l_{опл} = R_q - h \operatorname{ctg} \alpha - 0,5b;$$

б) для драглайнов при работе без подвалки

$$l_{опл} = R_p - h_0 \operatorname{ctg} \beta - a - 0,5b - h \operatorname{ctg} \alpha;$$

в) для роторных экскаваторов

$$l_{\text{опл}} = h \operatorname{ctg} \alpha;$$

г) для многоковшовых экскаваторов с нижним черпанием  $l_{\text{опл}} = l_{\text{пз}}$ , а с верхним черпанием  $l_{\text{опл}} = l_0$ , где  $R_{\text{ч}}$  — радиус черпания, м;  $h$  — высота рабочего уступа, м;  $\alpha$  — угол откоса уступа, градус;  $b$  — ширина ходовой части экскаватора, м;  $R_{\text{р}}$  — радиус разгрузки, м;  $h_0$  — высота отвала с углом откоса  $\beta$ ;  $a$  — ширина бермы безопасности (3—5 м);  $l_{\text{пз}}$  — длина планирующего звена ковшовой рамы, м;  $l_0$  — расстояние между основанием уступа и рельсовыми путями, м.

Длина языка оплыивания — функция удельного расхода воды, фильтрующейся через откос  $q$ ,  $\text{м}^2/\text{сут}$ , которая определяется зависимостью

$$l_{\text{опл}} = \frac{h_{\text{в}} (\gamma_{\text{в}} + \gamma)}{\chi \gamma_{\text{в}} \operatorname{tg} \varphi},$$

где  $\chi = f(q/d)$ ;  $\varphi$  — угол внутреннего трения песка;  $\gamma$  и  $\gamma_{\text{в}}$  — удельный вес песка и воды;  $d$  — средний диаметр частиц песка в м;  $h_{\text{в}}$  — высота высачивания, м.

В этом случае можно поставить вопрос о допустимых критических величинах удельного расхода, превышение которых вызывает необходимость организации опережающей водозащиты, расположенной на некотором расстоянии от фронта горных работ. Необходимо иметь в виду еще одно обстоятельство, осложняющее условия работы вскрышных экскаваторов. Это наличие связанных пород в кровле водоносных песков, которые при образовании языков оплыивания обрушаются на откос и тем самым увеличивают их длину (рис. 89).

Наблюдения, проведенные на карьерах Е. П. Писанцом, Г. Л. Фисенко и В. А. Мироненко, показывают, что для механических лопат и многоковшовых экскаваторов величины критических водопритоков воды (в  $\text{м}^3/\text{сут}$  на 1 м откоса) составляют: для пылеватых песков — 0,2; для тонкозернистых — 0,4; для мелкозернистых — 1,0; для среднезернистых — 1,5—2,0 и для крупнозернистых — 3,0—4,0. Отметим, что по рекомендациям этих же авторов, при ведении вскрышных работ гидромониторами, величины критических водопритоков для тонко- и мелкозернистых песков на порядок выше, а для средне- и крупнозернистых — в 5 раз. Практика ведения открытых работ на буроугольных карьерах ГДР и ФРГ, где водопритоки составляют 1—2 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ , а также на Лебединском и Сарбайском железорудных карьерах показали большие возможности применения открытого водоотлива.

Если прогнозные значения водопритоков к фильтрующему откосу превышают допустимые, то для их уменьшения сооружается водозащитная система из водопонизительных скважин или подземных дренажных выработок, расположенных парал-

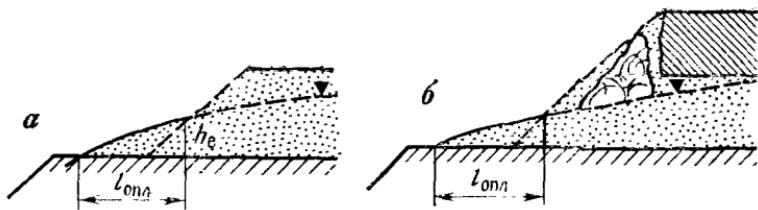


Рис. 89. Схема образования языка опливания в однородном песчаном откосе (а) и при наличии связанных пород в кровле водоносного песка (б)

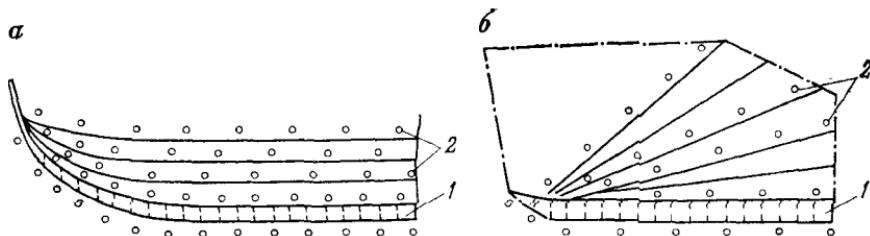


Рис. 90. Расположение водопонизительных скважин при параллельной (а) и веерной (б) системах горных работ:

1 — разрезные траншеи с первоочередными скважинами; 2 — водопонизительные скважины последующих этапов разработки поля

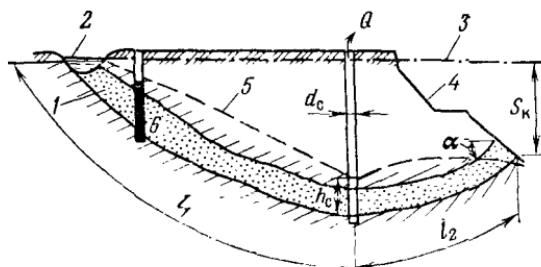


Рис. 91. Схема к расчету поверхностной дренажной системы при мульдообразном залегании напорного водоносного горизонта:

1 — напорный водоносный горизонт; 2 — поверхностный водоток; 3 — начальный пьезометрический уровень; 4 — откосы рабочего борта карьера; 5 — положение депрессионной кривой при работе водопонизительных скважин; 6 — проектируемая ПФЗ для ограничения притока речных вод

лько фронту горных работ (рис. 90) на расстоянии, определяемом с учетом скорости продвигания рабочего борта и срока службы дренажных сооружений. Например, система из водопонизительных скважин работает удовлетворительно 4—5 лет, чем и определяется ее расстояние от контура карьера, а подземная дренажная система имеет срок службы на 20—30 % больше, чем поверхностные скважины, поэтому она закладывается на большом расстоянии от фронта вскрышных работ.

На удаление дренажной системы от контура карьера большое влияние оказывает геологическая структура месторождений или карьерного поля. В условиях мульдообразного залегания (рис. 91) ряд водопонизительных скважин закладывается в районе наиболее глубокой части мульды (по ее оси), а расстояние до карьера, обеспечивающее нормальную работу, определяется из выражения, предложенного В. А. Мироненко [1]:

$$2,73l_1 \frac{l_2 \sin \alpha - h_c}{S_k} = l_{\max} \lg \frac{l_{\max}}{\pi d_c},$$

где  $l_{\max}$  — расстояние между водопонизительными скважинами в ряду.

В зависимости от положения разрабатываемого полезного ископаемого встанет вопрос об ограничении водопритока за счет речных вод при помощи ПФЗ или о переносе речного русла за пределы карьерного поля.

При технико-экономическом анализе вариантов водозащиты поверхностным и подземным способами, водопонизительные скважины оказываются более перспективными при глубине залегания водоносных горизонтов не более 150—200 м и коэффициентах фильтрации более 3—5 м/сут [1].

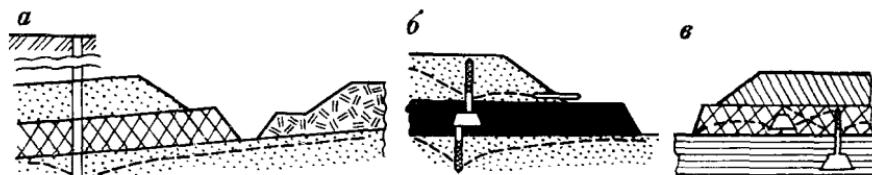
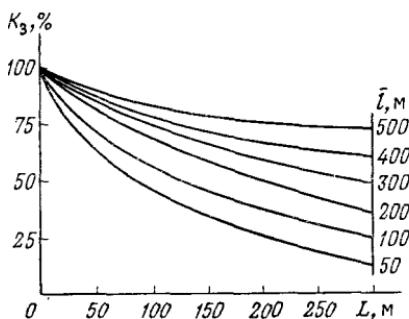
Расстояние между скважинами (водопонизительными или сквозными на подземный дренажный штrek) в ряду контурной дренажной системы, параллельной откосу рабочего борта, определяется из расчета обеспечения коэффициента заслона  $K_3 = 1 - \frac{q_d}{q_0}$ , где  $q_d$  — допустимый удельный водоприток к откосу из условий образования языка оплыивания допустимой длины;  $q_0$  — общий удельный водоприток к откосу. Ориентировочно расстояние между скважинами может быть получено из графика В. А. Мироненко, приведенного на рис. 92. Здесь параметр  $\bar{l} = \frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2}$  при  $\frac{R}{r_k} < 2$  и  $\bar{l} = l_2$  при  $R \gg r_k$ , где  $l_1$  и  $l_2$  — расстояния от ряда скважин соответственно до реки и контура откоса карьера на уровне выхода подземных вод;  $R$  и  $r_k$  — радиусы депрессионной воронки и карьера на уровне выхода воды на откос.

В некоторых случаях возможно увеличение удельного притока воды, прошедшей через контурный дренажный ряд, из-за

Рис. 92. График для определения ориентировочного расстояния между скважинами диаметром 0,1–0,2 м в контуриом ряду, параллельном откосу рабочего борта карьера

Рис. 93. Дренажные сооружения для осушения полезного ископаемого:

*а* — водопроницаемое полезное ископаемое залегает между водопроницаемыми породами; *б* — водонепроницаемое полезное ископаемое залегает между двумя водоносными горизонтами; *в* — водопроницаемое полезное ископаемое залегает между двумя водоупорами



влияния атмосферных и поверхностных вод, изменения водопроницаемости водоносных пород на отдельных участках поля, а также из-за аварийных ситуаций в водопонизительной системе. В таких случаях водоприток можно принять иглофильтровыми установками, приоткосным открытым дренажом или горизонтальными забивными фильтрами с организованным водосбросом в центральный или временный водоотлив.

В особых гидрогеологических и гидрологических условиях для защиты рабочего борта и охраны подземных вод можно предусмотреть заградительные сооружения в виде канав, траншей, дамб и ПФЗ.

Осушение полезного ископаемого с целью уменьшения его влажности и улучшения условий отработки, а также для подготовки основания будущих внутренних отвалов часто производится самостоятельно. Особое значение при этом приобретают водопроницаемость и водоустойчивость вмещающих пород и условия залегания продуктивной толщи. В зависимости от этого может быть применен открытый подземный или поверхностьный тип опережающего и сопутствующего дренажа подземных вод. Рассмотрим этот вопрос на примере конкретных геологических условий.

*Случай 1.* Полезное ископаемое водопроницаемое и залегает между двумя водоносными слоями или граничит с одним водоносным горизонтом (рис. 93, а). Осушение осуществляется с помощью опережающего ряда водопонизительных скважин, обустроенных глубинными насосами в подстилающем водоносном горизонте.

*Случай 2.* Полезное ископаемое практически представляет собой водоупор, залегающий между двумя водоносными горизонтами или граничит с одним водоносным горизонтом (в почве или кровле). Дренирование подземных вод осуществляется при помощи фильтров, спускающих воду в штрек, пройденный в полезном ископаемом (см. рис. 93, б). Кровля может быть осушена горизонтальными скважинами.

*Случай 3.* Полезное ископаемое водопроницаемо и залегает между двумя водоупорными слоями (см. рис. 93, в). Дренирование производится опережающим штреком, пройденным по полезному ископаемому или фильтрами, перепускающими воду в подземную выработку, пройденную ниже полезного ископаемого.

Отметим, что осушение полезного ископаемого различными способами имеет необходимую эффективность только при хорошо организованном карьерном водоотводе. Известны случаи, когда дорогостоящие поверхностные и подземные дренажные системы не приводят к ожидаемым (по проекту) результатам из-за наличия воды разного происхождения на рабочих бермах, это приводит к увеличению влажности полезного ископаемого и подстилающих пород, залегающих в основании будущих внутренних отвалов и горно-транспортного оборудования.

#### 7.2.4. Водозащита отвалов

Отрицательное влияние воды на устойчивость отвалов осуществляется двумя путями: увлажнением основания и тела отвала, сложенного водоустойчивыми породами и формированием водоносных горизонтов, создающих неблагоприятное напряженное состояние за счет гидростатического и гидродинамического давлений. Оползневые явления на отвалах, мешающие реализовать проектные технологические решения процесса отвалообразования и достичь оптимальных емкостей для вскрышных пород, происходят исключительно под влиянием подземных, поверхностных и атмосферных вод. В связи с этим водозащита отвалов, начиная с подготовки их основания, имеет большое практическое значение и является весьма сложной задачей на открытых разработках месторождений.

Внутренние отвалы примыкают (за редкими исключениями) к нерабочему борту и складируются на породах, залегающих в почве полезного ископаемого, поэтому существующая водозащита этого борта и ее эффективность во многом определяют условия обводнения отвалов. На бермах, залегающих в основании фильтрующих откосов, перед отсыпкой пустых пород сооружаются откосные дрены трубчатого типа, которые

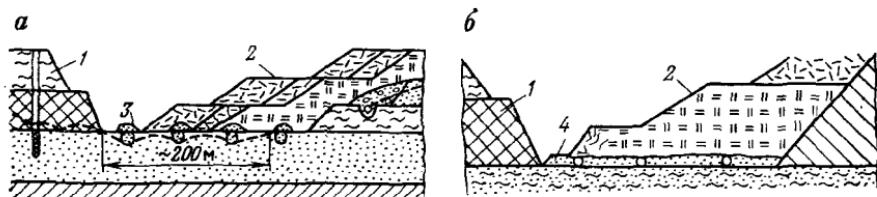


Рис. 94. Водозащита основания внутренних отвалов систематическим (а) и пластовым (б) дренажами:

1 — рабочий борт; 2 — внутренние отвалы, прислоненные к уступам нерабочего борта с приоткосным трубчатым дренажом (случай а) и без откосного дренажа (случай б); 3 — горизонтальные дрены в основании отвалов; 4 — водопроницаемая насыпь с водоотводящими перфорированными трубами

перехватывают просочившуюся через дренажную систему нерабочего борта воду и отводят ее в систему карьерного водоотлива (см. рис. 87, г). Труба диаметром не менее 200 мм (определяется гидравлическим расчетом) укладывается в канавку на песчано-гравийную подушку и засыпается крупнозернистым песком или гравием на высоту, превышающую максимальную мощность фильтрующих пород в откосе (определяемую гидрогеологическими расчетами). Коэффициент фильтрации засыпки должен быть не менее 5 м/сут [25].

Защита основания внутренних отвалов, представленных водоносными породами (содержащими чаще напорные воды), частично осуществляется дренажными системами нерабочего и рабочего бортов при благоприятном залегании полезного ископаемого (см. рис. 91, 93). На буроугольных карьерах ГДР установлено, что ширина осущененной полосы основания примыкающей к рабочему борту и обеспечивающей устойчивость отвала, составляет 200—300 м. Такая ширина не всегда достигается под прикрытием существующих защитных систем на бортах карьера, поэтому на многих месторождениях, где породы почвы полезного ископаемого представлены слабоводопроницаемыми песками, а водоносный горизонт имеет большой напор, отвалообразование предваряется строительством систематического дренажа из семи дрен (осушителей параллельно фронту отвала и собирателей перпендикулярно к нему) в основании отвалов (рис. 94, а). Такая сеть обеспечивает прием подземных вод и отвод их в водосборники подземной дренажной системы (если такая применяется для защиты карьера) или в специальные зумпфы, расположенные за пределами отвалов. Расстояние между дренами, их ширина, уклон и расположение определяются гидрогеологическими расчетами для конкретных условий [1]. Так, для наиболее часто встречаемых дрен, заложенных выше водоупорного слоя, подстилающего водоносный горизонт

(основание отвала), расстояние между ними (в м) определяют по формуле С. Ф. Аверьянова [1]:

$$l_d = \frac{h_0}{2} \left[ \sqrt{\frac{8kh_{\max}}{Wh} \left( 1 + \frac{h_{\max}}{2h_0} \right) + 4B^2} - 2B \right],$$

где  $h_0$  — расстояние от дрены до водоупорного слоя, м;  $h_{\max}$  — максимальная высота пониженного уровня воды над водоупором, м;  $W$  — интенсивность просачивания атмосферных вод, м/сут;  $B = 1,47 \lg \frac{1}{\sin \frac{\pi r_d}{h_0}}$ ;  $r_d$  — приведенный радиус дренажа.

Водоприток (в м³/сут) в дрену длиной  $B_d$  составляет

$$Q_d = 2W \lg B_d.$$

В построенных систематических дренажах расстояние между дренами составляет в среднем 50—100 м. Над дренами сооружают песчаную насыпь высотой 1—1,5 м и шириной 3—5 м.

При складировании внутренних (а иногда и внешних) отвалов на слабопроницаемых водоносных породах (мелкие и тонкие пески, супеси), в которых рассмотренный систематический дренаж не является эффективным, в основании отвалов укладывается плоская насыпь из фильтрующего материала, называемая пластовым дренажом (рис. 94, *д*). Толщина фильтрующего слоя определяется исходя из характера водоносного горизонта (напорный, безнапорный), но она не должна превышать 2—3 м. Отвод воды из пластового дренажа осуществляется самотеком по трубам, укладываемым в нижней его части. В тех случаях, когда пластовый дренаж очень дорог, отсыпают насыпи шириной 4—8 м параллельно фронту отвала, расстояние между которым принимает равным одной-двум заходкам экскаватора. На некоторых угольных месторождениях, с падением угольного пласта к рабочему борту, с целью повышения устойчивости и улучшения их дренирования оставляют полосы невыбранного угля высотой 0,5—1,0 м шириной 2—3 м при отсыпке отвалов на водоупорном слое небольшой мощности.

Внешние отвалы строят на подготовленном основании. С него снимаются почвенный и торфяной слои, отводят поверхностные воды, на дне засыпанных оврагов и балок укладывают перфорированные трубы или проходят дренажные канавы. В нижней части отвалов (первый ярус) отсыпают песчаные или скальные породы, которые обеспечивают дренирование вод из тела отвала. В последствии проводится рекультивация техногенных массивов, которая предусматривает поверхностные водоотводящие мероприятия, повышающие их устойчивость.

### 7.3. ВОДОЗАЩИТА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ КАПИТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Наиболее капитальные сооружения — шахтные стволы разного назначения требуют особого внимания в период строительства (проходки и крепления). В зависимости от геологических условий и степени водообильности участков месторождений, на которых проходятся эти сооружения, водозащита осуществляется разными способами: а) откачкой воды, поступающей в шахтный ствол, который проходит в твердых слабопроницаемых породах и общий водоприток составляет не более  $8 \text{ м}^3/\text{м}$ ; б) системой водопонизительных скважин, оборудованных глубинными насосами, обеспечивающими снижение уровня подземных вод, опережающее глубину проходки ствола, который строится в водоустойчивых скальных, полускальных или крупнообломочных породах; в) подземным дренажом с забоя ствола, в условиях пересечения рыхлых неустойчивых песчано-глинистых водоносных пород низкой водопроницаемости и небольшой мощности; г) строительством водонепроницаемых тампонажных завес вокруг ствола из цементного, глинистого, битумного или смешанного заполнителей в трещиноватых, закарстованных и крупнообломочных породах высокой водопроницаемости, а также ледопородных непроницаемых завес в неустойчивых слабопроницаемых рыхлых песках (плынках) большой мощности.

Водопонизительные скважины, число которых  $n_{\text{вс}} = K_3 \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{с}}}$ ,

где  $K_3$  — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,5—3, определяют из расчета перехвата всего ожидаемого водопритока в шахтный ствол, располагают вокруг шахтного ствола на расстоянии 15—20 м от его оси по одной из фигур, показанных на рис. 95. Глубина их определяется положением забоя ствола в водоносном горизонте и выбирается из расчета достижения отметки уровня подземных вод ниже забоя ствола или почвы выработок рудного двора. Под защитой водопонизительных скважин (от 3 до 20 шт) были пройдены стволы на многих рудных месторождениях, где водопритоки составляли от 100 до 800  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

В более сложных условиях, когда шахтный ствол пересекает несколько водоносных горизонтов, среди которых и приуроченных к неустойчивым песчаным породам, водопонизительные скважины не обеспечивают нормальный процесс проходки, приходится применять подземный многоярусный дренаж с помощью иглофильтров, установленных на забое ствола, или восстающих —

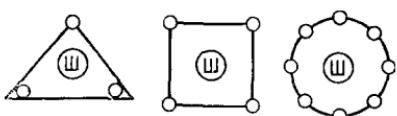


Рис. 95. Схемы контурной установки водопонизительных скважин вокруг шахтного ствола

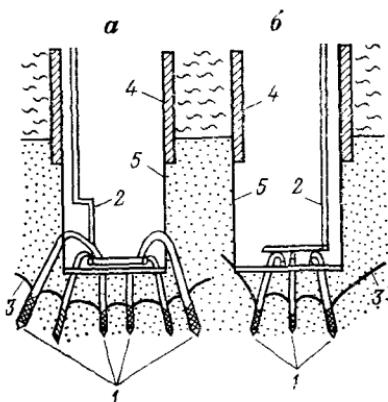


Рис. 96. Схемы установки иглофильтров за временной крепью (а) и по контуру в забое ствола (б) на шахте Маргансецкого ГОКа:

1 — иглофильтр; 2 — водоотводящая труба; 3 — сниженный уровень воды; 4 — постоянная крепь; 5 — временная крепь

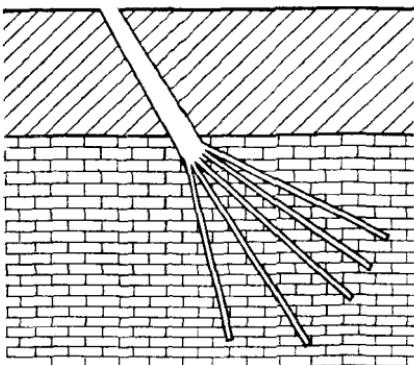


Рис. 97. Пример расположения многоствольных скважин для сооружения тампонажной завесы

фильтров из подземных дренажных выработок, заложенных ниже забоя ствола (на уже дренируемых участках шахтного поля). Например, при проходке шахтных стволов одной из шахт Марганецкого ГОКа для осушения нижнесарматских песков мощностью 8—10 м была использована многоярусная контурная схема подземного осушения с помощью иглофильтровых установок ЛИУ-2. Иглофильтры длиной 4—5 м располагались по 10—15 штук на одном ярусе на расстоянии 1 м друг от друга непосредственно в забое ствола или за временной крепью по периметру ствола (рис. 96). Дебит иглофильтровой установки в зависимости от крупности песков изменялся от 2 до 14 м³/ч. Через сутки после начала работы системы уровень подземных вод устанавливался на 2—3 м ниже забоя ствола [25].

При наличии высоконапорных вод ниже забоя ствола часто происходят прорывы изолирующих пород, поэтому необходимо определить величину безопасных напоров для различных отметок забоя шахтного ствола и обеспечить их водопонизительными скважинами, пройденными с поверхности. Остаточный водоприток (при вскрытии водоносных пород) принимается иглофильтровыми установками.

Противофильтрационные завесы вокруг шахтного ствола сооружаются также как и рассмотренные ранее (см. разд. 7.2). Особые трудности предоставляет их строительство в закарстованных массивах карбонатных пород, в которых водопритоки к шахтным стволам составляют тысячи кубических метров в час. Так, при проходке шахтных стволов на бокситовых ме-

сторождениях Урала водопритоки достигали 1400 м³/ч на СУБРе и 2200 м³/ч на ЮУБРе. При этом установлено, что скорость проходки стволов существенно зависит от объема откачиваемой воды и составляет: 100 м/мес при откачке до 8 м³/ч воды и 2—5 м/мес при водопритоке более 100 м³/ч (И. И. Плотников, 1987). Для защиты от воды шахтных стволов глубиной 100 и более в условиях этих бокситовых месторождений был применен тампонаж карбимидными смолами, нагнетаемыми через многоствольные скважины (рис. 97), часть из которых бурилась с целью оценки водопроницаемости затампонированных пород, в которых также проводился тампонаж. В результате строительства водозащитной завесы вокруг ствола шахты «Черемуховская» глубиной 1200 м водоприток был снижен почти в 80 раз. Общая стоимость водозащиты, включая гидрогеологические исследования для ее обоснования составила около 1 млн. рублей.

Водозащита околоствольных выработок представляет собой продолжение работ по защите шахтного ствола и имеет большое значение так как должна обеспечить устойчивость уже пройденного и закрепленного ствола и наземных сооружений, а также подготовить благоприятные условия для проходки новых выработок в почти ненарушенном естественном режиме подземных вод. Наиболее эффективен в сложных инженерно-геологических условиях (неустойчивые водоносные породы, напорные воды, несколько водоносных горизонтов) — комбинированный способ осушения водопонизительными скважинами, пройденными с поверхности по контуру защищаемого пространства и иглофильтровой подземной установкой из забоя ствола и околоствольных выработок. Пример такого способа водозащиты — осушение при проходке околоствольных выработок, на шахте «Нелидовская» в Подмосковном угольном бассейне [25]. Если эти выработки проходят в устойчивых скальных породах, их осушение осуществляется только поверхностными водопонизительными скважинами. И наконец, при строительстве рудничных дворов на расстоянии друг от друга более 60—80 м по вертикали необходимо предусматривать самостоятельную водозащитную систему.

Протяженные выработки находятся в начале проходки под защитой осушительных работ, проведенных при строительстве шахтного ствола и околоствольного двора. В дальнейшем, однако, они требуют самостоятельного осушения, характерного для линейных сооружений (разрядных траншей, гуннелей, бортов карьеров).

В зависимости от сложности гидрогеологических условий могут быть приняты 4 схемы водозащиты: а) отвод поступающей воды при проходке выработок в слабоводообильных трещиноватых скальных породах к водосборникам шахты при помощи

щелей, проходимых в почве (это по существу самозащита, выработка является дренажной); б) одноярусная линейная система из водопонизительных скважин, пройденных с поверхности, в случае небольших глубин единственного водоносного горизонта, залегающего в почве выработки); в) одноярусная линейная система из забивных фильтров в кровлю выработки и трубчатых колодцев в ее почву; водоносные горизонты в песчаных породах на небольшом расстоянии от почвы и кровли полезного ископаемого; г) двухъярусная линейная система состоящая из водопонизительных скважин для предварительного снижения уровня (напора) подземных вод и забивных фильтров в почву или кровлю выработки для осушения во время ее строительства.

Водопонизительные скважины в период проходки подземной выработки переоборудуются в сквозные фильтры, спускающие подземную воду в выработку.

В условиях низкой водопроницаемости песчано-глинистых пород их осушение производится системой из двух линейных рядов.

#### 7.4. ВОДОЗАЩИТА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ

Подземное пространство, из которого ведется отработка полезного ископаемого (очистные работы), в отличие от всех рассмотренных до сих пор горных выработок (подземных и открытых) характеризуется одной очень существенной особенностью — за редким исключением. В результате сдвижения подработанного массива горных пород происходит формирование гидравлической связи между отдельными водоносными горизонтами и подземными выработками. Степень нарушения естественного состояния горных пород (расслоение, раскрытие естественных и образование искусственных трещин, вынос рыхлого песчано-глинистого материала и т. д.) зависит от принятой системы и технологии горных работ, поэтому водозащита их, которая сводится к осушению вышележащего массива, гидравлически связанного с очистным пространством и к снижению напоров водоносных горизонтов, залегающих в почве, во избежание опасных водных прорывов должна быть строго привязана к процессу добычи полезного ископаемого.

Наиболее сложна схема осушения шахтных полей, отрабатываемых с полным обрушением кровли. Эта схема еще больше осложняется на угольных месторождениях при горизонтальном залегании пород и наличии нескольких водоносных горизонтов (Подмосковный угольный бассейн), поскольку в пределах мульды сдвижения происходит не только нарушение сплошности вышележащих пород, но и разрушение дренажных систем. Расположение же водопонизительных скважин за пределами

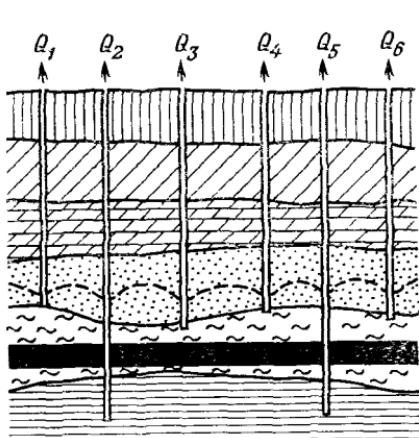


Рис. 98. Схема предварительного осушения очистного пространства

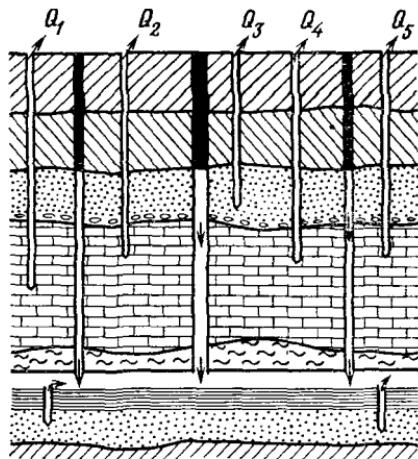


Рис. 99. Система комбинированного осушения очистного пространства

мульды сдвижения дает малый эффект из-за небольшого их радиуса депрессии (влияния).

В период нарезки очистного пространства (до начала процесса сдвижения) происходит строительство контурной системы осушения из поверхностных водопонизительных скважин, заложенных на все водоносные горизонты, раздельно на каждый горизонт или из расчета дренирования нескольких водоносных слоев (рис. 98). В этом случае из-за большого радиуса контурной системы центральная часть дренируемого пространства может оказаться неосушенней. В этой части необходимо заложить куст из нескольких водопонизительных скважин, которые во время сдвижения будут уничтожены. Однако практика эксплуатации систем водопонизительных скважин показывает, что они не полностью осушают водоносные горизонты и, в особенности те из них которые залегают в непосредственной кровле, что приводит к необходимости вести подземное осушение с помощью забивных фильтров и восстающих скважин, проходимых из панельных штреков и специальных камер. Таким образом, на месторождениях с высокой водообильностью создается двух- или трехъярусная контурная схема комбинированного осушения (рис. 99).

Система подземного осушения представляет наибольший интерес для горняка-технолога, поскольку она представляет собой часть горнодобывающего процесса, влияет на его развитие и ее приоризовывают к горным работам. Рассмотрим ее особенности на примере шахт Подмосковного бассейна в разработке В. С. Момчилова [16].

Сооружение подземных дренажных систем может производиться параллельно с горнопроходческими работами или после их окончания (последнее — в случае, когда в кровле или почве проходимого штрека имеются водоупорные слои достаточной мощности, чтобы выполнять роль защитной пачки). Устройство подземного осушения дренаж вод можно осуществлять вслед за проходимым забоем штреков или впереди забоев с некоторым опережением во времени. При осушении из подземных горных выработок используются следующие дренажные устройства: забивные фильтры; восстающие скважины; водопонизительные (самоизливающиеся) скважины; водопоглощающие скважины; наклонно-направленные (опережающие) скважины; дренажные канавы и колодцы.

Необходимость применения того или иного из перечисленных дренажных устройств определяется условиями обводненности участков подготовки выемочных столбов.

Забивные фильтры применяются для осушения надугольных песков, залегающих непосредственно над угольным пластом или на расстоянии от него не более 10 м. В зависимости от условий обводненности и фильтрационных свойств надугольных песков применяют различные типы забивных фильтров: дырчатые (с диаметром отверстий 3—10 мм), щелевые (с продольными щелями длиной 50—60' мм и шириной 1,5—2 мм) и кожуховые. Наиболее широкое распространение на шахтах бассейна имеют дырчатые забивные фильтры с диаметром отверстий 3—4 мм, скважностью 2—5 %. Щелевые фильтры работают примерно так же, как и крупнодырчатые, поэтому имеют ограниченное применение.

Кожуховый забивной фильтр состоит из перфорированной трубы диаметром 16—20 мм и внешней жестяной оболочки.

Межтрубное пространство засыпается гравием размером фракций 1—5 мм. Размер щелей внутренней трубы 20×1,5 мм, а внешней оболочки 20×1 мм. Щели расположены рядами: по окружности внутренней трубы — 8 отверстий в ряду, а по окружности внешней трубы — 16 отверстий. Скважность внутренней перфорации составляет 10 %, внешней — 5 %. Кожуховые фильтры нашли широкое применение на шахтах для осушения мелко- и тонкозернистых песков в безнапорном и напорном водоносных горизонтах. Эти фильтры не дают выноса песка и зарекомендовали себя как надежное средство осушения.

Забивные фильтры устанавливают за забоем горной выработки в процессе прохождения. Расстояние между фильтрами может быть весьма различным — от 2 до 10 м и зависит от характера обводненности, фильтрационных свойств песков, а также сроков осушения. Дебиты забивных фильтров колеблются в значительных пределах — от 0,1 до 10 м³/ч.

Восстающие скважины применяются для осушения надугольных известняков, а также надугольных песков, залегающих над кровлей выработки на расстоянии более 10 м. Скважины диаметром 75—100 мм бурят станком ДС-4 или СБД-2. Станок ДС-4 позволяет бурить скважины длиной 25—30 м без прекращения работ, связанных с прохождением горной выработки.

Размещение восстающих скважин через каждые 50—100 м, как это принято на большинстве шахт бассейна, может быть эффективным только в том случае, когда обводненные пески или известняки имеют повсеместное распространение в пределах всего выемочного столба. Наиболее целесообразно размещать восстающие скважины с учетом данных электроразведки, которая позволяет при минимальных затратах достаточно точно определять участки или зоны максимального обводнения пород кровли угольного пласта, что подтверждается опытом осушения многих шахт бассейна. Бурением восстающих скважин обеспечивается максимальный водозабор из водоносных горизонтов кровли угольного пласта, что предотвращает прорывы подземных вод при ведении очистных работ. Дебит этих скважин достигает 100 м³/ч (в среднем 15—30 м³/ч).

Водопонизительные скважины из горных выработок сооружают с целью осушения подугольных песков и упинских известняков. Скважины бурят диаметром 150—100 мм с промывкой в самых пониженных местах залегания угольного пласта. Опыт бурения водопонизительных скважин из горных выработок подтвердил техническую и экономическую целесообразность их применения при напорах подугольных вод на почву угольного пласта не более 5 м. Дебиты скважин в этих условиях достигают 5—13 м³/ч.

Водопоглощающие скважины из горных выработок применяют для сброса шахтных вод в нижележащие упинские известняки. Данный способ применим при условии, когда уровень упинских вод значительно ниже почвы угольного пласта и известняки способны поглощать воду.

Наклонно-направленные скважины применяют для опережающего осушения надугольных песков, залегающих непосредственно над угольным пластом, а также при незначительной мощности прослоев глин, залегающих между пластом и обводненными песками, когда выработки проходят в условиях весьма сложной гипсометрии угольного пласта. Скважины бурят из забоя штрека станком ДС-4 или СБД-2. Максимальная длина наклонно-направленных скважин не превышает 100 м. Бурение ведется до вскрытия водоносного горизонта, после чего в пески задавливают забивные фильтры с трубами диаметром 35—50 мм. Этот способ осушения успешно применялся на шахтах бассейна для обеспечения дренажа воды впереди забоя проходимой выработки.

Дренажные канавы и колодцы применяются для сбора воды из почвы выработки и ее транспортировки по горным выработкам. Осушение почвы имеет очень большое значение, так как улучшает состояние и сохраняет устойчивость крепи горной выработки.

Поэтому дренажные канавы проводятся почти во всех горных выработках. Глубина их принимается не менее 0,5 м и зависит от характера гипсометрии угольного пласта. По условиям удобства прохождения и чистки максимальная глубина канав не превышает 1,5—2 м. В самых пониженных местах штреков в специальных камерах сооружаются колоды, которые могут быть как перекачными, так и водопонизительными, где устанавливаются насосы для перекачки воды. Глубина колодцев — 4—5, сечение —  $1,5 \times 1,5$  м. Крепление дренажных канав и колодцев обычно деревянное.

На выемочных участках, оборудованных механизированными крепями и очистными комплексами, важно, чтобы дренажная система работала устойчиво, исключались места скопления воды, так как на этих участках ввиду ослабления несущей способности почвы могут быть осложнения при передвижении крепи. Опасным в этом отношении является прохождение комплексами участка наиболее пониженного залегания угольного пласта (мульды). В этих местах, как правило, трудно осуществить полное осушение почвы угольного пласта. Оно может быть достигнуто при условии заложения перекачного колодца не в центре мульды, а на склоне ее по направлению движения лавы.

В данном случае колодец надо проходить несколько глубже, а дренажной канаве придавать уклон от мульды к колодцу, где установлен насос с автоматическим управлением. При этом допустимая максимальная отметка уровня воды в колодце должна быть ниже уровня воды в центре мульды. Опыт подтвердил, что при таком размещении перекачных колодцев скопления воды в мульдах не наблюдается.

Дренажную канаву обычно проходят по всей длине выемочного штрека, однако, если поступление воды в штрек незначительное и имеется не более двух-трех мульд, можно дренажные канавы проходить только на участках, примыкающих к перекачным колодцам, где породы почвы обводнены. Поступающая вода откачивается из колодцев шахтными насосами по трубопроводу до дренажной канавы и далее самотеком поступает в участковый водоотлив. Преимущество этого заключается в том, что исключается обводнение пород почвы угольного пласта водой из дренажной канавы на участках, где штреки являются сухими.

В зависимости от применяемой системы разработки и возможных вариантов подготовки и отработки выемочных столбов

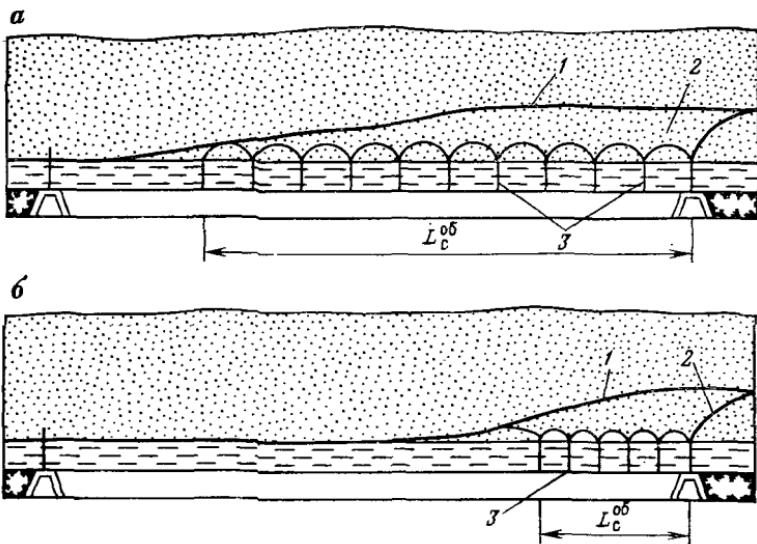


Рис. 100. Позабойно-столбовая схема осушения:

а, б — разрезы в двух взаимно перпендикулярных направлениях. 1 — динамический уровень воды до установки забивных фильтров; 2 — то же, после установки забивных фильтров; 3 — забивные фильтры;  $L_c^{\text{об}}$  — длина обводненной части штрека

на шахтах Подмосковного бассейна используются следующие схемы осушения из подземных горных выработок.

1. Позабойно-столбовая схема осушения (рис. 100) предусматривает использование всех штреков при нарезке первичных выемочных столбов в качестве дренажных. По мере их проходки вслед за забоем для осушения надугольных песков устанавливают забивные фильтры, чем обеспечивают нормальные условия выполнения проходческих работ. При наличии в кровле штреков надежных водоупорных слоев установку забивных фильтров можно производить после окончания нарезных работ. Бурение восстающих скважин для осушения тульских песков или известняков осуществляют после осушения надугольных песков, обычно после окончания горнопроходческих работ.

Проходимые штреки при нарезке промежуточных выемочных столбов не являются дренажными, установка забивных фильтров для осушения надугольных песков производится в концевой части штрека протяженностью 0,3  $L_c^{\text{об}}$ . Восстающие скважины для осушения тульских песков и известняков бурят с учетом данных геофизических исследований по выявлению обводненных зон.

При позабойно-столбовой схеме осушения каждый первичный столб при прочих равных гидрогеологических условиях нарезается в одинаковой обстановке обводненности, так как по

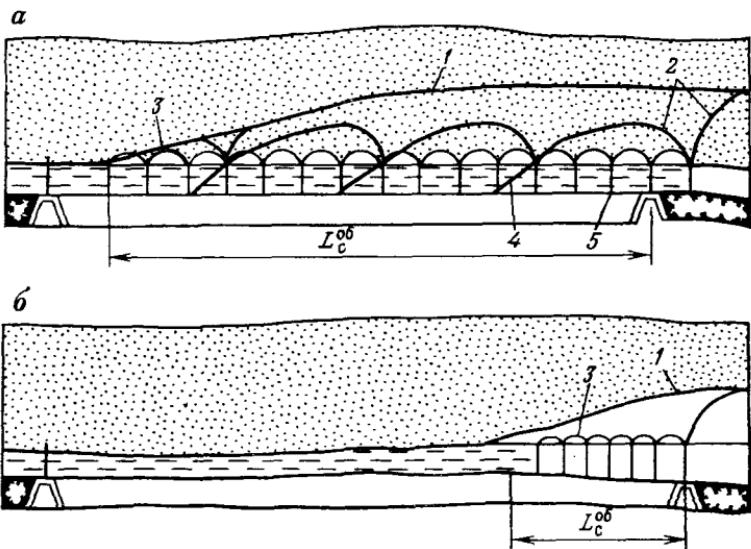


Рис. 101. Опережающе-столбовая схема осушения:

а, б — разрезы в двух взаимно перпендикулярных направлениях.  
 1—3 — динамические уровни воды соответственно до установки забивных фильтров, после бурения наклонно-опережающих скважин и после установки забивных фильтров; 4 — наклонно-опережающие скважины; 5 — забивные фильтры;  $L_c^об$  — длина опережающей дренажной выработки

мере дальнейшей нарезки столбов воронка депрессии расширяется в направлении развития горных работ на одинаковом расстоянии от отрабатываемого столба. Осушение первичных нарезаемых столбов способствует осушению только одного промежуточного столба.

Данная схема осушения широко применяется на шахтах бассейна.

2. Опережающе-столбовая схема осушения (рис. 101) предусматривает вначале нарезку «опережающего» выемочного столба, на расстоянии от отрабатываемого столба равном 2, 3, 4 или 5-кратный длине лавы. Штреки «опережающего» столба — дренажные. Вслед за забоем этих штреков для осушения надугольных песков устанавливаются забивные фильтры. Действием фильтров обеспечиваются требуемые условия для выполнения проходческих работ и осушения надугольных песков на площади между отрабатываемыми и нарезаемым столбами. При этом обводненной остается только концевая часть столба, равная по протяженности (0,3—0,5)  $L_c^об$ .

Следовательно, проходимые штреки при нарезке выемочных столбов на площади между отрабатываемым и ранее нарезанным «опережающим» столбами не являются дренажными, и установка забивных фильтров для осушения надугольных песков

производится только на концевой обводненной части этих столбов.

При повсеместной обводненности надугольных песков забивные фильтры устанавливают по всей длине дренажных штреков ( $0,8-1,0$ )  $L_c^{\text{об}}$ . Восстающие скважины бурят по данным геофизической разведки, а проходку дренажных канав и колодцев осуществляют также как при позабойно-столбовой схеме осушения. Могут быть незначительные изменения в схеме осушения при нарезке столбов на площади, расположенной между отрабатываемыми и «опережающим» столбом с учетом размеров концевой обводненной части, которая зависит от величины расстояния между отрабатываемым и «опережающим» выемочным и столбами. Чем это расстояние больше, тем больше и величина  $L_c^{\text{об}}$  при нарезке столбов на промежуточной площади.

Преимущество опережающе-столбовой схемы состоит в том, что ее применением можно осуществить меры защиты горных работ от подземных вод и обеспечить осушение нескольких промежуточных столбов за счет нарезки одного «опережающего» столба. Этим сокращаются объемы выполнения работ по дренажу воды и сроки осушения на нарезаемый столб, что способствует увеличению интенсивности подготовки и отработки шахтного поля (панели).

3. Оконтуровочно-опережающая схема осушения (рис. 102) предусматривает прохождение на уровне разрезной печи (оконтуровки), параллельно штрекам главных направлений опережающей дренажной выработки. Вслед за забоем этой выра-

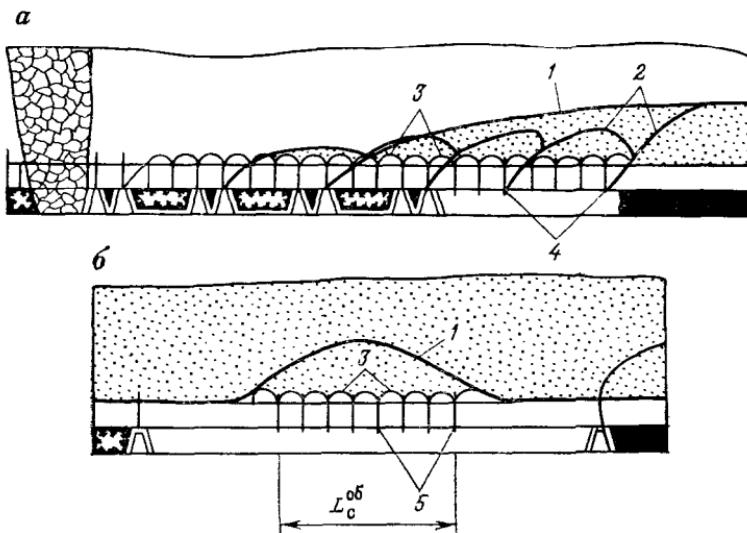


Рис. 102. Оконтуровочно-опережающая схема осушения.

Условные обозначения см. на рис. 101

ботки для осушения надугольных песков бурят наклоненные опережающие скважины на расстоянии, равном 25—50 м (реже более) друг от друга, а между ними устанавливают забивные фильтры. При опережении дренажной оконтуревки и одного из штреков главных направлений ( $L_{\text{опер}} = 300—400$  м) за счет действия в этих выработках дренажных устройств значительно улучшатся условия проходки штреков при нарезке выемочных столбов и перехвата ими водотоков.

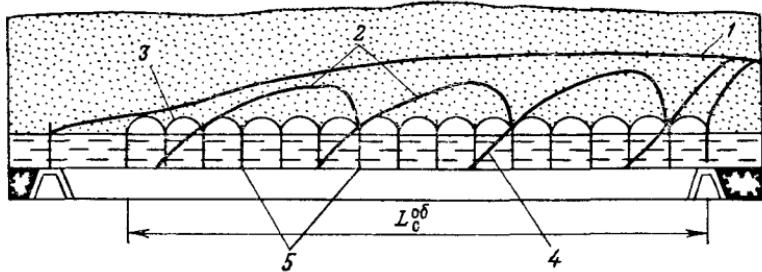
Проходка выемочных штреков осуществляется в условиях, когда обводненной является средняя часть столбов, равная по протяженности примерно  $0,3 L_c^{\text{об}}$ . Для создания требуемых условий проходки в этой части столба устанавливают забивные фильтры. Бурение восстающих скважин осуществляют так же, как и в предыдущих схемах. Проходку дренажных канав и колодцев производят с учетом гипсометрических особенностей подготовляемых столбов, однако схема шахтного водоотлива может быть организована с учетом откачки шахтных вод участковыми водоотливами, расположенными как в штреках главных направлений, так и в опережающей дренажной выработке. Этим значительно сокращается (примерно на половину по сравнению с позабойно-столбовой и опережающей столбовой схемами осушения) пути транспортирования откачиваемой шахтной воды.

Преимущество данной схемы заключается в том, что ни один из нарезаемых выемочных столбов не выполняет функции дренажного. Время на осушение выемочных столбов минимальное, так как концевая часть столба осушается опережающей дренажной выработкой до окончания горнопроходческих работ, а средняя обводненная часть осушается за время, затрачиваемое на проходку штреков проектной длины.

Данная схема осушения применялась на шахтах «Липковская», «Покровская» и других, при этом темпы проходки штреков при нарезке столбов были в 3—4 раза выше среднедостигнутых на этой шахте, а время осушения сократилось примерно в 3—5 раз.

4. Блочно-опережающая схема осушения (рис. 103) предусматривает одновременную проходку «опережающего» выемочного столба и опережающей дренажной выработки. По окончании проходки двух опережающих горных выработок образуется замкнутый блок, изолированный от внешних водотоков. Блок подготавливается на 2, 3 и 4 выемочных столба. Бурением наклонных опережающих скважин на расстоянии 25—50 м друг от друга и установкой между ними забивных фильтров в штреках «опережающего» столба, а также в опережающей дренажной выработке создаются необходимые условия для их проходки и осушения надугольных песков во внутренней (замкнутой) части блока. Обводненной остается лишь центральная

*а*



*б*

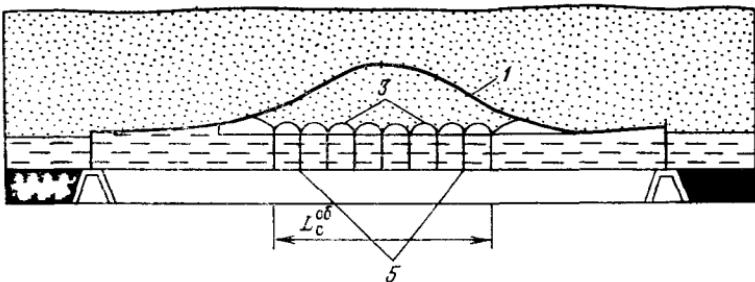


Рис. 103. Блочно-опережающая схема осушения.

Условные обозначения см. на рис. 101

часть блока, имеющая форму окружности или эллипса с диаметром равном примерно  $0,3—0,5 L_c^{\text{об}}$ .

При нарезке выемочных столбов внутри блока, установка забивных фильтров для осушения надугольных песков производится в штреках только на участках центральной обводненной части блока. В зависимости от размеров блока на один «опережающий» выемочный столб приходится 2, 3 или 4 столба, нарезка которых осуществляется на заранее осушенной площади.

Бурение восстающих скважин, проходка дренажных каналов и колодцев, а также организация шахтного водоотлива производятся так же, как и при оконтурочно-опережающей схеме.

Преимущество данной схемы по сравнению с оконтурочно-опережающей в том, что при нарезке выемочных столбов в первом случае в обводнении проходимых штреков принимают участие как динамические, так и статические запасы подземных вод, а во втором — только остаточные статические запасы, имеющиеся на площади центральной обводненной части блока.

Блочно-опережающая схема осушения применялась на шахтах «Прогресс», «Нелидовская», «Покровская» и других, что позволило достичь высоких темпов нарезки выемочных столбов и больших нагрузок на лаву (1000—1500 т угля в сутки).

5. Блочно-постадийная схема осушения (рис. 104) предусматривает постадийную подготовку двух взаимно перпендикулярных выемочных участков А и Б с последующей нарезкой двух или трех столбов. Каждый из этих участков готовится по оконтурочно-опережающей схеме, для чего от точек С, С¹, С² и т. д. проходят опережающие дренажные выработки, сначала для участка Б, затем для участка А. С помощью этих выработок обеспечивается одновременная защита участков А и Б от водотоков со стороны и осушение нарезаемых выемочных столбов. Длина опережающей дренажной выработки не превышает двух-трехкратную длину лавы. На период ее проходки для осушения надугольных песков бурят наклонные опережающие скважины на расстоянии 25—50 м друг от друга, а между ними устанавливают забивные фильтры, чем создают требуемые условия для выполнения проходческих работ и осушения выемочных столбов, расположенных на участках А и Б. Условия обводненности при нарезке выемочных столбов на участках такие же как и при оконтурочно-опережающей схеме.

При блочно-постадийной схеме осушения по мере развития горных работ увеличивается длина выемочных столбов на величину, равную длине отрезка штрека, выполняющего роль оконтурочно-опережающей выработки.

Бурение восстающих скважин, проходка дренажных канав производятся так же, как и в предыдущих схемах. Учитывая, что наиболее обводненная часть приурочена к концевой части подготавливаемых участках А и Б участковые шахтные водоподливы целесообразно сооружать в опережающе-оконтурочных выработках.

Блочно-постадийная схема осушения применяется на шахте «Подмосковная», имеющей самые высокие в бассейне технико-экономические показатели и самую высокую производственную мощность (7000 т в сутки).

Кроме перечисленных, в отдельных случаях находят применение другие схемы, предусматривающие бурение наклонных скважин для сокращения сроков осушения выемочных столбов с повышенной длиной лавы (более 100—150 м), а также наклонных скважин, сооружаемых из пройденного штрека для опережающего осушения параллельно к нему проходимого штрека.

Увязка осушительных и горных работ представляет собой завершающий этап разработки мер защиты шахт от подземных вод. После выбора схем осушения из подземных горных выработок, определения необходимых объемов сооружения дренажных устройств, зная продолжительность их выполнения и сроки, необходимые для достижения требуемого водопонижения (осушения), должна быть проведена проверка на выявление разрыва между осушительными и горными работами.

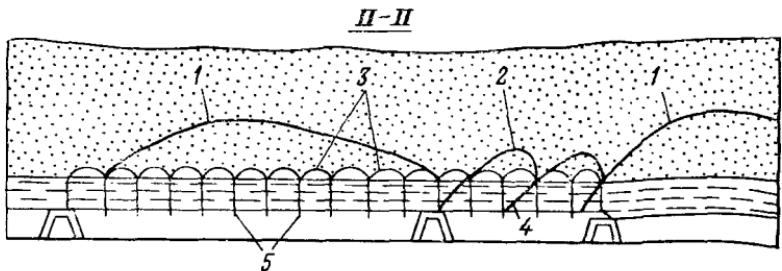
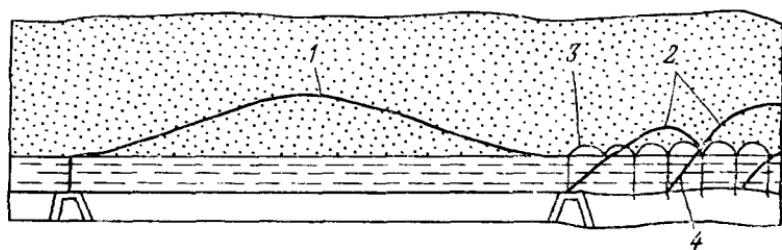
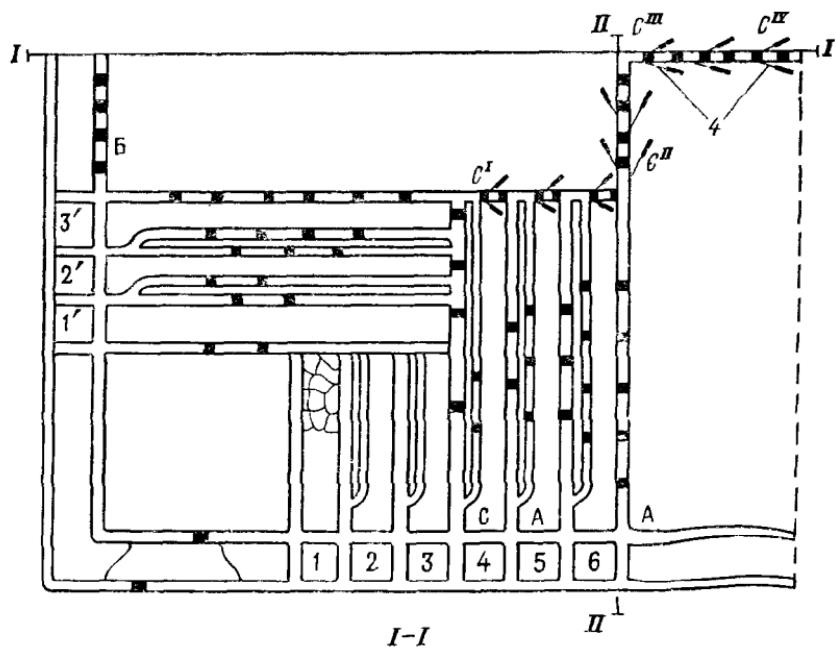


Рис. 104. Блочно-постадийная схема осушения.

Цифры 1–6 — указывают на очередность отработки угольного пласта в блоке А, а цифры 1'–3' — то же в блоке Б. Остальные условные обозначения см. на рис. 101.

Осушительные работы из подземных горных выработок должны быть увязаны со всеми остальными горными работами, которые необходимо выполнить до ввода лав в эксплуатацию.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким требованиям должны удовлетворять мероприятия по защите горных работ от подземных и поверхностных вод?
2. Из каких компонентов складывается водоприток в карьер?
3. Как проводится защита нерабочих бортов от подземных и поверхностных вод?
4. Чем определяются способы дренирования подземных вод в районе рабочего борта?
5. С какой целью и какими способами производится водозащита отвалов?
6. Какими способами проходятся шахтные стволы в водоносных породах?
7. Какие преимущества имеют противофильтрационные завесы в борьбе с обводнением горных выработок?
8. Какова специфика дренирования подземных вод при проходке очистных выработок?

## Глава 8

### ЗАЩИТА (ОХРАНА) ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ ВЛИЯНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

Изучение природных условий месторождений полезных ископаемых, как это видно из предыдущих глав учебника, проводится традиционно с целью оценки и прогноза их влияния на горные работы. Что касается подземных и поверхностных вод, то они и до сих пор рассматриваются как источники всех бед горняков. Их изучение направлено главным образом на получение информации для обоснования наиболее эффективных, с точки зрения горной промышленности, мероприятий по ограничению их влияния на горное производство. Это видно и по характеру рассмотренных в предыдущей главе способов защиты горных работ от воды и по их применению в горнодобывающих районах. Они сводятся к осушению водоносных горизонтов, отводу поверхностных водоемов, использованию гидрографической сети для сброса шахтных и рудничных вод и т. д. Остро встал вопрос о изучении и прогнозе техногенного режима вод под влиянием гидродинамических, гидрохимических и температурных изменений в них [17], их охране и рациональном использовании [14, 15, 18 и др.].

Специалисты, занимающиеся освоением месторождений полезных ископаемых должны быть знакомы с основными источниками техногенного влияния на природные водные объекты и с наиболее распространенными мероприятиями их охраны. Если

ограничиться рассмотрением только изменений подземных и поверхностных вод, то можно говорить о двух главных направлениях: осушении и обводнении территорий и горных пород и изменении гидрохимического режима (минерализации и химического состава).

Осушение происходит в связи с дреинированием подземных вод и отводом поверхностных водоемов и водотоков. Вокруг шахт и карьеров формируется зона техногенного изменения уровня подземных вод, измеряемая в плане десятками и сотнями тысяч гектаров (радиусы депрессионных воронок дренажных систем на карьерах КМА достигают 10 км и более, а по глубине десятками и сотнями метров. Площадь, занимаемая горными выработками на порядок меньше площади этой зоны. Поверхностные водоемы и водотоки или отведены за пределы возможного их влияния на горные работы или сдренированы вместе с подземными водами, с которыми они имеют гидравлическую связь.

Например, некоторые апатитовые и бокситовые рудники, которые дренируют подземные воды, приуроченные к трещиноватым и закарстованным породам и имеют непосредственную гидравлическую связь с озерами, болотами и реками. И. И. Плотников, анализируя водопритоки бокситовых рудников Урала, приходит к выводу о том, что 90 % откачиваемого из рудников количества воды формируется за счет речных вод. Исследованиями установлено, что при освоении североуральских бокситовых рудников на глубине 500—600 м за счет вод рек Сосьвы, Ваграна, Колонги, Калы, расположенных на расстоянии 0,5—2 км от горных разработок, водоприток может составить 70 тыс. м³/ч. Если изолировать поверхностные водотоки, ожидаемый водоприток в рудники составит 18 тыс. м³/ч, что показывает долю участия этих водотоков в формировании рудничного водоотлива. Подобное положение складывается и для рек Тошенка, Мань-Тосемья и Ивдель. Их воды дренируются рудниками Ивдельского района, ожидаемый водоприток которых составит 50 тыс. м³/ч при глубине разработки 600 м (И. И. Плотников, 1988 г.). Известны некоторые данные из практики открытых разработок в ПНР (В. Д. Горлов, 1981). Площадь, нарушенная горными работами, составляет 2100 га, а изменение водного режима наблюдается на площади в 25 тыс. га и ожидается ее увеличение до 120 тыс. га.

В специальной гидрогеологической литературе приведены подобные примеры для многих угольных бассейнов (Донецкий, Кузнецкий, Подмосковный, Днепровский и др.) и рудных месторождений (КМА, Никополь-Марганец, Соколовско-Сарбайское, Горевское, Кривой Рог и др.). Уменьшение или исчезновение воды в поверхностных водоемах обнаруживается без особых затруднений и специальных наблюдений в большинстве

горнодобывающих районов. Обезвоживание земель приводит к резкому снижению их продуктивности, а иногда и разрушению эрозионными и другими механическими и биохимическими процессами.

Вместе с осушением территорий при защите горных работ от воды местами происходит их переувлажнение и заболачивание в результате подтопления и затопления. Эти явления также получили большое распространение и приводят к существенному изменению земель вокруг горных предприятий. Главный источник воды — гидроотвалы различного назначения, из которых воды и различные растворы попадают в зону аэрации (см. гл. 3) и в рудничные воды, которые отводятся по несовершенным водотокам к плохо изолированным отстойникам и другим водоприемникам. Изменения земельных площадей в этом случае еще более существенны. Кроме гибели лесов, сельскохозяйственных угодий, засоления почв, переувлажненные и заболоченные территории становятся еще и непроезжими. Эти изменения также наблюдаются на многих угольных и рудных месторождениях, о них многое уже написано в специальной литературе по охране геологической среды.

Изменение качества (общей минерализации и химического состава) природных вод происходит во всех горнодобывающих районах и, в отличие от рассмотренных выше явлений, не всегда и не сразу становятся очевидными. В зависимости от гидрогеологических условий месторождений и характера и масштаба гидрохимических воздействий различают две группы изменений: а) региональные, протекающие под влиянием внутрипластовых гидродинамических и гидрохимических процессов; б) локальные, вызванные поступлением загрязнителей извне [14].

Региональные изменения качества подземных вод происходят при глубинном водопонижении за счет перетока напорных более минерализованных вод в дренируемые водоносные горизонты, содержащие, как правило, менее минерализованные воды. При этом подготавливаются условия и для локальных изменений, поскольку высокоминерализованные воды, попадая в дренируемый водоносный горизонт, откачиваются на поверхность шахтной (карьерной) водоотливной системой и начинают свой путь «загрязнителя» поверхностных и грунтовых вод. Яркий пример подобного изменения — переток напорных сульфатных минерализованных вод девонских пород на угольных шахтах Подмосковного бассейна в вышелегающий дренируемый водоносный горизонт, приуроченный к каменноугольному пласту. По данным А. А. Гаврюхина, за 15 лет эксплуатации минерализация вод этого горизонта возросла в 1,5—2 раза.

Другая причина передачи минерализации — отжатие и поступление порового раствора из относительных водоупоров

в дренируемые горизонты в связи с ростом эффективных напряжений в водоупорных породах в результате водопонижения (см. гл. 6). Наверное в реальных условиях переток происходит в результате действия нескольких причин, в том числе и за счет перетекания более минерализованных напорных вод при их разгрузке самоизливающимися скважинами и сквозными фильтрами или тектоническими нарушениями, раскрытие которых происходит под влиянием горных работ, а также в результате водных прорывов (см. гл. 6). Изменения состава и минерализации откачиваемых рудничных вод наблюдались и детально исследовались на Белозерском и Коршуновском железорудных месторождениях и на Ленинградском месторождении горючих сланцев [14]. Конечно в ряде случаев может иметь место опреснение откачиваемых шахтных (карьерных) вод за счет поступления в дренируемые водоносные горизонты пресных поверхностных и грунтовых вод, но такой процесс нельзя считать позитивным ибо речь идет о потере пресных вод попадающих под влияние дренажных систем.

В гл. 7 мы уже рассматривали влияние поверхностных водоемов на формирование водопритоков в открытые и подземные выработки. Чем больше это влияние, тем больше вероятность опреснения откачиваемых вод, что и наблюдалось на ряде месторождений. Еще более негативным такое опреснение подземных вод может оказаться в случае, если эти воды сильно минерализованы и имеют доступ к легко растворимым породам (соленосные и гипсонасные). В мировой практике известны случаи уничтожения соляных шахт и даже соляных месторождений в результате поступления пресных поверхностных и подземных вод. Некоторые сооружения, построенные на гипсодержащих породах терпели аварии из-за неравномерных осадок в результате размягчения этих пород поступающими пресными водами.

Защитные мероприятия по охране пресных вод от засоления и минерализованных от опреснения рассматриваются при обосновании водозащиты горных работ. Это предполагает наличие надежной информации о гидрогеологических условиях разрабатываемого месторождения и знание процессов протекающих при взаимодействии подземных и поверхностных вод с горными работами и их водозащитными системами. Особое значение здесь приобретают систематические наблюдения за формированием нового техногенного режима подземных вод, которые должны организовываться технологической службой горного предприятия, а не отдаваться маломощным геолого-маркшейдерским отделам, которые обнаруживают подобные явления чаще всего при аварийных ситуациях.

Локальные изменения гидрохимического режима подземных и поверхностных вод имеют большое значение из-за все расту-

щего числа их источников, связанных не только с горным производством, но и с различными промстоками, сельскохозяйственными, мелиоративными, ирригационными, удобрительными и другими мероприятиями, а также с атмосферными осадками, получившими загрязнение в воздухе или при проникновении через зону аэрации. Главные источники изменения естественного режима природных вод в горнодобывающих районах — прежде всего различные гидротехнические сооружения типа искусственных водохранилищ (запруд), гидроотвалов, хвостохранилищ обогатительных фабрик, отстойников, золоотвалов ТЭЦ (отвалы соленосных пород и пород содержащих различные металлы, солеотвалы на калийных комбинатах, промстоки при добыче полезного ископаемого методом выщелачивания, высоко минерализованные воды, откачиваемые с глубоких горизонтов шахт, рудников и карьеров, шахтные воды, содержащие большое количество механических взвесей и т. д.). Надо отметить, что все перечисленные источники создают, в той или иной мере, дополнительное питание подземных и поверхностных вод, что способствует частичному восстановлению их запасов, т. е. они являются локальными источниками питания. Например фильтрационные потери из гидроотвала «Березов Лог» (КМА) в 1975—1980 гг. достигали 1200—1500 м³/ч, что привело к подъему уровня подземных вод в его основании на 10—15 м [17].

Исследования, проводимые ЛГИ на железорудных, калийных, сланцевых фосфоритовых и угольных месторождениях (подобные исследования проводят ВНИМИ, ВИОГЕМ, ИГД и др.), показывают, что изменения химического состава подземных и поверхностных вод весьма существенны и в ряде случаев превышают предельно допустимые нормативные значения [15]. Рассмотрим некоторые результаты этих исследований на примере наиболее крупных горных предприятий.

Гидроотвал «Березов Лог» расположен в непосредственной близости от дренажного комплекса Южно-Лебединского карьера на трещиноватой мергельно-меловой толще мощностью 20—30 м, под которой залегает регионально выдержаный водоносный горизонт в песках верхнемелового возраста мощностью 30—40 м. Подземные воды дренируются подземной системой и бортами действующих карьеров. Понижения естественного уровня подземных вод на контурах карьеров составляет 120—130 м. Компоненты, загрязняющие воды гидроотвала — ионы группы азота (из аммиачной селитры, применяемой при БВР на карьере) и сульфат-ион из сульфидных минералов, содержащиеся в глинистых породах. О процессе миграции загрязняющих компонентов можно судить по данным химического анализа проб, отобранных из воды гидроотвала и подземных вод (табл. 47). Из этих данных видно, что влияние воды в гидроотвале сказывается на изменение качества подземных

Таблица 47. Данные о химическом составе и минерализации воды (в мг/л) в гидроотвале «Березов Лог» и подземных вод в области его влияния (По Н. Г. Головиной, 1980)

Химические компоненты	Гидроотвал		Скважина на плотине гидроотвала	Дренаж плотины	Водопонизительная скважина карьера
	Восточный борт	Западный борт			
Ca ²⁺	102,0	54,8	284,2	245,0	100,0
Mg ²⁺	13,0	9,6	59,6	37,0	2,3
Na ⁺ + K ⁺	34,5	74,0	149,0	47,0	41,95
NH ₄ ⁺	нет	0,15	0,15	следы	следы
Cl ⁻	23,1	26,7	23,4	23,4	13,4
SO ₄ ²⁻	212,0	175,0	900,0	550,0	110,0
HCO ₃ ⁻	158,6	122,0	378,2	341,6	256,2
NO ₃ ⁻	0,01	21,5	нет	0,3	0,3
NO ₂ ⁻	0,02	1,0	»	нет	нет
SiO ₂	20,0	10,0	28,0	22,5	24,0
H ₂ S	нет	нет	нет	следы	0,5
pH	7,5	7,8	6,8	7,0	6,6
Общая минерализация	540	480	1790	1340	530
Общая жесткость в мг-экв/л	6,2	3,5	19,1	15,3	5,2

вод в непосредственной близости от него (район плотины и ее дренаж) и заключается в повышении содержания катионов, сульфатного и гидрокарбонатного анионов, общей жесткости и общей минерализации. Вместе с тем можно отметить, что содержание нитрат-ионов практически исчезает при прохождении воды через тело плотины гидроотвала.

В этом же районе проводились исследования загрязнения подземных вод хвостохранилищем Лебединского ГОКа куда поступает около 500 тыс. м³/сут технических вод, которые содержат повышенное количество сульфат-иона (95 мг/л) и ионов группы азота (NH₄⁺=0,2, NO₃⁻=15 и NO₂⁻=0,27 мг/л), поступающие за счет аммиачного полиакриламида (ПАА) и аммиачной селитры. Хвостохранилище расположено на трещиноватых меловых породах, поэтому загрязнению подвергается опять же мощный водоносный горизонт, приуроченный к мелу и пескам (общая мощность более 50 м) и дренируемый водопонизительными скважинами и карьерами. Здесь отмечается загрязнение в непосредственной близости от хвостохранилища, а в систему водопонижения поступает «очищенная» вода, т. е. в данных условиях происходит самоочищение воды главным образом денитрификация под влиянием сульфатобактерий.

Загрязняющее воздействие отстойника ТЭЦ Лебединского ГОКа было обнаружено исследованиями ВИОГЕМ и ЛГИ.

Вредные компоненты в отстойнике — взвешенные вещества, нефтепродукты, поверхностно-активные вещества (ПАВ), азот, аммиак, нитраты и нитриты, поступающие с оборотной технической водой ТЭЦ, дренажными водами из карьеров и водопонизительных систем, содержащими повышенные концентрации сульфатов, нитратов и хлоридов. Под влиянием загрязняющего воздействия оказалась р. Осколец, а поскольку ее воды частично дренируются карьерами, то загрязнению подвергаются и подземные воды, откачиваемые на земную поверхность, откуда они попадают в качестве технических вод в гидроотвалы, хвостохранилища, ТЭЦ. Таким образом, все «загрязнители» связаны взаимным влиянием друг с другом, поэтому то самоочищение, которое происходит при инфильтрации через горные породы решает не в полной мере проблему охраны природных вод. По данным ВИОГЕМа концентрация ПАВ в водах р. Осколец достигает 0,25 мг/л, нефтепродуктов 8 мг/л, а в дренажных водах происходит накопление нитратов (13—15 мг/л) и сульфатов (до 350 мг/л).

Подобные примеры загрязнения поверхностных и подземных вод приведены в работе [15] для: 1) Ковдорского железорудного месторождения, разрабатываемого открытым способом, где источниками загрязнения являются хвостохранилища, отвалы вскрышных пород, отстойник карьерных вод, участки складирования горюче-смазочных материалов; 2) Коршуновского железорудного месторождения, на котором кроме поверхностных загрязнителей, перечисленных выше, появляется подземный загрязнитель, связанный с дренированием засоленных вод из горизонта известняков и доломитов с прослойями солей; 3) Кингисепского месторождения фосфоритов, где отходы обогащения руды складируются в хвостохранилищах, содержащих в своих поровых растворах талловые мыла (до 0,75 мг/л) фториды (до 9 мг/л) и фосфаты (3—9 мг/л). Наличие в основании хвостохранилищ озерно-ледниковых суглинисто-супесчаных отложений через которые поток воды направляется в р. Лугу обеспечивает ее самоочищение до попадания в реку (расстояние от хвостохранилищ, расположенных на левом берегу р. Луги до уреза воды в ней составляет 100—300 м). Однако в период весенних паводков уровень грунтовых вод поднимается на 1—1,5 м и попадает в горизонт песков, где самоочищение вод из хвостохранилищ происходит только частично.

Наиболее осязательным в последнее десятилетие стало засоление поверхностных и подземных вод при разработке калийных месторождений Урала и Белоруссии. Отходы калийного производства в виде твердой галитовой сыпучей массы складируются на земной поверхности в солеотвалах высотой 100 м и более, а жидкая соляноглинистая часть, содержащая различные химические реагенты обогащения, заполняет шламохранилища.

лица. По существу, как солеотвалы, так и шламохранилища, представляют собой неограниченные источники засоления и загрязнения подземных и поверхностных вод. В результате исследований Р. Э. Дацко (ЛГИ), Е. В. Мольского и других на Березниковских рудниках №№ 2 и 3, где шламохранилище № 2 было введено в эксплуатацию в 1969 г., были получены следующие данные. В основании залегают суглинки мощностью до 5 м, перекрывающие осадочную толщу пермского возраста, состоящую из трещиноватых песчаников, мергелей и известняков, к которым приурочены подземные воды. Коэффициент фильтрации суглинков до строительства составлял около  $10^{-3}$  м/сут, а для нижележащих трещиноватых пород он измерялся 2—5 м/сут. К началу 1972 г. были обнаружены первые признаки засоления подземных вод на глубину 30—40 м и на расстоянии 250 м от уреза рассолов, а примерно через 1,5 года началось засоление р. Зырянки и Верхнезырянского водохранилища, находящегося в 3,5 км севернее шламохранилища. К настоящему времени сформировались зоны различного состава и минерализации подземных вод — от хлоридных калиево-натриевых (общая минерализация 140—210 г/кг) до хлоридно магниево-кальциевых (общая минерализация 1—50 г/кг) [15].

В районе Солигорских калийных рудников засоление подземных вод началось с момента формирования солеотвалов на земной поверхности. Исследователями Всесоюзного научно-исследовательского института галургии (ВНИИГ) и Белорусского научно-исследовательского геологоразведочного института (БелНИИГРИ) были выявлены степень засоления подземных вод, глубина проникновения рассолов, а также изменение гидрохимической обстановки в поверхностных водоемах.

Анализ техногенного режима подземных и поверхностных вод показывает, что в горнодобывающих районах произошли существенные изменения природных зон под влиянием горных и дренажных работ. В связи с этим, наряду с обоснованием мероприятий по защите горного производства от влияния воды, необходимо рассматривать вопросы защиты природных вод от вредного воздействия этого производства. При этом надо переходить от мероприятий «охраны», которые имеют в большей своей части призывной характер, к мероприятиям «защиты» — реальным инженерным разработкам.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем видится проблема охраны подземных и поверхностных вод в горнодобывающих районах?
2. Каковы источники загрязнения природных вод в горнодобывающих районах? Где они располагаются и как формируются?
3. Какие изменения режима природных вод происходят под влиянием горных и дренажных работ?

## Глава 9

# УПРОЧНЕНИЕ ПОРОД ВОКРУГ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК*

Осушение горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых, а также при строительстве многих сооружений различного назначения нашло широкое применение в инженерной практике и очень часто рассматривается как наиболее эффективное мероприятие по улучшению условий строительства и обеспечению устойчивости горных выработок и других сооружений. Современный подход к рациональному использованию и охране природных ресурсов ставит проблему о поисках новых путей борьбы с неблагоприятными явлениями, возникающими в результате взаимодействия человека с окружающей средой. В этом направлении большие возможности дает искусственное улучшение свойств горных пород, применяемое успешно в строительстве. При этом, в зависимости от геологических условий и характера строительства, это улучшение производится с целью: уменьшения водопроницаемости, увеличения прочности и обеспечения устойчивости горных пород на различные периоды времени.

В горной практике нашли применение следующие методы изменения водопроницаемости, водоустойчивости и прочности пород (технической мелиорации): тампонаж (уплотнение) трещиноватых и закарстованных пород различными растворами; искусственное замораживание слабопроницаемых песков (плынунов) и трещиноватых водоносных пород; закрепление песчаных пород силикатизацией, цементацией, битумизацией; электрохимическое и термическое закрепление слабых глинистых пород. Наряду с этим для повышения устойчивости пород, залегающих в непосредственной близости к горным выработкам (в кровле и почве подземных выработок, в откосах карьеров и других сооружений) применяют специальные способы укрепления штангами, сваями, подпорными стенками и другими удерживающими средствами.

## 9.1. УКРЕПЛЕНИЕ ПОРОД В ОТКОСАХ КАРЬЕРОВ

При разработке месторождений открытым способом для некоторых разновидностей пород возникает необходимость укрепления откосов отдельных уступов и межуступных берм, площадок стояния тяжелых экскаваторов и поверхностей искусственных обнажений.

Укрепление откоса и берм проводилось на многих карьерах, борта которых сложены трещиноватыми и слоистыми (сланце-

* Глава написана совместно с В. Н. Новожиловым.

ватыми) породами по специально разработанной во ВНИМИ Г. Л. Фисенко, М. А. Ревазовым и Э. Л. Галустяном методике. В ней рассматривают четыре группы способов укрепления в зависимости от геологических условий, технологии разработки и поставленной задачи (табл. 48).

В основе механического укрепления неустойчивых откосов лежит принцип перераспределения напряжений в приоткосной зоне. Укрепительные конструкции и сооружения как бы «сшивают» зону неустойчивых пород, прикрепляя ее к массиву устойчивых пород.

Механические способы укрепления откосов объединяют применение одиночных конструкций (сваи, штанги и т. д.) и сплошных сооружений (подпорные стенки, контрабанкеты и т. д.).

Железобетонные сваи и шпоны наиболее просты и надежны для укрепления уступов нерабочих бортов, ослабленных трещинами тектонического происхождения, слоистостью и сланцеватостью и т. д.

Различные модификации свай и шпон приведены на рис. 105.

В практике открытых горных работ чаще всего применяют железобетонные сваи двух типов — набивные и сборные типовые. Набивные сваи изготавливают на месте производства горных работ. Арматурой для этого типа свай служат рельсы или другой прокат, а также готовые арматурные каркасы. Сборные типовые железобетонные сваи промышленного изготовления — сплошные и трубчатые. Диаметр свай изменяется от 200 до 1000 мм и обычно определяется возможностями горного предприятия по диаметрам буровых агрегатов. Сваи могут устанавливаться в один, два и три ряда.

Для обеспечения надежности и эффективной работы сваи, ее необходимо заглублять ниже поверхности скольжения в зону призмы упора. На сильно трещиноватых участках целесообразно проводить заливку бетона вокруг свай, что существенно повышает эффективность ее работы.

По характеру работы в массиве откоса различают сваи, работающие на срез и изгиб. Свайные укрепления рассчитывают по методике ВНИМИ.

Штанговое (анкерное) крепление применяют на карьерах для укрепления откосов уступов, сложенных твердыми трещиноватыми и слоистыми породами (см. рис. 105).

Длина штанг определяется мощностью ослабленной зоны и в практике горных работ целесообразна в пределах 4—5 м; при большей мощности ослабленной зоны (не свыше 30 м) переходят на гибкие тросовые тяжи. При отсутствии монолитных пород и необходимости устройства штанговой крепи необходимо переходить на комплексные методы, например, в сочетании с цементацией.

Таблица 48. Классификация способов укрепления пород (по ВНИМИ с дополнениями)

Группа способов	Способы укрепления	Условия применения
Механическое укрепление	Железобетонных свай и шпилей Штанг и гибких тросовых тяжей Защитных стенок Железобетонных подпорных стенок и конфорсов	Массивы со слаборазвитой трещиноватостью, подсеченные поверхности ослабления, падающими в выработанное пространство под углом 20—50° Крупноблочные маловыветрелые породы, сланцеватые слоистые твердые породы с падением в сторону выемки под углами 40—60° Сильнотрещиноватые, легко выветривающиеся полускальные породы Нарушенные массивы сложного строения, рыхлые увлажненные породы, склонные к оползанию
Упрочнение пород	Цементации Нагнетания укрепляющих растворов Силикатизации Электроосмоса и электрохимической обработки Термической обработки Уплотнения энергией взрыва	Трещиноватые полускальные породы, с трещинами без заполнителя; крупнозернистые и среднезернистые пески Песчаные и лессовые породы при коэффициенте фильтрации 0,1—5 м/сут Глинистые водонасыщенные породы при коэффициенте фильтрации меньше 0,01 м/сут Лессы и лессовидные породы, некоторые разности суглинков и глин с коэффициентом воздухопроницаемости 0,2—0,4 см/с Глинистые и супесчаные породы, лессы и лессовидные породы с коэффициентом пористости $> 1$
Изолирующие и защитные покрытия	Набрызгбетона по металлической сетке Агромелиоративных мероприятий	Сильнотрещиноватые породы, склонные к интенсивному выветриванию или выщелачиванию Откосы сложенные песчано-глинистыми породами
Комбинированные способы	Сочетания механических способов с упрочнением или изоляцией пород	Сложные инженерно-геологические условия

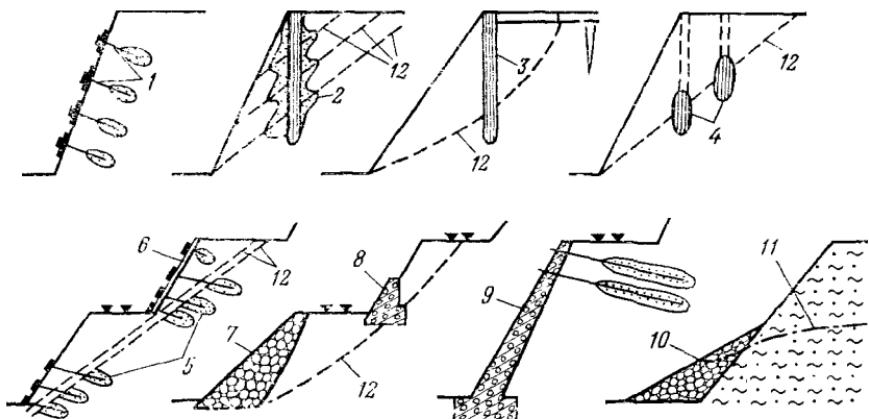


Рис. 105. Механические способы укрепления откосов:

1 — железобетонными штангами; 2 — железобетонными сваями; 3 — трубчатыми сваями; 4 — железобетонными шпанами; 5 — тросовыми тяжами; 6 — подвесными железобетонными стенками; 7 — призмами из твердых пород; 8 — железобетонными подпорными стенками; 9 — железобетонными защитными стенками; 10 — пригрузочной призмой из дренируемого материала; 11 — положение уровня подземных вод; 12 — вероятная поверхность скольжения

Суть этого метода закрепления состоит в том, что в предварительно пробуренную скважину вводят металлическую штангу, конец которой закрепляют бетоном. На другом конце посредством винтового домкрата и гайки создают натяжение. Обычно под гайку подкладывают деревянную, металлическую или бетонную затяжку. Иногда навешивают сетку и покрывают откос торкрет-бетоном. Рекомендуется скважины бурить с таким наклоном, чтобы штанга подходила к поверхности трещины под углом  $\omega = 45 + \varphi/2$ , но не более  $90^\circ$ .

Подпорные и защитные стены, контрфорсы и контрбанкеты относятся к типу сплошных, создающих единый фронт сопротивления сдвигающим усилиям в направлении выработанного пространства (оползни и сполы). Их сооружают на локальных участках протяженностью не более 50 м, когда требуется сохранить бесперебойную работу транспортных берм или других участков борта.

Железобетонные подпорные стены могут сооружаться на прочном основании (скальные и полускальные породы (рис. 106, а) и на относительно слабых породах — на свайном основании (рис. 106, б). Они рассчитываются на сдвиг и опрокидывание.

Контрфорсы, отсыпаемые из местных строительных материалов (породы вскрыши, представленные скальными и полускальными твердыми разностями) выполняют те же задачи, что и подпорные стены. Общее сопротивление контрфорса сдвигаю-

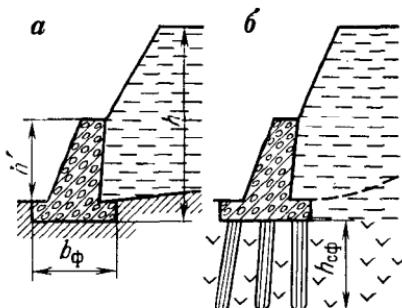
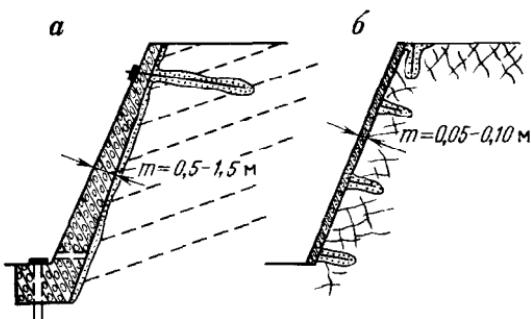


Рис. 106. Подпорная стенка на прочном (а) и слабом (б) основаниях:  $h$  и  $h'$  — высота уступа и стенки;  $b_\phi$  — ширина фундамента;  $h_{\text{сф}}$  — глубина свайного основания

Рис. 107. Защитная (а) и предохранительная подвесная (б) железобетонные стенки



щим усилиям должно быть не менее или равняться оползневому давлению, т. е.  $p_k = F / \operatorname{tg} \varphi_0$ , где  $F$  — давление пород призмы возможного обрушения;  $\varphi_0$  — угол трения контрфорса по породам основания.

Контрфорсы отсыпают на специально подготовленное место: на прочных породах — делают небольшую выемку (0,5—1,0 м), на слабых породах — сооружают свайное основание.

Задача контрфорса — не только удержание пород от сползания в выработанное пространство, но и создание условий для пропуска воды через его тело; в последнем случае необходимо предусмотреть отвод воды, высачивающейся у основания сооружения.

Задирыные железобетонные стенки обычно возводят в пределах высоты одного уступа (рис. 107) с обязательным креплением в основании уступа и установкой анкера в верхней его части. В отличие от массивных железобетонных подпорных стен, толщина защитных стенок небольшая (0,5—1,5 м).

Подвесные задирыные стенки (толщина 0,05—0,10 м) сооружают для изоляции откоса от выветривания с целью предотвращения осыпания пород. На откос устанавливают штанги, на которые навешивают металлическую сетку. Поверхность откоса покрывают набрызг-бетоном. Наиболее дорогой вариант подвесных стенок — затяжка поверхности откоса сборными железобетонными плитами.

Упрочнение пород в откосах и вокруг подземных выработок обычно производят с целью защиты от поступления воды и повышения их устойчивости. Для этого в горной практике применяют: цементацию, глинизацию, битумизацию (горячую и холодную), силикатизацию. Все эти методы были рассмотрены в гл. 7, поэтому здесь остановимся только на специфике укрепления откосов карьеров цементацией, получившей наибольшее распространение для повышения устойчивости трещиноватых пород.

Цементация может проводиться с поверхности уступа и берм (через скважины перфораторного бурения) на глубину 5—7 м, а также и через специальные буровые скважины вглубь массива. Глубинная цементация предназначена для закрепления больших объемов трещиноватых горных пород.

Во всех случаях применения цементных растворов обязательно отсутствие глинистого заполнителя в трещинах упрочняемого массива.

Сроки схватывания цемента должны быть такими, чтобы он успел проникнуть в трещины на заданную глубину. Быстро-схватывающие цементы целесообразны при наличии сильно трещиноватых пород с большим раскрытием трещин; при наличии в породе тонких трещин — рекомендуется применение медленносхватывающих растворов. Для сильно трещиноватых пород рекомендуется применение песчано-цементных растворов. Сроки схватывания цементного раствора можно регулировать путем введения в него добавок соды, хлористого кальция и других реагентов.

Специфика цементации для укрепления уступов карьеров, как показывают работы ВНИМИ, имеет две особенности: 1) она не должна создавать гидроизоляционную завесу, приводящую к росту гидродинамического давления, которое снижает общий эффект упрочнения; 2) устойчивость закрепленного участка борта должна обеспечиваться при параметрах одинаковых с соседними неукрепленными участками; 3) обычно полного заполнения трещин цементным раствором не требуется, что позволяет значительно упростить технологию цементации по сравнению с общепринятыми техническими условиями и нормами, принятыми в строительной практике (промышленное, гидротехническое и другие виды строительства).

При укреплении пород

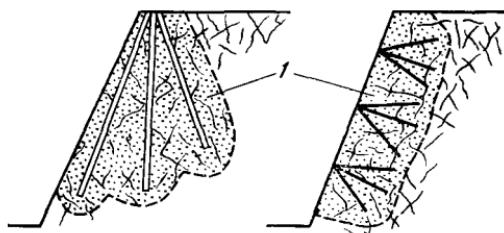


Рис. 108. Схема расположения цементационных скважин.  
1 — зона укрепленных пород

на уступах и бермах нагнетание цементного раствора обычно проводится через скважины расположенные веерообразно (рис. 108). Диаметр скважин 50–200 мм, длина 5–7 м; давление нагнетания не превышает 1,0 МПа (при более глубокой цементации давление достигает 1,5–3,0 МПа).

Для улучшения свойств слабых глинистых пород, обладающих малой водопроницаемостью и низкой прочностью применяют электрохимические способы закрепления: 1) электрообработку постоянным током; 2) электролитическую обработку с введением электролита; 3) электросиликатизацию с введением жидкого стекла и отвердителя.

В процессе электрообработки (длительное воздействие постоянного электрического поля) высокодисперсных глинистых пород происходят процессы коагуляционного структурообразования и электрохимические реакции. В результате электрообработки глинистых пород выделяют 3 зоны упрочненных пород: а) анодную — наиболее осущенную и упрочненную; б) катодную — наиболее обводненную и слабую; в) промежуточную незакрепленную зону, в которой обычно не происходит изменений свойств породы.

Способ электрозакрепления был применен для повышения устойчивости откосов на карьерах Раздольского ПО «Сера» и Яворовского горно-химического завода [4].

При электролитической обработке горных пород происходят процессы необратимого изменения их свойств. Здесь протекают электроосмитические и электрохимические процессы под воздействием поля постоянного тока, усиленные введенными через анод в породу растворами электролитов ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  и др.), образующих в результате химических реакций гидраты окиси кальция и железа (при железных электропроводах), которые представляют собой цементирующие вещества в анодной и катодной зонах.

При электросиликатизации пород (с коэффициентами фильтрации в пределах от 0,01–0,1 м/сут) через инъекторы — электроды нагнетается раствор жидкого стекла (силиката натрия) с отвердителем (например  $\text{CaCl}_2$ ) или без него при одновременном наложении поля постоянного электрического тока. При малой проницаемости обрабатываемых пород (суглинки) жидкое стекло нагнетают в катод, а хлористый кальций — в анод.

Сотрудниками ЛГИ были проведены опытные работы на карьерах Тихвинского глиноземного завода по электрохимическому упрочнению валунных суглинков и карбоновых глин.

Задачи опытных работ сводились к установлению следующих возможностей: а) увеличения несущей способности четвертичных валунных суглинков на рабочих площадках под шагающие экскаваторы (ЭШ-10/60, ЭШ-6/60 и ЭШ-15/90) посредством электроосмоса и электрохимических способов; б) повышения

прочности песчано-глинистых пород карбонового возраста, вскрываемых открытыми горными выработками, как одного из мероприятий по борьбе с оползневыми явлениями.

На нескольких опытных участках были опробованы различные способы упрочнения пород: 1) воздействие электроосмоса (без введения реагентов); 2) обработка электрическим током с введением в породу хлористого кальция; 3) обработка электрическим током с введением в породу силиката натрия; 4) обработка электрическим током с введением в породу мочевинно-формальдегидной смолы (МФ-17); 5) обработка электрическим током с введением в породу хлористого кальция и силиката натрия.

Опытное укрепление пород на каждом участке продолжалось в течение 25—30 дней. Электрический ток подавался к инъекторам непрерывно. Закрепляющие растворы вводили строго определенными порциями. Вода из инъекторов-катодов, откачивалась насосом и сбрасывалась за пределы площадки. После введения последней порции закрепляющего раствора, в течение 6—7 сут продолжали подачу электрического тока для электроосмотического осушения укрепляемого массива.

По окончании работ были пройдены контрольные шурфы и пробурена сеть скважин для уточнения зон укрепленных пород.

Сцепление суглинков в анодной зоне возросло до 0,05—0,06 МПа, в катодной — осталось без изменения.

Для обработки 1 м³ суглинков было израсходовано около 36 квт·ч электроэнергии, 9 кг растворов жидкого стекла с плотностью 1,5 г/см³ и 3 кг хлористого кальция. Прочность на сжатие достигала 11—12 МПа.

В конкретных инженерно-геологических условиях карьерных полей в Тихвинском горно-промышленном районе при электрохимическом способе укрепления глинистых пород наиболее эффективна их обработка с введением в породу хлористого кальция и жидкого стекла.

Термическое упрочнение позволяет полностью ликвидировать просадочные свойства лессов и высокопористых глинистых пород, резко повысить их прочность и водоустойчивость. Оно проводится двумя способами.

Первый способ, разработанный Н. А. Осташевым, заключается в нагнетании в горную породу через скважины горячего воздуха (600—900 °С). Прогрев упрочняемой толщи происходит за счет движения нагретого воздуха по порам и макропорам породы. Избыточное давление (0,1—0,2 МПа) в скважинах позволяет создавать вокруг них в радиусе 1—1,5 м столб упрочненных пород.

Второй способ, разработанный И. М. Литвиновым, Ф. А. Беляковым и П. К. Черкасовым, основан на термической и термохимической обработке горных пород горючими газообразными

продуктами горения, обогащенными, при необходимости, специальными химическими добавками (термохимический способ). Сжигание горючего производится или в устье скважины или в толще укрепляемой породы. Газообразные раскаленные продукты горения фильтруются через поры породы, прогревая ее до заданной температуры. Избыточное давление в скважинах в пределах 0,025—0,05 МПа позволяет эффективно упрочнять просадочные грунты.

При термической обработке горных пород скважины могут располагаться вертикально, горизонтально и наклонно, что определяется конкретными условиями на укрепляемом участке. Диаметр скважин составляет 150—22 мм, глубина — 6—15 м, расстояние между ними — 2—2,5 м. Продолжительность термообработки 1 м³ породы, в зависимости от его влажности и физического состояния составляет от 2 до 7 сут; затраты на 1 м³ закрепленной породы — 5—10 руб.

На рабочих площадках, бермах и откосах уступов наблюдается выветривание горных пород, интенсивность которого зависит от состава пород и времени действия агентов выветривания. В скальных и полускальных породах под влиянием разгрузки, буровзрывных работ и агентов выветривания образуются трещины, которые и приводят к возникновению осыпей и реже вывалов.

Наиболее эффективные способы защиты откосов в этом случае — устройство различных изолирующих покрытий: железобетонных подвесных стенок, набрызг-бетона, полимерных покрытий и др.

При наличии в откосах и рабочих площадках полускальных водонеустойчивых разностей (мергелей, слабых песчаников, аргиллитов и т. д.) наиболее целесообразным является покрытие их слоем песка или гравия мощностью 25—30 см. Набухающие разности глинистых пород пригружаются хорошо фильтрующим материалом (см. гл. 5 и 7).

Для песчано-глинистых откосов, главный процесс их разрушения — не выветривание, а размыв — образование промоин под воздействием атмосферных осадков и талых весенних вод. Главное мероприятие по предотвращению размыва — регулирование поверхностного стока и отвод воды в специальные водохранилища и водоспуски.

Довольно часто в практике открытых работ встречаются такие условия, когда требуется сочетание нескольких способов упрочнения горных пород.

По данным ВНИМИ, наиболее часто применяют железобетонные сваи со штангами или тросовыми тяжами (рис. 109, а), железобетонные сваи или штанги с цементацией пород (рис. 109, б), железобетонные сваи или штанги с изоляцией поверхности откоса (рис. 109, в, г, д).

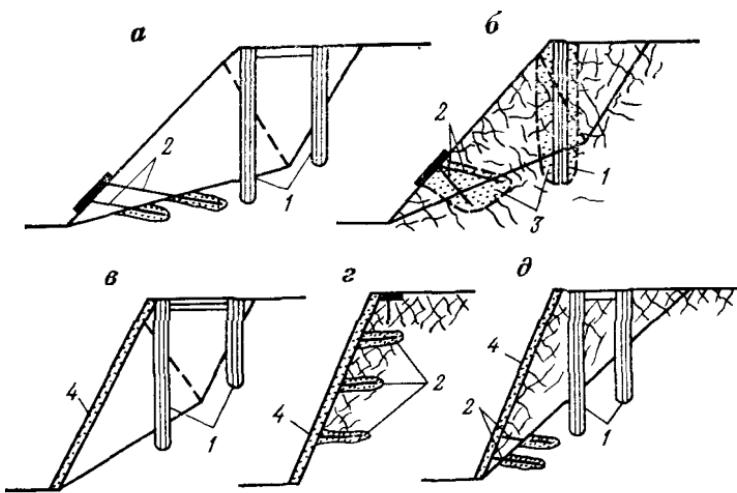


Рис. 109. Комбинированное укрепление откосов:

1 — железобетонные сваи; 2 — анкеры; 3 — зацементированный массив; 4 — подвесная железобетонная стена

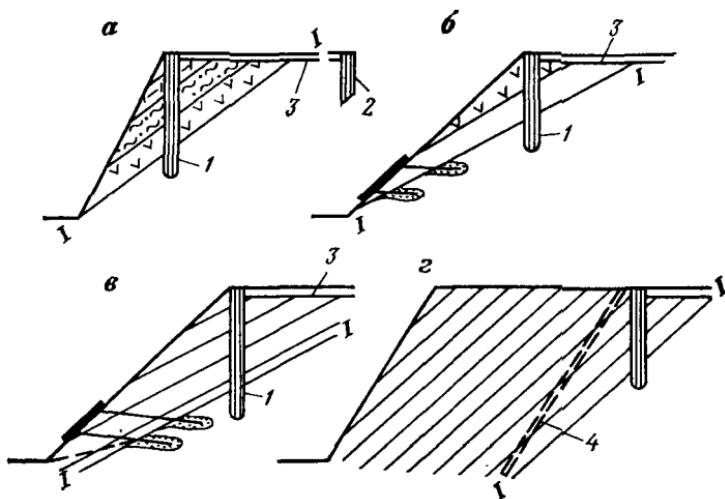


Рис. 110. Укрепление слоистых откосов при подрезке контактов наслоения пород:

1 — железобетонные сваи; 2 — анкер; 3 — анкерная тяга; 4 — отрезная щель

Большие трудности в поддержании в устойчивом состоянии уступов бортов довольно часто возникают при отработке слоистых массивов горных пород, когда горными выработками подрезаются слабые контакты и ослабленные зоны. В таких случаях также целесообразно применять комбинированные способы укрепления откосов уступов.

При полной подрезке контактных зон (рис. 110, *а*), уступ укрепляют железобетонными сваями большого сечения. Сваи закрепляют в монолитные породы ниже ослабленной зоны, а в верхней части через анкерную тягу связывают с анкером. Пологие откосы уступов в верхней части закрепляют железобетонными сваями, а в нижней — штангами (рис. 110, *б*). При частичной подрезке контакта, сначала просчитывают возможность сдвижения по контакту I—I, а затем принимают решение об укреплении откоса уступа (рис. 110, *в*).

При постановке уступов в предельное положение (нерабочий борт) в ряде случаев необходимо расчетом оценить устойчивость откоса уступа, а если необходимо, то провести свайное укрепление и заоткоску с применением отрезной щели (рис. 110, *г*) или наклонными скважинами.

## 9.2. УКРЕПЛЕНИЕ ПОРОД В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Рассмотренные выше примеры относятся к открытым разработкам, однако изложенные способы упрочнения пород применяются и при строительстве и охране шахтных стволов и других капитальных подземных выработок, что нашло отражение в технической литературе под названием «специальных способов проходки горных выработок» [24]. Как правило, применяемые мероприятия по улучшению условий горных работ выполняют одновременно две функции: защиты от подземных вод и повышения устойчивости пород вокруг выработок, поэтому они и были рассмотрены в гл. 7. Вместе с тем для обеспечения устойчивости пород в непосредственной почве и кровле подземных выработок применяют штанговое и свайное крепления в слоистых осадочных породах, цементацию трещиноватых пород, укрепление взрывом глинистых пород и др.

Штанговое крепление слоистых пород почвы, механизма которого рассмотрен в работе [9], применяют с целью обеспечения совместного деформирования слоистой системы. Штанги длиной 1—2 м и диаметром 25—50 мм из металла, железобетона или дерева располагаются рядами в почве выработки на расстоянии 0,7—1,5 м (рис. 111, *а*). Как показывает И. Л. Черняк [29], применение штангового крепления на шахтах Донецкого, Подмосковного и Карагандинского бассейнов уменьшает скорость пучения почвы в 1,5—2 раза только в начальный период

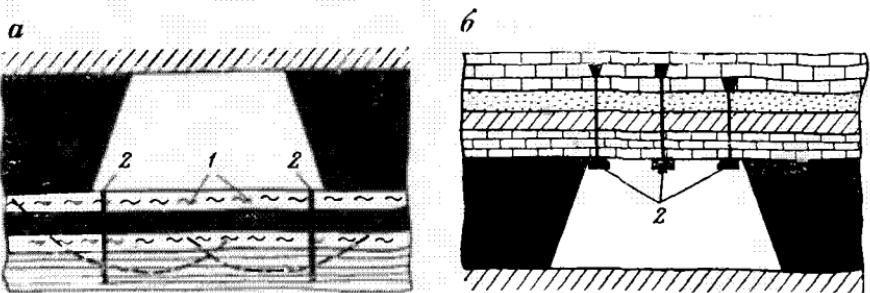


Рис. 111. Штанговое крепление слоистых пород в почве (а) и кровле (б) подземных выработок:

1 — потенциальная поверхность выдавливания пород; 2 — штанги крепления

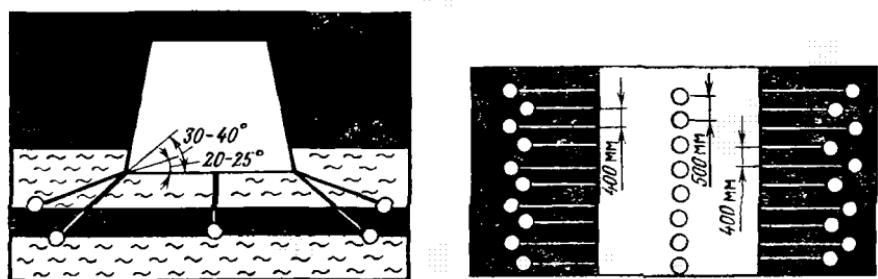


Рис. 112. Расположение зарядов ВВ для уплотнения глинистых пород в почве штранка шахты «Щекинская»

его работы. Впоследствии закрепленные и незакрепленные участки ведут себя одинаково.

Применение штангового крепления в кровле подземных выработок обеспечивает устойчивость нижнего слоя пород, который деформируется под влиянием собственного веса и дает положительный эффект если замок штанги попадает в прочную монолитную породу, к которой можно «подвесить» неустойчивый слой (см. рис. 111, б). Штанги металлические, длиной 1—2 м, диаметром 20—30 мм располагаются рядами, расстояние между которыми определяется расчетом. Широкое применение штангового крепления нашло на шахтах ПО «Ленинградсланец».

Уплотнение глинистых пород камуфлетным взрывом с целью повышения устойчивости почвы выработок получило распространение в Подмосковном угольном бассейне. Исследования И. А. Черняка показывают, что плотность и прочность глин увеличиваются на расстоянии от стенки равном двум радиусам полосы взрыва. Причем уменьшение пористости глин на 2—3 %

(естественная пористость составляет 45—47 %) приводило к росту сцепления в 1,7—1,8 раза и угла внутреннего трения на 4°. Расположение зарядов ВВ в почве штрека показано на рис. 112 на примере шахты «Щекинская».

Все мероприятия по улучшению свойств горных пород обосновываются детальной информацией о геологических условиях, в которых проходится выработка, и проектируются с учетом технологий горных работ, продолжительности срока службы выработок, требований безопасности людей и т. д. Наличие подземных вод в почве или кровле существенно ухудшает работу укрепляющих мероприятий, а иногда приводит к полной потере ожидаемого эффекта.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Когда в горной практике появляется необходимость закрепления пород?
2. Какие методы применяют для улучшения свойств горных пород различного состава и состояния?
3. Как укрепляют трещиноватые породы в откосах карьеров?
4. Как можно улучшить песчаноглинистые породы в откосах?
5. Какие методы применяют для закрепления пород в почве и кровле подземных выработок?
6. Как проходят шахтные стволы в неустойчивых водоносных породах?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. Арсентьев А. И., Букин И. Ю., Мироненко В. А. Устойчивость бортов и осушение карьеров. М., Недра, 1982.
2. Бондарик Г. К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М., Недра, 1981.
3. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. М., Недра, 1980.
4. Гайдик А. М., Певзнер М. Е., Смирнов Б. В. Прогнозная оценка инженерно-геологических условий разработки месторождений твердых полезных ископаемых. М., Недра, 1983.
5. Галустян Э. Л. Управление геомеханическими процессами в карьерах. М., Недра, 1980.
6. Гальперин А. М., Ильин А. И., Стрельцов В. И. Управление долговременной устойчивостью откосов на карьерах. М., Недра, 1985.
7. Голодковская Г. А., Матула И., Шаумян Л. В. Инженерно-геологическая типизация и изучение скальных массивов. М., Изд-во МГУ, 1987.
8. Дацко Р. Э. Механика горных пород. М., Недра, 1987.
9. Иванов И. П. Инженерно-геологические исследования в горном деле. Л., Недра, 1987.
10. Иванов И. П. Инженерно-геологические условия месторождений полезных ископаемых. Л., Изд-во ЛГИ, 1982.
11. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых. М., Недра, 1986.
12. Каган А. А. Инженерно-геологическое прогнозирование. М., Недра, 1984.

13. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. Л., Недра, 1986.
14. Мироненко В. А., Румынин В. Г., Учаев В. К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1980.
15. Мироненко В. А., Мольский Е. В., Румынин В. Г. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1988.
16. Момчилов В. С. Подземное осушение шахт Подмосковного бассейна. М., ЦНИИИуголь, 1987, вып. 8, 30 с.
17. Норватов Ю. А. Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод. Л., Недра, 1988.
18. Охрана геологической среды от отрицательного воздействия предприятий горнодобывающего профиля. М., изд-во МГУ, 1984.
19. Охрана окружающей среды при проектировании и эксплуатации рудников/Под ред. В. М. Мосинец. М., Недра, 1981.
20. Панюков П. Н. Инженерная геология. М., Недра, 1978.
21. Плотников Н. И., Рогинец И. И. Гидрогеология рудных месторождений. М., Недра, 1987.
22. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М., Недра, 1985.
23. Свержевский В. Л. О трещинах в породах вокруг горных выработок. — Уголь, 1979, № 12, с. 42—46.
24. Смирняков В. В., Тихомиров О. В. Специальные способы проходки подземных выработок. М., Недра, 1985.
25. Справочник по осушению горных пород/Под ред. И. К. Станченко. М., Недра, 1984.
26. Томаков П. И., Коваленко В. С. Рациональное землепользование при открытых горных работах. М., Недра, 1984.
27. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. Л., Недра, 1989.
28. Фисенко Г. Л., Пустовойтова Т. К., Кагермазова С. В. Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий угольных месторождений, подлежащих разработке открытым способом. Л., Недра, 1986.
29. Черняк И. Л. Предотвращение пучения почвы горных выработок. М., Недра, 1978.
30. Чернышев С. В. Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов. М., Недра, 1984.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

---

- Абразивность 74  
Агрессивность воды 109, 112  
Азимут падения 48  
— простирания 48  
Акустическая жесткость 76  
Анизотропия свойств 14, 31, 79  
Анкерное крепление 285  
Аномальный разрез 50  
Атмосферные осадки 99, 121  
Барражные завесы 247  
Безнапорные воды 102, 103  
Безопасная глубина 219  
Безопасный напор 104, 213  
Блочность пород 63  
Болото 157  
Борт карьера 141, 166, 175, 285  
Буримость 75  
Буроизрывные работы 194, 229  
Влагоемкость 43  
Внезапные выбросы 198, 228, 230  
Внешние отвалы 187, 260  
Внутренние отвалы 189, 258  
Водное зеркало 101  
Водные прорывы 198, 209, 233  
Водовмещающие породы 100  
Водозащитная дамба 312  
Водозащитные сооружения 242, 236  
Водонасыщение 43  
Водонепроницаемый экран 191  
Водообильность шахт 121  
Водоотдача 44  
Водопонизительная скважина 261, 264, 267  
Водорасторимые минералы 25  
Водоприток 116, 120, 236, 241  
Водопоглощающая скважина 246, 267  
Водосборник 338  
Водоупор 101, 103  
Вторичная консолидация 84, 227  
Выбросы угля и газа 11, 228  
Вывалы 206  
Выдавливание пород 199, 204  
Выпор 259  
Высота откоса (уступа) 145, 173, 178, 226  
Газодинамические явления 230  
Газоносность 10  
Газопроницаемость 57, 59  
Глинистый тампонаж 250  
Гидравлический градиент 100, 116  
Гидроизогипсы 100  
Гидроизопьезы 104  
Горизонтальная скважина 246
- Гориный удар 198, 228  
Гравитационная вода 98  
Гравитационное поле 129  
Гравитационные явления 141  
Грунтовый водоносный горизонт 100  
Давление гидродинамическое 14, 183  
— гидростатическое 142, 183  
— горное 194, 199  
— набухания 55, 168, 174  
— природное 166, 204  
Дамба обвалования 190  
Действительная скорость воды 101  
Дендриспиральная воронка 176  
Детальная разведка 7  
Диаграмма сопротивления сдвигу 68  
— трещиноватости 49, 50  
Динамический модуль 75  
— уровень воды 269, 270  
Динамические явления 228  
Длительная прочность 84  
Дренаж опережающий 270, 273  
— пластовый 260  
— подземный 265  
Дренажные системы 242  
Дренажно-пригрузочное устройство 242, 252  
Естественная влажность 41, 42  
— плотность 39  
— прочность 69  
Естественное напряженное состояние 11, 128, 168, 205  
— физическое состояние 18, 38, 167, 205  
Железобетонная стена 287, 288  
Железорудное месторождение 115  
Жесткость воды 110  
Забивные фильтры 257, 266, 269  
Загрязнение воды 97, 278, 282  
Закон Гука 75, 222  
— Дарси 57, 113  
— Кулоня 69, 152  
— уплотнения 80, 221  
Зона аэрации 98  
— обнаружения 217  
Иглофильтр 262  
Интегральная кривая 27  
Инъекционная ПФЗ 249  
Искусственная трещиноватость 52, 194  
Истираемость 74  
Капиллярность 44  
Карстовые формы 149  
Карта гидроизогипс 100  
— гидроизопьез 104  
Квазиноднородная среда 64, 144

- Кислотность воды 111  
 Компрессионная кривая 79, 222  
 Компрессионное сжатие 79, 222  
 Консолидация 84, 224  
 Коэффициент бокового распора 77  
 — водообилитности 119  
 — внутреннего трения 67  
 — выветрелости 47  
 — консолидации 83, 223  
 — крепости 74  
 — пластичности 78  
 — проницаемости 57  
**Сквозной фильтр** 243, 265  
 Скорость фильтрации 102  
 Слабый контакт 9, 176  
 — слой 72, 179  
 Сланцеватость 47, 54  
 Слоистость 47, 178  
 Слоистая толща 176  
 Совершенный колодец 116  
 Солеотвал 191  
 Солеотходы 191  
 Сопротивление резанию 74  
 — сдвигу 70, 178  
 Статический модуль 79  
 Ствол (шахтный) 9, 116, 104, 281  
 Стреляние пород 286, 210  
 Степень выветрелости 46  
 Структурная прочность 69, 167  
 Структурные связи 32, 34  
 Сцепление пород 69, 70  
 Сульфатная агрессивность 112  
 Сиффозия 153  
 Сфера влияния 162  
 Сыпучая среда 18  
**Тампонажная завеса** 261  
 Твердость пород 74  
 Тектоническая трещиноватость 47  
 Тектонические напряжения 11, 131, 47  
 — нарушения 124  
 Теплоемкость 60  
 Термическое закрепление 291  
 Термокарст 159, 160  
 Техногенные факторы 200  
 Трапешейныс ПФЗ 247  
 Точечная диаграмма 48  
 Трещинная пустотность 48  
 Турбулентная фильтрация 113  
 Тяжелая вода 107  
 Углекислые воды 109, 112  
 Угол внутреннего трения 70, 203, 185  
 — наклона борта 175, 184  
 — откоса 175, 203  
 Удельная теплоемкость 60  
 Удельное электросопротивление 61  
 Удельный вес 38, 174, 185  
 — водоприток 120, 251, 256  
 Уплотнение пород 79, 167, 222  
 Упругие деформации 69, 81  
 Уровень подземных вод 101, 232, 263  
 Устойчивость бортов 9, 12, 173, 180  
 — выработок 11  
 — кровли 194  
 — отвалов 189, 259  
 — пород 194, 196  
 — почвы 194  
 — сооружений 12  
 Уступ 173, 284, 288  
**Оползень** 8, 13, 141, 175, 187  
 Оползневая поверхность 8, 13, 184  
 Оседание земной поверхности 218  
 Основание отвалов 189  
 Остаточные деформации 75, 79  
 Относительная деформация 75  
 — плотность 41  
 Очистное пространство 265  
 Очистные работы 200, 264  
 Плоскость отслоения 37  
 — сдвига 68  
**Плывины** 152, 209  
 Поверхность ослабления 53  
 — скольжения 8, 13, 184  
 Поверхностный приток 236  
 Поверхностное осушение 242  
 Подземный водоприток 238  
 Подпорная стена 288  
 Подработка водных объектов 217  
 Ползучесть 84  
 Показатель выветрелости 46  
 Показатели свойств 20  
 Поровые воды 99  
 Поровое давление 223  
 Почва выработки 199, 202, 294  
 Пределы пластичности 42  
 Прессометрия 75  
 Противофильтрационные завесы 247  
 Природное состояние 69, 167  
 Прогноз 15, 179, 190, 201  
 Прорывы воды и глини 198, 209, 233  
 Пучение 199, 204  
**Рабочий борт** 252  
 Радиационные свойства 61  
 Радиус влияния 117, 240  
 Разуплотнение 35  
 Разупрочнение 35, 56, 171  
 Расслоение 53  
 Расчет водопритоков 116, 239  
 — ПФЗ 251  
 — устойчивости 144, 178, 183, 207  
 Роза трещиноватости 49  
 Рудничные воды 110  
**Свайная ПФЗ** 248  
 Свайное крепление 294  
 Свободная вода 97, 98  
 Свободная углекислота 108, 109  
 Сдвиг 68, 203, 135  
 Сдвижение 210, 218

- Сейсмическое воздействие 139  
— ускорение 136, 137  
**Коэффициент концентрации напряжений** 193  
— пористости 41, 80, 222  
— Пуассона 76, 81, 221  
— разупрочнения 55, 170  
— сейсмичности 137  
— сжимаемости 80, 224  
— структурного ослабления 72, 207  
— теплопроводности 60  
— температуропроводности 60  
— удельной трещиноватости 48  
**Коэффициент уплотнения** 80, 224  
— уплотняемости 41  
— упругого отпора 77  
— фильтрации 57, 113, 239  
— хрупкости 78  
**Кровля** выработки 207  
**Ламинарный режим** 113  
**Линейный дренаж** 263  
**Линейный закон фильтрации** 113  
**Линии тока** 115  
**Масштабный фактор** 62  
— эффект 62  
**Межмерзлотные воды** 106  
**Механические свойства** 62,  
— способы укрепления 286  
**Минеральный состав** 20  
**Мицелла** 33  
**Многоствольная скважина** 262  
**Многолетнемерзлые породы** 20  
**Модуль общих деформаций** 78, 81, 222  
— продольной упругости 75  
— сдвига 77  
**Морозное пучение** 159  
**Морфология оползней** 141, 176  
**Мульда сдвижения** 217  
**Набухание** 55, 168, 173  
**Наклонные скважины** 262  
**Наледи** 160  
**Напорные воды** 103, 117  
**Напорный горизонт** 104, 117, 241  
**Насосы** 110  
Начальный градиент 586, 114, 223  
Неоднородность 14, 64  
Нерабочий борт 242  
Несовершенный вертикальный колодец 116  
Обводненность 119  
Область взаимодействия 63  
Область напоров 104  
— питания 101, 104  
— разгрузки 101, 104  
Общий водоприток 241  
Однородность 14, 64  
Факторы оползневого процесса 143, 179  
Физическое состояние пород 38  
Фильтрационная консолидация 83  
Фильтрационный поток 113  
Хвостохранилище 16  
Шахтийный ствол 12, 16, 261  
Шламохранилище 16  
Штанговое крепление 205  
Щель 298  
Щелевая ПФЗ 248  
Эффективное давление (напряжение) 83  
**Язык оплыивания** 253

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

Предисловие . . . . .	3
<b>Часть I. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ</b>	5
Глава 1. Основные природные факторы, определяющие условия разработки месторождений полезных ископаемых . . . . .	5
1.1. Понятие об инженерно-геологических условиях . . . . .	5
1.2. Компоненты инженерно-геологических условий . . . . .	7
1.3. Неоднородность, анизотропность и изменчивость инженерно-геологических условий территорий . . . . .	14
Контрольные вопросы . . . . .	15
<b>Глава 2. Инженерно-геологическая оценка горных пород . . . . .</b>	16
2.1. Горные породы — среда для горных работ и сооружений . . . . .	16
2.2. Инженерно-геологическая оценка состава и строения горных пород . . . . .	20
2.2.1. Состав . . . . .	20
2.2.2. Структура и текстура . . . . .	29
2.2.3. Структурные связи . . . . .	32
2.2.4. Сложение и условия залегания . . . . .	35
2.3. Физическое состояние горных пород . . . . .	38
2.3.1. Плотность и пористость . . . . .	39
2.3.2. Влажность и влагоемкость . . . . .	41
2.3.3. Выветрелость и трещиноватость . . . . .	45
2.4. Водоустойчивость и водопроницаемость . . . . .	54
2.5. Теплофизические, электрические, магнитные и радиационные свойства . . . . .	59
2.6. Прочность и деформируемость горных пород . . . . .	62
2.7. Реологические свойства . . . . .	84
2.8. Инженерно-геологическая характеристика горных пород угольных и рудных месторождений . . . . .	86
Контрольные вопросы . . . . .	92
<b>Глава 3. Подземные воды месторождений полезных ископаемых . . . . .</b>	92
3.1. Влияние подземных вод на условия разработки месторождений . . . . .	92
3.2. Виды воды в горных породах . . . . .	97
3.3. Характеристика подземных вод по условиям их залегания . . . . .	99
3.3.1. Верховодка . . . . .	99
3.3.2. Грунтовые воды . . . . .	101
3.3.3. Артезианские (напорные) воды . . . . .	103
3.3.4. Подземные воды зоны многолетней мерзлоты . . . . .	105
3.4. Физические свойства и химический состав подземных вод . . . . .	106
3.5. Основные законы движения подземных вод . . . . .	112
3.6. Условия формирования обводненности горных выработок . . . . .	119
3.7. Гидрогеологические условия месторождений полезных ископаемых . . . . .	125
Контрольные вопросы . . . . .	128
	301

<b>Глава 4. Геодинамические условия</b>	128
4.1. Естественное напряженное состояние горных пород	128
4.2. Классификация геологических процессов и явлений	132
4.3. Тектонические движения	134
4.4. Сейсмические явления	135
4.5. Оползни	141
4.6. Карст	146
4.7. Плынущие и супфозия	152
4.8. Селевые явления	155
4.9. Заболачивание территории	157
4.10. Мерзлотные явления	159
Контрольные вопросы	161
<b>Часть II. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ С ГОРНЫМИ РАБОТАМИ И СООРУЖЕНИЯМИ</b>	162
<b>Глава 5. Взаимодействие открытых горных работ и сооружений с геологической средой</b>	162
5.1. Специфика взаимодействия	162
5.2. Изменение геологических условий при открытой разработке месторождений	164
5.3. Оползневые явления на бортах карьеров	175
5.4. Условия и факторы, определяющие устойчивость бортов	178
5.5. Оползневые явления на откосах отвалов	187
Контрольные вопросы	192
<b>Глава 6. Взаимодействие подземных горных работ с геологической средой</b>	192
6.1. Изменение геологических условий под влиянием подземных горных выработок	192
6.2. Геологические явления в подземных выработках	197
Контрольные вопросы	231
<b>Часть III. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ УСЛОВИЙ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ И ОХРАНЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ</b>	232
<b>Глава 7. Защита горных выработок от воды</b>	232
7.1. Основные требования к водозащитным мероприятиям	232
7.2. Защита карьеров от воды	235
7.2.1. Определение водопритока в карьер	236
7.2.2. Водозащита нерабочего борта	242
7.2.3. Водозащита рабочего борта	252
7.2.4. Водозащита отвалов	258
7.3. Водозащита при строительстве капитальных выработок	261
7.4. Водозащита выемочных участков	264
Контрольные вопросы	276
<b>Глава 8. Защита (охрана) водных объектов от влияния горных работ</b>	276
Контрольные вопросы	283
<b>Глава 9. Упрочнение пород вокруг горных выработок</b>	284
9.1. Укрепление пород в откосах карьеров	284
9.2. Укрепление пород в подземных выработках	294
Контрольные вопросы	296
<b>Список литературы</b>	297
<b>Предметный указатель</b>	298

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Иванов Иван Пенкович

**ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Заведующий редакцией *Л. Н. Аважанская*

Редактор издательства *Л. А. Дубкова*

Технический редактор *Л. Г. Лаврентьев*

Корректор *И. П. Розанова*

ИБ № 8097

---

Сдано в набор 12.09.89. Подписано в печать 11.12.89. Т-17066. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Гарнитура Литературная. Печать высокая. Усл.-печ. л. 19,0. Усл.-кр.-отт. 19,0. Уч.-изд. л. 20,27. Тираж 4650 экз. Заказ 1725/2145—4. Цена 1 руб.

---

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»,  
125047 Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Государственного комитета СССР по печати. 191126 Ленинград, Социалистическая ул., 14.