

И. И. Павлов

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

«Недра»

П. Н. Панюков

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ

*Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР в качестве учебника для
студентов горных специальностей вузов*



Панюков П. Н. Инженерная геология. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Недра», 1978, 296 с

В книге изложены основы инженерной геологии в соответствии с требованиями программы данного курса для горных специальностей вузов. В ней освещены вопросы инженерной петрографии, инженерной геологии массивов пород и инженерной геодинамики в объеме, необходимом для определения инженерно-геологических условий вскрытия и разработки месторождений полезных ископаемых и оценки этих условий с горнотехнологических позиций. Рассмотрены вопросы теории и методики прогнозирования инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых на разных стадиях их разведки и освоения.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов горных специальностей вузов. Она может быть также использована широким кругом специалистов, занимающихся инженерной геологией.

Табл. 48, ил. 77, список лит. — 64 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1962 г. была издана книга проф. Пантелеймона Николаевича Панюкова «Инженерная геология», утвержденная в качестве учебного пособия для студентов технологических специальностей горных вузов. Написанная с учетом состояния инженерно-геологических исследований в смежных отраслях и базирующаяся на фундаментальных исследованиях автора по проблемам инженерной геологии глубинных зон земной коры, книга получила широкое признание как в СССР, так и за рубежом. К настоящему времени книга является библиографической редкостью, поэтому, принимая во внимание потребности в специализированном курсе инженерной геологии для горных вузов, возникла необходимость в подготовке новой книги.

Недостаточное знание инженерно-геологических условий горно-строительных и горно-эксплуатационных работ и неумение оценивать их с горнотехнологических позиций — более опасно, чем сами неблагоприятные горно-геологические условия. Элемент неожиданности при возникновении различного рода нарушений нормальных условий производства работ в большинстве случаев является следствием этого. Вместе с тем всесторонний учет инженерно-геологических факторов таит в себе значительные резервы и возможности улучшения технико-экономических показателей работы горного предприятия и сохранения этих показателей в сложных горно-геологических условиях и на значительных глубинах залегания полезного ископаемого.

Этим определяется место и значение инженерной геологии в высшем горном образовании как науки, изучающей горно-геологические условия освоения и преобразования геологической среды.

Изложению основ инженерной геологии применительно к задачам, решаемым в практике горно-строительных и горно-эксплуатационных работ, и посвящена эта книга. Она предназначена в качестве учебника для студентов горных специальностей вузов. В ней учтен многолетний опыт постановки и ведения данного курса в Московском ордена Трудового Красного Знамени горном институте и достижения в разработке теоретических основ данной дисциплины за последние 15 лет после выхода учебного пособия «Инженерная геология».

Работа над рукописью была прервана безвременной кончиной автора. Пантелеймоном Николаевичем Панюковым была в основном завершена подготовка разделов «Основы инженерной петрографии» и «Инженерная геология массивов пород». В соответствии

с планом рукописи работа над III («Основы инженерной геодинамики») и IV («Прогнозирование инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых») разделами выполнялась его учениками и последователями.

В написании книги принимали участие: Л. В. Гончарова (§ 1—4 гл. 5), В. П. Костовецкий (§ 7 гл. 6), А. М. Гальперин (§ 2, 3 гл. 16; гл. 19; § 4 гл. 20), Д. М. Казикаев (§ 1, 2, 3 гл. 17; § 3 гл. 18; § 1, 2 гл. 20), Н. П. Верещагин (§ 6 гл. 17). В. С. Зайцев (§ 7, 8 гл. 17; § 3 гл. 20), М. Е. Певзнер (§ 1, 2 гл. 18; § 2 гл. 20).

Подготовка рукописи к изданию осуществлялась А. М. Гальпериным, В. С. Зайцевым, М. П. Панюковой, Л. Ф. Корчагиной.

А. М. ГАЛЬПЕРИН, В. С. ЗАЙЦЕВ

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Задачи и объекты инженерно-геологических исследований

Инженерная геология — наука геологического цикла. В ее задачу входит исследование геологических условий строительства и эксплуатации сооружений различного назначения и типа. Эти условия, называемые инженерно-геологическими, определяются геологическим строением и геодинамическим состоянием территории. Соответственно, основными объектами инженерно-геологических исследований являются горные породы, толщи (массивы) горных пород, а также геологические процессы и так называемые инженерно-геологические (т. е. вызванные инженерной деятельностью человека) явления, вместе характеризующие геодинамическое состояние территории.

В горно-строительной и горно-эксплуатационной практике инженерно-геологические условия часто называют горно-геологическими. Этим подчеркивается специфичность вопросов и задач инженерной геологии в горном деле, где на первый план выступают задачи по оценке горных пород и их массивов как среды производства инженерных работ и размещения сооружений. Горные породы и слагаемые ими массивы являются здесь главными конструктивными элементами самих сооружений — горных выработок. Надежность последних в работе и совокупность мероприятий по поддержанию их в работоспособном состоянии зависят от геолого-структурных характеристик массивов пород. Кроме того, горные выработки как инженерные сооружения находятся в состоянии строительства на протяжении всего периода работы горного предприятия, что сказывается на масштабах воздействия на состояние массивов пород и, в частности, на формах проявления и активности так называемых (по А. А. Скочинскому) горно-геологических явлений. С последними связаны все наиболее серьезные нарушения непрерывности технологического процесса, условий безопасности ведения горных работ, а также значительные потери полезного ископаемого при его добыче.

Горный инженер должен ориентироваться в вопросах инженерной геологии и уметь пользоваться инженерно-геологическими данными при решении горно-строительных и горно-эксплуатационных задач. Этим определяется значение инженерно-геологических знаний в подготовке горных инженеров и в практической их деятельности.

§ 2. К истории инженерно-геологических знаний

Первые шаги в эволюции инженерно-геологических знаний тесно связаны с практикой инженерных изысканий под различные виды наземного и тоннельного строительства. Они осуществлялись с участием геологов. Инженеры-строители ставили перед ними задачи по оценке прочности и устойчивости горных пород в основаниях сооружений; степени опасности для сооружений геологических процессов, вызываемых главным образом разрушительной работой вод поверхностного и подземного стока и землетрясений; устойчивости естественных склонов; условий осушения болотных массивов и т. п. Перечисленные и подобные им задачи решались геологами в основном на базе общегеологических исследований с привлечением опыта эксплуатации сооружений в различных геологических условиях. Рекомендации геологов носили описательный, качественный характер, что затрудняло их непосредственное использование в проектных решениях.

Опыт геологических исследований под строительство освещался в многочисленных разрозненных публикациях * и обобщался в руководствах по технической геологии. В последних давались краткое и доступное для строителей изложение основ геологии и примеры приложения геологических знаний для решения отдельных задач строительства **.

Не на высоком уровне находилась теория фундаментостроения и теория производства земляных (в том числе горных) работ. Многие аварии сооружений и крупные непредвиденные перерасходы, особенно участвовавшие с ростом масштабов и темпов строительства, вызвали необходимость разработки научных основ строительного дела, связанных с грунтами. Теоретической базой этих разработок послужили классические работы К. Кулона по статике сыпучих тел (1773 г.) и Ж. Буссинеска о распределении напряжений в упругой среде от сосредоточенной нагрузки (1885 г.). За сравнительно короткий срок были заложены основы нового раздела прикладной механики — механики грунтов ***. В частности, были получены решения некоторых задач по оценке несущей способности естественных оснований сооружений, условий устойчивости откосов земляных масс, давлению горных пород на подпорные стенки и крепь горных выработок и др. Были достигнуты определенные успехи также в разработке и

* Многие из них не потеряли своего значения и до сих пор. Таковы, например, работы Ф. Ю. Левинсон-Лессинга, А. П. Павлова, Н. И. Каракаша, И. В. Мушкетова и многих других выдающихся геологов.

** Среди руководств по технической геологии следует выделить книги Brauns'a (1875 г.), Вагнера (1887 г.), И. В. Мушкетова (1887 г.), Stiny (1922 г.), Р. Кейлхакка (1923 г.).

*** Грунтами в механике грунтов называют несцементированные (глинистые и н. раздельнозернистые) горные породы, прочность которых во много раз ниже прочности минеральных составляющих (Н. А. Цытович).

внедрении в практику инженерно-геологических изысканий экспериментальных методов изучения строительных свойств грунтов.

Но механика грунтов оперирует идеализированными телами. Как показала практика строительства, степень различия между идеализированными телами, изучаемыми в механике грунтов, и геологическими телами, исследуемыми геологическими науками, настолько велика, что в ряде случаев «геологическое строение и геологические процессы полностью противоречат выводам механики грунтов» (В. Пек, 1962 г.). Многочисленные ограничения в применении теории и математического аппарата механики грунтов оказались настолько обычными, что напрашивался вывод о необходимости замены строгих аналитических решений практических задач решениями по эмпирическим или полумэмпирическим формулам и правилам. Это обстоятельство повысило интерес к постановке исследований поведения горных пород в натуральных условиях (*in situ*). Большое значение начали придавать также методам моделирования явлений взаимодействия сооружений с геологической средой.

Такого рода нововведения позволили установить, что поведение горных пород в сфере воздействия инженерных работ и сооружений является совокупным результатом совместной работы единой системы: геологическая среда (массив пород) — сооружение. Этот вывод находит свое подтверждение и в результатах натуральных наблюдений. Поэтому появилась необходимость объединения научно-технических средств геологии и механики грунтов, на что в свое время указывали многие представители геологических наук. Так, Ф. Ю. Левинсон-Лессинг еще в начале текущего века писал, что не должно быть конкуренции и разобщенности между геологической наукой и инженерным искусством, а требуется содружество.

Данный вывод стал достоянием представителей технических наук главным образом после появления работ К. Терцаги (1925, 1929 гг.). По словам Н. В. Бобкова, его публикации являлись новым в технической литературе и особенно ценным, так как только при таком (геологическом — П. П.) подходе можно правильно оценивать строительные свойства грунтов и избежать многих ошибок. На базе этих идей возникают геотехнические направления в строительной механике. В историческом аспекте оно было первым шагом к сближению, а затем объединению научно-технических средств геологии и механики грунтов.

Однако рамки геотехники, ее научная база оказались довольно узкими в связи с тем, что сторонники геотехнического направления толковали роль геологических факторов весьма ограничено, в частности, для выяснения причин своеобразного поведения некоторых грунтов. В остальном они оставались в плену механики грунтов с ее неоправданными упрощениями и идеализацией геологических объектов. Основная задача по объединению

геологического и инженерного направления, поставленная всем предшествующим ходом развития теории и практики строительства, таким образом, оказалась вне поля зрения геотехников.

Комплексное, сочетающее в себе использование инженерных и геологических методов решение практических задач стало возможным и действительно происходит в рамках и н ж е н е р н о й г е о л о г и и.

§ 3. Структура и задачи инженерной геологии

Современная инженерная геология* — это разветвленная область знаний, объединяющая учение о свойствах горных пород и их толщ (массивов) как оснований сооружений, среды производства инженерных работ и размещения сооружений, а также учение о геодинамических условиях их возведения и эксплуатации. По характеру задач и методам их решения она является наукой сопредельной между науками геологического и инженерно-строительного циклов.

Основными разделами инженерной геологии являются учение об инженерно-геологических свойствах горных пород (инженерная петрография) и массивов пород (инженерная геология массивов пород)** и инженерная геодинамика.

В инженерной петрографии исследуются свойства горных пород, определяющие их поведение в сфере воздействия инженерных работ и сооружений. В теоретическом плане главной проблемой является изучение природы свойств горных пород, знание которой составляет научную базу для их прогнозирования и управления этими свойствами.

Инженерная геология массивов пород имеет своей задачей изучение толщ горных пород как среды производства инженерных (в частности, горных) работ и размещения сооружений. Роль данного раздела инженерной геологии возрастает по мере увеличения масштабов подземного строительства, особенно горно-строительных и горно-эксплуатационных работ. В теоретическом плане она решает задачи по инженерно-геологической типизации и оценке свойств массивов горных пород.

В инженерной геодинамике исследуются геологические процессы и инженерно-геологические явления, определяющие геодинамическую обстановку возведения и эксплуатации сооружений. В теоретическом плане в ней разрабатываются научные основы и методы оценки геодинамических условий строительства и про-

* Термин инженерная геология, по-видимому, впервые появился в работе Н. Ries'a и Т. Watson'a, изданной под таким же наименованием в 1915 г. Однако в ней, как и в ряде последующих публикаций, инженерная геология рассматривается как геология для инженеров, т. е. как техническая геология.

** Эти разделы инженерной геологии под такими наименованиями были введены в курс «Инженерная геология» [40].

гноза изменений этих условий под воздействием инженерных работ и сооружений.

Перечисленные элементы инженерно-геологических условий изменяются в пространстве не как угодно, а подчиняясь закономерностям регионально-геологического характера. Исследование этих закономерностей является главной теоретической задачей региональной инженерной геологии. Знание этих закономерностей лежит в основе типизации инженерно-геологических условий строительства и районирования территории.

Наконец, вопросы теории и практики решения инженерно-геологических задач применительно к различным видам хозяйственного освоения территории составляют предмет специальной инженерной геологии.

В первых трех разделах данного курса изложены основы инженерной петрографии, инженерной геологии массивов пород и инженерной геодинамики. Некоторые положения региональной инженерной геологии освещены также в главах этих разделов. Последний (четвертый) раздел посвящен краткой характеристике методов прогнозирования инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых.

Инженерная геология из отрасли геологии, «трактующей вопросы приложения геологии к инженерному делу» (Ф. П. Саваренский, 1939 г.), постепенно становилась самостоятельной наукой в системе геологических знаний, всесторонне изучающей условия инженерного освоения и преобразования геологической среды. Новая, геотехнологическая тенденция в эволюции инженерно-геологических знаний приобрела особую роль в связи с тем, что «хозяйственная и промышленная деятельность по своему масштабу и значению сделалась сравнимой с процессами в самой природе» (А. Е. Ферсман, 1939 г.), а ее последствия приобретают первостепенное значение для этой деятельности (А. В. Сидоренко, 1967 г.). Так, в результате осуществления мероприятий по защите горных выработок от затопления иссушаются подземные источники водоснабжения целых районов, выходят из сферы сельскохозяйственного использования ценные земельные угодья, наблюдается активизация ветровой эрозии и захоронение почвенно-растительного покрова на огромных площадях продуктами дефляции породных масс отвалов и терриконов и т. д. Предвидение характера и масштабов изменений природно-геологических условий с целью определения народнохозяйственных последствий необходимы для обоснования рационального проекта разработки месторождения, объемов работ по охране государственного земельного и водного фондов, рекультивации (восстановления) площадей, использованных под карьеры и шахтные поля, отвалы и терриконы.

Перед инженерной геологией в горном деле стоят комплексные по своему характеру проблемы. Независимо от их характера

они могут и должны решаться на базе глубокого знания инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых и с использованием арсенала современных теоретических и экспериментальных средств как геологических, так и технических наук [35].

Новые тенденции в эволюции инженерно-геологических знаний в нашей стране были подготовлены выдающимися успехами грунтоведения — науки о природе физических свойств горных пород и методах управления этими свойствами (П. А. Земляченский, М. М. Филатов, В. В. Охотин, В. А. Приклонский, Е. М. Сергеев и их школы), учения о геологических процессах и инженерно-геологических явлениях, влияющих на условия возведения и эксплуатации сооружений (Ф. П. Саваренский, В. А. Приклонский и др.), и, наконец, развитием механики грунтов и успехами технических наук вообще [18, 61].

Эти тенденции в инженерной геологии нашли реализацию в теории и практике управления состоянием и свойствами горных пород — т. е. в проблемах технической мелиорации горных пород (М. М. Филатов, С. С. Морозов и др.), прогноза и управления инженерно-геологическими явлениями, а в некоторых случаях и использования последних в целях интенсификации, например, некоторых горнотехнологических операций (в частности, в практике управления горным давлением) и, наконец, в начинаниях в области целенаправленного изменения геодинамических и гидрогеологических условий в районах интенсивного хозяйственного освоения больших территорий [48, 53].

ГЛАВА 1

**ПРИНЦИПЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО
ИЗУЧЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД**

**§ 1. Горные породы как объекты
инженерно-геологических исследований**

Отделение горной породы от массива, управление состоянием обнажений горных выработок и другие горнотехнологические операции представляют собой различные виды воздействий на горные породы. Очевидно, эффективность этих операций во многом зависит от знания свойств горных пород и использования этих знаний при проектировании техники и технологии производства горных работ. Этим определяется значение инженерно-петрографических исследований для горного производства. Задачей последних является исследование свойств горных пород и тех факторов, от которых они зависят. Наибольшее внимание в горном деле привлекают механические свойства горных пород. Они используются, например, при определении силовых и энергетических параметров разрушения горных пород, расчетах крепи горных выработок, несущей способности естественных оснований сооружений и горнотехнологического оборудования.

Механические свойства горной породы характеризуют способность ее так или иначе реагировать на внешние силовые (механические) воздействия и реализовать энергию этих воздействий в различного рода механические процессы (сжатие, растяжение, сдвиг и т. д.) и сопровождающие их явления. Они выражаются зависимостями, связывающими отдельные параметры свойств (например, сжимаемости или сопротивляемости разрушению) с параметрами деформационного процесса (давления, температуры и т. д.). Эти зависимости получают экспериментально методами, заимствованными у прикладной механики. Анализ и обобщение результатов экспериментов обычно выполняются на теоретической базе механики сплошных сред с использованием функциональных моделей идеально-упругой среды Гука, пластического тела Сен-Венана, упруго-вязкой жидкости Максвелла, Бингама и др.

Отдельные фрагменты этих моделей устанавливаются путем выявления корреляционных связей между показателями деформационных свойств и деформационного процесса. Однако функциональные модели сплошных идеальных сред лишь отдаленно отражают закономерности деформационных процессов в горных породах. Это объясняется тем, что деформационное поведение горных пород зависит от ряда факторов геолого-петрографической природы.

§ 2. Факториальные характеристики (признаки) и физические свойства горных пород

К числу основных геолого-петрографических факторов, от которых зависят свойства горных пород, относятся вещественный состав, структура минерального скелета и порового пространства и структурные (межминеральные) связи. Перечисленные характеристики (признаки) следует называть ф а к т о р и а л ь н ы м и, т. е. определяющими свойства горных пород. Они формируются в процессе породообразования и поэтому несут в себе глубокий отпечаток способа (генезиса) и условий породообразования.

Геолого-генетические исследования горных пород позволяют выявить важные для инженерной практики особенности горных пород как геологически самостоятельных тел. К числу таких особенностей относятся формы и условия залегания в земной коре, текстура (сложение), а также некоторые общие, в том числе региональные закономерности изменений факториальных характеристик. Очевидно, что влияние геолого-генетических факторов на свойства горных пород не непосредственное, а через соответствующие изменения факториальных характеристик.

В зависимости от степени влияния факториальных характеристик свойства горных пород условно подразделяются на структурно чувствительные (т. е. в основном зависящие от структурных факторов) и на свойства, в большей мере зависящие от вещественного (минерального, химического, фазового) состава. К первым относятся механические и акустические свойства, ко вторым — электронные (электрические, магнитные, оптические).

Механические свойства обнаруживают тесную зависимость как от структуры горной породы (минерального скелета, порового пространства и межминеральных структурных связей), так и от кристаллохимических особенностей минеральных составляющих (главным образом от структурного мотива, природы межатомных связей и параметров кристаллической решетки минералов).

§ 3. Межминеральные (структурные) связи в горных породах

Межминеральные связи в горных породах осуществляются с помощью поверхностных и объемных сил или же тех и других совместно.

Природа поверхностных сил такова. Атомы в кристаллической решетке минералов испытывают значительные силы притяжения от атомов, находящихся в объеме минерала. В поверхностном слое эти силы не компенсированы с внешней стороны. Вследствие этого поверхностные слои минералов обладают избыточной энергией. Она известна как поверхностная энергия.

Удельная плотность поверхностной энергии зависит от индивидуальных кристаллохимических особенностей минералов и в первую очередь от атомного (ионного) состава поверхностного слоя и ретикулярной плотности этого слоя. Она прямо пропорциональна удельной поверхности минеральных зерен. Степень реализации этой энергии в энергию межминеральных связей прямо пропорциональна удельной площади микроконтактов минеральных зерен и обратно пропорциональна четвертой степени расстояния между ними.

При непосредственном, истинном контакте, когда ширина зазора между зернами по площадкам микроконтактов близка к межатомным расстояниям в кристаллических решетках минералов *, устанавливаются прочные и жесткие связи кристаллизационной природы. Породы в этом случае обладают свойствами, присущими твердым телам.

При большом отдалении минеральных зерен межминеральные связи кристаллизационной природы вытесняются связями цементационными и водноколлоидной природы. В первом случае прочность межзерновых связей приближается к прочности связей кристаллизационной природы, но она зависит от химического состава и сродства цементирующего вещества и вещества минеральных составляющих, а также от типа цементации. Связи водноколлоидной природы присущи высокодисперсным минеральным системам, к которым относятся глинистые породы. Для них характерна высокая удельная поверхность твердой (минеральной) фазы и соответственно высокая плотность удельной поверхностной энергии, в существенной мере израсходованная на формирование ионно-гидратной оболочки минеральных частиц. Истинные контакты в них вытеснены контактами ионно-гидратных пленок (пластинизированные контакты). В результате жесткие и прочные связи в данных породах полностью или частично вытеснены связями эластичными, прочность которых на несколько порядков ниже прочности связей кристаллизационной природы и цементационных.

У минеральных систем, состоящих из обломочных компонентов с малой удельной поверхностью частиц и соответственно малой плотностью поверхностной энергии, роль поверхностных сил в межминеральных связях исчезающе мала. Взаимодействие обломочных составляющих в таких системах осуществляется

* Порядок межатомных расстояний в кристаллических решетках минералов 10^{-8} — 10^{-10} см.

посредством сил трения по площадкам микроконтактов и зацепления (статического сопротивления изменению первоначального положения частиц), т. е. силами механической природы. Породы с таким типом межминеральных связей представляют собой род сыпучих тел. Таковы раздельнозернистые породы.

Таким образом, главные черты горных пород как физических тел в основном определяются природой межминеральных структурных связей.

§ 4. Вещественный состав горных пород

В составе горных пород различают твердую (минеральную) и подвижные (жидкую и газовую) фазы. Петрографическая принадлежность горной породы, а также важнейшие ее свойства как физического тела определяются составом и строением минеральной фазы. Определенное влияние на свойства горных пород оказывают подвижные (особенно жидкая) фазы, заполняющие поровое пространство. Так, поровые водные растворы служат причиной снижения прочности (размягчаемости) горных пород, объемных деформаций (разбухания и усадки) высокодисперсных пород, появления ионной электропроводимости и т. д.

Вещество минеральной фазы горных пород индивидуализировано в виде минералов в абсолютном большинстве кристаллического строения. Свойства минеральных составляющих оказывают непосредственное влияние на свойства горных пород.

В свою очередь свойства минералов зависят от их химического состава и внутреннего строения. Химический состав является ведущей стороной природы свойств минералов, поэтому основные типы минералов разделяют на классы по характеру электроотрицательности анионов (величина электроотрицательности определяется энергией притяжения атомов валентных электронов при соединении с другим атомом).

Внутреннее строение минералов при данных термодинамических условиях зависит от химического состава, состояния химических связей и свойств атомов. Структурными особенностями обусловлены наиболее существенные различия в свойствах минералов данного класса. Поэтому подклассы минералов выделяются по структурным признакам.

Межатомные связи в кристаллических решетках минералов обеспечиваются силами межатомных взаимодействий различной природы. Выделяются ионная, ковалентная, металлическая, молекулярная межатомные структурные связи. Наибольшей прочностью отличаются ковалентные связи, наименьшей — молекулярные. Ионные и металлические связи занимают промежуточное положение. Для большинства минералов характерно сочетание двух и более типов структурных связей. Лишь у некоторых минералов (например, у кварца и галита) структурные связи одного типа. Кроме того, существуют промежуточные типы структурных

связей. Акад. Н. В. Беловым предложено изображать взаимопереходы между различными типами структурных связей в виде тетраэдра, в вершинах которых лежат представители ионной, ковалентной, металлической и молекулярной связей, а на ребрах — многочисленные соединения с промежуточными типами структурных связей.

Атомы (ионы) обычно входят в структуры кристаллических решеток минералов в определенных сочетаниях, образующих многогранники, полиэдры. В центре этих полиэдров размещаются катионы, в вершинах — анионы. Полиэдры можно рассматривать как элементарные структурные образования кристаллических решеток минералов. В зависимости от координационного числа катиона * возникают сочетания в виде плоских треугольников, тетраэдров или трехгранных призм, кубов и т. д.

Структурные связи в кристаллических решетках обнаруживают ту или иную направленность, проявляющуюся в различной мере у связей разных типов. Преимущественное направление связей (сцепления) атомов и их сочетаний (полиэдров) в пространстве определяет структурный мотив (структурный тип) кристаллической решетки минерала. Основными структурными типами кристаллических решеток минералов являются координационный, каркасный, островной, кольцевой, цепной и слоистый. Наибольшее число минеральных видов имеют островное строение. Лишь 50 видов от их общего числа, составляющего более 2500, имеют каркасную структуру. Однако они составляют основную массу земной коры. К этой группе, в частности, относятся полевые шпаты, кварц и некоторые другие наиболее распространенные породообразующие минералы. Минералы координационной и островной структур отличаются наивысшей ретикулярной плотностью (т. е. наиболее плотной упаковкой атомов). Ретикулярная плотность минералов слоистой и каркасной структур минимальная. Однако эта плотность кристаллической решетки одного и того же минерального вида меняется с изменением направления. Такая особенность лежит в основе анизотропии свойств минералов.

Большая группа свойств минералов обнаруживает тесную зависимость от особенности внутреннего строения и в первую очередь от структурного мотива кристаллической решетки минерала и типа внутрикристаллизационных структурных связей. К ним относятся прочностные и деформационные (т. е. механические) и акустические свойства. Их объединяет то, что в основе тех и других лежат упорядоченные движения нейтральных комплексов, контролируемые структурными факторами. Электронные (электрические, магнитные, оптические) свойства, напротив,

* Координационное число определяется числом атомов (ионов), составляющих ближайшее окружение данного атома и находящихся с ним в непосредственной связи.

обнаруживают более тесную связь с особенностями вещественного (в том числе фазового состава). В их основе лежат движения заряженных частиц и комплексов. В этом отношении теплофизические свойства занимают промежуточные положения, и они, как известно, обусловлены неупорядоченными движениями нейтральных комплексов.

Твердость, иначе местная прочность минерала на вдавливание, зависит от структурного мотива и природы структурных связей. Для минералов ионной связи она прямо пропорциональна ретикулярной плотности кристаллической решетки. Соответственно она снижается с уменьшением межатомных расстояний. Твердость таких кристаллов возрастает также с увеличением валентности и координационного числа атомов. В минералах с промежуточными типами структурных связей заметно возрастание твердости с увеличением степени ковалентности связей. В минералах координационной структуры с существенно металлической связью твердость возрастает с переходом от плотнейшей кубической упаковки к плотнейшей гексагональной. Наименьшей твердостью обладают структуры с молекулярными связями.

В зависимости от отмеченных факторов абсолютная твердость минералов варьирует от 2,4 (талък) до $10\,060 \cdot 10^7$ Н/м² (алмаз).

Сжимаемость минералов характеризуется объемным коэффициентом сжимаемости β , значения которого колеблются от 0,2—0,8 до $3,2\text{--}6,4 \cdot 10^{-11}$ м²/Н (табл. 1). Сжимаемость минералов уменьшается с возрастанием ковалентности связи и возрастает при появлении молекулярной связи (талък, графит, некоторые цепные и кольцевые силикаты с молекулярными связями между слоями, цепями и кольцами).

Т а б л и ц а 1

Группы минералов по сжимаемости

Группы	Интервалы значений ($\beta \cdot 10^{-11}$) м ² /Н	Минералы
I. Слабосжимаемые	0,2—0,8	Алмаз, корунд, самородная платина, касситерит, рутил, берилл, магнетит, ильменит, альмандин, самородное золото, гематит, grosсуляр, топаз, цирит
II Среднесжимаемые	0,8—1,6	Турмалин, марказит, оливин, сидерит, гиперстен, авгит, апатит, доломит, флюорит, халькопирит, актинолит, сфалерит, кальцит, арагонит, основные плагиоклазы
III. Сжимаемые	1,6—3,2	Барит, кислые плагиоклазы, ангидрит, галенит, микроклин, ортоклаз, флогопит, гипс, кварц
IV. Сильносжимаемые	3,2—6,4	Галит, графит, сильвин, квасцы

Минералы координационной и островной структур, отличающиеся высокой ретикулярной плотностью, слабосжимаемы. Высокой сжимаемостью отличаются минералы, состоящие из крупных малозарядных (одновалентных) ионов (галит, сильвин, квасцы). Сжимаемость обратно пропорциональна валентности и координационному числу.

Упругие и акустические свойства. Наблюдается множественность абсолютных значений упругих параметров в минералах. В минералах кубической сингонии их три, а в минералах триклинной сингонии достигает 21. Анизотропность упругих свойств минералов нередко весьма значительна, о чем можно судить по скоростям распространения упругих волн. Так, в микроклине скоростям распространения продольных упругих колебаний в разных направлениях варьирует в пределах 5,1—8,15 км/с, а скорость распространения поперечных волн — в пределах 2,14—4,91 км/с. Наименьшие значения модуля нормальной упругости наблюдается в направлениях, по которым нет спайности.

На упругих свойствах минералов сказывается изоморфное замещение атомов. Так, в плагиоклазах при переходе от кислых к основным наблюдается возрастание скорости распространения упругих колебаний и соответственно модулей упругости.

Минералы кубической сингонии в отношении упругих (акустических) свойств изотропны.

Спайность минералов. К своеобразным проявлениям механических свойств минералов относится спайность, т. е. способность раскалываться или расщепляться по плоскостям в строго определенных направлениях — параллельно плоским сеткам кристаллической решетки. В минералах с металлической и ковалентной связями спайность всегда проходит параллельно направлению наиболее удаленных друг от друга плоских сеток. В минералах с промежуточной ионно-ковалентной связью образование спайности зависит от состава плоских сеток. Спайность отчетливая, когда смежные сетки состоят из одинаковых ионов, и менее отчетлива, когда они построены из равного числа разноименных ионов. В минералах с островным, цепным и слоистым мотивами плоскости спайности обычно не разрывают связи между полиэдрами, образующими острова, цепи и слои. Минералы кубической сингонии в отношении теплофизических свойств изотропны, кристаллы остальных сингоний всегда анизотропны.

§ 5. Структура и текстура горных пород

Структура (строение) горной породы — понятие комплексное. Этим понятием мы объединяем строение минерального скелета и порового пространства. К структурным характеристикам, очевидно, можно отнести также типы структурных (межминеральных) связей.

Строение минерального скелета характеризуется морфологическими особенностями (формой и размерами) минеральных составляющих и взаиморасположением их в объеме породы. Структура порового пространства характеризуется морфологическими особенностями пустот (пор, трещин) и пространственными взаимоотношениями их.

Структуры горных пород зависят от способа и условий их образования. Соответственно различаются следующие основные морфогенетические типы пустотности горных пород (рис. 1):

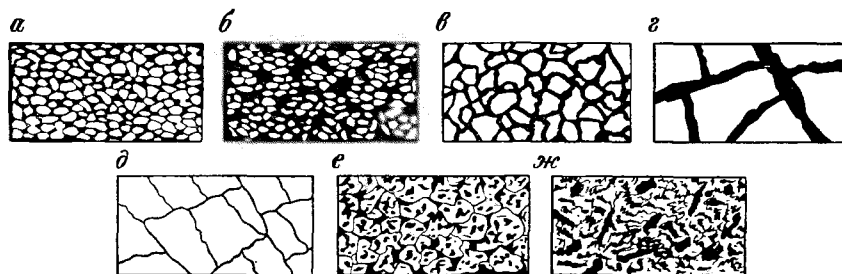


Рис. 1. Морфогенетические типы пустотности пород:

а — межгранулярная; б — межагрегатная; в — межкристаллическая; г — выщелачивания; д — трещинная; е — внутризерновая и внутриобломочная; ж — макропористость

1) межзерновая, или межгранулярная, характерная главным образом для раздельнозернистых пород;

2) межминеральная, свойственная кристаллически-зернистым породам;

3) трещинная, наблюдающаяся в твердых и полутвердых породах всех геолого-петрографических типов;

4) растворения, присущая карстующимся породам;

5) кристопористость глинистых пород;

6) пузырчатая пористость некоторых эффузивных магматических пород.

Для многих пород характерно сочетание двух и более типов пустотности. В этих случаях выделяются смешанные типы пустотности. Таковы, например, межзерновая и трещинная пустотности обломочноцементированных пород, пустотность выщелачивания в сочетании с трещинной в карбонатных породах.

Пустотность относится к числу важнейших факториальных петрофизических характеристик. Она численно выражается пористостью n или коэффициентом пористости ϵ .

Пустотность разных морфогенетических типов неравноценна в отношении степени ее влияния на физические характеристики горной породы. В этом отношении следует особо выделить трещинную пустотность, кристопористость и замкнутые системы пустотности.

Трещины обычно пронизывают весь объем горной породы и, таким образом, создают облегченные условия миграции подвижных (жидкой и газообразной) фаз. В случае упорядоченного взаиморасположения трещин и их систем горная порода приобретает трещинную анизотропность физических свойств. Трещины расчленяют горную породу на отдельные «структурные» блоки, которые могут рассматриваться как единичные объемы; при деформировании породного массива они в известной мере ведут себя как единое целое. Наконец, трещинная пустотность является неизменным условием развития пустот выщелачивания и активизации вторичных изменений состояний и свойств горной породы.

Криптопористость свойственна в основном высокодисперсным системам, в составе которых всегда содержатся минеральные частицы с большой удельной поверхностью. Такими системами являются глинистые частицы чешуйчатых очертаний и размерами менее нескольких микрометров. Специфические свойства данных систем (низкая газо- и водопроницаемость, связность, высокая пористость и влагоемкость и др.) в значительной мере обусловлены криптопористостью.

С возрастанием размеров минеральных зерен и степени их изометричности криптопористость постепенно вытесняется межзерновой пористостью и вместе с этим происходит снижение удельного молекулярного сцепления частиц* и повышение внутреннего трения при уменьшении общей пустотности горной породы.

При замкнутой системе пустотности и даже высокой пористости горная порода отличается значительной водостойкостью, слабой проницаемостью и некоторыми другими особенностями, столь характерными для эффузивов с пузырчатым строением.

Обращают на себя внимание весьма существенные различия свойств горных пород в образце (в малом объеме) и в массиве.

Строение горной породы в образце мы будем в дальнейшем называть *структурой*, а ее строение как геологического тела (в массиве) *текстурой***.

Структурными единицами горных пород, очевидно, являются минеральные зерна, их агрегаты, включения и новообразования. Форма, размеры и взаимное расположение минеральных составляющих и определяют структуру горной породы.

Структурные характеристики обычно не выдерживаются во всем объеме горной породы. Характер и степень структурной

* Подсчитано, что величина удельного молекулярного сцепления для частиц диаметром порядка 0,5 см составляет $6 \cdot 10^2$ Н/м², а для частиц в 1 мкм достигает $3000 \cdot 10^2$ Н/м².

** Различают также микроструктуру и микротекстуру горных пород, когда имеют дело со структурными и текстурными образованиями, обнаруживаемыми только при большом увеличении.

неоднородности и определяют текстуру горной породы. Текстурными единицами осадочных пород являются слои, прослои, линзы и подобные им образования, отличающиеся друг от друга по своему составу и строению. В магматических породах к текстурным единицам относятся шпировые, флюидалные, шаровые, брекчиевидно-такситовые, гнейсовидные и другие образования. Основными текстурными элементами метаморфических пород следует считать сланцеватость, пloidчатость и отдельности, на которые распадается горная порода по кливажной трещиноватости. В метаморфических породах нередко наблюдаются также реликтовые текстурные образования, унаследованные от материнских пород.

В случае отсутствия структурной дифференциации текстура горной породы считается однородной или массивной.

§ 6. Общая инженерно-геологическая классификация горных пород

В основе инженерно-геологических характеристик горных пород лежат факториальные признаки, к числу которых относятся физическая природа межминеральных (структурных) связей, вещественный состав и структура минерального скелета породы и порового пространства.

Наиболее существенные черты горных пород как физических тел находятся в непосредственной зависимости от природы и состояния межминеральных связей. По данным признакам различаются петрофизические классы (и подклассы) горных пород — твердых, глинистых (вязных) и сыпучих (раздельнозернистых).

Петрофизические классы по указанному признаку объединяют породы, относящиеся к разным геолого-генетическим типам: магматические породы, образовавшиеся за счет магматических расплавов сложного силикатного состава; осадочные породы, возникшие за счет продуктов экзогенных геологических превращений минеральных масс земной коры, их переноса и последующего осаждения; метаморфические породы, представляющие собой продукты преобразований первичномагматических и первичноосадочных пород в твердом состоянии.

Инженерно-геологические особенности горных пород зависят от условий образования. Эти условия, называемые фацialsьными, сказываются практически на всех факториальных признаках горных пород и зависящих от них свойствах пород. По фацialsьной принадлежности различаются фацialsьно-генетические подтипы пород. Таковы подтипы интрузивных (абиссальных и гипабиссальных) и эффузивных магматических пород; морских, континентальных и лагунных осадочных пород; контактово- и региональнометаморфических пород.

В составе перечисленных фацialsьных подтипов различаются геолого-петрографические группы и подгруппы пород. Например,

группы гранита — гранодиорита, диорита, габбро-норита, пироксен-дунита, включающие подгруппы кислых, средних, основных, щелочных и ультраосновных пород с характерными для каждого из них ассоциациями минералов и другими факториальными признаками.

Таковы основы построения общей инженерно-геологической классификации горных пород (табл. 2).

Нетрудно видеть, что данная классификация в своей основе является геолого-петрографической; состав и наименование таксономических (классификационных) подразделений в схеме соответствуют таковым, принятым в практике геологических исследований. По построению она многоступенчатая, причем каждая ступень классификации соответствует уровню раскрытия геолого-петрографической обусловленности инженерно-геологических особенностей пород; наконец, по своему назначению она инженерно-геологическая, построенная по факториальным признакам, лежащим в основе результативных инженерно-геологических показателей горных пород.

Конечной задачей инженерно-геологической классификации горных пород является получение некоторых количественных характеристик естественных совокупностей горных пород, входящих в состав классификационных подразделений.

В табл. 2 приведены характерные значения и интервалы основных характеристик пород на уровне инженерно-петрографических групп.

Кроме общей инженерно-геологической классификации известны многочисленные специальные классификации*. Обобщающие количественные характеристики в них являются расчетными, т. е. они предназначаются для непосредственного использования при решении проектных и технологических задач. Конкретные количественные значения расчетных параметров зависят не только от свойств горных пород, но также от ряда технических и технологических факторов производства инженерных работ и эксплуатации сооружений. В детальных инженерно-геологических классификациях возникает необходимость выделять в составе геолого-петрографических групп и подгрупп инженерно-геологические виды и разновидности горных пород. В большинстве случаев они отличаются друг от друга по вторичным изменениям факториальных признаков (в результате выветривания, катаклаза, в зависимости от уровня литификации и т. д.) и степени вторичных изменений.

В заключение следует подчеркнуть, что инженерно-петрографические исследования по своему существу являются развитием геолого-петрографических и в значительной мере базируются

* Классификации пород по несущим свойствам в основаниях сооружений, величине спловых и энергетических воздействий при разрушении, устойчивости в обнажениях горных выработок и т. д.

Общая инженерно-геологическая классификация горных пород

Инженерно-геологические классы	Основные свойства горных пород	Подклассы	Некоторые представители горных пород	Характерные особенности горных пород	Некоторые физико-механические показатели
I. Твердые					
1. Силикатные массивно-кристаллические (магматические горные породы)	Высокая прочность и стойкость, квазизизотропность физико-механических характеристик	а. Полнокристаллические (интрузивные) породы б. Неполнокристаллические (эффузивные) породы	Граниты, диориты, габбро, дуниты Базальты, порфиры, трахиты, андезиты	Равномернозернистое кристаллическое строение Порфировое, скрытокристаллическое или стекловатое строение Пористость от незначительной до высокой	$\sigma_{сж} = (4000-5000) \times 10^6 \text{ Н/м}^2$, $\sigma_p = 0,02-0,04$ от $\sigma_{сж}$, $f_{кр} > 10$. Водопроницаемы в случае трещиноватости
2. Силикатные и карбонатные кристаллические обычно сланцеватые (метаморфические горные породы)	Резко выраженная текстурная, а иногда и трещинная анизотропность физико-механических характеристик Размягченность от очень слабой до средней	а. Регионально-метаморфические породы б. Контактво-метаморфические породы	Филлиты, кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты, гнейсы, мигматиты, мраморы Роговики, спилзиты, скарны	Сланцеватое сложение, выдержанность свойств на больших пространствах Невыдержанность строения и свойств на коротких расстояниях	$\sigma_{сж} = (750-1800) \times 10^6 \text{ Н/м}^2$, $\sigma_p = 0,02-0,08$ от $\sigma_{сж}$, $f_{кр} > 5$. Водопроницаемы по трещинам

3. Несиликатные кристаллически-зернистые слоистые (осадочные) горные породы	Слоистая неоднородность. Растворимость в воде от средней до высокой	а. Осадочные карбонатные породы б. Осадочные сульфатные породы в. Осадочные галлоидные породы	Кристаллические и скрытокристаллические известняки, доломиты, гипсы, ангидриты Каменная и калийные соли	Слабая растворимость в воде. Прочность и стойкость средние Хорошая растворимость в воде	$\sigma_{сж} = (120-1500) \times 10^5 \text{ Н/м}^2$, $\sigma_p = 0,04 - 0,1$ от $\sigma_{сж}$, $f_{кр} > 4$ $\sigma_{сж}^I = 200 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, $\sigma_p = 0,1$ от $\sigma_{сж}/f_{кр} = 2$. Практически водонепроницаемы
4. Окаменевшие глинистые (осадочные) горные породы	Высокая размягчаемость, нередко резко выраженная анизотропность физико-механических характеристик	а. Сланцеватые глинистые породы дислоцированных толщ б. Массивные, микро- и грубослоистые глинистые породы слабо-дислоцированных или недислоцированных толщ	Глинистые, песчано-глинистые, глинисто-известковые и другие сланцы Аргиллиты, алевролиты, мергели и затвердевшие мергелистые глины, опоки и опокovidные глины	Сцементированные, отчасти перекристаллизованные породы с резко выраженной текстурной анизотропией свойств Окаменевшие твердые породы, не размокающие в воде, но сильно размягчающиеся	$\sigma_{сж} = (350-500) \times 10^5 \text{ Н/м}^2$, $\sigma_p = 0,02 - 0,17$ от $\sigma_{сж}$, $f_{кр} = 2-3$ Практически водонепроницаемы или слабопроницаемы по трещинам
5. Сцементированные обломочные (осадочные) горные породы	Зависимость прочностных и деформационных характеристик от состава цементирующего вещества и характера обломочного (и детритусового) материала	а. Обломочные породы с кремнистой цементацией б. Обломочные породы с карбонатной цементацией	Кремнистые конгломераты, песчаники, граувакки, туффиты Известковистые конгломераты, брекчии и песчаники	а. Высокая прочность и стойкость б. Размягчаемы, но слабо. Прочность от средней до высокой	$\sigma_{сж} \approx 1000 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, $f_{кр} = 8-10$. Водонепроницаемы по трещинам и порам $\sigma_{сж} \approx 850 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, $f_{кр} = 6-8$. Водонепроницаемы по трещинам и порам

Инженерно-геологические классы	Основные свойства горных пород	Подклассы	Некоторые представители горных пород	Характерные особенности горных пород	Некоторые физико-механические показатели
	В зависимости от них прочность и стойкость пород изменяются от высокой (обломочные породы с кремнистой цементацией) до низкой (обломочные горные породы с глинистой и льдистой цементацией)	в. Обломочные породы с глинистой и глинисто-гипсовой цементацией г. Детритусовые сцементированные породы д. Обломочные породы с льдистой цементацией	Глинистые и глинисто-гипсовые конгломераты, брекчии и песчаники Известняки-ракушечники, мел Вечномерзлые гравийно-галечные валунные, щебенистые, песчаные и песчано-глинистые породы	в. Сильная размягчаемость г. Ноздреватое или тойкопористое строение, невысокая прочность д. Зависимость прочности от величины отрицательной температуры, льдистости и влажности	$\sigma_{сж} \leq (250-300) \times 10^5 \text{ Н/м}^2$, $f_{кр} = 2-3$. Практически водонепроницаемы $\sigma_{сж} \approx 1000 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, $f_{кр} = 2$. Водопроницаемость от низкой до высокой $\sigma_{сж}$, как правило, ниже $100 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, $f_{кр} = 1-2$
6. Сильнотрещиноватые и выветрелые (деградированные) твердые породы	Зависимость свойств от степени трещиноватости и химического разложения (выветривания). Высокая водопроницаемость	а. Выветрелые и трещиноватые породы магматического происхождения б. То же, метаморфического происхождения в. То же, осадочного происхождения	Сильнотрещиноватые и выветрелые граниты, диориты, базальты, порфиры и др. Сильно разрушенные кристаллические сланцы, гнейсы и др. Сильно разрушенные известняки, доломиты и обломочные сцементированные породы	Резко пониженные показатели прочности и стойкости (разборные скальные горные породы)	$\sigma_{сж} \leq 50 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, σ_p равно или близко к 0, $f_{кр} = 1,5-2,0$, $k_{\phi} = 10-20 \text{ м/сут}$

II. Связные (глинистые)

7. Неокаменевшие, но плотные глинистые породы	Способность переходить в пластическое состояние при водонасыщении Практически водонепроницаемы. Сжимаемость слабая и средняя. Коэффициент уплотненности по Приклонскому $K_d > 1$	а. Водноосадочные слоистые, нередко микрослоистые породы б. Осадочные глинистые породы неправильного слоистого или неслоистого сложения в. Моренные (валунные) глинистые породы	Глины, суглинки и супеси морского, лагунного и континентального происхождения Элювиальные глины (первичные каолины, бокситы, латериты и др.) Валунные глины, суглинки и супеси	Слоистое сложение, пониженная прочность по увлажненным поверхностям слоистости Свойства слабо изучены. Контакты в увлажненном состоянии всегда резко ослаблены Высокая прочность и жесткость, слабая водопроницаемость	$\varphi = 16-35^\circ$, $c = (0,4 - 1,5) 10^5 \text{ Н/м}^2$, $f_{кр} = 1,5$, $k_\phi < 0,0 \text{ А м/сут}$
8. Среднеуплотненные или рыхлосложенные со слабой цементацией глинистые породы	При водонасыщении переходят в текучее состояние. Средне- и сильно сжимаемы, иногда обладают просадочностью. Коэффициент уплотненности по Приклонскому $0 < K_d < 1$ или $K_d < 0$	а. Водноосадочные слоистые, нередко микрослоистые глинистые породы б. Континентальные макропористые глинистые породы	Глины, суглинки и супеси морского, лагунного, континентального происхождения Лесс и лессовидные глины, суглинки и супеси	В зависимости от влажности породы могут находиться в твердом или пластичном состоянии Слабая водостойкость, иногда просадочность	$\varphi = 14-23^\circ$, $c = (0,2 - 0,5) 10^5 \text{ Н/м}^2$, $f_{кр} = 0,3-0,8$, $k_\phi < 0,0 \text{ А м/сут}$
9. Глинистые осадки, не претерпевшие уплотнения	Рыхлое сложение, нередко текучее состояние. Ко-	а. Современные глинисто-илистые осадки	Морские, лагунные, озерные и элювиальные или	Тиксотропность, высокая влажность и сжимаемость	$\varphi < 10^\circ$, $c < 0,05 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$, $f_{кр} = 0,3$, $k < 0,0 \text{ А м/сут}$

* А — число от 1 до 9.

Инженерно-геологические классы	Основные свойства горных пород	Подклассы	Некоторые представители горных пород	Характерные особенности горных пород	Некоторые физико-механические показатели
и цементацию	эффект уплотненности по Приклонскому $K_d < 0$	б. Заторфованные глинистые осадки в. Почвы	Заторфованные или, илесто-глинистые осадки Почвы различных генетических типов глинистого состава	Высокая влагоемкость и сжимаемость Высокая сжимаемость и размываемость	

III. Раздельнозернистые (несвязные)

10. Крупнообломочные нецементированные	Высокая водопроницаемость и жесткость. Способность держать крутые откосы (под углом 30—45°)	а. Каменистые и щебенистые накопления б. Валунно-галечные и гравелистые отложения водоосадочного и ледникового происхождения	Отложения горных обвалов, осыпей и россыпей Отложения аллювиального, делювиального, флювиогляциального происхождения	Практически несжимаемы без сотрясения	$\varphi = 30-45^\circ$, $f_{кр} = 1,0-1,5$, $k_\phi = 50-100$ м/сут
11. Песчаные горные породы	Хорошая водопроницаемость. Свободные откосы устойчивы под углом 25—35°	а. Крупнозернистые пески б. Среднезернистые пески в. Мелкозернистые и тонкозернистые пески	Отложения морские, аллювиальные, пролювиальные, озерные и пр. То же »	Сжимаемы: (за счет рыхлого сложения) Уплотнение следует быстро за приложением нагрузки	$\varphi = 20-35^\circ$, $f_{кр} = 0,5-0,8$, $k_\phi = 5-50$ м/сут $\varphi \approx 20^\circ$, $f_{кр} = 0,3-0,6$, $k_\phi = 1$ м/сут

Примечания. 1. Классификация охватывает главные, наиболее распространенные типы горных пород. 2. $\sigma_{сж}$ — временное сопротивление сжатию, σ_p — временное сопротивление растяжению, $f_{кр}$ — коэффициент крепости пород по М. М. Протодьяконову, φ — угол внутреннего трения, c — сцепление, k_ϕ — коэффициент фильтрации.

на результатах последних. Это обстоятельство открывает возможность: а) существенно повысить научную достоверность результатов специальных инженерно-петрографических исследований как факториальных признаков, так и результативных характеристик горных пород; б) прогнозировать свойства пород по геолого-петрографическим признакам; в) экстраполировать данные дорогостоящих и трудоемких испытаний и исследований свойств пород по этим признакам, и в конечном счете; г) существенно повысить эффективность инженерно-геологических работ.

ГЛАВА 2

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. Геолого-петрографические особенности

Магматические породы относятся к классу твердых пород. Общей их чертой является высокая сопротивляемость разрушению, упругость и некоторые другие свойства, присущие твердым телам вообще. Однако свойства магматических пород изменяются в широком диапазоне и главным образом в зависимости от их вещественного (минерального) состава и строения.

Вещественный состав. По содержанию главных породообразующих минералов магматические породы образуют непрерывный ряд, крайние члены которого — гранит и ультраосновные породы связаны между собой постепенными переходами (рис. 2). Для первых членов этого ряда (кислых пород) характерно абсолютное преобладание силикатов «рыхлой» каркасной структуры, в которых элементарные ячейки (кремнекислородные тетраэдры) связаны между собой жесткими и прочными ковалентными связями. Последние члены этого ряда состоят из железо-магнезиальных силикатов цепной (пироксены и амфиболы) и островной структуры (оливин). В их составе также почти постоянно присутствуют рудные минералы (магнетит, хромит и др.), содержание которых в районах рудных месторождений может быть значительным.

С отмеченными переменами минерального состава обусловлено повышение плотности и вязкости горных пород по мере снижения их кислотности. В группе кислых магматических пород значительные колебания физических свойств связаны с изменениями содержания минералов слоистой структуры (слюд).

Структура. Вещество магматических пород интрузивных фаций полностью раскристаллизовано. В породах эффузивных фаций оно частично или полностью представлено вулканическим стеклом. Элементарные кремнекислородные тетраэдры силикатного вещества, составляющие скелетную основу структуры силикатов,

здесь (в вулканическом стекле) обнаруживают лишь тенденцию к правильному симметричному расположению друг относительно друга. Эта тенденция проявляется в развитии кристаллитов — зародышей скелетных кристаллов, их агрегатов — микролитов и, наконец, появлении микропорфировых выделений.

Степень кристалличности минерального вещества оказывает существенное влияние на свойства магматических пород. Так, только в зависимости от абсолютных размеров кристаллических зерен прочность породы может изменяться в 1,5—2,0 раза и более.

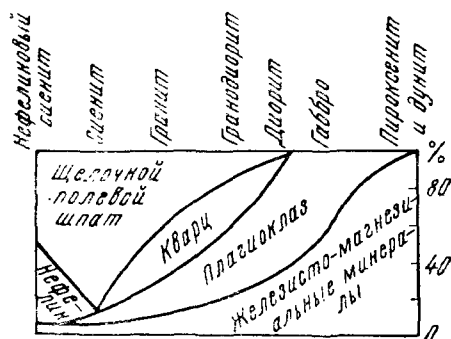


Рис. 2. Относительное содержание главных породообразующих минералов в важнейших типах магматических пород (по А. Н. Заварицкому)

Структурные связи в магматических породах кристаллизационной природы. Исключение составляют некоторые представители эффузивных пород, в которых вулканическое стекло выступает в качестве цементирующего вещества. В этом случае они могут быть условно отнесены к своеобразному подклассу сцементированных пород.

Текстура магматических пород может быть неупорядоченной и ориентированной. С появлением ориентированных текстур (полосчатости, гнейсовидности, флюидалности и т. д.) горная порода приобретает текстурную анизотропность. В случае неупорядоченной текстуры порода может рассматриваться как квазиизотропное тело.

Магматические породы, как правило, расчленены скрытыми или в той или иной мере зияющими (открытыми) трещинами. Среди них выделяются: трещины, возникшие при остывании магматического расплава, — это так называемые контракционные тектонические трещины, развивающиеся под воздействием тектонических напряжений и деформаций, и, наконец, трещины выветривания, появляющиеся главным образом под воздействием процессов физического выветривания.

В абиссальных интрузивах контракционные трещины приурочены в основном к приконтактовым зонам (окраинам массива)

и вызывают появление отдельностей плитообразных очертаний; поверхности раздела плит ориентированы параллельно контактам с боковыми породами. В гипабиссальных (жилых) телах и эффузивных покровах и потоках развиваются призматические и столбчатые отдельности, а в подводных излияниях лав основного состава — шаровые отдельности.

Тектонические трещины обнаруживают пространственную связь с тектоническими (разрывными и складчатыми) нарушениями, и они пронизывают всю толщу пород, подверженную этим нарушениям. Различают приразрывные и соскладчатые системы трещин. Интенсивность тектонической трещиноватости пород, протяженность и элементы залегания трещин закономерно изменяются с приближением к зонам разрывных и осям пликативных (складчатых) нарушений.

Трещины коры выветривания в своем большинстве развиваются в процессе физической дезинтеграции горной породы. Они развиты в коре выветривания, степень трещиноватости пород которой обнаруживает вертикальную зональность. Эта зональность определяет существенные особенности «профиля» коры выветривания.

Отдельности высокопрочных горных пород при деформации массива часто ведут себя как единое целое. Деформация последних складывается из дифференциальных перемещений отдельностей друг относительно друга. Общая картина квазипластических деформаций породы, наблюдаемая, например, при провисании потолочины горных выработок, создается за счет микроскольжений по правильно ориентированным системам трещин. При концентрации деформаций под одной из систем поверхностей скольжения возникает зона разрыва, вызывающая явление обрушения или скольжения отдельных блоков и пачек породы. В этом отношении отдельности твердых горных пород могут рассматриваться как элементарные объемы.

§ 2. Показатели плотности — пористости

Плотность горных пород, как и любого другого тела, — масса единицы объема, т. е. объемная масса δ .

Выделяют также минералогическую плотность δ_0 , численно равную удельной массе, т. е. массе минерального вещества в единице объема.

Пористость, иначе пустотность, характеризуется коэффициентом пористости ε и пористостью n , значения которых получаются из следующих зависимостей:

$$\varepsilon = \frac{\delta_0 - \delta}{\delta_0} \quad \text{и} \quad n = \frac{\delta_0 - \delta}{\delta}.$$

или с учетом влажности породы

$$\epsilon = \frac{\delta_0 (1 - W) \delta_W}{\delta_W} \text{ и } n = \frac{\delta_0 (1 - W) \delta_W}{\delta_0 (1 - W)},$$

где δ_W — объемная масса влажной породы; W — весовая влажность породы. Коэффициент пористости выражают в долях единицы, пористость в процентах.

С колебаниями значений показателей пористости и плотности сопряжены вариации всех других физических характеристик горных пород. В этом отношении они могут быть отнесены к группе факториальных инженерно-петрографических характеристик. В то же время сами они непосредственно связаны с изменениями вещественного состава и строения горной породы, т. е. являются результативными физическими характеристиками. Однако аналитическая форма зависимости между показателями плотности и пористости, с одной стороны, и различными физическими свойствами, — с другой, весьма сложна и зависит не только (даже не столько), например, от абсолютных значений пористости, но также (чаще — в основном) и от структуры порового пространства. Поэтому породы с одинаковыми абсолютными значениями пористости могут обладать совершенно различными показателями проницаемости, прочности, деформируемости и т. д.

По морфологическим признакам различаются несколько систем пористости (пустотности) магматических горных пород, главнейшими из которых являются: 1) межкристаллическая (межзерновая) пористость кристаллически-зернистых пород; 2) трещинная пустотность; 3) пузырчатая пустотность, типичная для многих эффузивных пород.

В реальных горных породах чаще всего наблюдается сочетание двух или трех систем пустотностей. Так, в магматических породах эффузивных фаций трещинная пустотность сочетается с пузырчатой, в интрузивных породах — с межзерновой.

Нередко можно наблюдать несколько генераций пустотности, т. е. пустот, возникших на разных стадиях формирования горной породы. Пустотность первой генерации возникает в процессе образования горной породы. Таковы контракционная трещиноватость и пузырчатая пустотность эффузивных пород. Пустотности, возникающие на последующих стадиях, образуют генерации вторичной пустотности — например, тектоническая трещинная пустотность и пустотности, возникающие при выветривании.

При морфологическом сходстве систем пустотностей разных генераций их роль в формировании свойств пород может быть различной. Так, первичные пустотности часто являются «залеченными», т. е. заполненными минеральными новообразованиями, тогда как вторичные — открытыми, нередко зияющими. Они могут отличаться и по пространственно-геометрическим характеристикам.

По степени раскрытости выделяются трещины сверхкапиллярные с величиной раскрытия, не превышающей 0,25 мм, капиллярные, раскрытость которых 0,001—0,25 мм, и субкапиллярные при раскрытии менее чем 0,001 мм.

Пористость магматических пород интрузивных фаций в основном трещинная, в меньшей мере — межзерновая. В кайнотипных эффузивных породах наблюдается также пузырьчатая пустотность, возникающая при выделении пузырьков газа и паров воды при остывании лавы. В зонах катаклаза и коре выветривания магматические породы приобретают повышенную трещинную пустотность, достигающую 10—20%, при поровой (межзерновой) обычно не превышающей 1—3%.

Средние значения плотности и пористости интрузивных пород характеризуются данными табл. 3. Замечено, что средние значения плотности δ колеблются главным образом в зависимости от минерального состава. У гранитов они достигают 0,12, у габбро 0,30 и ультраосновных пород $0,50 \cdot 10^3$ кг/м³. Весьма существенно

Таблица 3

Средние значения плотности и пористости интрузивных магматических пород

Горные породы	Плотность δ , 10^3 кг/м ³			Пористость, %		
	минимальная δ_0	средняя	пределы колебаний	средняя	минимальная	максимальная
Гранит биотитовый	2,65	2,57	2,53—2,70	2,7	0,4	5,2
Плагιοгранит	2,71	2,60	2,57—2,70	3,2	2,9	3,4
Гранодиорит	2,77	2,69	2,62—2,78	1,8	1,1	2,9
Нефелиновый сиенит	2,72	2,66	2,45—2,70	2,5	0,7	5,0
Диорит	2,95	2,81	2,67—2,92	2,9	1,8	5,1
Габбро	3,06	2,95	2,85—3,05	1,3	0,3	3,5
Габбро-норит	3,0	—	—	1,6	1,3	2,0
Пироксенит	—	3,19	2,90—3,40	—	—	—

Таблица 4

Значения плотности эффузивных пород

Горные породы	Плотность δ , 10^3 кг/м ³	
	средняя	пределы колебаний
Липарит	2,35	2,14—2,59
Кварцевый порфир	2,60	2,54—2,66
Андезит	2,49	2,07—2,68
Порфиновый андезит	2,54	2,20—2,85
Диабаз	2,79	2,62—2,95

влияние на показатели плотности и пористости вторичных изменений состава и строения горной породы. Так, в коре выветривания плотность гранитов может снижаться до $2,29-2,48 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, а пористость соответственно возрастает до 25%.

Плотность эффузивных пород колеблется в значительно более широких пределах (табл. 4), в известной мере она зависит от геологического возраста породы. Так, средняя плотность палеотипных пород (например, порфириров) мезозойского возраста 2,63, палеозойского 2,73, докембрийского $2,76 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

§ 3. Механические свойства твердых горных пород

Механические свойства характеризуют способность горной породы так или иначе реагировать на внешние силовые (механические) воздействия. В определенных пределах эта способность проявляется в объемных деформациях, носящих упруго-обратимый характер. С ростом напряжений и увеличением длительности действия деформирующей силы они перерастают в необратимые деформации — пластические и вязкопластические. Последние могут привести к нарушению сплошности, т. е. к разрушению породы при ползучести и вязко-пластическом течении. Разрушение может произойти и в упругой области (хрупкое температурное разрушение). Как показывают микроструктурные исследования, зарождение очагов разрушения и в этом случае связано с пластическими деформациями, точнее — с локализацией очагов микроскользящих в относительно небольшой зоне. Этому способствуют дефекты внутреннего строения горной породы (главным образом трещиноватость), которые являются носителями собственных напряжений. По этой причине все механические процессы в горной породе протекают при минимальной затрате энергии.

В силу указанных причин необратимые пластические деформации в твердых горных породах появляются уже на начальных стадиях нагружения и возрастают с ростом напряжений и длительностью действия деформирующей силы. По этой же причине зависимость между действующими напряжениями и деформациями не линейная и горные породы не имеют четко выраженного предела прочности. Соответственно, диаграмма «напряжение — деформация» для горных пород сходна с таковой для упруго-пластических тел (рис. 3). Вообще горным породам присущи:

1. Упруго-линейные деформации, следующие почти мгновенно за приложением нагрузки* и носящие обратимый характер.
2. Нелинейно-упругие деформации, особенностью которых является криволинейная зависимость между напряжением и деформацией. Кривая медленной разгрузки следует за кривой нагрузки в обратной последовательности и возвращается в точку O .

* Скорость упругой деформации $v = \sqrt{Eg'/\delta}$, где E — модуль упругости; g' — ускорение силы тяжести; δ — объемная масса породы.

Это называется последствием (прямым — при загрузке и обратным — при разгрузке). Особенностью упругого последствия является его зависимость не только от величины нагрузки, но и от длительности их действия.

3. Пластические деформации, происходящие длительное время за приложением нагрузки и носящие необратимый характер (остаточные деформации). Пластические деформации зависят от продолжительности действия, величины и скорости возрастания напряжений.

Упругая часть деформаций связана с объемными деформациями (сжатием, растяжением) кристаллических решеток минералов. Природа неупругих деформаций значительно сложнее. Они связаны с так называемой девиаторной частью напряжений, т. е. напряжениями, изменяющими форму тела.

Неупругие (пластические) деформации поликристалличе-

ских тел в основном являются результатом следующих процессов: 1) сдвиговых деформаций минеральных зерен — явлений трансляции (внутрикристаллического скольжения), двойникования, изгиба, пластинообразования и некоторых других; 2) диффузионных процессов, имеющих место при наличии «вакантных» (т. е. не занятых атомами) мест в узлах кристаллических решеток минералов и других дефектов и происходящих в форме переноса вещества (атомов, ионов) путем последовательного замещения «вакантных» мест в направлении деформирующей силы; 3) пограничных процессов — явлений относительного перемещения зерен и блоков по плоскостям спайности, полигонизации (дробление зерен), рекристаллизации и некоторых других.

Если напряжение, вызывающее пластические деформации, по своей величине не превышает предельного значения (предела прочности) и остается постоянным, скорость пластического течения во времени падает, т. е. наблюдается упрочнение породы в процессе пластической деформации. Оно происходит вследствие роста удельной площади истинных контактов минеральных зерен в процессе полигонизации и уплотнения.

По мере упорядочения структуры при пластическом течении, развитии микротрещин и т. д. сопротивление породы к сдвигу постепенно ослабевает. Данное явление, имеющее место при напряжениях, превышающих предел прочности, называется разупрочнением в процессе пластической деформации. Развитие деформаций во времени в этом случае приводит в конечном счете к разрушению породы.

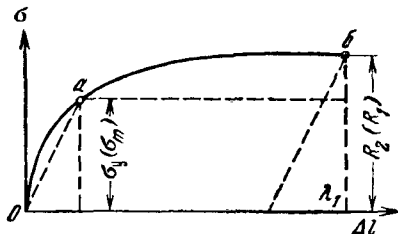


Рис. 3. Диаграмма «напряжение — деформация» для упруго-пластического тела (по П. М. Цимбаревичу): σ_y — предел упругости; R_2 (R_1) — предел прочности на сжатие (растяжение)

Таким образом, неупругие деформации в отличие от упругих всегда сопровождаются изменениями внутреннего строения, а при известных условиях (как, например, при процессах метаморфизма) — и минерального состава горной породы.

При явлениях необратимых пластических деформаций может иметь место непрерывный рост деформаций при постоянной нагрузке, т. е. ползучесть, или крип.

Разумеется, что ползучесть может быть вызвана и таким напряжением, которое изменяется по произвольному закону.

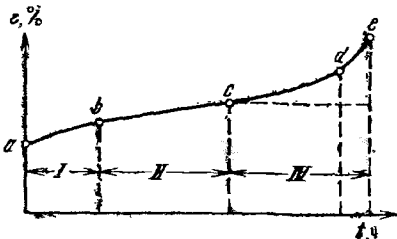


Рис. 4. Классическая диаграмма ползучести твердых тел

В обобщенном («классическом») виде кривая ползучести состоит из трех отрезков, соответствующих трем основным стадиям пластической деформации (рис. 4). Начальный отрезок кривой ползучести ab характеризует обычный процесс деформации от мгновенно приложенной нагрузки. Здесь наблюдается постепенное уменьшение скорости возрастания деформации. Второй отрезок кривой ползучести bc соответствует установившемуся состоянию пластического течения (ползучести) с постоянной скоростью ползучести. Третий отрезок кривой ползучести cd характеризует возрастание скорости деформации и наступление момента разрушения материала (точка d).

При явлениях пластической деформации может иметь место непрерывное падение напряжений при сохранении величины деформации, т. е. явление релаксации.

В основе явления релаксации лежит процесс рассеивания упругой энергии сдвига, запасенной в деформируемом теле. Релаксация неразрывно связана с тепловым движением частиц вещества, она повышается с повышением температуры; как и тепловое движение, релаксация протекает без внешнего воздействия, самопроизвольно и носит энтропийный характер.

Явление пластической деформации возникает при определенной длительности действия силы по отношению к так называемому периоду релаксации θ , т. е. времени, в течение которого упругое напряжение сдвига спадает на значительную величину*. Если период релаксации очень велик по сравнению с общим временем наблюдения (опыта), тело является упругим или хрупким. При иных соотношениях длительности опыта по

* Время релаксации $\theta = 1/\epsilon$, т. е. соответствует времени, в течение которого упругое напряжение сдвига снижается в $1/e$ раз по сравнению

с начальной величиной. Время релаксации находится в следующей зависимости от коэффициента вязкости η и модуля сдвига G : $\theta = \eta/G$.

отношению к периоду релаксации твердое тело переходит в одно из состояний течения — упруго-вязкое, вязко-пластическое или жидкое. Релаксации напряжений по существу и есть процесс трансформации упругой энергии деформирования в энергию пластического или вязкого течения. Иными словами, процесс релаксации представляет собой ползучесть при напряжениях, которые падают во времени пропорционально нарастающим необратимым деформациям. Процессы, сопровождающиеся релаксацией напряжений, называются релаксационными.

Граница между упругим и пластическим состояниями соответствует пределу текучести, одновременно являющемуся пределом упругости. Предел текучести определяется как предельное напряжение сдвига τ_{ki} .

Описанная выше картина деформационных процессов позволяет составить представление о природе прочности твердых горных пород. Как известно, последние состоят из минеральных зерен и их агрегатов, скрепленных между собой структурными связями высокой прочности и стойкости. При внешнем силовом воздействии в первую очередь деформируются минеральные зерна, плоскости внутрикристаллизационного скольжения (трансляции) которых ориентированы наиболее удобно по отношению к девиаторной части напряжений. Однако деформации таких зерен стеснены соседними зернами, с которыми они скреплены структурными связями и плоскости внутрикристаллизационного скольжения которых ориентированы иначе. Рассматриваемое зерно, стремясь деформироваться под действием внешних сил, будет оказывать давление на соседние зерна и заставлять их вращаться, а в случае возможности (наличия пустот) перемещаться в направлении деформирующей силы. Этому препятствуют структурные связи и силы трения и статическое сопротивление этих зерен изменению первоначального положения. В случае преодоления этих сил наиболее прочные и мелкие зерна могут сохраниться, а более крупные и хрупкие дробятся. В дальнейшем раздробленные зерна стремятся образовать более крупные плоскости, трансляции которых ориентированы в направлении действия деформирующей силы. При этом могут происходить процессы пластинообразования, двойникования и др.

Следовательно, каждое минеральное зерно в начале описываемого процесса оказывается в весьма сложном напряженном состоянии, причем в таком, которое препятствует развитию сдвигов. В этом заключается причина высокой начальной прочности твердых горных пород.

Переориентация и упорядочение расположения минеральных зерен, а также нарушения структурных связей должны облегчить деформацию породы. Такова природа разупрочнения породы в процессе пластических деформаций.

Прочность обычно оценивается максимальной нагрузкой, воспринимаемой образцом горной породы до разрушения. Эта нагрузка называется пределом прочности. Такое представление о прочности связано с критическим характером процесса разрушения породы: потеря сплошности (т. е. разрушение) наступает, когда один из параметров, определяющих состояние деформационного процесса, например нормальное или касательное (тангенциальное) напряжение, достигает предельного, критического значения.

К основным показателям прочности относятся временное сопротивление сжатию $\sigma_{сж}$, растяжению σ_r и сдвигу $\sigma_{сдв}$, т. е. пределы прочности при указанных напряженных состояниях. Как показывают экспериментальные данные, параметры прочности твердых горных пород зависят от рода напряжений. Наибольшее значение по величине имеет временное сопротивление на сжатие, наименьшее на растяжение.

Прочность горных пород при двухосном сжатии значительно больше прочности при одноосном сжатии. При всестороннем сжатии их прочность возрастает в еще большей мере. Плотные твердые горные породы в условиях всестороннего сжатия не разрушаются даже при очень высоких давлениях.

Прочность магматических пород на сжатие $\sigma_{сж}$ варьирует в очень широких пределах: от 1000—1200 до (2000—2800) 10^5 Н/м² и более и главным образом в зависимости от степени кристаллизации и состава минерального вещества. Так, прочность гранита мелкозернистого строения выше крупнозернистых его разновидностей на (300—350) 10^5 Н/м² (табл. 5), нераскристаллизованное минераль-

Таблица 5

Временное сопротивление сжатию некоторых групп магматических пород

Подтипы пород	Структурные особенности	Группы пород	Временное сопротивление сжатию, 10^5 Н/м ²
Глубинные (интрузивные)	Равномернокристаллические, мелко- и среднезернистые	Граниты	1200—2400
		Диориты	1400—2800
		Сиениты	1000—2200
	Порфиroidные и крупнозернистые	Граниты	800—2800
		Диориты	1600—3100
		Габбро	1900—3200
Излившиеся (эффузивные)	Палестинские	Порфириты	1300—2600
	Кайнотипные	Андезиты	800—2600
		Базальты	900—4600

ное вещество (вулканическое стекло) при его содержании свыше 20% снижает прочность породы в 1,5 раза.

Снижение прочности магматических пород наблюдается также при повышении в их составе содержания минералов слоистой структуры (слюд) и соответствующем снижении содержания кварца — типичного минерала каркасной структуры. По данным Г. С. Сенатской, увеличение содержания биотита в гранитах с 4—5 до 15—17% и понижение содержания кварца с 38 до 28% приводит к снижению временного сопротивления сжатию с 2200 до $800 \cdot 10^5$ Н/м².

Размягчаемость магматических пород *. По величине размягчаемости магматические породы относятся к слаборазматчающимся $K_p > 0,9$. С повышением содержания минералов слоистой структуры (слюд) и понижением содержания кварца связано некоторое повышение размягчаемости магматических пород.

Паспорт прочности горных пород. В горнотехнической практике прочность горных пород обычно характеризуется паспортом прочности, построенным исходя из теории прочности О. Мора. Согласно данной теории разрушение (хрупкое или пластический сдвиг) материала происходит, когда касательное напряжение в плоскости скольжения возрастает до некоторой предельной величины или когда предельное нормальное растягивающее напряжение достигает определенной величины. При этом допускается, что касательное напряжение τ в плоскости скольжения зависит только от величины нормального напряжения σ_n , действующего в той же плоскости. Эта зависимость выражается уравнением огибающей главных кругов напряжений Мора в системе координат σ_n — нормального и τ — касательного напряжения. По нему устанавливаются объемные показатели прочности: коэффициент внутреннего трения $\operatorname{tg} \varphi$, связывающий приращение нормальных и касательных напряжений по поверхностям сдвига и сцепление c , выражающее наибольшее касательное напряжение при нормальном напряжении $\tau_n = 0$ (рис. 5).

Условия разрушения анизотропных пород, очевидно, будут неодинаковыми вдоль площадок, различно ориентированных по отношению к направлению текстурной или трещинной анизотропии (рис. 6). Разрушение породы, по-видимому, произойдет по той системе ослабления, для которой предельное значение напряжений будет достигнуто раньше всего.

Предложено несколько вариантов аппроксимации огибающей больших кругов напряжений: прямолинейная, параболическая, циклоидальная и др. (рис. 7).

* Размягчаемость — это способность горных пород снижать прочность при водонасыщении. Оно характеризуется коэффициентом размягчаемости $K_p = \sigma_{сж}^B / \sigma_{сж}^C$, где $\sigma_{сж}^B$ и $\sigma_{сж}^C$ — временное сопротивление сжатию водонасыщенной и воздушно-сухой горной породы.

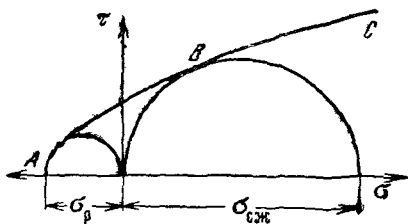


Рис. 5. Паспорт прочности изотропной горной породы

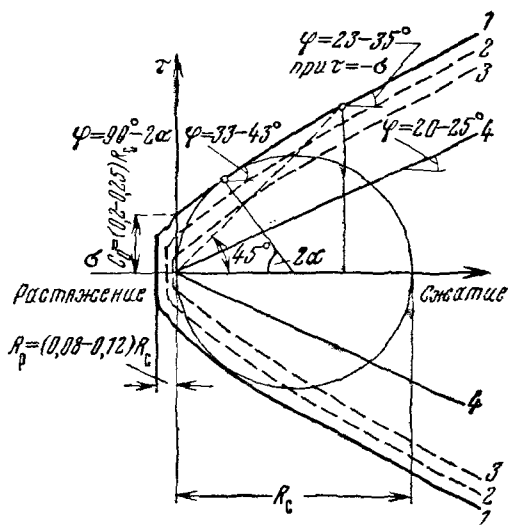
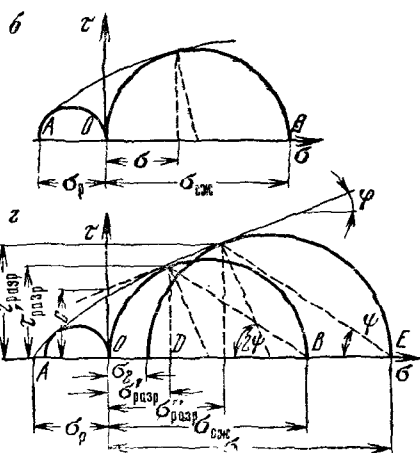
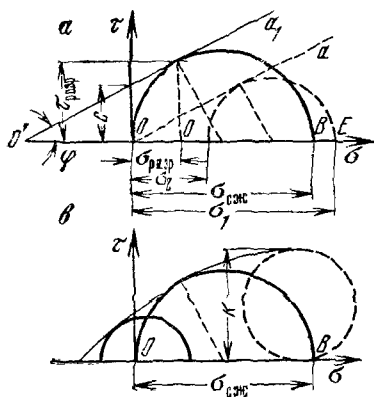


Рис. 6. Паспорт прочности анизотропной породы

Кривые предельных состояний: 1 — для основной монолитной массы породы; 2 — для поверхностей микрослоистости; 3 — для поверхностей отдельности; 4 — для контактных поверхностей слоев

Рис. 7. Типы огибающих главных кругов напряжений:

а — прямолинейная; б — параболическая; в — циклоидальная; г — огибающая, полученная по результатам одноосных и трехосных испытаний



Прямолинейная огибающая (рис. 7, а) описывает предельное состояние катаклазированных (интенсивно трещиноватых) твердых и сыпучих пород. Она выражается известными уравнениями Кулона:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c. \quad (1.1)$$

Параболическая огибающая (рис. 7, б) описывается уравнением вида

$$(\tau)^m = \lambda (\sigma + H), \quad (1.2)$$

где H — предел прочности породы при двухосном напряжении; λ — коэффициент бокового распора, и $1 \leq m \leq 2$.

Циклоидальная огибающая (рис. 7, в) в координатах (σ, τ) в параметрической форме:

$$\sigma + H = \frac{1}{2} K^* (4\psi + \sin 4\psi),$$

$$|\tau| = \frac{1}{2} K^* (1 - \cos \psi),$$

где K^* — постоянная (размерность ед. силы/ед. площади) и $0 \leq \psi \leq \pi/4$ (условие справедливо для области сжимающих напряжений).

На рис. 7, г представлена огибающая кругов Мора, полученная по результатам одноосных и трехосных испытаний.

Предельные состояния горных пород, описываемые приведенными уравнениями огибающей кругов главных напряжений, соответствуют породам, обладающим различными свойствами и находящимся в разных условиях напряженного состояния. Поэтому выбор математической формы выражения огибающей должен быть произведен с учетом этих факторов. К этому следует добавить, что при высоких всесторонних, но неравных по величине напряжениях огибающая кругов главных напряжений выполаживается и асимптотически стремится к некоторой прямой, параллельной оси σ_n .

При малых напряжениях очертание огибающей изменяется более заметно, чем на участках более высоких напряжений. В целях упрощения огибающую кругов главных напряжений предложено представить состоящей из двух прямолинейных участков (рис. 8). Первый из них соответствует одноосному сжатию и характеризуется параметрами φ_1 и c , а второй — условиям всестороннего сжатия с параметрами φ_2 и «приведенного» сцепления c' :

$$c' = c \frac{1 - \operatorname{tg} \varphi_2}{1 - \operatorname{tg} \varphi_1}.$$

Теория прочности Мора построена в предположении, что разрушение материала зависит от наибольшего σ_1 и наименьшего σ_3

главных напряжений. В условиях трехосного напряженного состояния данное положение не оправдывается. Однако влияние среднего главного напряжения σ_2 , по-видимому, не превышает 10—15% [22].

Разрушение горных пород при неупругих деформациях происходит в форме сдвига и отрыва (разрыва), сопротивляемость которым может быть охарактеризована внутренним трением φ и сцеплением c . Вообще переход любого твердого тела из упругого

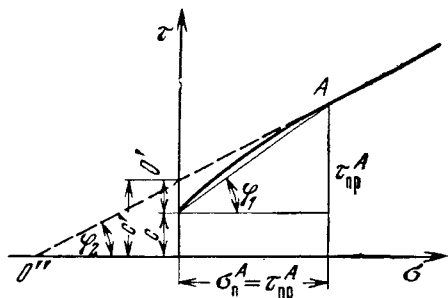


Рис. 8. «Приведенный» паспорт прочности горной породы

зотропности прочностных свойств обладают известной универсальностью.

Паспорт прочности для твердых пород может быть построен по данным временных сопротивлений сжатию $\sigma_{сж}$ и растяжению σ_p при различных значениях нормального напряжения σ_n , как это показано на рис. 6.

Длительная прочность пород. Горные породы способны снижать сопротивляемость разрушению с возрастанием длительности действия деформирующей силы. Прочность, соответствующая той или иной длительности действия нагрузки, называется длительной прочностью. Основной ее характеристикой является диаграмма длительной прочности, построенная по опытным данным в координатах «временное сопротивление — время» (рис. 9).

Минимальное значение длительной прочности σ_m , совпадающее с ординатой асимптоты кривой длительной прочности, называется пределом длительной прочности. Длительная прочность приводит к снижению коэффициента сцепления в 1,5—2,5 раза и незначительному уменьшению внутреннего трения по сравнению с их значениями, полученными при кратковременных испытаниях. Коэффициент снижения временного сопротивления сжатию у магматических пород обычно составляет 0,7—0,8.

Основными деформационными характеристиками механических свойств в пределах их упругой устойчивости являются модули упругости и коэффициент Пуассона. У большинства твердых горных пород состояние упругой устойчивости сохраняется до напряжений, составляющих 70—75% от разрушающих [22].

состояния в состояние неупругих деформаций характеризуется интенсивным развитием микроскольжений. В этом случае φ и c относятся к числу основных параметров, характеризующих прочность горных пород. Поэтому паспорт прочности, позволяющей характеризовать породу во всех основных видах напряженного состояния (сжатия, растяжения, сдвига), и явление ани-

обладают известной универсальностью.

Деформационное поведение горных пород в указанном состоянии характеризуется модулем упругости E , модулем сдвига G , модулем всестороннего сжатия K и коэффициентом Пуассона μ *.

Модуль сдвига и всестороннего сжатия связаны с модулем упругости и коэффициентом Пуассона зависимостями

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad \text{и} \quad K = \frac{E}{3(1-2\mu)}.$$

Абсолютные значения модулей упругости и коэффициента Пуассона могут быть определены статическим или динамическим методами. При статических испытаниях упругие характеристики получают по величине деформации пород под действием приложенных нагрузок. Динамические методы основаны на известных зависимостях скоростей распространения упругих колебаний от упругих свойств среды. Расчет модуля упругости E_d и коэффициента Пуассона μ_d в этом случае производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} E_d &= \delta v_p^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \\ \mu_d &= \frac{2 - \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2} \end{aligned} \right\},$$

где v_p и v_s — скорости распространения продольных и поперечных упругих колебаний.

По экспериментальным данным найдено следующее отношение между динамическим E_d и статическим $E_{ст}$ модулями:

$$E_d = kE_{ст} + b, \quad (1.3)$$

где k и b — вспомогательные коэффициенты, средние значения которых: $k = 0,83$; $b = 0,97 \cdot 10^{10}$ Н/м².

Динамический модуль упругости плотных (слаботрещиноватых) магматических пород на 20—30% превышает статический модуль, определенный статическим методом. С повышением пустотности породы разница между E_d и $E_{ст}$ достигает 70—100% и более.

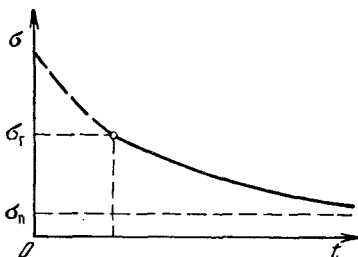


Рис. 9. Диаграмма длительной прочности

* Модуль упругости E является коэффициентом пропорциональности между продольным (сжимающим и растягивающим) напряжением и соответствующей деформацией. Модуль сдвига G — коэффициент пропорциональности между касательным напряжением τ и соответствующей деформацией сдвига. Коэффициент Пуассона μ — коэффициент пропорциональности между относительным продольным и поперечным деформациями.

Наблюдается значительное возрастание модулей в нормальном ряду: гранит — ультраосновная порода, что, очевидно, связано с увеличением минералогической плотности пород.

Замечено, что с понижением значения E_d разница между динамическим и статическим модулями возрастает.

К факторам, обуславливающим различие между величинами статического и динамического модулей упругости, следует также отнести минералогическую плотность и явления упругого последствия. Последнее существенно снижает величину статического модуля и практически не сказывается на величине динамического модуля.

Модуль упругости возрастает с повышением всестороннего сжатия. Повышение температуры в этих условиях приводит к снижению модуля упругости.

ГЛАВА 3

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. Геолого-петрографические особенности

В составе метаморфических горных пород различаются: 1) минералы, унаследованные от исходных (материнских осадочных или магматических) пород. Это так называемые реликтовые минералы; 2) метаморфогенные минералы, возникшие в процессе метаморфизма. Они образуют минеральные системы, достигшие равновесия на данной стадии метаморфизма и, следовательно, в данных термодинамических и геохимических условиях. Эти системы известны как минеральные фации метаморфических горных пород; 3) вновь образованные минералы в процессе вторичных изменений горной породы.

Среди реликтовых минералов выделяются особо стойкие (например, кварц), проходящие через все ступени метаморфизма, и поэтому называемые проходящими. С повышением их содержания возрастает стойкость, абразивность и жесткость горной породы.

Минеральные фации метаморфических горных пород представлены типоморфными минералами, характерными для определенных уровней (стадий) метаморфизма. На начальных и средних стадиях метаморфизма процессы минералообразования характеризуются преимущественным развитием минералов цепной и слоистой структур с упорядоченным взаимным расположением их относительно друг друга. Этому способствуют одностороннее давление, пластически деформируемое состояние породы и анизотропность сил роста кристаллов. В результате появляются горные породы

с кристаллобластической * структурой и ориентированной текстурой. Метаморфизм на более высоких уровнях сопровождается преимущественным развитием горных пород гранобластической — равномерно- и неравномернозернистой (порфиробластической) структуры. На высших уровнях метаморфизма, протекающих в условиях всестороннего гидростатического давления, предпочтительное развитие получают минералы каркасной структуры (полевые шпаты в породах гранулитовой фации и минералы группы

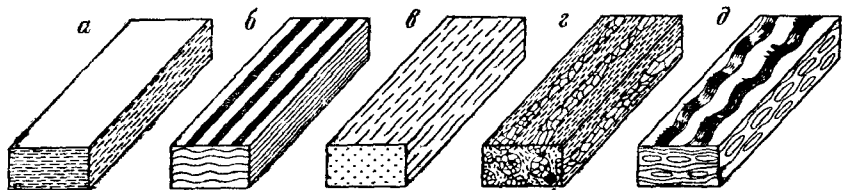


Рис. 10. Основные типы сланцеватости метаморфических пород (по А. Н. Елисееву):

а — сланцеватая (плоскопараллельная); *б* — сланцеватая волнистая (плойчатая); *в* — линейная, или линейно-параллельная; *г* — столбчатая, или карандашная; *д* — линзовидная, или очковая

гранат-эклогитовой фации). Для последних также характерно развитие минералов островной структуры (например, оливина).

Метаморфические породы относятся к классу твердых пород с кристаллизационным типом структурных связей. К числу основных текстурных особенностей метаморфических пород относятся сланцеватость и кливаж.

Отмеченные выше своеобразные условия минералообразования на начальных и средних стадиях метаморфизма благоприятствуют развитию ориентированных текстур — различных типов сланцеватости (рис. 10). Для более высоких уровней метаморфизма более характерны плойчатые (в частности, гнейсовидные) и массивные текстуры.

Сланцеватость нередко развивается по первичной слоистости осадочных пород. В этом случае ее называют слоистой сланцеватостью. Под кливажем понимают способность горной породы раскалываться вдоль более или менее параллельных плоскостей вторичного происхождения. Кливаж свойствен всем метаморфическим породам. Выделяют кливаж течения и кливаж скольжения (разлома). Кливаж течения возникает в результате дифференциальных движений при пластическом деформировании (течении) породы по сближенным параллельным поверхностям. Способность пород раскалываться обусловлена параллельным расположением пластических (хлорита, слюды) и таблитчатых минералов (кианита

* Blastos — росток (греч.).

и др.), а также параллельным расположением спайности этих минералов. Кливаж течения чаще всего наблюдается в податливых породах, заключенных между более жесткими породами (рис. 11).

Кливаж скольжения (иначе — разлома) не зависит от взаимного расположения и ориентировки минеральных зерен породы. Он носит характер тектонической трещиноватости породы. Ориен-

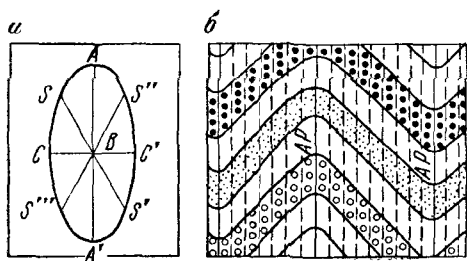
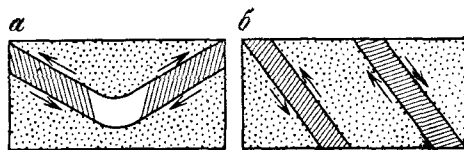


Рис. 11. Кливаж течения:

а — кливаж течения ориентирован под прямым углом к малой оси CC' эллипсоида деформации; он проходит через большую AA' и среднюю (B) оси деформации (средняя ось перпендикулярна к плоскости рисунка); кливаж разлома и кливаж скалывания развиваются в основном параллельно плоскости, обозначенной SS' и $S''S'''$. б — структурный разрез складки. Кливаж течения, обозначенный вертикальными пунктирными линиями, параллелен осевым плоскостям (AP) складок

Рис. 12. Кливаж разлома:

а — на крыльях складки; б — в зонах нарушений



тировка трещин параллельна плоскостям скола эллипсоида деформации и контролируется эллипсоидом тектонических напряжений (рис. 12).

§ 2. Плотность и пористость

В зависимости от минерального состава и степени метаморфизма плотность метаморфических пород варьирует в широком диапазоне (табл. 6). Первичноосадочные породы отличаются от первичномагматических несколько более низкой плотностью. Определенное влияние оказывает также тектоническая позиция района. Так, амфиболиты, приуроченные к геоантиклинальным зонам и образованные за счет осадочных пород, отличаются более низкими значениями плотности $(2,72-2,88) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ по сравнению с амфиболитами геосинклинальных зон $(2,93-3,06) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Влияние структурно-текстурных факторов на плотность метаморфических пород невелико и не всегда обнаруживается.

Процессы ультраметаморфизма и гранитизации сопровождаются некоторым разуплотнением породы. Разуплотнение происходит и при процессах регрессивного метаморфизма гнейсов и амфиболитов.

Плотность метаморфических пород

Степень метаморфизма	Горные породы	Плотность δ , 10^3 кг/м ³
Низшая	Кварц-серпичитовые сланцы	2,42—2,88
	Кварц-хлоритовые сланцы	2,62—2,60
	Серпичитовые сланцы	2,61—2,72
	Хлоритовые сланцы	2,57—2,61
Средняя	Биотитовые сланцы	2,67—2,68
	Графитовые сланцы	2,44—2,99
	Амфиболитовые сланцы	2,97—3,00
Высшая	Гнейсы биотит-плагноклазовые	2,63—2,73
	» гранат-биотитовые	2,80—2,85
	» амфиболитовые	2,86—3,07
	Амфиболиты	2,72—3,27
	Магматиты	2,68—2,7
	Мраморы	2,68—2,71
	Кварциты	2,57—2,68
	Роговики	2,63—2,82
	Скарны	2,87—3,47

Пористость метаморфических пород в основном трещинная, и редко превышает 1—2%. Поэтому плотность данных пород близка к минералогической ($\delta \approx \delta_0$). Несколько повышенная пористость отмечается у динамометаморфических пород (до 3—5%), что связано с их интенсивной микротрещиноватостью. Максимальные значения пористости (до 10%) характерны для серпентинитов. Дело в том, что серпентинизация ультрабазитов (за счет которых возникают серпентиниты) сопровождается расширением первоначального объема породы и развитием значительных объемных напряжений. Реализация последних приводит к развитию интенсивной трещиноватости породы. Характер и густота трещин в серпентинитах меняются с глубиной и зависят от механических условий деформирования и, в частности, от механических свойств (жесткости, податливости) вмещающих пород.

§ 3. Механические свойства

Наивысшие значения прочности отмечены у следующих метаморфических пород: джеспелитов и кварцитов [$\sigma_{сж} = (4500—5000) \times 10^5$ Н/м²], магнетит-амфиболитовых скарнов (до $5800 \cdot 10^5$ Н/м²). Прочность кристаллических сланцев превышает $1000 \cdot 10^5$ Н/м², но нередко (например, у гнейсов) снижается до $(800—900) \times 10^5$ Н/м².

Для большинства метаморфических пород характерна текстурная анизотропность. Коэффициент текстурной анизотропности их достигает 3—5.

Соотношения между динамическим E_d и статическим $E_{ст}$ модулями упругости некоторых представителей метаморфических пород характеризуются данными табл. 7.

Как известно, процессы метаморфизма всегда сопровождаются глубокими изменениями состава и свойств пород. Они особенно

значительны при процессах скарнирования и формирования контактовых скарновых ореолов. В табл. 8 приведены некоторые прочностные характеристики для переходных зон (скарнированных диоритов и альбитофиров) и эпидот-магнетитовых и гранат-магнетитовых скарнов. Прочность пород первой зоны порядка $(9400-1000) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, а скарнов до $2700 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Влияние повышенных давлений на прочность горных пород может быть иллюстрировано на примере мрамора (рис. 13). По мере увеличения всестороннего сжатия вначале происходит непрерывный рост прочности (первый участок кривой. В этой области наблюдается хрупкое разрушение без предварительной пластической деформации. При напряжении $\sigma_n = 235 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ появляются пластические деформации, развивающиеся при непрерывном падении (релаксации) напряжений (второй участок кривой). При более высоких напряжениях (в третьей области) происходит упрочнение породы в процессе пластической деформации.

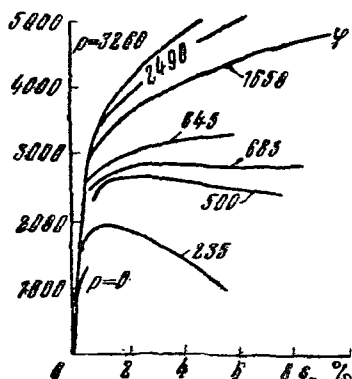


Рис. 13. Влияние повышенных давлений на прочность мрамора

Таблица 7

Соотношения между $E_{ст}$ и E_d для метаморфических пород (по В. С. Ямцикову)

Породы	$E_{ст}, 10^{10} \text{ Н/м}^2$	$E_d, 10^{10} \text{ Н/м}^2$	$\frac{E_{ст} - E_d}{E_{ст}} 100\%$
Глинистый сланец	1,2—1,3	2,4—2,7	100—106
Серицитовый сланец	0,9	1,9	100
Биотитовый сланец	4,2	6,0	43
Кварцит сланцеватый	1,4	2,24	60

Прочностные характеристики скарированных пород и скариов
Соколовско-Сарбайского месторождения (по Г. С. Сенатской)

Породы	Временное сопротивление, 10^4 Н/м^2	
	сжатию $\sigma_{сж}$	растяжению σ_p
Диорит-порфирит, скарированный эпидотом и пироксеном	940	120
Альбитофир, скарированный эпидотом и актинолитом	1630	199
Пироксенит гранатовый и гранат магнетитовый	1800	140
Скари актинолитовый	1900	145
Гранат-магнетитовый скари	2690	230
Эпидот-магнетитовый скари	2700	230

ГЛАВА 4

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. Общие сведения

Минеральный состав. Минералы осадочных пород представлены продуктами механической дезинтеграции, химического и биохимического разложения минерального вещества исходных (материнских) пород и продуктов их синтеза. Продукты механической дезинтеграции составляют основную массу обломочных пород. В их составе преобладают минералы жесткой и прочной каркасной структуры (кварц, полевые шпаты). Они образуют группы аллотигенных минералов. Продукты химического и биохимического распада относятся к группе аутигенных минералов *. В их составе представлены минералы слоистой (глинистые минералы, хлориты и др.), островной (карбонаты и некоторые сульфаты) и координационной структур (галит, сильвин). Первые из них являются постоянными компонентами глинистых, а вторые — химико-органических пород.

Подсчитано, что на долю минералов каркасной структуры приходится примерно 40% — слоистой 30% и островной 40% общего объема осадочных пород.

* Аллотигенные — минералы, образовавшиеся ранее самой породы, в состав которой они входят. Аутигенные — вновь образованные минералы при процессах экзогенного минералообразования.

Аутигенное минералообразование чаще всего сопровождается заменой ковалентных межатомных связей в кристаллических решетках минералов ионно-ковалентными, ионными, водородными, т. е. менее прочными и стойкими. Этим в определенной мере обусловлено снижение показателей прочности и стойкости осадочных пород по мере повышения в их составе аутигенных (особенно слоистых) минералов.

Среди осадочных пород широко распространены породы, всецело состоящие из одного минерала или абсолютно преоблада-

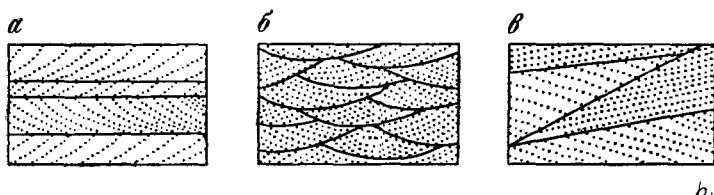


Рис. 14. Типы слоистости осадочных горных пород (по Р. Шроку):
 а — плитообразная; б — линзовидная; в — клиновидная

ющего одного, составляющего от 75 до 90% объема породы, и нескольких количественно резко подчиненных минералов, т. е. мономинеральные и олимиктовые породы.

Текстура. Основной текстурной характеристикой осадочных пород является их слоистость различного типа — параллельная, линзовидная, клиновидная и т. п. (рис. 14). Известны также породы, лишенные слоистости, — массивного сложения. Следует отличать слоистость осадочных пород от их напластованности. Осадочные толщи слагаются из пластов, четко ограниченных от покрывающих и подстилающих пластов. Поверхности раздела пластов являются поверхностями ослабления толщ осадочных пород.

В напластованности осадочных пород нередко наблюдается ритмичность, т. е. цикличная повторяемость слоев. Она особенно характерна для угленосных формаций геосинклинального типа (например, Донбасса) и толщ флиша (рис. 15, 16). Ритмичность может иметь место и в строении самих пластов. Таковы, например, микрослоистость известняков или ленточнослоистых глин (рис. 17). Со слоистостью и напластованностью связаны анизотропность свойств осадочных пород и их толщ.

Структурно-генетические признаки служат основанием для выделения трех групп осадочных пород — обломочных (в том числе пирокластических), глинистых и химикоорганических.

Структура обломочных пород характеризуется гранулометрическим составом, формой и степенью окатанности (угловатости) обломочного материала. По гранулометрическому составу различаются грубообломочные, среднеобломочные и мелкообломочные

породы, — отличающиеся друг от друга преобладанием одной или суммы нескольких фракций (табл. 9). Важнейшей характеристикой гранулометрического состава является коэффициент неоднородности $K_{неод}$. Он определяется по суммарной (кумулятивной) кривой гранулометрического состава, построенной в обычном или же полулогарифмическом масштабе (рис. 18). В том и другом случае по оси ординат откладывается суммарное содержание фракций (в вес. %) менее определенного размера, а по оси абсцисс — размеры частиц (в мм) или логарифмы этих размеров.

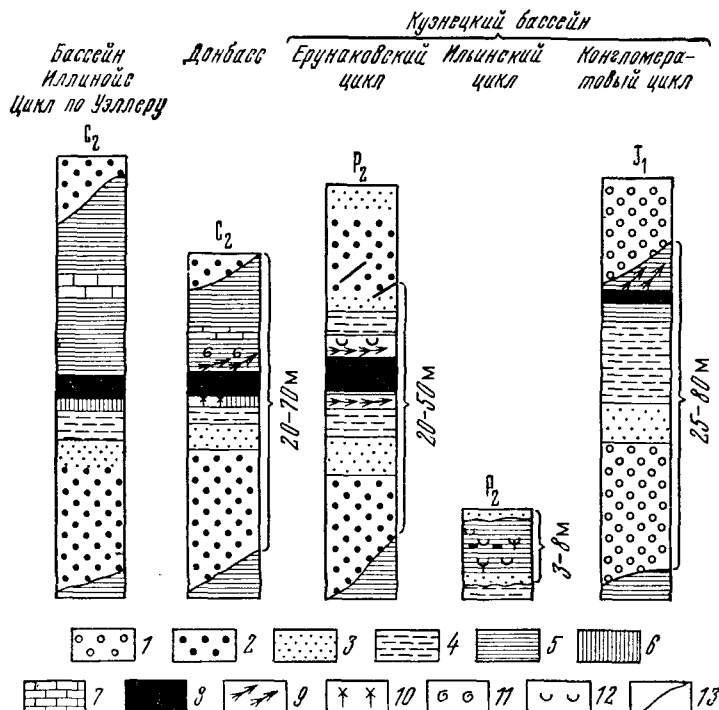


Рис. 15. Схема строения ритмов в угленосных толщах (по Ю. А. Жемчужникову):

1 — конгломерат; 2 — песчаник крупно- и среднезернистый; 3 — песчаник мелкозернистый; 4 — алевролит; 5 — аргиллит слоистый; 6 — аргиллит неслоистый; 7 — известняк; 8 — уголь; 9 — растительные остатки; 10 — остатки корней; 11 — остатки морских организмов; 12 — остатки пресноводных организмов; 13 — размыты

Коэффициент неоднородности $K_{неод}$ равен отношению диаметров частиц, соответствующих ординатам 60 и 10%:

$$K_{неод} = \frac{d_{60}}{d_{10}}. \quad (I.4)$$

Величина d_{10} называется эффективным диаметром; он соответствует диаметру частиц, менее которых в неоднородной по составу

породе содержится 10% суммы всех частиц. Соответственно d_{60} равен диаметру зерен, содержание частиц менее которых составляет 60% суммы всех частиц.

О неоднородности можно судить также по степени отсортированности. Коэффициент отсортированности S_0 равен отношению

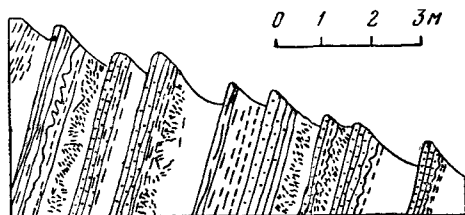


Рис. 16. Схема строения флиша из песчаников и алевролитов

Рис. 17. Схема ленточной слоистости озерно-ледниковых глин (по Р. Широку):

Л — летние отложения — алевроит; З — зимние отложения — очень мелкий алевроит и некоторое количество глины. Слой А обнаруживает летние отложения умеренной мощности; Б — обе части отложения равны; В — летние отложения значительной мощности по сравнению с зимними

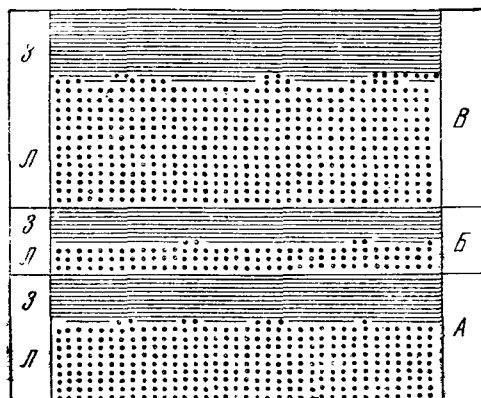


Таблица 9

Классификация обломочных пород по гранулометрическому составу

Породы	Разновидности пород	Распределение фракций, % от сухой массы породы
Грубообломочные	Валуно-гальчатковые и каменистые	Масса фракций крупнее 10 мм составляет 50% и более
	Гравийно-песчаные и щебенистые	Масса фракций крупнее 2 мм составляет 50% и более
Средне-мелкообломочные	Крупнозернистые пески	Масса фракций крупнее 0,5 мм составляет 50% и более
	Мелко-тонкозернистые пески	Масса фракций крупнее 0,1 мм составляет 75% и более
	Пылеватые пески	Масса фракций 0,05—0,002 мм превышает содержание фракций крупнее 0,5 мм
	Разнозернистые пески	Нет преобладающей фракции

разности между средним размером частиц $d_{\text{ср}}$ и средневзвешенным отклонением от среднего диаметра к $d_{\text{ср}}$

$$S_0 = \frac{d_{\text{ср}} - \sum \delta_0 V_i}{d_{\text{ср}}}, \quad (1.5)$$

где V_i — доля содержания частиц диаметром $d_{\text{ср}}$.

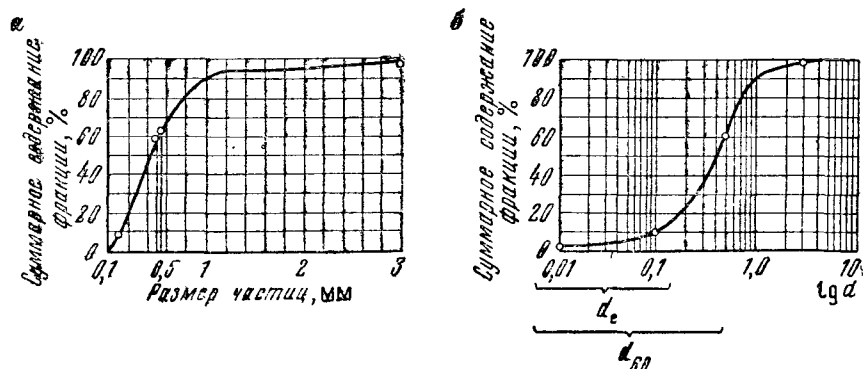


Рис. 18. Суммарная (кумулятивная) кривая зернового состава: а — в обыкновенном масштабе; б — в полулогарифмическом масштабе

Форма обломочного материала характеризуется коэффициентом округлости P , численно равным отношению радиуса кривизны проекции зерна r к радиусу максимальной вписанной окружности в проекцию зерна R , т. е. $P = r/R$. По величине P различают формы обломочного материала (табл. 10).

Т а б л и ц а 10

Значение величины P для различной формы обломочного материала

Форма зерен	P	Форма зерен	P
Остроугольная	0,15	Окатанная	0,50—0,70
Угловатая	0,15—0,30	Совершенно ока-	0,70—1,00
Полукруглая	0,30—0,50	танная	

Для сцементированных обломочных пород дополнительной и весьма важной структурной характеристикой служит тип цементации и структура цементирующего вещества.

Структура глинистых пород может быть первичной, сформировавшейся при седиментации (осадконакоплении), и вторичной, сформировавшейся на стадиях литификации осадка (в процессе его обезвоживания, уплотнения, цементации и т. д.).

Хемотропным и органотропным породам нередко присущи вторичные структуры, возникшие в результате перекристаллизации

осадка, при катаклазе, процессах цементации и др. Им соответствуют структуры кристаллобластические, катакластические (брекчиевидные), метасоматические, криптокристаллические и др. Органогенные породы представлены фитогенными и зоогенными сложными скелетными частями растений и животных. По степени сохранности выделяют биоморфные, детритусовые и скрытобиоморфные структуры.

Структура порового пространства осадочных горных пород также весьма разнообразна. Кроме межзерновой пустотности обломочных пород и кристопористости глинистых пород для некоторых из них (например, для лёссовидных) характерна макропористость, для закарстованных — пустотность выщелачивания, наконец, для всех твердых и полутвердых осадочных пород — трещинная пустотность. Но чаще всего осадочные породы характеризуются сочетанием двух и более основных систем пустотности. Так, кристопористость глинистых пород типа ячеистой, ячеисто-хлопьевидной и др. существует совместно с межгранулярной, а пустотность выщелачивания — с межзерновой и трещинной. Нередко выделяются пустотности первичной и вторичной генераций. К последним относятся, например, тектоническая трещиноватость и трещиноватость выветривания пород. Размеры пустот характеризуются их диаметром, а трещинная пустотность — протяженностью трещин, степенью их раскрытости и частотой (густотой) развития.

Пустотность осадочных пород чаще всего относится к типу открытой, когда пустоты сообщаются друг с другом и с внешней средой. Распределение пустот в объеме пород может быть равномерным или неравномерным, нередко упорядоченным. Последнее чаще связано с ориентированной системой или системами трещин, или упорядоченной (например, слоистой) текстурой породы. Ими обусловлена трещинная или текстурная анизотропность свойств пород.

По природе структурных связей различают породы трех физических классов: твердые, глинистые и раздельнозернистые. Особую группу составляют мерзлые породы.

А. ТВЕРДЫЕ ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ

Представлены они карбонатными, карбонатно-глинистыми (мергелями), окаменевшими глинистыми и песчано-глинистыми, обломочно-цементированными и галогенными породами. Структурные связи их цементационные, кристаллизационные и смешанные (цементационно-кристаллизационные).

Цементирующее вещество по составу может быть полимиктовым, состоящим из минералов различного состава и степени дисперсности, однородным (например, опаловым, карбонатным, сульфатным и т. д.) и смешанным (карбонатно-глинистым, сульфатно-глинистым и т. д.). В зависимости от

характера распределения цементирующего вещества различаются структуры с базальной и контактовой цементацией, цементацией пор и смешанной (рис. 19). Разнообразна структура и самого цементирующего вещества. Она может быть беспорядочно зернистой, обрастания, прорастания, вдавливания и др.

Пестрота и широкий диапазон изменений физических параметров осадочных пород обуславливаются только что охарактеризованными особенностями их минерального состава, структуры и текстуры.

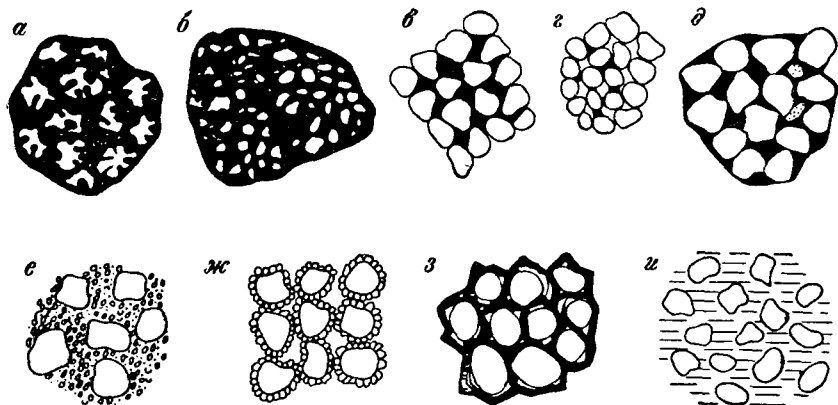


Рис. 19. Типы цементации обломочных пород (по М. С. Швецову):

а — цемент базальный и одновременно разъедания (коррозийный); *б* — цемент базальный и одновременно ступчатый (неравномерно распределенный); *в* — цемент пор; *г* — цемент контактовый; *д* — цемент выполнения и пор; *е* — цемент беспорядочно зернистый кристаллический; *ж* — цемент обрастания; *з* — цемент нарастания; *и* — цемент прорастания

§ 1. Карбонатные породы

Главными породообразующими минералами являются кальцит и доломит, но могут присутствовать также сидерит, сульфаты кальция (гипс и ангидрит) и глинистые минералы, реже битумы. По мере повышения содержания примесей глинистых минералов карбонатные породы через глинистые известняки связаны постепенными переходами с мергелями.

По структурным признакам выделяются пелитоморфные, оолитовые, кристаллически-зернистые, обломочно-детритусовые, обломочно-шламовые, губчатые (кавернозные) и другие карбонатные породы. Сложение пород — от массивных и грубослоистых до тонкоплитчатых. Как и всем твердым породам, им присуща трещиноватость. Нередко они закарстованы.

Пористость карбонатных пород колеблется в широких пределах — от 10—15 до 35% и более (табл. 11).

Наибольшей прочностью обладают породы мелко- и тонкозернистой и пелитоморфной структуры, временное сопротивление

Значения плотности карбонатных пород

Породы	Характер значений δ , 10 кг/м ³	
	колебания	наиболее часто встречающиеся
Известняки	1,80—2,90	2,60—2,70
Доломиты	1,90—3,0	2,60—2,80
Мергелистые известняки	1,50—2,80	2,20—2,40

сжатия которых нередко достигает $2000 \cdot 10^5$ Н/м². Прочность крупнозернистых и особенно обломочно-шламовых пород снижается до нескольких десятков ньютонов на квадратный метр. С появлением в составе карбонатных пород глинистых примесей наблюдается заметное повышение размягченности и снижение прочности. Процессы перекристаллизации и брекчирования сопровождаются повышением пористости до 10—15% и понижением прочности до $1000 \cdot 10^5$ Н/м² и более (табл. 12).

Таблица 12

Значения временного сопротивления сжатию известняков, 10^5 Н/м²

Породы	Структура				
	микро-зернистая	мелко-зернистая	средне-зернистая	крупно-зернистая	брекчированная
Кремнистые	2400	1400—1500	—	—	—
Битуминозные	—	900	750	—	—
Кристаллически-зернистые	—	850—950	650	50	250—30
Глинистые	—	350	—	—	—

Характерные интервалы значений временного сопротивления сжатию известняков и доломитов представлены в табл. 13. Весьма существенно влияние на прочность карбонатных пород трещинной расчлененности. По данным Л. В. Шаумян прочность микротрещиноватых доломитов палеозоя Сибирской платформы не превышает $(500—600) \cdot 10^5$ Н/м², тогда как у монолитных доломитов прочность достигает $(1200—1300) \cdot 10^5$ Н/м².

В зависимости от микротрещиноватости находятся и параметры упругости. Статический модуль упругости $E_{ст}$ мелкозернистых массивных доломитов $1,2 \cdot 10^{10}$ Н/м², а сильнотрещиноватых — $7,5 \cdot 10^9$ Н/м².

Значения временного сопротивления сжатию карбонатных пород

Известняки	$\sigma_{сж},$ 10 ⁶ Н/м ²	Доломиты	$\sigma_{сж},$ 10 ⁶ Н/м ²
Мелкозернистые	1000—1800	Монолитные	500—1500
Крупнозернистые	270—700	Микротрещиноватые	500—900
Битуминизированные	750—900	Детритусовые и шламо- во-детритусовые	600—120
Детритусовые и шламо- во-детритусовые	2150		

§ 2. Известково-глинистые породы (мергели)

Мергели относятся к группе карбонатно-глинистых пород с содержанием карбонатов от 25 до 75%. При более высоком содержании глинистой составляющей порода называется мергелистым известняком, а при более низком — глинистым мергелем.

По ряду свойств (высокой размягченности, гидрофильности, способности набухать и давать деформации усадки) мергели приближаются к глинистым породам с карбонатной цементацией.

Минеральный скелет мергелей с высоким содержанием карбонатов образуется из кристаллов кальцита со структурными связями кристаллизационной природы. В мергелях с малым содержанием карбонатов кальцит выступает в роли цементирующего вещества. При этом снижается степень дисперсности и повышается агрегатированность глинистой составляющей породы.

В массиве (in situ) мергели трещиноваты, иногда тонкоплитчатого сложения. В обнажениях при высыхании растрескиваются, образуя высокоподвижные осыпи.

Прочность влажных и высокопористых мергелей обычно не превышает $(60—70) \cdot 10^6$ Н/м², но при влажности до 6—7% и пористости, не превышающей 35%, прочность достигает $(250—300) \times 10^5$ Н/м².

По ряду свойств к мергелистым породам приближаются мел и мелоподобные породы. Они состоят из известковых скелетных частей микроорганизмов, сцементированных кальцитом. Цементация непрочная и нестойкая. Поэтому во влажном состоянии порода легко растирается руками на мельчайшие частицы. При нарушении естественной структуры водонасыщенный мел приобретает тиксотропную плавучесть. Воздушно-сухой мел является довольно прочной породой: при пористости, не превышающей 40%, временное сопротивление сжатию достигает $(150—170) \times 10^6$ Н/м² с повышением влажности — пористости прочность резко снижается.

По гранулометрическому составу мел — тонкодисперсная порода, преобладающую фракцию которого составляют частицы

0,05—0,005 мм; содержание этой фракции достигает 80%. С возрастанием терригенного (песчано-глинистого) материала происходит некоторое снижение пористости и повышение плотности, при этом порода переходит в мелоподобный мергель.

§ 3. Окаменевшие глинистые и песчано-глинистые породы

Породы данной группы являются постоянными спутниками ископаемых углей средней и высокой степени углефикации (метаморфизма), а также песчано-глинистых терригенных толщ горно-складчатых областей. Они распространены также в толщах осадочных пород платформенных областей, где обычно залегают на глубинах 500—600 м и более.

Группа эта представлена глинистыми и песчано-глинистыми сланцами, аргиллитами и алевролитами, плотность которых характеризуется данными табл. 14.

Таблица 14

Значения плотности глинистых и песчано-глинистых пород

Порода	Пределы колебаний δ , 10^3 кг/м ³	Наиболее часто встречающиеся значения δ , 10^3 кг/м ³
Глинистые сланцы	2,30—3,00	2,40—2,60
Аргиллиты	1,70—2,90	2,30—2,40
Алевролиты	1,80—2,80	2,30—2,50

Плотность этих пород зависит от степени литифицированности содержания обломочного материала и некоторых аксессуарных минералов (например, сидерита, пирита и др.).

Структурные связи окаменевших глинистых пород чаще всего носят цементационный характер. По площадкам микроконтактов частиц межминеральные связи частично осуществляются за счет сил главных валентностей, а иногда с помощью остаточных связей водноколлоидной природы. Этим объясняется широкий диапазон изменений прочностных свойств и показателей стойкости пород.

В Д о н б а с с е углевмещающие породы представлены в основном глинистыми сланцами, аргиллитами и алевролитами. Степень литифицированности и прочность их коррелируются с уровнем метаморфизма заключенных в их толще углей. По исследованиям С. И. Малинина, временное сопротивление сжатию глинистых пород бассейна на стадии катагенеза возрастает с 120 до $180 \cdot 10^5$ Н/м², а в дальнейшем достигает $370 \cdot 10^5$ Н/м². Однако на уровне коксово-жирных углей (К—Ж) отмечается некоторое снижение $\sigma_{сж}$, которое этот исследователь связывает с повышением

содержания вторичных слюд, образующихся на данной стадии литификации.

Присутствие карбонатов, а также повышение содержания алевролитовой фракции (0,1—0,01 мм) несколько снижает отмеченный эффект. На высших стадиях метаморфизма (полуантрацитов и антрацитов) заметно возрастает содержание вторичного кварца, гидрослюда и мусковита. Происходит полная перестройка углевмещающих пород, превращение их в глинистый или песчано-глинистый сланец с резко выраженной анизотропностью прочностных и деформационных свойств (табл. 15).

Т а б л и ц а 15

Прочностные и деформационные свойства песчано-глинистых сланцев Донбасса

Порода	Временные сопротивления, 10^6 Н/м^2				Упругие свойства		
	сжатию $\sigma_{сж}$		растяжению σ_p		Модуль упругости E , 10^{10} Н/м^2	Модуль сдвига G , 10^{10} Н/м^2	Коэффициент Пуассона μ
	слоев	⊥ к слоям	слоев	⊥ к слоям			
Глинистые сланцы	70—660	70—370	5—70	20—150	7,5—4,50	3,1—2,03	0,1—0,39
Песчано-глинистые сланцы	150—870	70—630	10—45	30—140	6,0—4,5	2,8—1,8	0,1—0,30

Коэффициент анизотропности механических свойств $K_{ан} = 1,35 \div 2,5$.

Значительное ослабление механических свойств углевмещающих пород происходит при появлении в их составе углистого вещества. Ослабление их, по-видимому, обусловлено повышенной микротрещиноватостью данных пород и вследствие этого и хрупкостью. Наиболее ослабленными являются так называемые «кучерявички» * — породы, состоящие из переслаивающихся между собой аргиллитов, алевролитов и (реже) мелкозернистых песчаников. Содержание углистых веществ в них до 5%.

Углевмещающие породы Донбасса обнаруживают ползучесть уже при напряжениях, не превышающих 70% от разрушающих. Величина ползучести ко времени стабилизации достигает 150—370% от упругих. Затухание ползучести по времени достигается по прошествии 600 ч (Ж. С. Ержанов).

* «Кучерявички» отличаются высоким содержанием неупорядоченно распределенных в породе остатков растений (стигмариев) и причудливо изогнутых корешков растений, придающих породе своеобразный «кучерявый» вид.

Аргиллиты и алевролиты Карагандинского бассейна представлены разностями, прочность которых заметно возрастает с глубиной (табл. 16).

Таблица 16

Временные сопротивления сжатию и растяжению аргиллитов и алевролитов Карагандинского бассейна (по исследованиям Ж. М. Кандыбаевой)

Глубина залегания, м	$\sigma_{сж}, 10^5 \text{ Н/м}^2$	$\sigma_{р}, 10^5 \text{ Н/м}^2$
	от—до	от—до
220—858	А р г и л л и т ы 162—508	20—35
220—858	А л е в р о л и т ы 122—397	7—31

§ 4. Обломочно-цементированные породы

В состав данной группы входят разнородные песчаники, конгломераты, гравелиты и брекчи со структурными связями цементационной природы. Основными факторами, влияющими на их свойства, являются состав и тип цементации горной породы. Минимальной прочностью обладают породы с глинистой и серицит-глинистой цементацией, максимальной — с кремнистой. При одном и том же составе цементирующего вещества наибольшей прочностью обладают породы с цементацией типа вдавливания (прессования), или регенерации. Так, у песчаников тунгусской свиты Сибирской платформы с глинистой и глинисто-серицитовой поровой цементацией временное сопротивление сжатию не превышает $850 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, при том же составе цемента, но с цементацией типа вдавливания или регенерации временное сопротивление повышается до $1180 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ (Л. В. Шаумян). Определенное влияние на прочность оказывает плотность породы, характерные значения которой приведены в табл. 17.

Таблица 17

Значения плотности обломочно-цементированных пород

Порода	Характерные значения $\delta, 10^3 \text{ кг/м}^3$	
	от—до	часто встречающиеся
Песчаники	2,0—2,90	2,50—2,60
Песчаные сланцы	2,30—3,00	2,60—2,70
Конгломераты и брекчи	1,60—3,00	—

Резкое снижение прочности цементированных обломочных пород связано с содержанием в составе обломочного материала аргиллита, алевролита, глинистых сланцев, а также сильно выветрелых пород других литолого-генетических типов.

Обломочно-цементированные породы Донбасса представлены песчаниками и песчано-глинистыми сланцами. Значительно меньшей распространенностью пользуются конгломераты. Преобладают разномерные песчаники преимущественно с базальной и контактно-поровой цементацией карбонатно-глинистого и гидрослюдисто-карбонатного состава. В цементе практически всегда имеется вторичный кварц и вторичные слюды, содержание которых повышается с уровнем метаморфизма заключенных в их толще углей. Прочностные и деформационные свойства характеризуются данными табл. 18.

Таблица 18

Механические свойства обломочно-цементированных пород Донбасса
(По В. Т. Шрубко).

Порода	Временное сопротивление, 10^5 Н/м^2				Упругие свойства		
	сжатию $\sigma_{сж}$		растяжению σ_r		Модуль упругости $E, 10^{10} \text{ Н/м}^2$	Модуль сдвига $G, 10^{10} \text{ Н/м}^2$	Коэффициент Пуассона μ
	слоистости	⊥ к слоистости	слоистости	⊥ к слоистости			
Песчаники	200—1470	190—1050	20—100	30—220	150—610	71—260	0,1—0,29
Песчанистые сланцы	190—890	120—690	15—60	20—250	120—475	50—250	0,1—0,4
Песчано-глинистые сланцы	150—870	70—630	10—45	30—140	60—450	28—180	0,1—0,38

Песчаники Карагандинского бассейна чаще всего средне- и тонкозернистые и разномерные, полимиктовые и кварц-полевошпатовые. Цементация глинисто-карбонатного и карбонатного состава. Тип цементации контактно-поровый и поровый, содержание цементирующего вещества до 20%. В зависимости от петрографического состава обломочного материала цемента и типа цементации прочностные характеристики изменяются в широких пределах (табл. 19).

При столь значительных колебаниях прочностных параметров наблюдается тенденция повышения их с глубиной. По данным Ж. М. Канлыбаевой в интервале глубин 500—600 м отмечается резкое аномальное понижение значения $\sigma_{сж}$ до 200—300 $\cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, обусловленное изменением петрографических характеристик пород на глубинах.

Временное сопротивление песчанников промышленного района Карагандинского бассейна (по Ж. М. Кандыбаевой)

Литологические разности песчанников	Глубина залегания, м	Пределы изменения временных сопротивлений, σ , 10^8 Н/м ²	
		$\sigma_{сж}$	σ_p
Разнозернистые слабосцементированные железистые	До 150	50—100	10—20
		350—470	50—65
		370—400	45—70
Полимиктовые и кварц-полевошпатовые	150—500	550—600	110—130
	500—1000	450—570	80—120
Средне- и тонкозернистые		820—922	145—160

Примечание. В числителе — пределы колебаний минимальных значений временного сопротивления, в знаменателе — максимальных.

§ 5. Галогенные породы

В состав данной группы входят типичные представители хемогенных осадков осолоненных лагун и соленых озер — каменная и калийные соли, гипс и ангидрит. Породообразующими минералами их являются галит, сильвин, карналлит, гипс и ангидрит. В качестве примесей присутствуют карбонаты, глинистые минералы, гидроокислы железа, а также битуминозные вещества. Залегают в виде пластообразных, линзовидных и штокообразных залежей, мощность которых нередко измеряется сотнями метров. Последние часто составляют ядра соляных диашировых складок.

По структуре галогенные породы разнообразны. Среди них выделяются разности со структурами замещения, собирательной кристаллизации, катакlastической и скрытокристаллической. Общая черта галогенных пород — высокая растворимость в воде (до 300 г/л и более при $t = 30^\circ \text{C}$ для галита и карналлита) *, пластичность и гигроскопичность и весьма плохая электрическая сопротивляемость (десятки и сотни тысяч Ом·м). Залежи калийных солей газonosны. Газовыделение нередко сопровождается внезапными выбросами соли. В составе газов преобладают азот, углекислый газ, горючие газы (H_2 , CH_4 , высшие углеводороды) и благородные газы (главным образом аргон).

Контакты между слоями и прослоями различного состава и структуры обычно весьма ослаблены. Поэтому в потолочинах горных выработок они легко расслаиваются, образуя высокие

* Здесь и далее значение температуры дается по шкале Цельсия. Для получения термодинамической температуры Кельвина (Международная система СИ) используется соотношение: $T = (t + 273)$.

Физико-механические свойства каменной соли и ангидритов (по данным Д. С. Писарева)

Наименование показателей и их размерность	Каменная соль			Ангидрит		
	доверительные пределы колебаний		среднеарифметические	доверительные пределы колебаний		среднеарифметические
	нижний	верхний		нижний	верхний	
Минералогическая плотность σ_0 , 10^3 кг/м^3	2,19	2,20	2,20	2,85	2,90	2,87
Объемная масса σ , 10^3 кг/м^3	2,08	2,10	2,09	2,63	2,75	2,69
Пористость n , %	4,66	5,50	5,08	4,07	5,75	4,92
Влажность W , %	0,26	0,31	0,28	0,33	0,53	0,43
Временное сопротивление сжатию $\sigma_{сж}$, 10^5 Н/м^2	268	282	275	706	864	785
Временное сопротивление растяжению σ_r , 10^5 Н/м^2	14	15	14,5	—	—	—
Временное сопротивление срезу $\sigma_{ср}$, 10^5 Н/м^2	68	73	68	211	259	235
Скорость упругих колебаний v , м/с	4,14	4,25	4,94	5,46	5,98	5,67
Коэффициент Пуассона μ	0,27	0,29	0,28	—	—	—
Модуль упругости E , 10^{10} Н/м^2	2,74	2,95	2,87	—	—	—
Модуль сдвига G , 10^{10} Н/м^2	1,09	1,17	1,09	—	—	—
Модуль всестороннего сжатия K , 10^{10} Н/м^2	—	—	2,31	—	—	—

своды параболических очертаний. Разности массивной текстуры в тех же условиях подвержены медленному пластическому прогибанию.

Обращает на себя внимание известная выдержанность физико-механических свойств галогенидов (табл. 20).

Ангидрит на глубинах, не превышающих 100—120 м от поверхности, обычно гидратируется и переходит в гипс. Гидратация ангидрита наблюдается и при наличии линз рассолов в соленосной толще. Известны случаи переслаивания ангидрита с гипсом. При гидратации ангидрита возрастает первоначальный объем породы до 64,9%. При дегидратации гипса, наоборот, происходит объемное сжатие, сопровождающееся развитием трещин растяжений. Трещиноватость (катаклаз) имеет место и при гидратации ангидрита, но трещины в этом случае типа сжатия.

По некоторым данным соленосным толщам (в частности, для залежей каменной соли) присуща анизотропность.

Установлено, что объемный модуль упругости находится со статическим модулем в линейной зависимости:

$$E_d = E_{ст} + 0,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2. \quad (1.6)$$

Коэффициент Пуассона $\mu_d \approx \mu_{ст}$.

Б. ГЛИНИСТЫЕ ПОРОДЫ

§ 1. Общие сведения

Глинистые породы по составу являются полидисперсными системами. Они отличаются высокой гидрофильностью и чувствительностью к изменениям влажности.

Специфические «глинистые» свойства этих пород обусловлены наличием в их составе высокодисперсной глинисто-коллоидной фракции с гидравлическим диаметром частиц $< 0,002$ мм *. По содержанию данной фракции различаются глины, суглинки и супеси, а также существенно пылеватые и грубообломочные глинистые их разновидности (табл. 21).

Таблица 21

Классификация глинистых пород по гранулометрическому составу

Порода	Содержание фракции (мм), %			
	$< 0,002$	$0,002-0,05$	$0,05-2,0$	$> 2,0$

Собственно глинистые породы

Глины	30	—	Больше, чем пылеватых	—
Суглинки	30—40	—	То же	—
Супеси	10—3	—	»	—

Пылевато-глинистые породы

Пылеватые глины	30	Больше, чем песчаных	—	—
Пылеватые суглинки	30—40	То же	—	—
Пылеватая супесь	10—3	»	—	—

Грубообломочные глинистые породы

Гравелисто-валунные и щебенистые глины	30	—	Больше, чем пылеватых	10—50
Гравелисто-валунные и щебенистые суглинки	30—40	—	То же	10—50
Гравелисто-валунные и щебенистые супеси	10—3	—	»	10—50

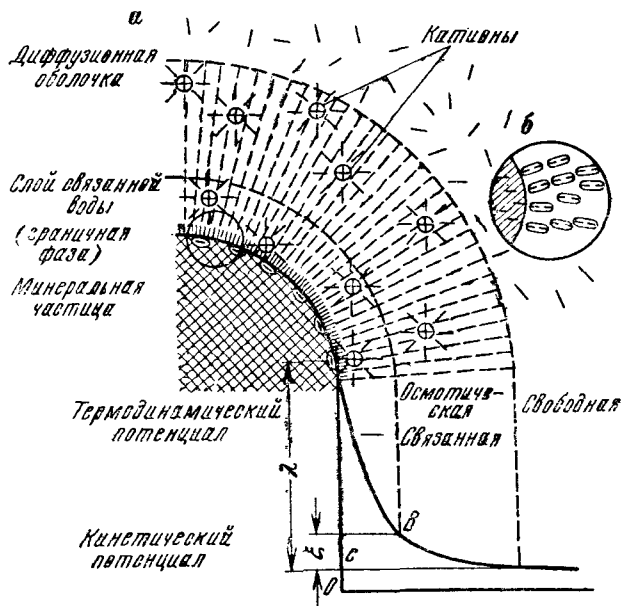
Фракция физической глины в основном представлена минералами слоистой структуры — каолинитом и галлуазитом, монтмориллонитом и бейделлитом, гидрослюдами (иллитом), хлоритом и некоторыми другими. При разрушении они распадаются на

* Гидравлическим называется диаметр шарика, падающего в воде с такой же скоростью, что и данная частица, независимо от ее формы.

чешуи толщиной 0,01—0,02 мкм и даже 0,001 мкм. Размеры их по плоскостям спайности чаще всего в пределах 1—0,01 мкм. В результате глинистая фракция обладает огромной удельной поверхностью тонкодисперсной минеральной фазы и соответственно высокой плотностью свободной поверхностной энергии и большой адсорбционной способностью.

В тонкодисперсной фракции могут содержаться также карбонаты кальция и железа, сульфаты железа и органическое вещество (главным образом гуминовое).

Рис. 20. Схема молекулярного взаимодействия сил в системе «твердая частица — вода» (по Н. А. Цытовичу): а — схема строения адсорбционной пленки воды; б — расположение диполей воды вокруг электрически заряженной частицы; в — эпюра изменений величины молекулярных сил в зависимости от расстояния до поверхности минеральной частицы



В составе пыли (0,002—0,05 мм) и песчаной фракции (0,05—2,0 мм) преобладают минералы преимущественно жесткой и прочной каркасной структуры (кварц, полевые шпаты), а в грубообломочной — обломки по преимуществу твердых горных пород различного размера и степени окатанности (угловатости).

Значительная часть воды в глинистых породах находится в связанном состоянии — в виде адсорбированных пленок, обволакивающих минеральные частицы высокодисперсных фракций. Связанная вода состоит из неподвижной (прочносвязанной) и диффузной (рыхлосвязанной) частей. На некотором расстоянии от поверхности минеральных частиц, превышающем радиус действия поверхностных сил, молекулы воды переходят в свободное (гравитационное) состояние (рис. 20).

Энергетический уровень связи неподвижной (прочносвязанной) воды очень высок. Поэтому вода в этом слое по своим свойствам

резко отличается от свободной воды: ее плотность достигает $2 \cdot 10^3$ кг/м³, модуль сдвига $2 \cdot 10^5$ Н/м², а температура смерзания — 70° С. Молекулы воды в нем представляют собой как бы застройку кристаллической решетки минералов и непосредственно скреплены с ними кристаллохимическими связями или же ионно-дипольными (электростатическими) силами. Последние возникают в результате гидратации поглощенных катионов на поверхностях частиц. Максимальное содержание прочносвязанной воды в глинистых породах колеблется от 0,2 до 30%, главным образом в зависимости от степени дисперсности и минерального состава твердой фазы породы, а также состава поглощенных катионов (энергии их гидратации). В минералах с подвижным типом кристаллической решетки прочносвязанная вода заполняет также межапакетные пространства кристаллической решетки (монтмориллонитах).

При влажности, превышающей максимальную гигроскопичность ($W_{\text{гиг}}$), появляется слой рыхлосвязанной воды. Часть полислоев молекул воды удерживается электромолекулярными силами прочносвязанной воды, а другая — осмотическими силами. Последняя формируется путем осмотического поглощения молекул свободной поровой воды водой диффузного (рыхлосвязанного) слоя, отличающегося более высокой концентрацией ионов.

С появлением осмотически связанной воды глинистая порода переходит в пластическое состояние и в этом состоянии пребывает только в определенном интервале влажности.

Адсорбционные пленки исключают возможность установления истинных контактов минеральных зерен. Эти контакты всегда пластифицированы пленкой связанной воды. Последняя обволакивает минеральные частицы и в своем составе содержит коллоидные частицы (главным образом гидроксиды кремнезема и органических веществ), обладающие клеящими свойствами. В результате между минеральными частицами глинистых пород устанавливается особый тип структурных связей — водно-коллоидный. Он придает глинистым породам пластичность, высокую чувствительность к изменениям состояния влажности и другие специфические физические свойства.

Прочность структурных связей водно-коллоидной природы на несколько порядков ниже прочности связей кристаллизационной природы и цементационных. Лишь со снижением влажности (с дегидратацией) отмечается некоторое упрочнение породы, однако прочность их никогда не достигает значений, характерных для полутвердых пород.

Упрочнение, консолидация глинистой породы — сложный многостадийный процесс. На начальной стадии (стадия глинистого ила) формируется рыхлый аркас минеральных частиц, скрепленных между собой силами молекулярного и электростатического притяжения. В порах минерального каркаса удерживается значительная масса иммобилизованной воды (порового раствора). Глинистый осадок на данной стадии способен к внезапному раз-

жизнению под воздействием даже незначительных нагрузок. Структурные связи такого типа принято называть тиксотропно-образными *.

Последующее уплотнение за счет отжатия поровой влаги и сближения частиц по площадкам микроконтактов приводит к потере тиксотропных свойств. По мере сближения частиц возрастает энергия межчастичных связей молекулярной природы. При дальнейшем сближении на расстояния, меньшие двойного радиуса действия электростатических сил (т. е. при перекрытии гидратно-ионных оболочек), вступают в действие силы кулоновского отталкивания ионных сфер соседних частиц с зарядами одного и того же знака. Действием этих сил обусловлена способность глинистых пород к набуханию (при гидратации) и усадкам (при дегидратации).

Структурные связи на данной стадии консолидации глинистых осадков являются коагуляционно-конденсационными.

При средней и высокой степени консолидации происходит цементационное упрочнение глинистой породы. Исследованиями И. М. Горьковой установлено, что цементирующими являются вещества, обладающие молекулярным сродством с поверхностью минеральных частиц. Таковы гидрогели кремнезема, появляющиеся на поверхности частиц твердой фазы за счет гидролиза силикатов, а также органические (в основном гуминовые) вещества. Эти вещества поляризуются в присутствии ионов кальция и цементируют частицы твердой фазы в пределах площадок микроконтактов с минимальной толщиной ионно-гидратных пленок. При этом возникают коагуляционно-цементационные структурные связи. В результате порода приобретает повышенную прочность (до $2-3 \cdot 10^5$ Н/см², тогда как прочность пород с коагуляционно-конденсационным типом структурных связей не превышает значений 10^3 Н/м²).

Наконец, в результате выпадения минеральных веществ из пересыщенного порового раствора формируется цементационный тип структурных связей. Цементирующее вещество вначале обычно замещает ионно-гидратные пленки на площадках микроконтактов частиц (т. е. возникает контактный тип цементации), а затем может частично или полностью заполнить поровое пространство и инкрустировать стенки пор и трещины породы. По мере вытеснения коагуляционно-цементационных структурных связей цементационными глинистая порода приобретает свойства полутвердого тела.

* Тиксотропность — свойство изменять состояния консистенции и вязкости концентрированных суспензий в результате только механического воздействия (например, встряски). Эти изменения совершаются по схеме: тиксотропное $\rightleftharpoons$ текучее $\rightleftharpoons$ твердообразное состояние.

§ 2. Структурно-текстурные особенности

При осаждении осадка с высоким содержанием глинистой фракции формируется ячеисто-хлопьевидная структура. При одновременном осаждении глинистой фракции с песчаной и пылеватой возникают более сложные неоднородно-ячеистые структуры, в которых частицы более крупных фракций скреплены между собой глинисто-коллоидными частицами. Таковы некоторые из первичных крипструктур глинистых пород (рис. 21, 22).

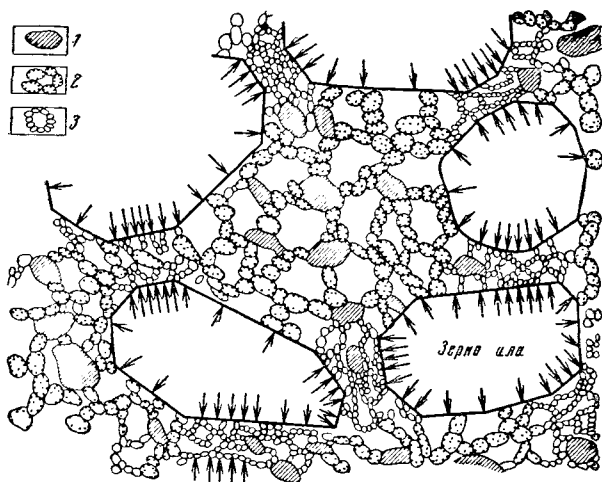


Рис. 21. Схема крипструктуры морского ила (по А. Казагранде):

1 — частицы глины;
2 — коллоиды слабоуплотненные;
3 — коллоиды сильноуплотненные

В процессе старения и кристаллизации коллоидов, обезвоживания и уплотнения осадка, а также постседиментационного минералообразования и цементации возникают вторичные структуры глинистых пород. Глинистое вещество в них чаще всего имеет скрыто- или микроструктурное, реже гелевидное (аморфное), строение. Расположение частиц в них может быть упорядоченным или спутанночешуйчатым, а в глинах песчаных формируются структуры глинисто-кластических типов.

Процессы уплотнения и структурообразования обычно связывают с уплотняющим действием всех вышележащих толщ горных пород (т. е. с петростатическим давлением). Согласно таким представлениям следует ожидать закономерное возрастание плотности породы с глубиной. По некоторым данным наблюдается линейная зависимость между коэффициентом пористости ε и логарифмом глубины залегания породы

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 - \alpha \lg h, \quad (1.7)$$

где α — коэффициент уплотнения породы; ε_1 и ε_n — коэффициенты пористости породы на глубинах 1 и n м.

Процесс уплотнения и литификации глинистых пород в целом совершается не только за счет силы тяжести (масса выпележащих пород), но и за счет свободной поверхностной энергии минеральных составляющих. В глинистых породах эти процессы в определенной мере носят самопроизвольный энтропийный характер. При этих процессах наблюдаются смена ассоциаций большого числа неустойчивых минералов ассоциациями меньшего числа, но более стойких минералов, явления самопроизвольной раскристаллизации коллоидного вещества и др. К числу такого рода процессов можно, например, отнести вытеснение минералов с неустой-

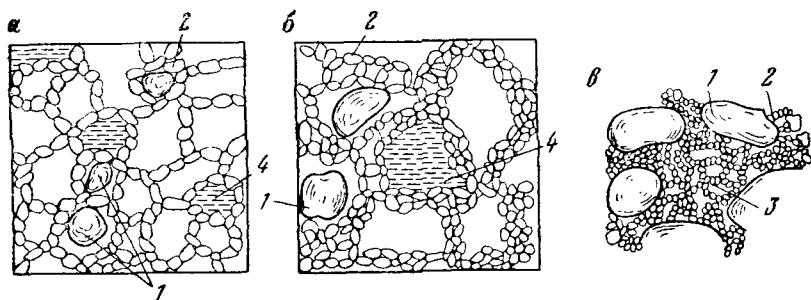


Рис. 22. Некоторые типы кристоструктуры глинистых осадков:

а — ячеистая; б — ячеисто-хлопьевидная; в — неоднородно-ячеистая; 1 — песчаные и алевроитовые частицы; 2 — глинистые частицы, образующие ячейки; 3 — уплотненные глинистые и коллоидные частицы; 4 — зацементированная вода

чивой, подвижной кристаллической решеткой минералами с более стойкими типами кристаллических решеток (например, монтмориллонита гидрослюдами), при которых выделяется вторичный кремнезем, а также происходит агрегатизация и цементация минеральных частиц. Однако, разумеется, такого рода постседиментационные процессы могут идти более интенсивно в условиях повышения температуры и давления.

Таблица 22

Категории плотности глинистых пород (по И. М. Горьковой)

Степень плотности	Плотность, 10^3 кг/м ³	Пористость n , %	Типы структурных связей	Коэффициент агрегативности *, %
Слабая	0,3—1,2	50	Тиксотропно-обратимый	Частиц $< 1-5$ мкм = 7
Средняя	1,3—1,65	50—25	Коагуляционно-конденсационный	Частиц < 1 мкм от 50 до 45, частиц 5 мкм — 1
Высокая	1,66—2,20	25—30	Коагуляционно-цементационный	Частиц < 1 мкм от 6 до 38, частиц 5 мкм от 20 до 30

* Склеиваемости частиц указанных размеров.

По плотности глинистые породы подразделяются [17, 32] на слабо-, средне- и высокоуплотненные (табл. 22).

§ 3. Водно-физические свойства

Вода, заключенная в порах, составляет естественную влажность породы W . Она выражается отношением массы воды к массе сухой породы (в %). Влажность по отношению к объему пор называется коэффициентом водонасыщенности K_w . Он характеризует степень заполнения порового пространства породы водой и может быть рассчитан из следующих зависимостей:

$$K_w = \frac{W\delta_0}{n} = \frac{W\delta_0}{\varepsilon} = \frac{W\delta(1-n)}{n} = \frac{W}{W_{пв}}, \quad (1.8)$$

в которой $W_{пв}$ — полная влагоемкость породы. При $W = W_{пв}$ глинистая порода представляет собой двухфазную систему: минеральный скелет + вода. В механике грунтов принято называть такую систему грунтовой массой. При $K_w < 1$ порода является трехфазной системой: минеральный скелет + вода + воздух.

Степень водонасыщенности непосредственно сказывается на состоянии глинистой породы. Воздушно-сухая глинистая порода при увлажнении вначале размягчается, затем переходит в пластическое состояние, а по достижении некоторого состояния влажности порода приобретает текучую консистенцию. Значения влажности в весовых процентах, при которых порода переходит из одного состояния консистенции в другое, получили название пределов пластичности. Различают верхний W_v и нижний пределы пластичности W_n . Первый из них соответствует влажности, ниже которой порода находится в пластическом состоянии, а выше — в текучем. Второй предел соответствует той влажности, ниже которой порода переходит из пластического состояния в непластичное (начинает крошиться). Нижний предел пластичности близок или равен тому состоянию влажности, ниже которого вода находится в связанном состоянии. Выше нижнего предела пластичности появляется свободная (капиллярная и гравитационная) вода.

Разность между верхним и нижним пределами пластичности называется числом пластичности: $\Phi = W_v - W_n$. Число пластичности свидетельствует о диапазоне влажности, в пределах которого глинистая порода находится в пластическом состоянии.

Величина числа пластичности зависит от многих факторов и прежде всего, от гранулометрического состава породы: она возрастает с повышением содержания глинистой фракции (частицы $< 0,002$ мм). На число пластичности влияет также минеральный состав породы: с повышением содержания глинистых минералов — наиболее активных составных частей в межфазных взаимодействиях — возрастает и число пластичности. Наконец, число

пластичности заметно отражает изменения химического состава катионов, поглощенных в поверхностном слое минеральных частиц, а также состава и концентрации солей в рыхлосвязанной воде. При этом одновалентные катионы (K^{+1} , Na^{+1} , Li^{+1}), обладающие наиболее высокой энергией гидратации, повышают пластичность глин. Обратное действие оказывает замещение одновалентных катионов двухвалентными (Ca^{+2} , Mg^{+2}).

Таким образом, число пластичности отражает многие особенности состава (и, следовательно, свойств) породы и может быть использовано в качестве некоторой обобщенной характеристики глинистой породы.

По значениям коэффициентов пористости в состоянии естественной влажности и структуры ϵ и при влажностях, соответствующих верхнему ϵ_v и нижнему пределам пластичности ϵ_n , можно оценить степень уплотненности глинистой породы

$$k_d = \frac{\epsilon_v - \epsilon}{\epsilon_v - \epsilon_n}.$$

Значения ϵ_v и ϵ_n получают путем перемножения весовых влажностей W_v и W_n на минералогическую плотность породы δ_0 , т. е. $\epsilon_v = W_v \delta_0$ и $\epsilon_n = W_n \delta_0$.

По значениям k_d В. А. Приклонский рекомендовал различать следующие состояния уплотненности глинистых пород (табл. 23).

Т а б л и ц а 23

Состояния уплотненности глинистых пород (по В. А. Приклонскому)

Уровни уплотнен- ности	Состояние уплотненности	При
I	Неуплотненное, рыхлое	$\epsilon > \epsilon_v$ и $k_d < 0$
II	Начальной стадии уплотнения	$\epsilon = \epsilon_v$ и $k_d = 0$
III	Средней уплотненности	$\epsilon_n < \epsilon < \epsilon_v$ и $0 < k_d < 1$
IV	Плотное	$\epsilon = \epsilon_n$ и $k_d = 1$
V	Переуплотненное	$\epsilon < \epsilon_n$ и $k_d > 1$

К числу важных водно-физических характеристик глинистых пород относятся также показатели набухаемости и усадки, липкость, размокаемость, капиллярные свойства и водопроницаемость.

Приращение объема глинистой породы при смачивании водой называется н а б у х а н и е м. Обратное явление — сжатие породы при дегидратации называется у с а д к о й. Оба эти явления осмотической природы; они происходят при наличии разности концентрации солей в поровом растворе и во внешней окружающей породу воде. Если концентрация солей в поровом

растворе выше концентрации внешней воды, наблюдается осмотическое всасывание воды, сопровождающееся набуханием породы. При обратном соотношении концентрации солей наблюдается усадка породы.

Набухание породы характеризуется: а) величиной приращення объема породы по отношению к первоначальному; б) величиной давления, порождаемого набуханием, выраженного в ньютонах на квадратный метр, и в) влажностью набухания, соответствующей влажности породы, при которой прекращается увеличение объема породы.

Усадка характеризуется линейной или объемной усадкой:

линейная усадка

$$l = \frac{l_0 - l_n}{l_0} 100 \%,$$

объемная усадка

$$V = \frac{V_0 - V_n}{V_0} 100 \%;$$

где l_0 — начальная длина бруска исследуемой породы; l_n — его длина при достижении предела усадки; V_0 — первоначальный объем влажной породы, см³; V_n — объем породы при достижении предела усадки, см³.

Липкость. Внутренние межзерновые связи между частицами глинистой породы обуславливают не только связность и пластичность, но и липкость, т. е. способность пород прилипать к посторонним телам. Числовой характеристикой липкости является сила (Н/м²), которую нужно приложить, чтобы оторвать глину от металлической поверхности.

С увеличением влажности липкость вначале возрастает, а затем резко уменьшается (рис. 23). Влажность, при которой порода обладает наибольшей липкостью, называется влажностью максимального прилипания. Липкость связывают с вязкостью и клейкостью пленки рыхлосвязанной воды, наступающей при определенной для данных условий толщине этой пленки. До влажности начального прилипания молекулы воды удерживаются мощными силами молекулярного притяжения минеральных частиц, и поэтому они не способны вступать во взаимодействие с другими телами. При повышении влажности породы и соответствующем утолщении пленки рыхлосвязанной воды молекулы воды в периферийных частях этой пленки притягиваются с равной силой как минеральными частицами, так и поверхностью постороннего предмета. Это состояние соответствует влажности максимального прилипания. При дальнейшем утолще-

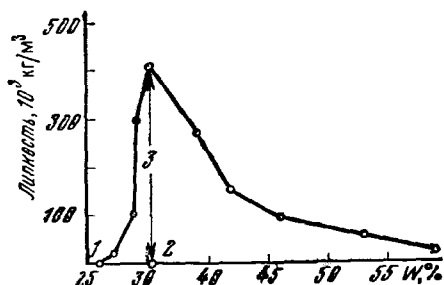


Рис. 23. График зависимости липкости горной породы от влажности (по Е. М. Сергееву).

1 — влажность начального прилипания; 2 — влажность максимального прилипания; 3 — максимальная липкость породы

l_n — его длина при достижении предела усадки; V_0 — первоначальный объем влажной породы, см³; V_n — объем породы при достижении предела усадки, см³.

Липкость. Внутренние межзерновые связи между частицами глинистой породы обуславливают не только связность и пластичность, но и липкость, т. е. способность пород прилипать к посторонним телам. Числовой характеристикой липкости является сила (Н/м²), которую нужно приложить, чтобы оторвать глину от металлической поверхности.

С увеличением влажности липкость вначале возрастает, а затем резко уменьшается (рис. 23). Влажность, при которой порода обладает наибольшей липкостью, называется влажностью максимального прилипания. Липкость связывают с вязкостью и клейкостью пленки рыхлосвязанной воды, наступающей при определенной для данных условий толщине этой пленки. До влажности начального прилипания молекулы воды удерживаются мощными силами молекулярного притяжения минеральных частиц, и поэтому они не способны вступать во взаимодействие с другими телами. При повышении влажности породы и соответствующем утолщении пленки рыхлосвязанной воды молекулы воды в периферийных частях этой пленки притягиваются с равной силой как минеральными частицами, так и поверхностью постороннего предмета. Это состояние соответствует влажности максимального прилипания. При дальнейшем утолще-

нии пленки рыхлосвязанной воды молекулы периферийных частей ее оказываются уже настолько удаленными от минеральных частиц, что они легко отрываются от их поверхности. Это соответствует снижению липкости породы.

Липкость, как и пластичность глинистых пород, зависит от гранулометрического и минерального состава, состава поглощенных оснований. С повышением содержания глинистых частиц повышается и липкость породы, но до определенного предела: при содержании глинистых частиц, превышающем 50—60%, липкость глин остается постоянной (В. В. Охотин). Липкость повышается с увеличением содержания в породе гидрофильных минералов, например монтмориллонита *. Липкость повышается при замене двухвалентных катионов одновалентными в поглощенном основании. Она зависит также от характеристики той поверхности, к которой прилипает порода, а также от состава жидкой фазы породы. Содержание в воде коагулирующих веществ, которым свойственны положительная адсорбция, приводит к уменьшению липкости; при отрицательной адсорбции липкость должна возрастать.

Размокание глинистых пород выражается в распаде (полностью или на крупные агрегаты) при погружении в воду; размокаемость относят к числу основных показателей водостойкости глинистых пород. По степени водостойкости различаются неводостойкие (например, лессы), слабоводостойкие и относительно водостойкие. Неводостойкие породы быстро распадаются в воде на микроагрегаты и элементарные минеральные частицы — зерна пыли, песка и глины. Для слабоводостойких пород характерна меньшая интенсивность распада и притом только на крупные агрегаты — пластинки, угловатые обломки, мелкозернистые агрегаты и т. д. Примером их являются осадочные глинистые породы коры выветривания. Большинство глинистых пород в свежем, невыветрелом состоянии в воде не распадаются, а только размягчаются.

Для характеристики размокаемости породы определяют время размокания, характер распада образца и слоистость размокшей породы.

Капиллярные свойства глинистых пород можно выразить через высоту капиллярного поднятия и скорость поднятия капиллярной влаги от свободной поверхности воды.

Поднятие воды в породе по капиллярным порам нередко рассматривают как результат действия подъемной силы вогнутых менисков, возникающих в породах при взаимодействии воды с твердыми частицами. Величина этой силы, отнесенная к единице

* Как уже отмечалось, монтмориллонит обладает подвижной кристаллической решеткой. Под влиянием водных прослоек, находящихся между пакетами с плотной упаковкой атомов в кристаллической решетке, наблюдается так называемое внутрикристаллизационное набухание. Этим объясняется высокая гидрофильность и липкость глинистых пород с монтмориллонитом.

поверхности мениска, определяется по формуле Лапласа

$$\theta = \alpha \frac{2}{R}, \quad (I.9)$$

где α — поверхностное натяжение жидкости; R — радиус кривизны мениска.

Радиус кривизны мениска находится в следующей зависимости от диаметра капилляра:

$$R = \frac{d}{2 \cos \theta}, \quad (I.10)$$

где d — диаметр капилляра; θ — краевой угол смачивания.

Высота и скорость капиллярного поднятия зависят также от силы электрохимического взаимодействия между поверхностью минеральных зерен и водой. Поэтому высота и скорость капиллярного поднятия изменяются не только в зависимости от гранулометрического состава, плотности и структуры породы, но также от минерального состава, состава обменных катионов и некоторых других особенностей вещественного состава породы, а также от химического состава воды.

По данным П. С. Косовича, грунтовая вода в лессах поднимается под действием капиллярных сил до 4 м в течение двух лет, а в глинистых породах лёссовидного облика максимальная высота капиллярного поднятия достигает 8 м.

В суглинках и легких глинах насыщение одновалентными катионами вызывает увеличение высоты капиллярного поднятия; в тяжелых глинах насыщение их натрием дает обратный эффект.

Исследованиями Б. Б. Полынова установлено, что капиллярное передвижение водного раствора сопровождается его дифференциацией. Так, например, при поднятии раствора хлористого и сернокислого натрия последний отстает от первого, и поэтому в верхней зоне капиллярного насыщения породы наблюдается повышение концентрации хлористого натрия.

Водопроницаемость глинистых пород. По показателям водопроницаемости глинистые породы относятся к полупроницаемым с коэффициентом фильтрации k_f от 1 до 0,001 м/сут (супеси и легкие суглинки) и практически водоупорным с коэффициентом фильтрации менее 0,001 м/сут.

Для некоторых глинистых пород характерны резкие изменения показателей водопроницаемости в зависимости от направления движения воды. К таким породам, например, относятся лёссы, лёссовидные породы и тонко- и микрослоистые глины. Для подобных пород коэффициенты фильтрации определяются по взаимно перпендикулярным направлениям: нормальным и параллельным к основным текстурным элементам породы (плоскостям слоистости) и трещинам отдельностей. Так как большая часть воды в глинистых породах находится не в свободном, а в связанном состоянии, ее можно привести в движение, например, увеличивая на-

грузку на глинистую породу, т. е. увеличивая градиент фильтрации.

Опыты С. А. Роза и др. показали, что вода в глинах начинает двигаться только после того, как градиент фильтрации превысит некоторую определенную величину, которую называют начальным градиентом, или градиентом порога фильтрации $I_{нач}$. Очевидно, что с увеличением нагрузки на глину вначале отжимается свободная (гравитационная и капиллярная) вода, а при высоком давлении — слой рыхлосвязанной воды. Если вызванный в глине градиент действует длительное время, то отжатие воды может происходить при более низких градиентах, чем при кратковременном действии.

На величину начального градиента фильтрации существенное влияние оказывают минеральный состав, точнее — гидрофильность минералов, плотность породы, а также химический состав порового раствора и его температура.

Начальный градиент, по-видимому, вызван уменьшением эффективного диаметра пор в результате образования пленок связанной воды. Для сдвига этой воды требуется приложить некоторое давление, равное $I_{нач}$. При $I > I_{нач}$ большая часть рыхлосвязанной воды приходит в движение вместе со свободной водой.

В согласии с таким предположением находится факт снижения начального градиента фильтрации с повышением концентрации электролитов в поровом растворе и температуры. При концентрации электролитов в поровом растворе в 2—3н. величина $I_{нач} \approx 0$.

§ 4. Механические свойства

Основные параметры механических свойств глинистых пород получают путем испытаний на сжатие в условиях отсутствия бокового расширения (компрессия) и при наличии этих условий и испытаний на сдвиг.

Компрессионные испытания проводятся в специальных приборах — одометрах, принципиальная схема устройства которых показана на рис. 24. Образец породы помещают в металлическую обойму между двумя пористыми пластинками. При последовательном нагружении верхней пластинки порода сжимается, а поровая вода выжимается через пористые пластинки наружу. Во избежание набухания образца породы после впуска воды верхняя пластинка закрепляется арретирами. Деформацию сжатия породы определяют с помощью микрометра. Полученные данные о деформациях на различных ступенях нагружения наносят на график в координатах ϵ — p (рис. 25) и получают кривую сжатия (компрессионную диаграмму).

Если глинистая порода полностью насыщена водой, т. е. находится в состоянии грунтовой массы, сжатие такой породы возможно только при условии оттока воды из породы. Поэтому скорость завершения процесса сжатия на любой ступени нагружения

зависит от водопроницаемости породы и толщины ее слоя (или образца).

При разгрузке сжатый до этого образец породы начинает набухать. Однако восстановление первоначального объема происходит не в полной мере, а только частично. Как уже было показано, процесс набухания имеет осмотическую природу. Механическую схему осмотического втягивания можно представить в виде схемы (рис. 26). Предположим имеются две частицы 1 и 2, сближенные

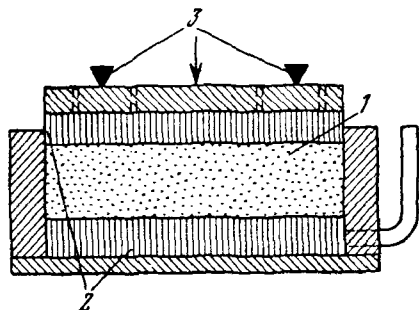


Рис. 24. Схема устройства одометра.
1 — образец породы; 2 — пористые пластинки;
3 — арретеры

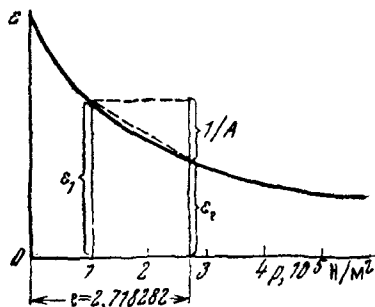


Рис. 25. Компрессионная кривая и вычисление ее параметров

на такое расстояние, когда между ними начинают действовать молекулярные силы притяжения. Рыхлосвязанная вода между ними частично выдавливается силами p (внешней нагрузкой). В точке b молекулы воды испытывают притяжение как верхней, так и нижней частиц. Величины сил притяжения изображены векторами $b-q$ и $b-i$. Равнодействующая их $b-f$ ориентирована в направлении, противоположном направлению выдавливания воды внешней силой p . Поэтому равнодействующая сила $b-f$ стремится вклинить слой молекулярно связанной воды и раздвинуть частицы. Расклинивающее действие тонких слоев воды лежит в основе набухания глинистых пород.

Очевидно, сжатие глинистой породы в состоянии грунтовой массы может происходить лишь в том случае, если внешнее давление p превзойдет давление набухания $b-f$ или вызовет разрушение тонкой структуры породы.

Диаграмма сжатия (компрессионная кривая) для грунтовой массы с малой прочностью структурных связей либо пород с нарушенной структурой имеет вид правильной логарифмической кривой:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \frac{1}{A} \ln \frac{p}{p_1}, \quad (\text{I.11})$$

где A — постоянная кривой, численно равная

$$A = \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_e};$$

здесь ε_e — коэффициент пористости при $p = 10^5 \text{ Н/м}^2$; ε_e — то же, при давлении $p = p_e = 2,718 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

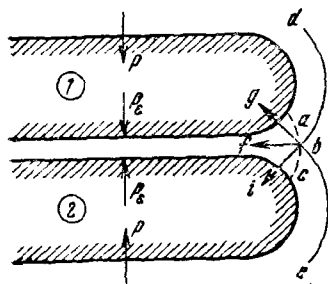


Рис. 26. Схема расклинивающего действия тонкой пленки воды (по А. Ф. Лебедеву)

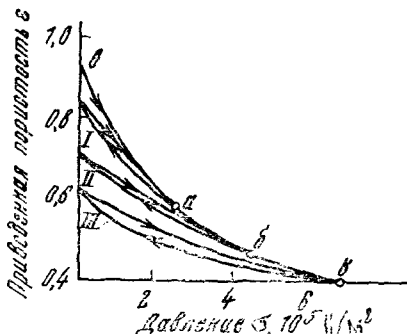


Рис. 27. Петли гистерезиса и главная ветвь компрессионной кривой: а, б, в — точки разгрузки; I, II, III — последовательные циклы сжатия и набухания (расширения)

В небольшом интервале давлений $(1-3) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ уравнение (I.12) можно заменить уравнением прямой

$$\varepsilon = A - ap, \quad (\text{I.12})$$

где A — отрезок, отсекаемый на ординате ($p = 0$); a — угловой коэффициент прямой (пунктирная линия на рис. 26), равный

$$a = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{p_2 - p_1}, \quad \text{м}^2/\text{Н}. \quad (\text{I.13})$$

Угловой коэффициент прямой a называется коэффициентом сжимаемости.

Обратная ветвь компрессионной кривой (диаграмма набухания) внешне напоминает нелинейное упругое восстановление формы твердых тел. Но, как уже отмечалось, восстановление формы здесь является в основном результатом работы осмотических сил, всасывающих воду при разгрузке и вызывающих эффект объемного расширения.

При повторном уплотнении нагрузкой, превышающей первоначальную, кривая набухания не совпадает с первоначальной кривой уплотнения (будет иметь место гистерезис), а кривая уплотнения, лишь начиная с точки а (рис. 27), будет продолжением кривой уплотнения Оа при предшествующей нагрузке. В результате получается экспериментальная кривая Оабе — главная ветвь компрессионной диаграммы. Отсюда следует, что кривая

циклического уплотнения грунтовой массы принципиально не отличается от кривой, построенной по данным непрерывного уплотнения.

По величине коэффициента уплотнения a глинистые породы подразделяются на: практически несжимаемые ($a < 0,001$), слабо-сжимаемые ($a = 0,001-0,005$), среднесжимаемые ($a = 0,005-0,1$); повышенносжимаемые ($a = 0,01-0,1$) и сильносжимаемые ($a > 0,1$).

Коэффициент сжимаемости — величина непостоянная, и поэтому непригодна для оценки сжимаемости породы в большом интервале давлений.

С этой целью следует спрямить компрессионную кривую в значительном диапазоне давлений, используя для этого компрессионную диаграмму в полулогарифмических координатах ($\varepsilon - \lg p$). Угловым коэффициентом прямой, называемый коэффициентом компрессии (безразмерная величина), равен

$$a_k = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \lg p}. \quad (I.14)$$

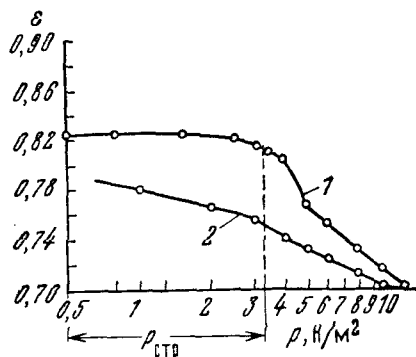


Рис. 28. Компрессионная диаграмма бентонитовой глины в полулогарифмическом масштабе:

1 — ветвь нагрузки; 2 — ветвь разгрузки

ности породы $p_{стр}$ по перелому кривой компрессии (рис. 28), численно равной абсциссе точки перелома последней. По достижении $p = p_{стр}$ происходит нарушение структурных связей, а вместе с этим изменяются параметры и конфигурация компрессионной кривой. В частности, возрастает коэффициент уплотнения и доля необратимой деформации сжатия в суммарной деформации породы.

Как показали исследования А. С. Храмушева, впоследствии подтвержденные Казагранде, в диаграммах компрессии глинистых пород средней и высокой степени уплотнения обнаруживается две и более переломных точек, очевидно, соответствующих нарушениям структурных связей различных генераций, сформировавшихся в породе на разных этапах катагезиса.

По данным компрессионных исследований могут быть получены значения модуля нормальной упругости $E_n = (1-A)/a$ и модуля полной деформации $E \approx 1/a$.

Явление консолидации. Как уже отмечалось, процесс уплотнения (разуплотнения) глинистой породы протекает длительное время после приложения (снятия) нагрузки, в течение которого

происходит отжатие (или впитывание) воды. Это является важной особенностью деформационного поведения глинистых пород.

Процесс уплотнения глинистых пород при постоянной нагрузке ($p = \text{const}$) называется консолидацией. Данный процесс характеризуется графиком зависимости деформаций от логарифмов времени (рис. 29).

График консолидации глинистой породы в типичном виде состоит из начальной кривой AB и двух прямолинейных отрезков BB и $B\Gamma$, соединенных плавной кривой и характеризующих так

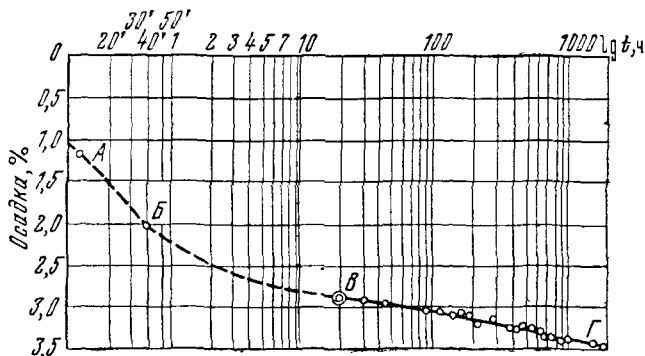


Рис. 29. Диаграмма «вековой» консолидации глинистой породы

называемую «вековую» консолидацию. Отрезок AB характеризует обычную осадку.

Первый прямолинейный отрезок вековой консолидации BB выражает так называемую первичную консолидацию. Консолидация на этом отрезке уплотнения обуславливается в основном водопроницаемостью породы и оттоком воды из нее.

Второй прямолинейный отрезок $B\Gamma$ соответствует вторичной консолидации, когда сжатие происходит не только за счет отжатия воды, в том числе рыхлосвязанной оболочки, но также в результате объемного сжатия минерального скелета породы (Г. И. Покровский), уплотнения адсорбированных гелеобразных оболочек минеральных частиц, передвижек частиц в более устойчивое положение и др.

Сжатие глинистых пород при наличии условий бокового расширения. Сжатие при компрессионных испытаниях является одномерным. В условиях возможности бокового расширения сжатие сопровождается явлениями сдвига и пластического деформирования и поэтому носит не только более сложный характер, но приобретает многостадийность. Так, при непрерывно возрастающем напряжении, передаваемом посредством жесткого штампа, наблюдается три фазы деформирования, последовательно сменяющие друг друга. Первая стадия характерна плавным затуханием деформации сжатия с течением времени при $p = \text{const}$. На данной стадии наблюдается уплотнение породы за счет спижения пористости (рис. 30, а).

Вторая стадия характерна плавным ростом деформаций во времени (явление крипа), причем скорость деформации после достижения определенной величины при данной нагрузке приобретает постоянное значение (рис. 30, б). Данное состояние деформирования является следствием появления площадок микросдвигов, характерных для предельного равновесия. Последнее является таким состоянием напряжений, когда в любой точке деформируемой породы сдвигающее напряжение достигает

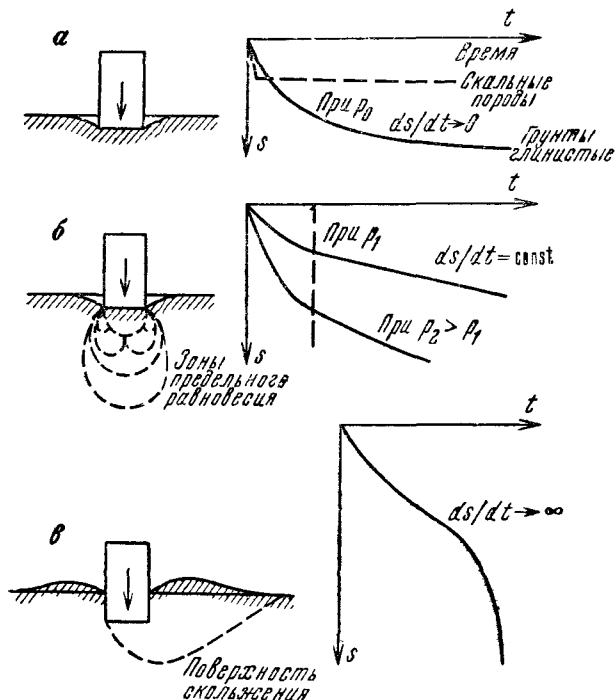


Рис. 30. Фазы напряженного состояния глинистой породы под штампом (по Н. А. Цытовичу):

а — фаза ушлотнения;
б — фаза сдвигов;
в — фаза выпирания
и соответствующие
диаграммы хода деформаций (осадок) во времени $\delta = f(t)$

некоторой предельной величины, соответствующей полному сопротивлению сдвигу в данной точке.

На третьей стадии наблюдается непрерывный рост деформаций во времени (рис. 30, в). Данная фаза наступает как бы внезапно и сопровождается выпиранием породы из-под штампа.

В соответствии с описанным характером процесса деформации глинистой породы под штампом различают две критические точки напряжения: первая из них соответствует наступанию фазы микросдвигов и называется пределом пропорциональности P_p ; вторая точка характеризует момент вступления деформации в фазу разрушения (критическая нагрузка $P_{кр}$). С точки зрения условий прочности фазу сдвигов (предел пропорциональности P_p) следует считать критическим состоянием породы.

Величины осадок штампа при нагрузках, не превышающих предел пропорциональности P_p , зависят не только от свойств породы, но также от размеров штампа (F), его жесткости и геометрии. В пределах допустимых нагрузок осадка нагруженного штампа прямо пропорциональна удельной нагрузке p и корню квадратному из площади F , т. е.

$$S = kp\sqrt{F}, \quad (\text{I.15})$$

где k — коэффициент пропорциональности, постоянный для данной породы.

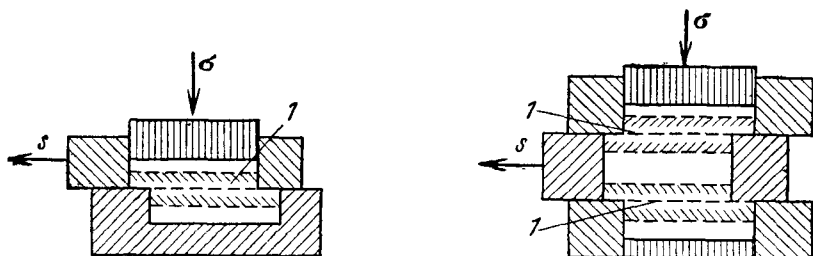


Рис. 31. Схема поперечного сдвига образцов глинистых пород (по одной и двум плоскостям).

1 — зона сдвига

Сопротивление сдвигу изучается в условиях предельного напряженного состояния, когда возникает незатухающее во времени скольжение (сдвиг) одной части образца по другой (рис. 31). Образцы породы, идущие на срез, предварительно уплотняют различной по величине нагрузкой σ в жестких цилиндрах. После этого каждый образец помещают в сдвиговый прибор и определяют сопротивление сдвигу τ . Оно соответствует тому минимальному сдвигающему напряжению s , при котором возникает незатухающее скольжение (сдвиг) одной части образца породы по другой. По полученным значениям σ и τ строят диаграмму сдвига $\tau = f(\sigma)$. Диаграмма сдвига глинистых пород криволинейна (рис. 32), причем максимальная кривизна ее отмечается в интервале начальных нормальных напряжений $\sigma = 0,5\text{--}1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ (до точки 1). При возрастании нормальных напряжений криволинейность диаграммы сдвига становится незначительной (отрезок 1—2—3) и с достаточной для практики точностью описывается уравнением прямой (I.1).

При инженерных расчетах нередко приходится пользоваться не углом внутреннего трения φ и величиной сцепления c , а одним показателем — коэффициентом сдвига f_0 или соответствующим значением угла сдвига ψ . Коэффициент сдвига

$$f_0 = \frac{\tau}{\sigma}. \quad (\text{I.16})$$

Как видно из рис. 32, величины f_0 и ψ непостоянны для данной породы и уменьшаются с возрастанием нормальных напряжений σ .

Сцепление и угол внутреннего трения глинистых пород при прочих равных условиях прежде всего зависят от их гранулометрического состава. С увеличением содержания песчаных и особенно грубообломочных фракций внутреннее трение возрастает, а сцепление снижается. Сцепление и угол внутреннего трения зависят также от состояния влажности — плотности глинистой породы. Для глинистых пород, находящихся в мягко-пластичном

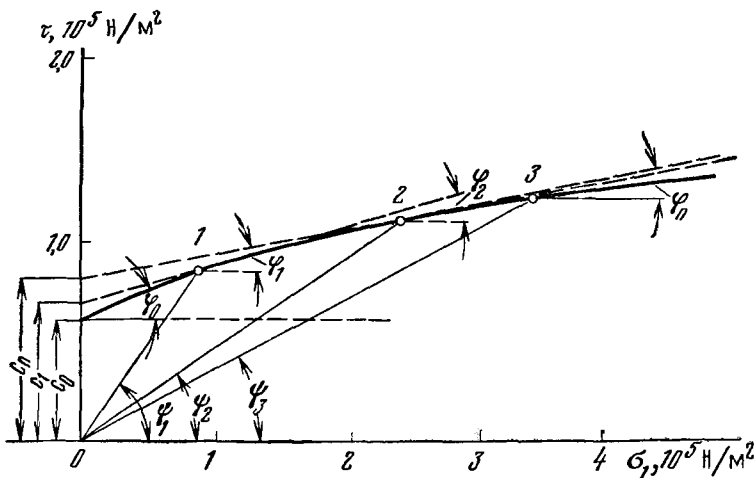


Рис. 32. Диаграмма сдвига глинистой породы

состоянии, коэффициент внутреннего трения обычно равен 0,1—0,2, и соответствующие им значения углов внутреннего трения не превышают 5—10°. Твердопластичные глины характеризуются коэффициентом внутреннего трения от 0,4 до 0,5 и соответственно углами внутреннего трения от 14 до 35°. Величина сцепления глинистых пород в большинстве случаев выдерживается в пределах 0,05—1,5 · 10⁵ Н/м².

В зависимости от скорости приложения сдвигающего усилия в процессе опыта различают медленный и быстрый сдвиги. В первом случае сдвигающую силу увеличивают только после прекращения деформации, вызванной предыдущей ступенью сдвигающей силы. При быстром сдвиге увеличение сдвигающей силы производят, не дожидаясь прекращения деформаций.

Значения ϕ и c во всех перечисленных случаях получаются разными. Когда срез производится до стабилизации осадки под сжимающим давлением, получаются неустойчивые и заниженные значения коэффициента трения, но величина сцепления при этом завышена. Это происходит потому, что часть нормального давления σ в этом случае будет восприниматься не скелетом породы,

а водой, заполняющей поры. Наиболее устойчивы значения φ при медленном сдвиге нормально уплотненных пород.

Режим испытаний выбирается в зависимости от реальных механических условий деформирования исследуемых пород в проектируемом откосе или основании сооружения.

Плоскостный сдвиг — наиболее распространенный в настоящее время способ определения показателей сопротивления сдвигу. Однако в последнее время все чаще стали прибегать к определению сопротивления сдвигу путем испытаний образцов породы

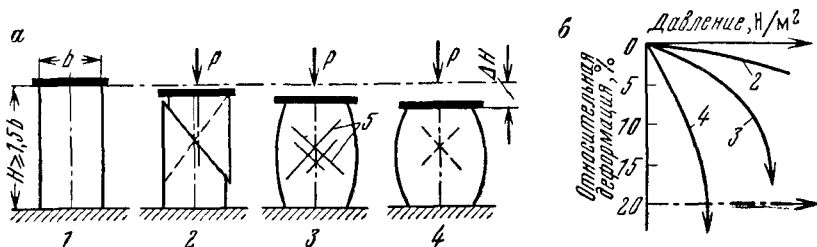


Рис. 33. Схема разрушения образца глинистой породы в условиях одноосного сжатия (а) и диаграмма «давление — относительная деформация» (б): 1 — внешний вид образца до испытания; 2 — хрупкое разрушение образца; 3 — хрупко-пластическое разрушение; 4 — разрушение в процессе пластической деформации; 5 — трещины скола

в условиях как одноосного, так и трехосного сжатия. Эти методы основаны на теории прочности Мора.

Определение сопротивления сдвигу в условиях одноосного сжатия. Данный метод применим для глинистых пород, находящихся в полутвердом состоянии, когда деформация образца носит характер скола уже при малой деформации сжатия, не превышающей 10% от первоначальной высоты образца. Измеряя угол α , образуемый плоскостями скола с вертикальной осью (рис. 33), вычисляют угол внутреннего трения

$$\varphi = 2(45^\circ - \alpha). \quad (I.17)$$

Силу сцепления c в данном случае можно определить по формуле

$$c = \frac{\sigma_{сж.}}{2 \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)}, \quad (I.18)$$

где $\sigma_{сж.}$ — разрушающее осевое напряжение.

Исследования механических свойств глинистых пород в условиях трехосного сжатия позволяют получить прочностные и деформационные характеристики пород в условиях, максимально приближающихся к условиям их деформирования в массиве (in situ). Они производятся в стабилометрах различных моделей. По принципу построения различают стабилометры гидростати-

ческого и компрессионного типов (рис. 34). В стабилометрах гидростатического типа образец испытываемой породы постоянно находится под действием всестороннего сжатия, равного боковому, а осевое давление не может быть менее бокового. При сжатии объем образца породы изменяется в результате бокового расширения и под воздействием вхождения в камеру части штока. В стабилометрах компрессионного типа осевое давление может подаваться независимо от бокового и, в частности, быть менее послед-

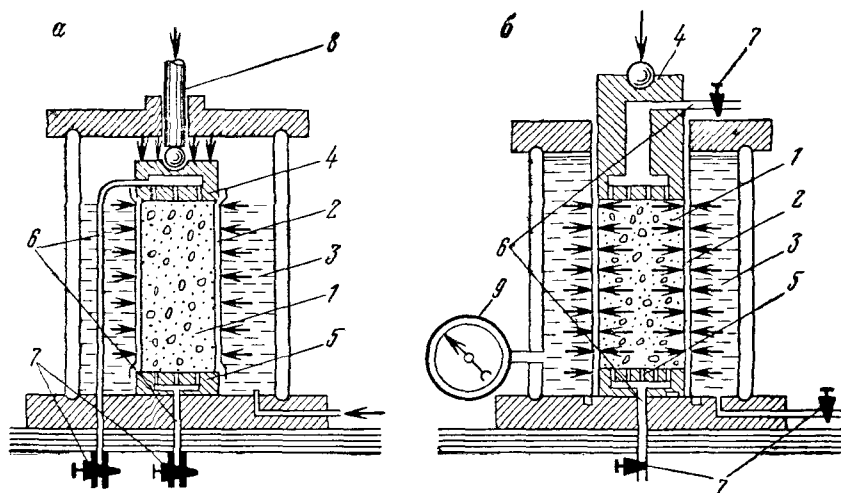


Рис. 34. Схема стабилометра гидростатического (а) и компрессионного (б) типов:

1 — образец; 2 — резиновая оболочка; 3 — камера; 4 — верхний поршень; 5 — нижний поршень; 6 — соединительные трубки; 7 — краны; 8 — шток; 9 — манометр

него или равно нулю. Осевое давление передается с помощью штока без входящего в камеру штока меньшего диаметра. Вследствие этого при сжатии образца породы боковое ее расширение возможно лишь при удалении части воды от камеры.

Метод трехосных испытаний в современных стабилометрах отличается простотой изменения условий испытания образца породы. Испытание может вестись, например, без оттока воды, либо образец вначале может быть уплотнен нагрузкой, соответствующей боковой (природной), а затем испытания продолжают без оттока воды.

Современные стабилометры* снабжены специальными устройствами для измерения порового давления. Эти устройства работают по принципу противодействия. Учет влияния динамики

* В СССР наиболее широко используются стабилометры гидростатического типа конструкции ДИИТ и ЛИИЖТ и компрессионного типа М-2 конструкции Е. И. Медкова.

порового давления имеет большое значение, например, при определении сопротивления сдвигу. Стабилометры новейшего типа позволяют определить: модуль деформации в условиях свободного бокового расширения; ограничения и отсутствия бокового расширения; коэффициент бокового распора ξ , коэффициент фильтрации в зависимости от заданного напряженного состояния; зависимости напряженно-деформированного состояния от продолжительности действия нагрузки; сопротивление раздавливанию образца при ограниченном и свободном боковом расширении; пределы структурной прочности; показатели сопротивления сдвигу при трехосном напряженном состоянии; показатели деформации набухания; поровое давление и некоторые другие.

Наиболее полное решение задач в горностроительной и горно-экспериментальной практике отвечает стабилометр ВНОГЕМ конструкции Н. П. Верецагина [37].

§ 5. Вязкопластические и реологические свойства глинистых пород

В состоянии течения любой материал характеризуется пластической вязкостью η^* , которая имеет тот же физический смысл, что и коэффициент внутреннего трения. Пластическое течение глинистых пород начинается при напряжениях, равных 10^4 — 10^5 Н/м².

Значение пластической вязкости глинистых пород снижается в процессе пластической деформации материала в результате нарушения его начальной структуры. Поэтому возникает необходимость различать начальную и наибольшую (иначе шведовскую) вязкость η_0^* и наименьшую (бингамовскую) вязкость η_m^* . Промежуточными между ними являются значения эффективной вязкости η^* ($\eta_0 > \eta > \eta_m$)*. Эффективная вязкость равна по своей величине касательному напряжению, которое должно обеспечить ламинарное течение материала с постоянной скоростью, равной единице относительно сдвига**. Вязкость глинистых пород определяется методом прямого сдвига, перекося или трехосного сжатия. При этом устанавливается величина касательного напряжения при данном нормальном давлении, при котором наступает состояние ползучести (течения) с относительно постоянной скоростью. Коэффициент пластической вязкости рассчитывается по формуле Шведова — Бингама

$$\eta = \frac{\tau - \tau_{lim}}{\dot{\gamma}} d, \quad (I.19)$$

* Размерность вязкости — напряжение, умноженное на время: Н·с/м².

** Шведовская вязкость $\eta_0^* = (\tau - \tau_{ki})/(d\tau/dt)$, бингамовская вязкость $\eta_m^* = (\tau - \tau_{kg})/(d\tau/dt)$, где τ_{ki} — условный статический предел текучести, τ_{kg} — условный динамический предел текучести. При $\tau > \tau_{ki}$ развивается незатухающая во времени деформация ползучести, а при $\tau < \tau_{kg}$ — деформации течения, заканчивающиеся разрушением материала.

где τ — сдвигающее напряжение;

τ_{lim} — порог ползучести;

v — скорость ползучести;

d — высота перекашиваемого образца.

Порог ползучести τ_{lim} определяется по данным длительных опытов на ползучесть при различных значениях касательных напряжений, по результатам которых составляются соответствующие диаграммы в координатах v — τ (рис. 35). Величину τ_{lim} рекомендуется определять путем экстраполяции кривой ползучести до пересечения с осью абсцисс или путем расчета по формуле

$$\tau_{lim} = \sigma \operatorname{tg} \varphi_{ост} + c_e, \quad (I.20)$$

где $\tau_{ост}$ — наименьший угол внутреннего трения при данной плотности — влажности, определенный при медленном дренажном сдвиге;

c_e — сцепление, обусловленное обратимыми, водно-коллоидными структурными связями (по Е. М. Сергееву).

Вязкость глинистых пород возрастает с повышением гидрофильности и влажности породы и снижается с повышением плотности. Она зависит также от структурно-текстурных особенностей породы, величины касательных напряжений и др.

При затухающей деформации ползучести вязкость глинистых пород возрастает. Такое явление имеет место в том случае, когда плотность породы во времени (в процессе пластического течения) повышается.

Вязкость глинистых пород зависит также от температуры. По данным Е. М. Сергеева и других, повышение температуры для глины (иллита) от 20 до 26° С приводит к снижению вязкости в 30 раз [18].

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что деформации горных пород в каждый момент времени зависят от предыдущей истории нагружения, т. е. они обладают свойствами наследственности. Теория и модели, описывающие поведение материала, обладающего данными свойствами, называются теориями и моделями наследственных сред [16, 20].

Наиболее близко приемлемыми из их числа является теория наследственной ползучести Больцмана — Вольтерра, согласно

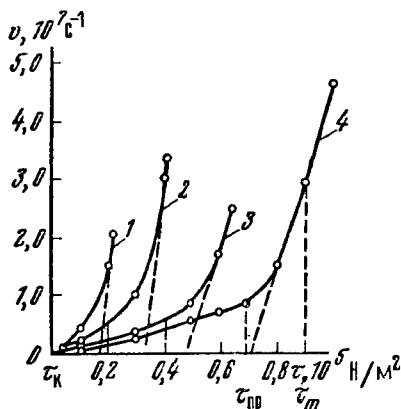


Рис. 35. Зависимость скорости относительной деформации сдвига (перекоса) от величины сдвигающей нагрузки кембрийской глины при различных значениях вертикального давления σ (по Б. Ф. Рельову).
1 — 10^5 Па; 2 — $2 \cdot 10^5$ Па; 3 — $3 \cdot 10^5$ Па; 4 — $4 \cdot 10^5$ Па

которой деформация в каждый данный момент зависит не только от действующего напряжения, но и от истории предшествующего уплотнения (деформирования). В соответствии с последним, деформации в любой момент времени t , обусловленные последовательным приложением ряда напряжений в предыдущие моменты времени $t_1; t_2; \dots; t_n$ являются суммой деформаций, которые наблюдались бы в данный момент, если каждое из постоянных напряжений прикладывалось независимо от других.

Уравнение Больцмана — Вольтерра исходит из линейного закона деформирования $\sigma = E_0(t) \varepsilon$, где $E_0 \leq E(t)$ при $0 \leq t \leq \infty$. При постоянной нагрузке ($\sigma = \text{const}$) уравнение ползучести

$$\varepsilon(t) = \sigma \left[\frac{1}{E_0} + \int_0^t K(t) dt \right]. \quad (I.21)$$

Уравнение релаксации напряжений ($\varepsilon = \text{const}$)

$$\sigma(t) = \varepsilon \left[E - \int_0^t R(t) dt \right]. \quad (I.22)$$

При дифференцировании уравнений (I.21) и (I.22)

$$K(t) = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}; \quad (I.23)$$

$$R(t) = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{d\sigma}{dt}, \quad (I.24)$$

где $K(t)$ — ядро ползучести характеризует скорость деформации при постоянном напряжении $\sigma = 1$;

функция $R(t)$ — показатель изменения напряжений во времени, необходимым для поддержания деформации $\varepsilon = 1$.

Уравнения наследственной ползучести обладают большой общностью и при соответствующем выборе ядра $K(t)$ дают различные законы деформирования. Ядро $K(t)$ получают по опытным данным на ползучесть, представленным в виде графиков

$$\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\varepsilon}{\sigma} = f(t).$$

Если диаграммы $\sigma = \varphi(\varepsilon)$ (для различных значений t) нелинейны, но геометрически подобны, то уравнение состояния нелинейной теории наследственной ползучести принимает вид

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_0} [f(\sigma)] + \int_0^t K(t-\tau) f[\sigma(\tau)] d\tau. \quad (I.25)$$

Относительно $f(\sigma)$ уравнение (1.25) линейное. В результате его дифференцирования выражение для определения ядра принимает вид

$$K(t) = \frac{eE_0}{f(\sigma)}. \quad (1.26)$$

Уравнения наследственной ползучести используются при решении задач консолидации и расчете деформации горных выработок длительной службы. Они достаточно приближенно описывают реологическое поведение также твердых и полутвердых пород (известняков, аргиллитов, алевролитов) при степенном (абелевом) ядре ползучести вида

$$K(t) = \delta(t - \tau)^{-\alpha}, \quad (1.27)$$

где α и δ — безразмерные параметры ползучести.

Значения α чаще всего выдерживаются в пределах 0,670—0,720, $\delta = 0,002 \text{ с}^{-1}$.

§ 6. Просадочные и некоторые другие явления в глинистых породах

Просадки образуют вполне самостоятельную группу деформаций пород со слабостойкими структурными связями. Они происходят при неизменной внешней нагрузке или даже от собственной массы породы, но под воздействием некоторых побочных факторов: увлажнения, сотрясения и т. д. Просадочные деформации всегда приводят к существенным изменениям первоначальной структуры породы и нередко носят внезапный, иногда катастрофический характер.

Наиболее распространенным видом просадочных деформаций являются просадки макropористых лёссовидных пород и лёссов. Вода, легко проникая через системы трещин и макropор, частично растворяет соли, инкрустирующие их стенки, а также агрегатирующие мелкие минеральные частицы, а в тонких межзерновых зазорах оказывает расклинивающее действие. В результате несущая способность породы резко падает, что и является причиной просадочных деформаций пород.

Величина (степень) просадочности пород устанавливается путем испытаний образцов в компрессионном приборе. На рис. 36 показана кривая сжатия (компрессии) просадочной породы. Вертикальный отрезок ab диаграммы соответствует уменьшению коэффициента пористости ϵ при постоянной нагрузке $p = 3 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ только за счет замачивания испытываемого образца породы. Отрезок ab , численно равный разности в величинах коэффициента пористости до и после замачивания, характеризует так называемую макropористость и именуется коэффициентом макropористости ϵ_m . Так как коэффициент макropористости будет изменять свою величину в зависимости от нагрузки p , то для полу-

чения сравнимых характеристик принято определять данный коэффициент при $p = 3 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

По коэффициенту макропористости можно рассчитать так называемый коэффициент просадочности $i_{\text{пр}} = \varepsilon_m / (1 - \varepsilon_s)$, где ε_s — коэффициент пористости при давлении $p = 3 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Очевидно, что коэффициент просадочности может быть рассчитан по следующему выражению:

$$i_{\text{пр}} = \frac{\Delta h_2}{h - \Delta h_1},$$

где h — первоначальная высота образца породы до испытания; Δh_1 — уменьшение высоты образца при естественной влажности под нагрузкой p ; Δh_2 — уменьшение высоты того же образца после замачивания.

Некоторые рыхлые неводостойкие глинистые породы с коагуляционно-конденсационными структурными связями в определенном интервале влажности приобретают тиксотропно-обратимые свойства. По granulометрическому составу они различны, но всех их объединяет одна общая особенность — водно-коллоидный коагуляционно-стабилизационный тип структурных связей. Среди них выделяются существенно песчаные, пылеватые и глинистые разновидности. В сухом состоянии такие породы могут обладать известной жесткостью и прочностью, но при нарушении структурных связей и увлажнении они резко ослабевают*.

Тиксотропное оплывание наблюдается у тех пород, глинистая фракция которых обладает огромной емкостью обмена (40—111 мг. экв на 100 г породы). Это наблюдается в случае высокой дисперсности глинистой фракции и при содержании в его составе высокомолекулярных органических веществ и ферро-алюмозолой.

Тиксотропно-обратимое оплывание возможно в том случае, когда процесс оплывания породы протекает быстрее, чем процесс тиксотропной стабилизации. В противном случае переход в плавучее состояние возможен только в условиях постоянного вибрационного воздействия.

Подвижные тиксотропно-обратимые структуры при высыхании породы превращаются в хрупкие. При этом эффект упрочнения

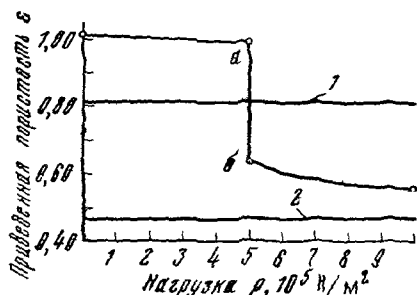


Рис. 36. Кривая сжатия просадочной и лёссовидной горной породы:

ab — отрезок, характеризующий просадку при намачивании; 1 — приведенная пористость, соответствующая верхнему пределу пластичности, 2 — приведенная пористость, соответствующая нижнему пределу пластичности

* По данным И. М. Горьковой образцы песчано-коллоидных плавучев в нарушенном состоянии и при влажности 17—23% имеют временное сопротивление от $2,8$ до $4,3 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. При нарушении структуры при той же влажности прочность падала в 80—100 раз.

пород особенно велик у пород, обладающих во влажном состоянии наибольшей подвижностью. Таковы породы, содержащие в своем составе высокогидрофильные минералы (монтмориллонит, глауконит и др.).

В. РАЗДЕЛЬНОЗЕРНИСТЫЕ (СЫПУЧИЕ) ПОРОДЫ

§ 1. Общие сведения

Породы данного класса представлены разнородными песками, песчано-гравелистыми, валунными и щебеночными породами, входящими в состав прибрежно-морских, лагунных и континентальных отложений. По своим свойствам они ближе всего к сыпучим телам, сохраняющим форму только под действием массы частиц и трения между ними. Деформации сжатия (уплотнения) связаны главным образом с перемещением и взаимным приспособлением частиц, поэтому они носят необратимый характер. Деформации уплотнения протекают быстро вслед за приложением давления, что резко отличает их от глинистых пород. Влияние влажности на механические свойства сыпучих пород несущественно и, во всяком случае, значительно меньше по сравнению с глинистыми породами. Водопоглощаемость — от средней до высокой.

Основными факторами, определяющими механические свойства, являются гранулометрический состав, степень уплотненности и минеральный состав.

§ 2. Сопротивление сдвигу

Сопротивление сдвигу является основной прочностной характеристикой раздельнозернистых пород. Диаграмма сопротивления сдвигу представляет собой прямую, исходящую от начала координат и наклоненную к оси нормальных давлений под углом φ — углом внутреннего трения. Соответственно, сдвигающее усилие τ равно

$$\tau = \operatorname{tg} \varphi \sigma = f \sigma, \quad (1.28)$$

где f — коэффициент внутреннего трения.

Сопротивление сдвигу в общем случае складывается из сопротивления трению минеральных частиц друг о друга φ_t , статического сопротивления частиц изменению первоначального положения — зацепления φ_z и сопротивления минеральных частиц разрушению φ_c , т. е. $\varphi = \varphi_t + \varphi_z + \varphi_c$. Сопротивление φ_t возрастает с повышением шероховатости площадок микроконтактов частиц, укрупнением их размеров * и степени плотности упаковки.

* Данное явление объясняется уменьшением удельной площади микроконтактов частиц по мере укрупнения размеров последних и, следовательно, возрастанием удельных давлений на площадках микроконтактов.

Заметное влияние на величину f_t оказывает также минеральный состав пород. По величине коэффициента трения* различаются две группы минералов: 1) с высоким коэффициентом трения $f = 0,4-0,8$ и 2) с низким коэффициентом трения $f = 0,1-0,3$. Значения f получены для условий, когда поверхность трения минералов смочена водой. К первой группе относятся минералы каркасной (кварц, полевые шпаты) и островной структур (кальцит, доломит), ко второй — исключительно слоистой структуры (мусковит, биотит, хлорит, тальк и др.). Для минералов первой группы характерно также то, что адсорбированная пленка воды не оказывает смазочное воздействие, а для минералов второй группы, наоборот, характерно это воздействие. Поэтому отношение коэффициентов трения по поверхностям, покрытым водой и сухим f_m/f_c , у минералов первой группы более единицы (3,5—7), а у второй группы менее единицы (0,4—0,6).

При трении по соприкасающимся поверхностям минералов, принадлежащих к различным кристаллохимическим типам, величина коэффициента трения f данной пары минералов ближе к наименьшему коэффициенту трения. Иными словами, разноименные минералы являются антифрикционными, что, по-видимому, обусловлено адгезионным сцеплением (табл. 24).

Таблица 24

Коэффициент трения одноименных и разноименных пар минералов

Минерал	Контртело	Коэффициент трения f и угол внутреннего трения φ			
		Поверхность			
		сухая		покрытая водой	
		f	φ	f	φ
Кварц	Кварц	0,12	7° 25'	0,44	23° 45'
Микроклин	Микроклин	0,12	6° 50'	0,77	37° 35'
Кальцит	Кальцит	0,14	8°	0,64	32° 40'
Кварц	Микроклин	—	—	0,35	19° 20'
»	Кальцит	—	—	0,33	18° 15'
Пирофиллит	Пирофиллит	—	—	0,13	7° 25'
Кварц	»	—	—	0,18	10° 12'

При трении кварца по слоистому минералу — слюде, коэффициент трения равен коэффициенту трения слюды: $f_c = 0,13$ по сухой поверхности и $f_m = 0,44$ по поверхности, покрытой водой. По исследованиям В. В. Охотина уже при 10%-ном содержании слюды сопротивление песка сдвигу практически полностью

* Для большинства минералов коэффициент трения покоя близок коэффициенту трения при скольжении. Лишь для смоченной водой поверхности кварца последний в 1,5—2 раза меньше коэффициента трения покоя.

определяется слюдой. Понижение сопротивления сдвигу оказывают также органические вещества и коллоиды, часто образующие пленки поверхности зерен песка.

Зацепление частиц φ_3 в основном зависит от степени уплотненности породы и гранулометрического состава. С учетом сил зацепления влияние плотности на угол внутреннего трения, на величину сопротивления сдвигу φ может быть оценено по следующим эмпирическим формулам:

а) крупнообломочных пород

$$\varphi = \varphi_0 + aD^m, \quad (I.29)$$

где D — степень плотности породы*;

a и m — параметры зависимости, соответственно равные 5—12 и 0,4—1;

φ_0 — угол внутреннего трения породы в рыхлом состоянии;

б) песчаных пород

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k}{\varepsilon}, \quad (I.30)$$

где ε — коэффициент пористости породы;

k — параметр, зависящий от дисперсности породы и возрастающий с укрупнением зерен песка от 0,33 до 0,55.

Следует заметить, что при переходах песков от рыхлого до плотного сложения угол внутреннего трения может возрастать на 7—15°, при колебаниях предельных значений φ от 19 до 37°.

Разрушение минеральных зерен при сдвиговых деформациях не наблюдается даже при высоких нормальных напряжениях. Поэтому третьей составляющей сопротивления сдвигу — сопротивлением разрушению минеральных зерен φ_c можно пренебречь. Лишь при сверхвысоких напряжениях роль этого слагаемого становится заметной.

Угол внутреннего трения φ сыпучих пород, как правило, более так называемого угла естественного откоса α , образованного поверхностью откоса свободно насыпанной породы с горизонтальной плоскостью. Отношение угла естественного откоса к углу внутреннего трения (α/φ) закономерно снижается по мере повышения плотности породы, содержания минералов слоистой структуры и величины нормального напряжения σ_n . О влиянии минерального состава и размеров минеральных зерен на значения α , φ и α/φ можно судить по данным табл. 25.

На значение α оказывает влияние влажность породы. Для песков, лишенных минералов слоистой структуры, повышение влажности до 5—15° (в зависимости от дисперсности) приводит к уве-

* Степень плотности характеризуется коэффициентом плотности D , численно равным $D = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon) / (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})$, где ε , $\varepsilon_{\max}$ и $\varepsilon_{\min}$ — коэффициенты пористости породы в естественно максимально разрыхленном и минимально уплотненном состоянии.

Влияние минерального состава на угол откоса песчаных и пылеватых фракций различных минералов (данные В. В. Охотина)

Размеры фракций, мм	Кварц остроугольный			Кварц окатанный			Полевой шпат			Мусковит		
	α	φ	α/φ	α	φ	α/φ	α	φ	α/φ	α	φ	α/φ
2—1	66	41,5	0,63	61	32,0	0,53	—	36	—	44	41,5	0,94
1—0,5	55	34,0	0,61	—	32,0	—	—	38	—	45	42,0	0,91
0,5—0,25	46	32,4	0,70	27	34,0	1,26	41	34	0,83	32	39,5	1,23
0,25—0,1	27	35,0	1,3	18	32,0	1,83	—	37	—	38	43,0	1,13
0,1—0,06	15	36,0	2,4	18,5	33,2	1,80	16	39	2,44	—	36,4	—

личению α на 10—15%. Это, очевидно, обусловлено отмеченным выше антисмазочным действием адсорбированных пленок воды. При полном затоплении откоса или при влажности, равной полной влагемкости, угол естественного откоса уменьшается на 10—40% в зависимости от содержания минералов слоистой структуры, степени окатанности и размеров зерен.

Откосы из тонкозернистых пылеватых и слюдястых песков под водой обладают углами откосов, не превышающими 15°. Обращает внимание резкое снижение угла откоса песков под водой (на 70%) при наличии пылевой фракции кварца.

Как можно заключить из изложенного, сопротивление сдвигу сыпучих пород складывается из двух частей: угла трения минеральных зерен друг о друга φ_t и зацепления φ_z . С явлением зацепления связаны изменения сопротивления сдвигу в процессе деформации сдвига (рис. 37). У плотных песков оно вначале возрастает, и достигнув максимума ($\tau_{\max}$), снижается до минимального значения ($\tau_{\text{ост}}$). У рыхлых песков, наоборот, сопротивление сдвигу возрастает с самого начала до значения ($\tau_{\text{ост}}$). При этом пористость плотного песка в зоне сдвига снижается, а рыхлого повышается. Разность $\tau_{\max} - \tau_{\text{ост}}$ зависит от величины зацепления τ_z и нормального давления σ_n . Формирование зоны сдвига происходит при напряжении сдвига, равном $\tau_{\text{ост}}$.

Очевидно, при некотором промежуточном состоянии плотности породы в зоне сдвига следует ожидать, что пористость породы остается без изменения. Такое состояние пористости называется критической пористостью (Н. М. Герсегонов). Для крупнозернистых песков она близка к пористости в наиболее рыхлом состоянии, а для средне- и мелкозернистых — примерно средней величине пористости между плотным и рыхлым состоянием. Критическая пористость тонкозернистых илистых песков близка к пористости их в наиболее плотном состоянии. С критической пористостью обычно связывают способность водонасыщенных

песков оплывать под воздействием динамических нагрузок. Оплывание в данном случае связано с действием двух факторов: 1) снижения внутреннего трения при вибрационной нагрузке и 2) повышения гидродинамического давления под действием той же нагрузки. В результате частицы песка переходят во взвешенное состояние и увлекаются фильтрующим потоком. Полагают, что неперенным условием перехода водонасыщенных песков в плавунное состояние под действием вибрации является соблюдение следующего неравенства

$$\delta_{\text{взв}} h (2\xi - 1) - (p - p_0) > 0, \quad (1.31)$$

где $\delta_{\text{взв}}$ — взвешенная объемная масса породы;

h — глубина, на которой проверяется возможность оплывания породы;

ξ — коэффициент бокового давления;

p — постоянная нагрузка на глубине h , равная $p = h\delta_{\text{взв}}$;

p_0 — вибрационная нагрузка.

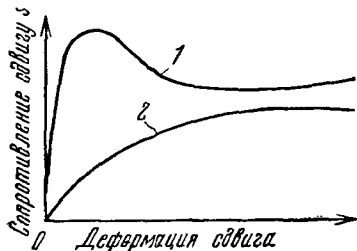


Рис. 37. Зависимость сопротивления песка сдвигу от величины деформации (по М. И. Гольдштейну):

1 — плотный песок; 2 — рыхлый песок

Рассматриваемый случай соответствует условиям фильтрационно-динамического оплывания пород.

Оплывание песков возможно и без воздействия динамических нагрузок, но при градиентах фильтрации, превышающих некоторое критическое значение *. Оплывание происходит под действием фильтрационного давления, и поэтому его следует называть *фильтрационным*. Сила сопротивления (внутреннего трения) в этом случае оказывается недостаточной для преодоления силы фильтрационного давления $P_{\text{ф}}^{**}$ и порода оплывает.

Тиксотропное оплывание наблюдается у тонкозернистых, существенно пылеватых водонасыщенных песков, содержащих в своем составе коллоидные частицы и органическое вещество.

Таким образом, оплывание раздельнозернистых пород может быть вызвано разными причинами, поэтому следует иметь в виду различные виды оплывания.

§ 3. Сжимаемость

В сыпучих породах давление передается непосредственно от частицы к частице через площадки их микроконтактов. Вследствие малой удельной площади контактов удельные давления на пло-

* По данным В. А. Мощанского в мелкозернистых песках величина критического градиента $I_{\text{кр}} = 0,17 \div 0,36$.

** Фильтрационное давление $P_{\text{ф}} = \Delta_0 I$, где Δ_0 — плотность фильтрующей жидкости, I — градиент фильтрации.

щадках микроконтактов намного превышают петростатическое давление. По этой причине сыпучие породы отличаются от глинистых пород более высокими значениями угла внутреннего трения. С повышением угла внутреннего трения возрастает сопротивляемость породы сжатию (уплотнению).

Деформация сжатия сыпучих пород в основном носит неупругий характер. Неупругая часть деформации их происходит путем уплотнения породы в результате перегруппировки и взаимного

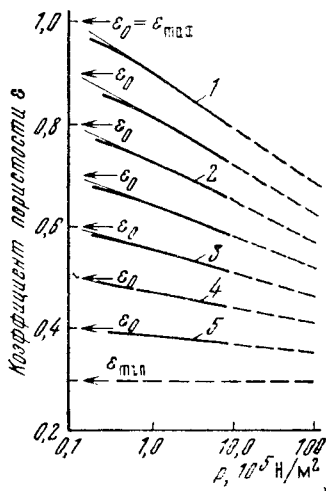


Рис. 38. Влияние плотности песка на его сжимаемость:

1 — очень рыхлый песок; 2 — рыхлый песок; 3 — песок средней плотности; 4 — искусственно уплотненный песок; 5 — очень сильно уплотненный песок

приспособления частиц. Упругая часть деформации сжатия очень мала и она связана с упругими деформациями минеральных частиц. С повышением содержания минералов слоистой структуры упругая часть деформации заметно возрастает.

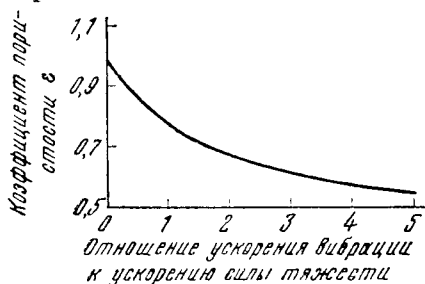


Рис. 39. Виброкомпресссионная кривая среднезернистого песка

Пленки гидроокислов железа на поверхности минеральных частиц и появление в составе породы глинистой и пылевой фракции повышают общую сжимаемость породы и вместе с тем удлиняют продолжительность самого процесса сжатия.

Исследованиями Е. М. Сергеева установлено, что при высоких давлениях процесс сжатия сыпучих пород сопровождается повышением дисперсности породы, т. е. раздроблением частиц. Интенсивность дробления зависит не только от величины сжимающего напряжения, но также от минерального и гранулометрического состава породы и ее влажности. Установлено, что в чистых кварцевых песках дробление протекает менее интенсивно, чем в полиминеральных песках. Дробимость частиц возрастает с увеличением их размеров. Кварцевые пески при давлениях до $200 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ дробятся более интенсивно в сухом состоянии, но в присутствии других минералов (глауконита, кальцита, слюды и др.); влажность повышает интенсивность дробления частиц и степень дисперсности породы.

Мелкодисперсные сыпучие породы с повышением давления дробятся менее интенсивно, чем средне- и крупнозернистые. Разрушение крупнообломочных частиц (щебня, дресвы, гальки и гравия) начинается уже при давлениях $(2-3) \times 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Опытами установлено, что рыхлые пески не сжимаются до максимально плотного для данной породы состояния даже при давлениях $20 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Вследствие этого кривые сжатия в интервале давлений до $20 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ песков одного и того же состава, по различной плотности образуют семейства кривых, не пересекающихся друг с другом (рис. 38). Чтобы довести рыхлые породы до максимально плотного состояния, требуется применение вибрационного воздействия.

При вибрации песок приобретает свойство вибротекучести, последняя характеризуется коэффициентом вибровязкости, величина которой зависит от свойств самой породы (ее влажности, дисперсности, формы и окатанности зерен) и ускорения ударной (сейсмической) волны $a_{\text{мах}}$. Виброуплотнение не зависит от способа увеличения ускорения ударной волны.

Виброуплотняемость сыпучих пород может быть иллюстрирована виброкомпрессионной кривой, построенной в координатах $\varepsilon - (\varepsilon_{\text{мах}}/g)$ (рис. 39).

Наибольшей виброуплотняемостью обладают мелкозернистые пески. Пригрузка на породу уменьшает виброуплотняемость.

Коэффициент бокового распора песчаных пород изменяется в пределах $0,25-0,37$, т. е. немного более узком интервале по сравнению с глинистыми породами.

Г. МЕРЗЛЫЕ ПОРОДЫ

§ 1. Общие сведения

По Н. А. Цытовичу, мерзлыми называют породы, имеющие отрицательную или нулевую температуру, в которых хотя бы часть поровой влаги превращена в лед, цементирующий минеральные частицы. Их можно рассматривать как особое (мерзлое) состояние связанных и раздельнообломочных пород с термонестойкими структурными связями. При положительных температурах они превращаются в мягкопластическое или текучее состояние.

Вечномерзлые породы распространены в областях многолетней («вечной») мерзлоты, занимающей 49% территории СССР. Нижняя граница вечномерзлых пород проникает в районах высоких широт азиатской части СССР до глубины 800 м. Сезонномерзлые породы занимают еще более значительную территорию СССР, но глубина проникновения их невелика и зависит от континентальности и суровости климата, теплофизических свойств пород и некоторых других факторов.

Появление льда, цементирующего минеральные частицы, резко изменяет свойства связных и раздельнозернистых пород. В процессе промерзания последних возникает новая, морозная (криогенная) текстура породы, с которой связаны весьма существенные изменения всех ее характеристик. Различаются следующие основные виды криогенных текстур: слитная, слоистая и ячеистая (рис. 40). Породы со слитной текстурой обладают значительной

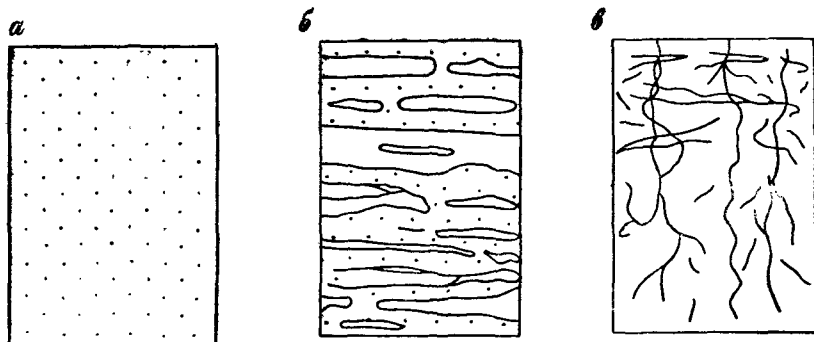
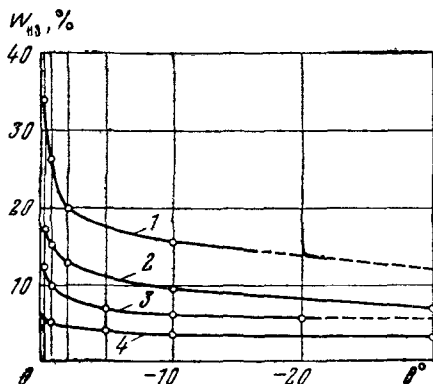


Рис. 40. Основные виды текстуры мерзлых пород:

a — слитная; *b* — слоистая; *c* — ячеистая

Рис. 41. Кривые содержания незамерзшей воды $W_{\text{нз}}$ в мерзлых породах в зависимости от величины их отрицательной температуры:

1 — глина; 2 — суглинки; 3 — супесь;
4 — песок



прочностью, а при оттаивании сохраняют, а иногда даже улучшают прочностные свойства по сравнению с показателями той же породы до промерзания. Слоистая текстура чаще наблюдается в глинистых породах, особенно в пылеватых их разновидностях. Она возникает при одностороннем промораживании сильно переувлажненных пород. В мерзлом состоянии они обладают значительной прочностью, но при оттаивании прочность их резко падает. По данным Н. А. Цытовича, сопротивление сдвигу при этом снижается до пяти раз. Мерзлая порода ячеистой текстуры при оттаивании также снижает прочность, но в меньшей мере, чем породы слоистой текстуры.

Поровая вода в мерзлых породах не полностью превращается в лед даже при температурах до -30°C (рис. 41). Свободная вода в крупных порах замерзает при отрицательной температуре, близкой к 0° . По мере возрастания степени связанности воды с поверхностью минеральных частиц температура смерзания снижается. Некоторое количество связанной воды в дисперсных породах сохраняется в незамерзшем состоянии. Количество незамерзшей воды в мерзлых породах изменяется под влиянием внешних воздействий (отрицательной температуры, давления и пр.), находясь в динамическом равновесии с последними (принцип равновесного состояния воды и льда в мерзлых породах Н. А. Цытовича).

§ 2. Физико-механические свойства мерзлых пород

Физические свойства мерзлых пород зависят от цементирующего действия льда, общее содержание которого называется л ь д и с т о с т ь ю мерзлой породы i . Льдистость равна отношению массы всего льда к массе воды, содержащейся в породе, т. е.

$$i = \frac{W - W_{\text{нз}}}{W}, \quad (1.32)$$

где $W_{\text{нз}}$ — содержание незамерзшей воды (в долях от сухой навески породы);

W — суммарная влажность породы.

Механические свойства мерзлых пород зависят не только от льдистости, но и ряда других, в частности, текстурных особенностей и длительности действия деформирующей силы. Уменьшение сопротивления сдвигу происходит с увеличением суммарной плотности льдинок на поверхности среза. Мгновенное сопротивление сдвигу мерзлых пород ($\sigma_{\text{мгн}}$) во много (часто в семь — десять и более) раз превышает длительное сопротивление ($\sigma_{\text{дл}}$). Это происходит вследствие расслабления (релаксации) структурного и льдоцементационного сцепления при одновременном незначительном увеличении молекулярного сцепления. Однако при некотором напряжении мерзлая порода не разрушается, сколь долго бы оно не действовало. Это напряжение соответствует длительному сопротивлению мерзлой породы.

По исследованиям Н. А. Цытовича, релаксация напряжений в мерзлых породах описывается уравнением следующего вида:

$$\sigma_t = \sigma_{\text{дл}} + (\sigma_{\text{мгн}} - \sigma_{\text{дл}}) e^{-\frac{t}{t_r}}, \quad (1.33)$$

где σ_t — сопротивление, соответствующее времени t ;

t_r — время релаксации, численно равное $t_r = \eta/E$ (здесь η — коэффициент вязкости, E — модуль нормальной упругости).

Уравнение (I.33) графически изображено на рис. 42. Оно позволяет определить длительное сопротивление сдвигу

$$\sigma_{дл} = \frac{\sigma_1 - \sigma_{мгн}Z}{1-Z}, \quad (I.34)$$

где $Z = (\sigma_1 - \sigma_2)/(\sigma_{мгн} - \sigma_1)$ (здесь σ_1 — сопротивление, соответствующее действию нагрузки в течение времени t_1 ; σ_2 — сопротивление, соответствующее времени t_2 , причем $t_2 = 2t_1$).

По С. С. Вялову, предельно-длительное сопротивление сдвигу $\tau_{дл}$ находится в следующей зависи-

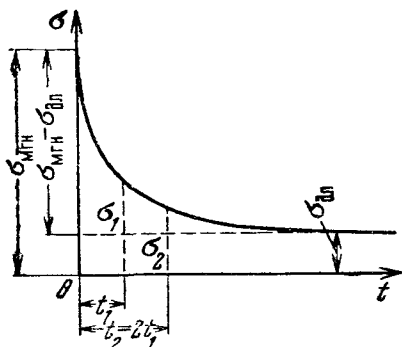


Рис. 42. Кривая релаксации напряжений в мерзлых породах

мости от длительности действия статического напряжения:

$$\tau_{дл} = \frac{\beta}{\ln \left(\frac{t_{пр}}{B} \right)}, \quad (I.35)$$

где β и B — параметры длительной прочности; $t_{пр} = (100 - B^{0,05}) \times \times 1/1,05$ — предельное время.

Весьма существенным фактором, определяющим прочность мерзлых пород, является величина отрицательной температуры (рис. 43). С понижением температуры возрастает временное сопротивление сжатию, особенно в интервале температур 2—7° С. В данном интервале льдообразование происходит особенно интенсивно и, кроме того, наблюдается качественное изменение самого льда — повышается его прочность.

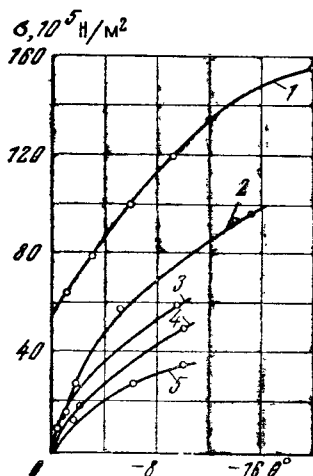


Рис. 43. Зависимость предела прочности мерзлых пород при сжатии $\sigma_{сж}$ от величины отрицательной температуры (по Н. А. Цытовичу).

1 — песок ($W = 16-17\%$); 2 — супесь ($W = 11-12\%$); 3 — супесь ($W = 21-26\%$); 4 — глина ($W = 43-44\%$); 5 — пылеватая глина с органическим веществом ($W = 52-61\%$)

На рис. 44 приведен график зависимости сопротивления сдвигу замороженных пород от величины внешнего давления p и отрицательной температуры θ . Он также свидетельствует о повышении показателей сопротивления сдвигу, особенно сцепления с понижением температуры мерзлой породы.

По исследованиям В. А. Мощанского, глинистые породы при отрицательной температуре $\sim 0,5^\circ \text{C}$ и нагрузке свыше $(6-8) \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ обладают сопротивлением сдвигу оттаявших пород. Это объясняется плавлением льда вначале на контактах минеральных частиц, а затем (по мере повышения давления) и всей мерзлой массы.

По Н. А. Цытовичу, важными показателями механических свойств мерзлых пород являются величины длительного сцепления $c_{\text{дл}}$ и коэффициента оттаивания A_o . Первая характеризует несущую способность мерзлой породы при данной отрицательной температуре и определяется методом шаровой пробы * с использованием следующей зависимости

$$c_{\text{дл}} = 0,18 \frac{p}{\pi D s_{\text{дл}}}, \quad (\text{I.36})$$

где $s_{\text{дл}}$ — длительная осадка мерзлой породы под шаровым штампом диаметром D и при нагрузке p **.

Согласно Н. А. Цытовичу, зная $c_{\text{дл}}$, можно определить безопасную нагрузку (начальную критическую) на вечномерзлые породы при сохранении отрицательной темпера-

туры, рассматривая их как идеально связанные тела

$$p_{\text{кр}}^{\text{нач}} = \frac{n(\gamma h + c_{\text{дл}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{дл}})}{\operatorname{ctg} \varphi_{\text{дл}} + \varphi_{\text{дл}} - \pi/2} + \gamma h, \quad (\text{I.37})$$

где h — глубина заложения фундаментов, $c_{\text{дл}}$ и $\varphi_{\text{дл}}$ — параметры сопротивления мерзлых пород грунтов, соответствующие их льдистости и отрицательной температуре.

* Метод основан на испытании деформации сжатия мерзлой породы с помощью шарового штампа.

** По исследованиям СО АН СССР, длительная осадка при испытаниях мерзлых пород шаровым штампом приблизительно равна половине осадки штампа за 30 мин наблюдения, т. е. $s_{\text{дл}} = 1/2 s_{30}$.

СПОСОБЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И ИСКУССТВЕННЫЕ ГРУНТЫ

§ 1. Общие сведения

При производстве инженерных работ нередко возникает необходимость изменять свойства горных пород с целью повышения или снижения их прочности и стойкости, увеличения плотности, изменения проницаемости, устранения просадочности и оплываемости и т. п. Способы искусственного изменения состояния и свойств горных пород составляют предмет технической мелиорации горных пород — раздела современной инженерной геологии, находящегося на стыке с технологическими дисциплинами. Развитие технической мелиорации идет главным образом в трех направлениях: геолого-минералогическом, химическом и технологическом.

Геолого-минералогическое направление имеет своей задачей исследование геолого-минералогических факторов, влияющих на выбор наиболее эффективных методов изменения свойств пород. Химическое направление осуществляет поиск и синтез химических реагентов, позволяющих изменить свойства и состояние горной породы. Технологическое направление объединяет результаты этих исследований для разработки технологической схемы изменения свойств и состояния горных пород в конкретных геологических условиях. Существующие методы мелиорации позволяют искусственно улучшать породы всех трех петрофизических классов.

Выделяют поверхностные методы улучшения пород с нарушенным строением и глубокие методы укрепления пород в массиве с ненарушенным строением.

Для поверхностного укрепления пород используют методы цементации, известкования, битумизации и др.

Для глубинного укрепления пород используются физико-механические (механические и физические), физико-химические и химические методы. При выборе метода необходимо учитывать петрографические особенности пород, геологическое строение укрепляемой толщи, а также цели и задачи инженерных работ.

§ 2. Механические методы

Механическое уплотнение статическими и динамическими нагрузками применяется для дисперсных пород: лёссов, насыпных и намывных грунтов, а также рыхлых свежееосажденных морских, озерных и речных илов и торфяников.

Различают следующие виды уплотнения: 1) гравитационное уплотнение рыхлых отложений (илов, торфяников) статической

нагрузкой (наземное и подводное); 2) уплотнение грунтов укаткой; 3) уплотнение грунтов трамбованием; 4) уплотнение массива грунтов сваями.

Наземное уплотнение применяется для предварительного обжатия и повышения несущей способности водонасыщенных отложений, залегающих в основании земляных плотин, дамб, железнодорожных насыпей.

Способ подводного гравитационного уплотнения с помощью песчаной пригрузки применяется при строительстве морских и речных сооружений на глинистых илах.

Уплотнение пород укаткой применяется при строительстве автомобильных и железных дорог, аэродромов, а также при вертикальной планировке местности и возведении гидротехнических сооружений. Уплотнение производят с целью увеличения несущей способности пород и понижения их водопроницаемости.

Трамбование применяется в гражданском, промышленном, дорожном, гидротехническом и других видах строительства для уплотнения различного рода насыпей (подушек, дамб, плотин, валов), грунтовой одежды, покрытий, экранов.

При уплотнении массива пород сваями все виды свай, погруженные в породу без ее выемки, в какой-то мере оказывают уплотняющее действие за счет уменьшения пористости породы на величину, равную суммарному объему тела забитых свай.

Набивные сваи устраивают путем создания цилиндрических полостей в породе и заполнения их более плотным и устойчивым материалом или цементирующим веществом. В зависимости от состава заполнителя набивные сваи могут быть бетонными, железобетонными, песчаными, цементно-песчаными.

При помощи набивных свай улучшают рыхлые малопрочные песчаные, торфяно-илистые, глинистые (неустойчивые консистенции) породы в активной зоне оснований сооружений до глубины 30 м и более. Сваями обычно прошивают всю уплотняемую толщу и не менее чем на 1 м подстилающий слой.

Сейсмическое уплотнение пород осуществляется энергией взрыва. Энергия взрыва применяется при устройстве поверхностных (открытых) и подземных (закрытых) выемок различного назначения, а также для уплотнения пород в массиве.

Кумулятивные взрывы направленного действия применяются при устройстве в глинистых породах подземных емкостей для хранения бензина, нефти, кислот и других жидкостей.

Для уплотнения рыхлых лёссовых, глинистых и песчаных пород в массиве способ кумулятивного взрыва колонковых зарядов успешно сочетается с набивными грунтовыми, железобетонными и другими сваями.

В настоящее время разработаны способы уплотнения пород глубинными внутренними взрывами и подводными глубинными и поверхностными взрывами.

Метод глубинных взрывов эффективно используется при уплотнении водонасыщенных песчаных пород.

Глубинные взрывы используются также при создании подземных хранилищ в глинистых породах. В основе метода камуфлетных взрывов лежит способность глинистых грунтов уплотняться и упрочняться под действием ударных волн и давления газов, образующихся при подземных взрывах.

Уплотнение грунтов подводными взрывами осуществляется в водной среде. Взрывы могут быть поверхностными и глубинными. В первом случае взрывчатое вещество (ВВ) подвешивается на расстоянии 0,5 м над поверхностью уплотняемого грунта и под слоем воды толщиной 1,0—1,5 м. Чем больше слой воды над ВВ, тем эффективнее уплотнение пород, так как водный слой экранирует энергию взрыва. Слой воды между ВВ и уплотняемой поверхностью породы служит средой для равномерной передачи энергии взрыва.

Глубинные подводные взрывы применяются для уплотнения водонасыщенных песчаных грунтов, при этом заряды ВВ помещают в скважины на определенных глубинах.

Метод виброуплотнения пород применяется для повышения устойчивости преимущественно сыпучих пород. Под влиянием вибрации минеральные частицы испытывают колебательные движения, происходит их перемещение и достигается более плотная укладка. Результатом вибрации является уплотнение песка, уменьшение его пористости и увеличение внутреннего трения. Различается поверхностное и глубинное виброуплотнение.

Поверхностное виброуплотнение производят при помощи вибрирующей плиты. Этот способ применяется для уплотнения оснований и одежды дорог и аэродромов, для уплотнения насыпных сооружений.

Применение глубинного виброуплотнения целесообразно для уплотнения значительных толщ сыпучих пород на сравнительно небольшой площади, например: основание под фундаментом, отдельные участки насыпных плотин.

Упрочнение горных пород при осушении обводненных территорий является наиболее универсальным и доступным способом общего улучшения состояния породного массива.

Осушение применяют для решения различных технических задач: 1) защиты поверхностных и подземных выработок от затопления подземными водами; 2) отвода грунтовых вод от фундаментов сооружений; 3) предупреждения заболачивания и подпора грунтовых вод; 4) закрепления плывунов (песков, обладающих водоотдачей); 5) упрочнения пород в основании сооружений; 6) предупреждения оползней, осыпания и других деформаций склонов и откосов выработок.

Основным способом осушения песчаных пород является гидродинамический дренаж.

При осушении пород гидродинамическим дренажем — водопонижением — извлекаются большие массы подземных вод, при этом резко увеличиваются скорости их фильтрации. Последнее вызывает промывание и выщелачивание горных пород. Уменьшение жидкой фазы в породах ведет к изменению их состояния и свойств.

В незасоленных гравийно-песчаных и песчано-глинистых породах водопонижение ведет в основном к депрессионному их уплотнению. При понижении уровня подземных вод происходит снятие эффекта гидростатического взвешивания пород и соответствующее увеличение напряжений в скелете породы. Это увеличение напряжений способствует депрессионному обжатию, т. е. уплотнению породы. В результате повышается плотность и сопротивляемость породы сдвигу и сжатию, снижается влажность и коэффициент фильтрации породы. По подсчетам Уинслоу и Дюпеля, одна шестая часть водопритоков в скважину происходит за счет отсоса воды из песчано-глинистого комплекса пород в процессе их депрессионного обжатия.

Депрессионное обжатие песчано-глинистых пород впервые было предложено М. Е. Кнорре. В настоящее время этот метод широко используется для обжатия слабых естественных оснований с целью предотвращения больших осадок сооружений. При водопонижении происходят также изменения состояния и свойств пород, особенно песчано-глинистых и засоленных, не связанные с действием «депрессионной нагрузки»: 1) объемные деформации пород, вызванные изменением химического состава и концентрации веществ в подземных водах, изменениями состава поглощенных оснований и емкости обмена; 2) деформации усадки глинистых пород, вызванные миграцией капиллярной и адсорбированной воды; 3) явления уплотнения под действием массы вышележащих пород, происходящие в результате ослабления структурных связей в породе в процессе диффузионного и фильтрационного выщелачивания солей и т. п.

Метод водонасыщения применяется для устранения просадочности лёссов. Увлажнение приводит к нарушению структурных связей, изменению строения лёсса и вызывает просадки. Просадку лёссов вызывают путем их замачивания водой через скважины.

В 1962 г. И. М. Литвинов разработал ускоренный метод глубинного уплотнения просадочных пород большой мощности. Сущность его заключается в применении замачивания лёссов совместно со взрывом с предварительным оконтуриванием зоны уплотнения траншеями.

§ 3. Физические методы

Физические методы, основанные на применении физических полей (электрического, температурного, магнитного), направлены на увеличение плотности, прочности, водо- и морозостойкости, устранение просадочности за счет изменения характера структурных связей в породах.

Упрочнение пород с помощью электрического поля. Электрохимическое закрепление эффективно для водонасыщенных глинистых, илистых и плавунных пород с коэффициентом фильтрации менее 0,1 м/сут.

Сущность электрохимического упрочнения состоит в том, что через влажную породу с помощью системы электродов пропускается постоянный электрический ток напряжением 60, 110 или 220 В.

Электрический ток вызывает в породе электроосмос, электрофорез, электролиз, обменные реакции, образование и накопление новых химических соединений. Эти процессы ведут к изменению состояния глинистых пород (осушению, упрочнению), вследствие чего улучшаются их механические свойства.

Эффект электрохимического закрепления усиливается при введении в породу растворов солей, суспензий, химических веществ, способствующих ее структурообразованию.

Электрохимическое упрочнение пород имеет несколько модификаций:

1. Электрообработка без введения химических добавок (эффективна для пород с $k_f < 0,05$ м/сут). Подразделяется на: а) электроуплотнение, б) электроосушение.

2. Электролитическая обработка за счет совместного воздействия на породу постоянного электрического тока и электролита (например, хлористого кальция). Этот метод применим к породам с $k_f < 0,01$ м/сут.

3. Электросиликатизация — обработка пород постоянным электрическим током с введением в нее раствора жидкого стекла и отвердителя или других вяжущих веществ. Применима к породам с k_f от 0,1 до 0,005 м/сут.

Термическое упрочнение пород. Метод основан на воздействии положительного температурного поля.

Различают поверхностное упрочнение глинистых пород с нарушенной структурой и глубинное упрочнение пород с ненарушенной структурой.

В зависимости от величины температуры и времени воздействия термическая обработка пород разделяется на: прогрев (температура до 500—600° С), обжиг (температура до 1000° С) и клинкерование (температура более 1000° С).

Основные процессы, вызывающие изменения в породе, следующие: 1) дегидратация частиц и минералов и агрегация частиц; 2) размягчение дисперсной части, приводящее к спеканию и преобразованию структуры породы; 3) диссоциация карбонатов и частичное разрушение алюмосиликатов с образованием аморфного кремнезема, приводящие к образованию кальциевых силикатов и алюмосиликатов; 4) плавление; 5) кристаллизация.

Термическое упрочнение пород с ненарушенным строением, или глубинный обжиг, применяется в основном для упрочнения просадочных лёссовых пород.

Сжигание топлива (газообразного, жидкого, твердого) производится либо непосредственно в толще укрепляемого грунта, либо в устьях скважин или над скважинами с регулированием химического состава продуктов горения путем соответствующих химических добавок. Для создания температурного поля используется также электрический ток. В настоящее время внедрены методы электроплавления плывунов и протаивания многолетне-мерзлых пород.

Упрочнение пород действием поля отрицательных температур. Способ замораживания может применяться для упрочнения как слабо обводненных (пески, глины, плывуны), так и твердых трещиноватых обводненных пород. Однако большие скорости движения воды по трещинам требуют больших расходов холода и времени замораживания, что иногда ограничивает его применение.

Сущность метода замораживания сводится к созданию вокруг выработки монолитной стены из мерзлой породы. Упрочнение пород основано на кристаллизации воды, находящейся в порах, капиллярах и трещинах и цементирующей частицы и агрегаты породы.

§ 4. Физико-химические методы

Физико-химические методы применимы в основном к глинистым породам, обладающим значительной или высокой обменной способностью, а также при комплексных методах их закрепления. Принцип воздействия заключается в обработке пород небольшими дозами реагентов (не более 1—3%), изменяющих их обменную способность и поверхность минеральных частиц. Обработка производится с целью изменения структуры (диспергации, агрегации) или защиты естественной структуры породы (например, от влияния воды). К физико-химическим методам относятся: кольматация, глинизация, глинование, пескование, торфование и солонцевание.

Собственно химические методы основаны на введении в породу химических реагентов, что приводит к значительному увеличению прочности, водо- и морозостойкости, уменьшению ее водопроницаемости в результате изменения состава и характера структурных связей.

Из химических методов наиболее широко применяются битумизация, силикатизация, цементация и известкование.

Битумизация пород подразделяется на глубинную (в массиве) и поверхностную. Горячая битумизация (введение в породу подогретого битума — до 160°C) применяется для закрепления и гидроизоляции трещиноватых пород с раскрытием трещин до 0,2—1 мм и удельным водопоглощением Q до 0,5 л/мин. Холодная битумизация (введение в породу битумных эмульсий) применяется для закрепления и гидроизоляции гравелисто-песчаных и песчаных пород с k_f от 10 до 100 м/сут и удельным водопогло-

чением 0,1—1 л/мин. Грунтово-битумная изоляция выдерживает гидростатические давления более $2,5 \cdot 10^5$ Па.

Глубинная битумизация применяется для придания водонепроницаемости трещиноватым и щебенисто-гравийным породам, а также пескам, особенно при наличии в них подземных вод, движущихся с большой скоростью, или агрессивных вод, когда применять портландцементные растворы нецелесообразно.

Упрочнение пород синтетическими полимерами. При использовании синтетических полимеров образуется прочная и долговечная структура породы с затратой небольшого количества вяжущего вещества.

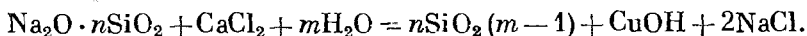
Продукты полимеризации и поликонденсации практически не подвергаются деструкции или расщеплению на исходные мономеры. Они обычно представляют собой химически инертные вещества, нерастворимые в воде и стойкие к биологическим воздействиям.

Наиболее распространены методы инъекционного закрепления массивов песчаных пород мочевиноформальдегидными смолами.

Упрочнение пород растворами жидкого стекла (силикат-растворами). Силикатизация подразделяется на двухрастворную и однорастворную.

Двухрастворный способ силикатизации (укрепление песков) предусматривает нагнетание в массив двух растворов: жидкого стекла и отвердителя. В результате песок приобретает значительную механическую прочность $[\sigma_{сж} = (5-60) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2]$ и водопроницаемость. Прочность силикатизированного грунта не снижается при воздействии на него кислых агрессивных вод.

Упрочнение обусловлено реакцией, происходящей между жидким стеклом и отвердителем (например, хлористым кальцием) с образованием кремнегеля:



Такая двухрастворная силикатизация эффективна для грунтов с коэффициентом фильтрации от 2 до 80 м/сут.

В качестве отвердителя жидкого стекла могут быть использованы также серная кислота, алюминат натрия, фосфорные кислоты, кремнефтористый натрий или аммоний, углекислый газ и др.

Однорастворный способ силикатизации имеет две модификации: 1) для пород химически активных — лёссов и 2) для пород химически неактивных — мелко- и тонкозернистых.

Способ силикатизации лёссов основан на легком и быстром пропитывании (при небольшом давлении $(2-3) \cdot 10^5$ Па разведенного силикатраствора (10—20%-ной концентрации) и выделении пленки геля кремниевой кислоты, цементирующей лёсс. При этом лёсс приобретает водостойкость, прочность $[\sigma_{сж} = (8-18) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2]$.

Способ однорастворной силикатизации мелкозернистых песков и плывунов заключается в том, что в породу через систему инъекторов вводится силиказоль в состоянии слабовязкой жидкости с заранее заданным временем гелеобразования. При этом вода, заполняющая поры породы, вытесняется и замещается золей, который через определенное время превращается в гель. Гель заполняет поры песка и цементирует частицы, превращая песок в водонепроницаемый песчаник с повышенной прочностью.

В качестве коагулятора силиказоля используются: H_3PO_4 ; H_2SO_4 ; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; H_2SiF_6 ; $\text{NaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и др.

Прочность кислых гелей несколько выше щелочных: через несколько часов $\sigma_{\text{сж}}$ достигает $(40-60) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Прочность песков, закрепленных золями, обычно $(1,5-2,5) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ и более.

Силиказоли на основе жидкого стекла имеют незначительную вязкость, близкую к вязкости воды, что позволяет осуществить инъекцию пород с коэффициентом фильтрации от 0,3 м/сут и выше. Прочность закрепленных песков от 10 до $(40-80) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Цементация пород используется для устройства противофильтрационных завес, оснований и покрытий автомобильных дорог и аэродромов и создания стройматериалов. Упрочнение пород цементом — наиболее распространенный и экономичный метод.

Применяются различные виды цемента: портландцементы, фоманцементы, шлаковые и пуццолановые цементы и др. Портландцемент представляет собой гидравлическое вяжущее вещество, получаемое путем обжига до спекания сырьевой смеси надлежачего состава, обеспечивающего преобладание в полученном клинкере силикатов кальция. Процесс твердения цемента определяется гидратацией его основных клинкерных минералов: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$; $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и др.

Продукты гидратации и гидролиза цемента (в результате силификации, алюминоза, химических, хемосорбционных и обменных процессов) способны срачиваться со всеми минеральными составляющими грунта. Степень и механизм срачивания (упрочнение цементированного грунта) зависят от активности (величины и природы) поверхности минеральных частиц и их агрегатов, кристаллохимических особенностей и теплофизических свойств слагающих грунт минералов, а также их растворимости, особенно в щелочной среде.

Цементация подразделяется на глубинную (укрепление пород в массиве) и поверхностную (укрепление пород с нарушенной структурой).

Способ поверхностной цементации используется в дорожно-аэродромном строительстве, в результате обработки получается прочное $[\sigma_{\text{сж}} = (50-200) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2]$ и морозостойкое покрытие.

Сущность глубинной цементации заключается в том, что через пробуренные скважины или инъекторы под давлением (от 3 до $70 \cdot 10^5 \text{ Па}$) нагнетаются цементные растворы (суспензии) из

цемента и воды или сложные смеси жидкой консистенции из цемента, воды, песка, глины и химических добавок.

Раствор заполняет трещины и пустоты в породе и затем твердеет, в результате чего снижается ее водопроницаемость и приобретает значительная прочность.

Цементация лимитируется (ГОСТ 4759—49) размером трещин в породах — до 0,1 мм, скоростью подземных вод — до 200 м/сут, видом агрессивности подземных вод (выщелачивающая, углекислая, общекислотная, сульфатная и магниевая).

Укрепление пород известью — один из способов упрочнения их в основаниях дорожных и аэродромных одежд. Известкование также применяется при изготовлении стройматериалов. В последнее время известь используется для укрепления илов (известково-песчаными сваями — дренами) и при комплексном упрочнении пород.

Упрочнение пород известью обусловлено: 1) испарением воды и постепенной кристаллизацией гидрата окиси кальция; 2) карбонатизацией гидрата окиси кальция при поглощении CO_2 воздуха; 3) хемосорбционными и химическими процессами связывания извести кремнеземом в гидросиликаты кальция.

§ 5. Насыпные грунты и горные массы отвалов карьеров

Данная подгруппа объединяет насыпные и намывные грунты, горные массы отвалов и терриконов, а также так называемый культурный слой, под которым подразумевают верхние слои пород в населенных пунктах, переработанные человеком и включающие следы материальной культуры (обломки строительного материала, предметов домашнего обихода и т. д.).

По исследованиям Ф. В. Котлова, состав основной минеральной массы культурного слоя чаще всего соответствует геологическим условиям местности, а состав «культурных включений» определяется характером и состоянием хозяйственно-культурной деятельности человека. В отличие от горных пород культурный слой крайне неоднороден по составу и невыдержан по мощности. В составе некоторых разностей его наблюдается очень высокое содержание органических включений. Такие образования непригодны для использования в качестве основания сооружений.

Наносные грунты накапливаются в различных ирригационных системах, каналах и водохранилищах. По своим свойствам они приближаются к осадкам современных озер и рек.

С развитием техники гидромеханизации земляных работ широкое распространение получают намывные земляные сооружения и гидроотвалы.

В процессе намыва наблюдается фракционирование породы — отделение песчано-гравелистых частиц от тонкообломочных пыле-

вато-глинистых. Указанные фракции укладываются на отвалах с различным уклоном, величина которых зависит от размера зерен, удельного расхода воды и некоторых других факторов. Ориентировочное значение этих уклонов для случаев свободного течения пульпы на отвале при расходе воды от 300 до 1200 м³/ч приведено в табл. 26.

Т а б л и ц а 26

Значения величин уклонов для намывных породных масс

Порода	Уклон поверхности	
	при намыве на воздухе	при намыве в воде
Гравий с песком	0,70—0,50	1,00—0,70
Песок крупнозернистый	0,20—0,10	0,30—0,20
» среднезернистый	0,07—0,06	0,20—0,15
» мелкозернистый	0,04—0,03	0,15—0,10
Супесь легкая	0,03—0,01	0,07—0,015
Глинистые породы	0,015—0,007	—

По данным Г. А. Нурка, дробленный аргиллит укладывается водой под углом от 20 до 30°, а намываемые массы прокопьевских терриконов (Кузбасс) — под углом 25—26°.

Грубообломочные и песчаные породы, легко отделяющие воду, укладываются плотно. Глинистые породы длительное время сохраняют текучесть и рыхлое сложение.

Горные массы отвалов. При разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом приходится извлекать из массива мощные толщи вскрышных пород и транспортировать их в отвалы. Последние могут располагаться как в контуре карьера (внутренние отвалы), так и вне его (внешние отвалы).

Отвальные насыпи характеризуются следующими особенностями. Форма откоса отвала близка к прямолинейной, что объясняется условиями его формирования при свободном сыпании пород. Породы при этом располагаются под углом естественного откоса, который достигает следующих значений:

для песчано-глинистых пород	30—40°
полутвердых (полускальных) пород . . .	37—44°
твердых (скальных) пород	45°

В процессе отвалообразования наблюдается разрыхление породы, причем коэффициент разрыхления песков (отношение объемных масс в естественном залегании и в насыпи) составляет 1,1—1,25; у глин коэффициент разрыхления достигает 1,6 (А. М. Драпников). Однако при высоких отвалах (свыше 20 м) песчано-глинистые породы в их основании приобретают плотность, близкую к плотности в естественном залегании.

При разрыхлении пород в процессе их экскавации и транспортирования в отвал наблюдается снижение прочности. Для условий Днепровского буроголиного бассейна (песчано-глинистые породы) при работе транспортно-отвальных мостов снижение прочности пород во внутренних отвалах характеризуется данными табл. 27.

Таблица 27

Снижение прочности пород в отвалах

Порода	Коэффициенты снижения	
	угла внутреннего трения	сцепления
Глинистая	0,72	0,57
Песчаная	0,95	0,60

Отвалы могут быть однородными, когда в них размещаются литологические однородные породы, или неоднородными, когда в отвалы складываются породы, разнородные по литологическому составу.

Неоднородность отвала может быть вызвана также результатом естественного фракционирования пород в процессе их отсыпки. При этом более мелкие фракции породы скапливаются в верхней части насыпи, а более крупные — в нижней. Такой тип сложения насыпи формируется также в случае отсыпки разнородных по литологическому составу пород, например песков и плотных глин. Песчаная масса при этом концентрируется в верхней части отвала и частично достигает средней, а куски и комки глины скатываются вниз.

Отвальные массы характеризуются неоднородностью по их плотности. Как правило, плотность этих масс является функцией времени существования отвала и увеличивается с глубиной под действием вышележащих масс.

Уплотнение отвалов происходит также под действием силы удара сбрасываемой породы на поверхность отвала и массы работающих машин и механизмов на площадке отвалов. При отсыпке отвалов, например конусами, в их основании и по всей высоте образуется уплотненное ядро.

В связи с прогрессирующим уплотнением отвальной насыпи, протекающим особенно интенсивно в начальный период ее существования, возрастает сцепление породных масс отвала. По ориентировочным данным С. И. Попова, при «возрасте» насыпи в 1,5 года сцепление песчано-глинистых насыпей соответственно восстанавливается на 38 и 50%.

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ МАССИВОВ ПОРОД

ГЛАВА 6

О СВОЙСТВАХ ГОРНЫХ ПОРОД В ОБРАЗЦЕ И МАССИВЕ

§ 1. Предварительные сведения

Опыт и наблюдения за поведением горных пород в массиве свидетельствуют о зависимости свойств пород от их особенностей как геологических тел и конкретных условий залегания в массиве. Об этом свидетельствуют также данные значительных расхождений свойств горных пород в образцах и массиве. Так, модуль упругости, полученный на образцах, нередко на один—два порядка выше модуля упругости, полученного в натурных условиях.

Основными причинами расхождения свойств пород в образцах и массиве являются нарушения условий подобия — геометрического напряженного состояния и во времени (длительности наблюдений). Определенное влияние оказывают эффект разгрузки горной породы в результате извлечения образца из массива и деформаций, неизбежно сопровождающие разгрузку, а также изменения фазового состава (потеря влаги, дегазация) и механические повреждения.

Многие явления текстурной неоднородности и трещиноватости не могут быть представлены в малых объемах — образцах. В то же время их роль в развитии механических и других процессов в массивах пород исключительно велика. Все наиболее серьезные по своим последствиям нарушения устойчивости горных пород в окрестностях горных выработок и области (зоны) их локализации связаны с явлениями структурной и физической неоднородности породы и массива пород в целом.

Известны различные методы определения свойств пород в массиве. Поиски в этом направлении продолжаются и в настоящее время. Они направлены на усовершенствование методов и технических средств проведения испытания пород в образцах в условиях, максимально приближающихся к натурным, и на выявление роли отдельных факторов структурной и физической неоднородности на свойства пород в массиве путем использования для этой цели методов модельного эксперимента. Перспективны также методы моделирования, основанные на нахождении природных объектов, отвечающих условиям так называемого «интеграль-

ного подобия» и основанные на теории подобия и теории распознавания образцов (Л. Б. Розовский). Ниже рассмотрены основные факторы нетождественности свойств горных пород в образцах и в массиве.

§ 2. Явления неоднородности горных пород в образцах и массиве

Факториальные признаки (вещественный состав, структура минерального скелета и порового пространства, межминеральные связи) горных пород, как правило, не остаются постоянными во всем объеме горной породы, они изменяются при переходе из одной точки в другую (явление неоднородности) и с изменением направления (явление анизотропности). Явления неоднородности и анизотропности далеко не всегда тождественны для породы в образцах и массиве. Так, при неупорядоченной изменчивости факториальных признаков порода в массиве может рассматриваться как квазиоднородное тело, тогда как в образцах она обнаруживает резко окрашенную неоднородность. В равной мере при интенсивной «вторичной» складчатости или пльчатости порода в массиве ведет себя как квазиизотропное тело; в образцах она анизотропна.

Очевидно, в подобных и аналогичных им случаях нельзя переносить характеристики неоднородности и анизотропности породы в образцах на массив.

По характеристикам неоднородности и анизотропности можно различать следующие группы горных пород (табл. 28).

Перечисленные группы пород по характеристикам неоднородности и анизотропности устанавливаются по микроскопическим признакам. Но в природе известны случаи, когда анизотропность свойств пород обнаруживается лишь на микротекстурном уровне.

Т а б л и ц а 28

Группы горных пород по характеристикам неоднородности и анизотропности

Группа пород	Изменения факториальных признаков породы
Однородные Неоднородные квазиизотропные Однородные анизотропные Неоднородные и анизотропные	Примерно равноценны во всем объеме породы и во всех направлениях Качественно различны в отдельных участках, но примерно равноценны во всех направлениях Меняются с изменением направления, но выдерживаются в любом данном направлении Различны во всех частях объема породы и изменяются с изменением направления

В таких случаях она обусловлена определенной ориентацией кристаллографических осей (и соответственно плоскостей спайности) некоторых породообразующих минералов, например кварца в гранитах. По исследованиям Л. М. Музырева (1973 г.), с ней связано направление наилучшей «делимости» породы при добыче и обработке штучного камня.

§ 3. Трещиноватость горных пород в массиве

Прочность горных пород при прочих равных условиях зависит от их монолитности. С нарушением монолитности (появлением трещин) прочность пород неизменно снижается.

Трещиноватость — общее свойство твердых и полутвердых горных пород. Природа трещиноватости горных пород различна. Часть трещин возникает в процессе породообразования. Таковы так называемые «первичные» трещины, к которым относятся литогенетические осадочных пород, контракционные магматических пород и кливажные метаморфических пород. На последующих этапах изменения породы могут появиться «вторичные» трещины. К ним относятся тектонические, сопряженные с разрывными и складчатыми дислокациями и соответственно называемые приразрывными и соскладчатыми трещинами, экзогенные, представленные трещинами выветривания и разгрузки, и искусственные, возникшие при буровзрывных, горнопроходческих и других работах.

Перечисленные генетические типы трещиноватости горных пород составляют системы трещин с характерными для каждой из них пространственно-геометрическими и другими характеристиками.

При изучении трещиноватости пород обращается внимание на:

1) ориентацию трещин данной системы относительно друг друга и по отношению к граничащим поверхностям (контактам с вмещающими породами) и тектоническим нарушениям;

2) изменения характеристик трещиноватости (элементов залегания трещин, степени раскрытости и протяженности, интенсивности развития, степени шероховатости стенок трещин и наличия на их поверхности примазок) на плане и с глубиной;

3) заполнение («залечивание») трещин минеральными новообразованиями.

Различают микро- и макротрещиноватость горных пород. Микротрещиноватость визуально не наблюдается. Протяженность микротрещин несколько превышает линейные размеры минеральных зерен. В твердых породах микротрещины обычно пересекают границы зерен, реже проходят по ним. Нередко микротрещины сопряжены с микротекстурой горной породы — упорядоченной ориентацией кристаллографических осей некоторых породообразующих минералов. В этом случае микротрещины развиваются по направлениям спайности и, таким обра-

зом, усиливают анизотропность свойств пород. Протяженность микротрещин может быть значительной и нередко (например, в коре выветривания) по ним развивается макротрещиноватость породы.

Макротрещины наблюдаются визуально. Наиболее развитые из них пронизывают породу на значительную (или всю) мощность, расчленяя ее на отдельные структурные блоки. В результате порода в массиве приобретает блочное строение, а в зонах коры выветривания превращается в «разборную» толщу. При малой степени раскрытости макротрещины обуславливают легкую «делимость» породы в массиве.

Степень раскрытости и интенсивность развития макротрещин обычно снижается с глубиной. На больших глубинах макротрещины сменяются микротрещинами.

Макро- и микротрещиноватость вместе с пустотами других морфогенетических типов образуют так называемую внешнюю фазовую поверхность горной породы. Изменения физических (в первую очередь прочностных) свойств горных пород тесно связаны с удельной площадью этой поверхности. Естественно, что с возрастанием удельной площади этой поверхности следует ожидать активизацию взаимодействий твердой фазы (минерального скелета) с подвижными фазами, заполняющими поровое пространство.

Под влиянием тангенциальных напряжений в поверхностном слое кристаллических решеток минералов развивается субмикроскопическая трещиноватость породы. В результате появляется внутренняя фазовая поверхность, образованная сложной паутиной сетью сообщающихся между собой субмикроскопических трещин и дислокаций; микроскопическая и субмикроскопическая трещиноватости оказывают большое влияние на показатели стойкости горной породы, в частности, на ее размягчаемость (т. е. на величину снижения прочности породы при водонасыщении), морозостойкость, выветриваемость и др.

При инженерно-геологических исследованиях обычно ограничиваются изучением микро- и макротрещиноватости горной породы, и основное внимание обращается на: а) установление главных направлений развития макротрещин; б) интенсивность развития трещин различной ориентировки; в) определение величины снижения прочности породы в массиве за счет трещиноватости.

В результате статистической обработки данных натурных измерений определяется объемный коэффициент макротрещиноватости и коэффициент структурного ослабления породы в массиве $K_{осл}$.

Объемный коэффициент макротрещиноватости

$$W = \frac{1}{V}, \quad (II.1)$$

где V — объем элементарного структурного блока, м^3 , равный

$$V = \frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\left(1 \pm \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\bar{a}_4}}\right) \left(1 + \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\bar{a}_5}}\right) \left(1 + \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\bar{a}_6}}\right)},$$

где $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_6$ — средние расстояния между трещинами 1, 2, 3, ..., 6 систем.

Среднее расстояние между трещинами каждой данной системы

$$\bar{a} = \frac{P}{n} \sin \alpha,$$

где P — периметр исследованного объема породы в массиве (в целике); α — средний угол падения трещин; n — число трещин данной системы.

Для оценки влияния трещиноватости на прочность породы в массиве предложены различные методы, в том числе основанные на:

а) лабораторных испытаниях образцов пород двух резко различных размеров и построении данных этих испытаний паспортов, вычисленного масштабного эффекта и средней прочности породы в массиве (М. М. Протоdjяконов);

б) данных лабораторных испытаний образцов пород и испытания отдельных блоков породы в массиве (ВНИМИ).

В том и другом случае размеры испытываемых объемов горной породы, как правило, не являются представительными, так как в этих объемах не могут быть представлены крупномасштабные явления трещинной расчлененности и макротекстуры горной породы. Иными словами, названными методами нельзя полностью избежать нарушения условий геометрического и структурно-механического подобия образцов пород и массива породы.

§ 4. Масштабный фактор

Масштабный фактор является неизбежным следствием изменений инженерно-петрографических характеристик в зависимости от размеров (и формы) исследуемых объемов горной породы.

К частным проявлениям масштабного фактора относятся рассмотренные выше явления нетождественности, анизотропности и трещиноватости пород в образцах и массиве.

Принято считать, что с увеличением размеров образцов прочность породы неизменно снижается в основном за счет изменений соотношения размеров и частоты трещин различных категорий в образцах и массиве. По некоторым экспериментальным данным снижение прочности с увеличением размеров образцов происходит до некоторого предельного, характерного для каждой данной породы значения. У галогенидов (каменной и калийных солей) наблюдается обратная картина: прочность образцов возрастает

с увеличением их размеров до определенного, максимального для данной породы значения, а затем наблюдается тенденция к снижению. В условиях растягивающих напряжений прочность пород снижается с увеличением размеров образцов. В рассматриваемом случае немаловажным, по-видимому, является пластичность галогенидов и быстрая «залечиваемость» микротрещин, развивающихся в стадии пластической деформации породы. В силу этого затруднено перерастание микротрещиноватости в макротрещиноватость и наступление фазы разрушения горной породы. Сам процесс разрушения их обычно связан с явлением разупрочнения породы в процессе пластической деформации.

В массиве разрушение породы обычно связано с разрывом сплошности по контактам между разновидностями данных пород, отличающимися друг от друга по факториальным признакам и всегда характеризующимся резким ослаблением породы*.

Очевидно, что степень снижения прочности горных пород в массиве зависит от их деформационных характеристик (в частности, от степени жесткости и пластичности), текстурной и структурной неоднородности и анизотропности.

Применительно к условиям целиков величина снижения прочности породы в массиве за счет его трещиноватости может быть оценена через коэффициент K_w , численно равный произведению трех коэффициентов:

1) коэффициента $f(\tau)$, учитывающего снижение сопротивляемости горной породы сдвиговым деформациям в массиве по отношению к сопротивляемости этим деформациям в образцах;

2) коэффициента $f(\beta)$, учитывающего влияние ориентировки трещин по отношению к касательным напряжениям в массиве;

3) коэффициента $f(n)$, учитывающего влияние густоты трещиноватости породы в массиве, т. е.

$$K_w = f(\tau) f(\beta) f(n).$$

Перечисленные коэффициенты могут быть определены по данным непосредственных измерений основных направлений трещиноватости, густоты развития трещин и прочности на сдвиг по каждой системе трещин.

Известны случаи, когда микротрещины «залечены» минеральными новообразованиями. В этом случае определение интенсивности трещиноватости возможно по содержанию вещества, заполняющего трещины. Такая методика была предложена и использована при изучении трещиноватости медистых песчаников Джезказганского месторождения (В. И. Борщ-Компаниец, В. Г. Голева), в которых оруденение тесно связано с интенсивностью макротрещиноватости породы.

* Такова природа отслаивания потолочин горных выработок в расчлененных или разлитизованных толщах галогенидов.

§ 5. Влияние окружающей геологической среды на свойства горных пород в массиве

Наблюдения показывают, что на поведение и механические свойства горных пород оказывают влияние геологическая обстановка залегания их в массиве, а именно: 1) прочность, жесткость или пластичность вмещающих пород; 2) геолого-структурная позиция развития породы (или точки наблюдения) в массиве и 3) характер и степень геолого-структурной и физической неоднородности массива в целом.

В условиях горно-строительных и горно-эксплуатационных работ на деформационное поведение (и свойства) пород оказывают влияние также горнотехнологические факторы. Перечисленные факторы создают особые условия развития деформационных процессов, существенно отличные от условий лабораторных испытаний образцов пород. В качестве иллюстрации можно привести следующие примеры. Каменная соль в окружении ангидридов деформируется как пластическое тело. Та же каменная соль в окружении калийных, более пластичных пород ведет себя как жесткое тело. Пластичные глины при развитии углисто-глинистых диаширов приподнимают и растягивают пласты лигнита. При этом как песчаные породы в толще углей и глин, так и боковые породы относятся на мелкие клинья, взаимные перемещения которых относительно друг друга создают картину квазипластичного смятия пластов песка.

Очевидно, пластичность и жесткость горных пород — понятия условные, относительные, зависящие от конкретных условий развития деформационного процесса. Об этом свидетельствует также тот факт, что глинистые (пластичные) породы в более пластичных толщах лигнитов ведут себя подобно пескам в толще глинистых пород.

Известно различное поведение одной и той же горной породы в окрестностях горных выработок в сводовых частях складок (действие сводового эффекта) и на их крыльях, формирование которых происходит в условиях растягивающих напряжений и деформации.

Угльные пласты нередко взрывоопасны. Взрывоопасность их возрастает с глубиной залегания, но зависит не только от нее. По-видимому, локализация явлений внезапных выбросов углей и газов в данном пласте строго приурочена к участкам (зонам) интенсивных остаточных деформаций, сопровождавшихся не только смятием пород, но также сдвиговыми (в том числе микросдвиговыми) деформациями и катаклазом. Обстоятельством, способствующим возникновению этих опасных по своим последствиям явлений, следует считать также повышенную жесткость и низкую газопроницаемость вмещающих пород.

§ 6. Влияние гидрогеологических условий

Вода практически постоянный компонент подвижной фазы горных пород. Благодаря исключительным свойствам — высокой подвижности, теплоемкости и химической активности она оказывает весьма существенное влияние на свойства горных пород и процессов, протекающих в них. Практически все электрокинетические явления, играющие столь значительную роль в изменениях состояния и свойств пород, протекают в присутствии воды и при ее активном участии.

Процессы миграции подземных вод в условиях водопонижения и производства горных работ, достигающие большой интенсивности, являются причиной многих горно-геологических явлений, особенно в толщах дисперсных, в том числе гидрофильных (глинистых) и раздельнозернистых пород. К ним относятся, в частности, процессы консолидации глинистых пород, фильтрационного разрушения раздельнозернистых пород и др.

Свойства подземных вод изменчивы и, соответственно, эффект воздействия их на состояние и свойства горных пород подвержен известным колебаниям. В определенной мере изменчивость свойств пород является следствием высокой чувствительности структуры самой молекулы воды, точнее — ассоциацией монокристаллических молекул в так называемые льдоподобные рои. В каждом из них может быть от 12 до 150 молекул, время существования (и образования) которых не превышает 10^{-10} — 10^{-11} с.

Вследствие изменений молекулярной структуры воды, происходящих, например, при повышении температуры и давления с глубиной, наблюдается повышение миграционной способности воды в толщах, являющихся практически водонепроницаемыми в обычных термодинамических условиях. Следствием этого может явиться ускорение процесса консолидации глинистых пород и некоторые другие эффекты, наблюдающиеся при глубоком водопонижении.

§ 7. Полевые методы определения свойств горных пород

Основными методами натурных наблюдений за состоянием горных выработок и прежде всего деформаций бортовых массивов являются маркшейдерские методы. Наиболее распространены инструментальные наблюдения за смещением реперов, заложенных по профильным линиям. Периодичность наблюдений и точность замеров определяются в зависимости от скорости и величины смещения [76].

Цель натурных исследований — определение прочностных и деформативных характеристик пород.

Сопротивление сдвигу горных пород в натурных условиях определяется различными методами, например, срезом целиков пород в шурфах посредством установки конструкции «Фундамент-

проекта», срезом больших призм по методике ВНИИ, срезом монолитов в приборах конструкции ДИИТ и др. Во всех случаях к выбранному для эксперимента объему пород ненарушенной структуры прикладываются вертикальная и горизонтальная нагрузки. В процессе испытаний фиксируют деформации целика или монолита. Породная призма оконтуривается таким образом, чтобы она сохранила связь с массивом лишь по той поверхности, по которой необходимо определить характеристики сопротивления сдвигу. К этой поверхности прикладываются нормальные и касательные силы, создаваемые гидравлическим домкратом или плоскими гидравлическими подушками. Положение плоскости среза относительно поверхностей ослабления в целике (слабого простоя, поверхностей контакта, трещин и т. п.) определяется положением плоскости гидроподушки или основания гидродомкрата.

Давление P , передаваемое на плоскость среза, определяется по формуле:

$$P = DSt + \Delta P, \quad (II.2)$$

где D — давление жидкости в домкрате при срезе;

S — рабочая площадь цилиндра домкрата;

t — коэффициент передачи давления, определяемый при тарировке домкрата;

ΔP — поправка за счет массы призмы и домкрата.

Сцепление по плоскости среза призмы определяется по формуле

$$c = \frac{P}{F} (\sin \alpha + \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi), \quad (II.3)$$

где F — площадь среза;

α — угол между плоскостью гидроподушки или гидродомкрата и плоскостью среза;

φ — угол внутреннего трения породы по плоскости среза (определяется по данным лабораторных испытаний).

В изложенной схеме расчета сцепления совмещаются результаты натурных и лабораторных испытаний. В ГИГХСе разработана методика статистической обработки результатов серий натурных испытаний, позволяющая непосредственно получать значения сцепления и угла внутреннего трения в массиве. Значения сцепления и угла внутреннего трения в массиве можно получать также при обработке результатов серии (не менее трех) испытаний с различными значениями α , построив график зависимости сдвигающих усилий от величин нормального давления.

Величину несущей способности и модуль деформации в натурных условиях определяют различными методами. Одним из наиболее распространенных является метод пробных нагрузок, заключающийся в том, что жесткий штамп круглой или квадратной формы загружают возрастающими нагрузками (прикладыва-

емыми ступенями или одной нагрузкой), соответствующими массе сооружения или оборудования, и измеряют его осадку. Критическую точку графика деформаций от нагрузки определяют как точку перегиба кривой, отделяющую начальный участок графика, для которого зависимость между осадками и нагрузками может быть принята линейной, от участка графика, где эта зависимость криволинейная. Для линейного участка графика зависимость $S = f(g)$ принимает вид

$$S = c(g - g_0),$$

где S — осадка штампа;

g — нагрузка на штамп;

g_0 — начальное давление уплотнения, соответствующее величине структурной прочности породы;

c — коэффициент пропорциональности, равный $\operatorname{ctg} \alpha$.

Нагрузка, передаваемая на породу, должна быть такой, чтобы порода находилась в устойчивом состоянии, т. е. деформирование за данной ступенью нагрузки происходило с затуханием. Поэтому нагрузка, соответствующая критической точке графика, является критической. Эта нагрузка и определяет несущую способность породы. Для линейного участка деформации вычисление модуля деформации может производиться по формуле Буссинеска:

$$E = (1 - \mu^2) \frac{Q}{Sd}, \quad (\text{II.4})$$

где E — модуль деформации;

Q — полная нагрузка на штамп, соответствующая критической;

d — диаметр штампа (если используется квадратный штамп, то определяется диаметр равновеликого по площади круга);

S — конечная осадка, отвечающая нагрузке Q ;

μ — коэффициент поперечного расширения (коэффициент Пуассона), принимаемый для песков и супесей 0,3 для суглинков 0,35, для глин 0,42.

Крыльчатое зондирование применяется для определения общего сопротивления сдвигу песчано-глинистых (связных) пород. Испытания заключаются в срезе пород вращением вокруг продольной оси четырехлопастного наконечника, вдавленного в забой скважины. Срез породы происходит по цилиндрической поверхности. Во время испытания замеряется крутящий момент. Общее сопротивление сдвигу при полном заглублении лопастей определяется по формуле

$$\tau = \frac{M}{1,57d^2 \left(h + \frac{d}{6} \right)}, \quad (\text{II.5})$$

где M — максимальный крутящий момент;

d — диаметр крыльчатки;

h — высота лопасти.

В настоящее время разработаны крыльчатые зонды, конструкция которых позволяет создавать различные нормальные давления поверхности среза. Поэтому проведя два испытания в смежных точках в пределах одного слоя пород, можно получить показатели сопротивления сдвигу, решив систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \sigma_1 \operatorname{tg} \varphi + c \\ \tau_2 &= \sigma_2 \operatorname{tg} \varphi + c \end{aligned} \right\}.$$

Для экспрессного и массового определения общего сопротивления сдвигу слабых (иловатых) глинистых пород или отвальных пород (т. е. пород с нарушенной структурой) успешно используется переносной крыльчатый зонд конструкции Л. П. Загоруйко, отличающийся компактностью, малой массой, оснащённостью самописцами для фиксации диаграмм усилий внедрения и крутящего момента.

Идея определения деформативных характеристик песчано-глинистых пород посредством камеры бокового давления, помещаемой в скважину, была высказана А. А. Ктаторовым в 1930 г. Развитие идеи привело к разработке в 1952 г. Луи Менаром установки для механических испытаний горных пород в скважине — прессиометру. Прибор основан на принципе измерения радиальных деформаций расширяющейся упругой камеры, помещаемой в скважину. Испытания прессиометром относятся к быстрым испытаниям недренированной породы. Модуль деформации породы определяется по формуле

$$E = k \frac{\Delta P}{\Delta r}, \quad (\text{II.6})$$

где k — показатель, зависящий от параметров установки и коэффициента бокового расширения породы;

ΔP — изменение давления в камере;

Δr — изменение радиальных деформаций рабочей камеры или по известной формуле Лямэ:

$$E = (1 + \mu) a \frac{P}{\varepsilon}, \quad (\text{II.7})$$

где μ — коэффициент Пуассона;

ε — величина абсолютной деформации упругого цилиндра;

P — давление в расширяющемся цилиндре;

a — начальный радиус упругого расширяющегося цилиндра (скважины).

Для получения величины сцепления можно воспользоваться приближенной формулой, вытекающей из уравнения Прадтля — Рейсса

$$c = \left[\frac{E}{1+\mu} \varepsilon + (1-2\mu) P \right] \frac{1}{2(1-\mu)} \quad (\text{II.8})$$

при условии, что $P/c - 1$ мал.

Натурные замеры порового давления в водонасыщенных глинистых породах позволяют оценить изменения прочности и уточнить условия работы этих пород под нагрузкой. В отечественной практике применяются пьезодинамометры, в которых использован метод измерения мелких деформаций, разработанный П. П. Давиденковым, заключающийся в преобразовании механических колебаний струны в электрические. Приборы для измерения порового давления конструкции Гидропроекта состоят из собственно пьезодинамометров, помещаемых или задавливаемых в породную толщу, и измерительной аппаратуры, находящейся на поверхности. Регистрирующее устройство и датчики связаны между собой электропроводами. Пьезодинамометры выпускаются для давления от 3 до $100 \cdot 10^5$ Н/м². Не искажая картину порового давления в области заложения в силу небольших размеров, пьезодинамометры могут надежно работать в водонасыщенных породах в течение нескольких десятилетий.

Под зондированием понимают метод исследования связанных пород посредством вдавливания в них статической нагрузкой или задавливания под действием динамической нагрузки конического наконечника. Метод зондирования позволяет получить характеристику о состоянии пород по всему разрезу исследуемой толщи и изменениях их прочности. Об этих изменениях судят по числу ударов для заглубления зонда на стандартную величину (чаще всего на 10 см) или по усилию, необходимому для внедрения зонда в породу.

В последние годы благодаря разработке аппаратуры и методики исследований в практике натурных инженерно-геологических изысканий для оценки водно-физических свойств и состояния пород в массиве стали широко использоваться геофизические методы, в том числе радиоактивные, сейсмо-акустические, электрические и др.

Весьма перспективным является изучение водно-физических свойств песчано-глинистых пород в массиве методами, основанными на использовании радиоактивных изотопов и радиоактивного излучения. Радиоактивные методы применяются для литологического расчленения разреза (гамма-каротаж), определения объемной массы пород (гамма-гамма каротаж), их влажности, уровня подземных вод (нейтрон-нейтронный каротаж), качественной оценки химического и минерального состава (нейтронный гамма-каротаж). Физической основой метода гамма-каротажа является наличие естественной радиоактивности пород, слага-

ющих исследуемую толщу. Плотностной гамма-каротаж основывается на зависимости интенсивности рассеянного гамма-излучения от объемной массы (плотности) породы. Метод нейтрон-нейтронного каротажа основан на использовании функциональной зависимости между регистрируемым потоком нейтронного излучения и влажностью рассеивающей среды. При нейтронном гамма-каротаже происходит неупругое взаимодействие испускаемых нейтронным источником быстрых нейтронов и захват замедлившихся нейтронов ядрами элементов породы, что приводит к возникновению радиационного гамма-излучения.

Сейсмоакустические методы основаны на изучении путей и скоростей распространения упругих волн в толще горных пород и позволяют установить литологические разности пород массива, их состояние (трещиноватость, выветрелость), оценить их прочностные свойства. На основе данных сейсмоакустической разведки определяется возможность картирования карьерных полей по крепости и трещиноватости для оценки взрываемости и рыхлости массивов.

Звукометрические исследования с применением звуковых пьезометров (геофонов), способных улавливать звуки, генерируемые горными породами в процессе разрушения, позволяют установить нарастание или убывание начавшегося процесса разрушения бортового массива в скрытой фазе и выделить области, опасные в отношении деформации.

Применение электрических методов основано на наличии определенных зависимостей между параметрами электрических полей и электрическими свойствами пород, обусловленными их литологическим составом, влажностью, текстурно-структурными особенностями и другими характеристиками. В связи с тем, что удельное сопротивление пород зависит от плотности и влажности, дистанционно действующие электрические системы применяются также для наблюдения за напряженно-деформативным состоянием бортового массива. Методика оценки состояния бортового массива электрическими методами была разработана и опробована в натурных условиях институтом ВИОГЕМ.

Следует отметить, что геофизические методы исследований не заменяют инженерно-геологических и могут применяться только в комплексе с ними, что способствует более быстрому, глубокому и эффективному проведению инженерно-геологической съемки и разведки, а также контроля состояния пород в окрестностях горных выработок.

К группе полевых методов инженерно-геологических исследований следует отнести и метод обратных расчетов для уточнения характеристик прочности горных пород в массиве борта карьера или откоса отвала. Для этого составляется паспорт оползня на основании маркшейдерских съемок, где указываются первоначальные (до начала деформации) параметры откоса, положение и конфигурация оползневого клина, фиксируется поверхность

скольжения, описываются породы, слагающие откос. Показатели сопротивления сдвигу определяются из условия предельного равновесия оползневого клина до начала деформаций и на момент их завершения

$$\sum T_{i_1} = \operatorname{tg} \varphi \sum N_{i_1} + cl;$$

$$\sum T_{i_2} = \operatorname{tg} \varphi \sum N_{i_2},$$

где T_i — сдвигающие силы;

N_i — нормальная составляющая массы блока к поверхности скольжения;

c — сцепление;

$\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент трения;

l — длина поверхности скольжения.

Для обратных расчетов могут использоваться и искусственно вызванные оползни на опытных участках откосов.

ГЛАВА 7

МАССИВ ПОРОД КАК ОБЪЕКТ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

§ 1. Предварительные сведения

В инженерно-геологическом понимании массив пород — это структурно обособленная часть земной коры, отличающаяся от граничащих с ним частей по условиям возведения и эксплуатации сооружений.

Границы массивов пород обычно устанавливаются по комплексу признаков, в том числе геоморфологических, геологических и геодинамических. Они иногда фиксированы тектоническими швами или резкими изменениями строения и гипсометрии физической поверхности массива, являющейся его верхней границей.

Исследования массивов пород производятся до глубин, несколько превышающих глубины производства работ и размещения сооружений — с охватом всей зоны воздействия последних на массив пород. В отдельных случаях возникает необходимость специальных исследований, например, для оценки степени опасности прорыва высоконапорных вод или плывунов из подстилающих толщ пород или с задачей определения опасности обрушения сводов карстовых полостей, заключающихся в них.

Линии пересечения граничащих поверхностей массивов пород с физической поверхностью являются границами инженерно-геологических районов изучаемой территории, т. е. площадей, отличающихся друг от друга по условиям строительства и эксплуата-

ции сооружений. Установление границ инженерно-геологических районов, иными словами — инженерно-геологическое районирование территории, относится к числу важнейших задач инженерно-геологических исследований. Карты инженерно-геологического районирования используются при установлении границ геолого-промышленных районов бассейна, разработке генеральных планов застройки территории и т. д.

§ 2. Структура физической поверхности массивов пород

Понятием структура массива пород мы объединяем структуру физической поверхности и внутреннее строение массива. Ниже идет речь о структурных характеристиках физической поверхности массива.

Геологические исследования показывают, что в структуре физической поверхности находят отражение многие черты внутреннего строения и геодинамического состояния массива. Поэтому изучение физической поверхности является первым шагом в распознавании инженерно-геологических особенностей массива в целом.

Структура физической поверхности показывается на петрографических планах местности — гипсометрических и батиметрических (для подводных частей). В каждой точке такого плана с координатами x, y отвечает определенное значение функции поля высот $H = H(x, y)$. Основной дифференциальной характеристикой этого поля (топографической поверхности) является градиент высот, $\text{grad } \bar{H}$, равный i , взятому с обратным знаком, $\text{grad } \bar{H} = -i$.

Дополнительными характеристиками топографической поверхности являются густота и глубина расчленения физической поверхности. Густота расчленения оценивается величиной a , равной отношению суммарной протяженности эрозионно-гидрографической сети Σl и площади ее развития P , т. е. $a = \Sigma l / P$. Разность высоких отметок $h = H_{\max} - H_{\min}$ характеризует глубину расчленения физической поверхности в пределах интересующей нас территории.

Реальная физическая поверхность массивов пород далеко не всегда отвечает основным условиям топографической поверхности — непрерывности и плавности. Данные условия нарушаются резкими перепадами высоких отметок, отвесными и даже нависающими складками и косогорами, конусообразными врезами днищ речных долин и т. д. Дополнительные, притом важные в инженерно-геологическом отношении нарушения поверхности топографического порядка вносят карстовые, оползневые и некоторые новообразования, характеризующие экзогеодинамическое состояние территории. В рельефе физической поверхности некоторых массивов пород находят свое выражение также некоторые

неотектонические новообразования, известные как проявления «живой тектоники» района * (ступенчатые сбросы, горсты и грабены). К этому следует добавить, что дифференциация физической поверхности крупных областей по степени развития эрозионно-денудационных процессов и связанных с ними форм рельефа в одних их частях и аккумулятивных процессов и форм рельефа в других также тесно связана направленностью тектонических (чаще всего колебательных) движений земной коры.

Очевидно, топографические планы должны быть «оживлены» показом форм рельефа, характеризующих современные формы развития и геодинамическое состояние физической поверхности массива.

Знание особенностей строения физической поверхности имеет большое практическое значение. Эти особенности в значительной мере определяют общие возможности компоновки наземных технических сооружений, в частности размещение внешних отвалов, а также положение транспортных подступов к карьеру. При этом выявляются фиксированные пункты поверхности земли, определяющие направление транспортной траншеи и возможные варианты ввода ее в карьерное поле (Е. Ф. Шешко). Не менее существенно влияние структуры и геодинамического состояния физической поверхности массивов на решение задач, возникающих при определении способа и места вскрытия месторождения при подземных разработках.

§ 3. Внутреннее строение массива пород

Бедущей стороной инженерно-геологических свойств массивов пород несомненно является их строение. Оно оказывает непосредственное влияние на решение многих горнотехнологических задач и вместе с тем является важнейшим фактором формирования свойств горных пород в массиве и самого массива.

Массив горных пород — сложно структурированная и, как правило, физически неоднородная среда. Общий структурный их узор создают объемные структурные элементы и поверхности их раздела [40]. Те и другие могут быть подразделены на группы петрогенетических, петротектонических, тектонических и нетектонических (табл. 29).

В первую группу входят горные породы всех петрофизических классов, являющиеся основными конструктивными элементами горных выработок и вместе с тем всех тесных совокупностей пород, составляющих массив пород в целом.

Горным породам присуща внутренняя «делимость», т. е. способность расчленяться на некоторые части при минимальных

* «Живой тектоникой» принято называть неотектонические (неоген-антропогенного времени) движения земной коры. Их результаты обычно отчетливо выражены в структуре физической поверхности массивов пород.

Классификация структурных элементов массивов пород

Группы	Представители	Элементы внутреннего расчленения	Признаки выделения группы
Петрогенетические	Горные породы всех петрофизических классов	Текстуры и их швы; петрогенетические отделимости и трещины	Непосредственно связаны с процессами и условиями породообразования
Петротектонические	Фацialsные комплексы — совокупности пород, тесно связанные между собой пространственно и по условиям образования Геологические формации — фацialsные комплексы, соответствующие по времени образования крупным этапам тектонического развития отдельных сегментов или поясов земной коры Структурные этапы геологического разреза земной коры	Горные породы комплекса; поверхности раздела между породами Фацialsные комплексы; тесная совокупность пород в составе комплексов; поверхности раздела между ними Структурные этажи платформенных областей; то же, складчатых (подвижных) зон коры	Обнаруживают глубокую связь с тектонической историей и геотектонической позицией района их развития
Тектонические	Пликативные структурные элементы Дизъюнктивные структурные элементы Сочетания пликативных и дизъюнктивных структур	Моноклинали; простые складки, мульды и кушода; складчатые системы Тектонические блоки и швы; региональные разломы и пояса; соскладчатые и приразрывные трещины Складчато-надвиговые системы; чешуйчатоскладчатые системы; те же, но нарушенные сбросами	Вызваны соответственно тектоническими (дислокационными) движениями земной коры
Нетектонические	Экзогенно-гравитационные структурные новообразования	Складки диапировые и выдавливания; гляциодислокации; карстовые (кровельные) нарушения; оползневые дислокации; мерзлотно-динамические дислокации	Вызваны нарушением условий гравитационной устойчивости породных масс экзогеодинамическими процессами

энергетических затратах. К элементам внутреннего расчленения горных пород относятся текстурные обособления и так называемые элементарные структурные блоки, образованные системами петрогенетических трещин*. К поверхностям раздела горных пород относятся швы между текстурами (обособленными внутренними слоями, линзами, элементами сланцеватости и т. д.), а также трещины между структурными блоками.

Вторая группа объединяет тесные совокупности горных пород, среди которых наибольшее значение имеют фациальные ряды горных пород, формационные комплексы их и структурные этажи геологического разреза земной коры, а также граничащие их поверхности. Геолого-петрографические особенности и инженерно-геологические характеристики названных совокупностей горных пород обнаруживают глубокую связь с тектоническими движениями земной коры и условиями породообразования, в основном контролируемые этими движениями. По своей сути они фиксируют основные этапы формирования геологического разреза массива пород. Этим продиктовано наименование данной группы структурных элементов последних как петротектонических.

К третьей группе мы относим структурные элементы собственно тектонической природы, а именно: пликативные, дизъюнктивные и пликативно-дизъюнктивные образования. Среди них особое значение имеют тектонические блоки и тектонические швы, региональные разломы и сопровождающие их зоны дробления (катаклаза) и милонитизации пород, а также различные типы пликативных нарушений и систем складчатостей и складчато-разрывных нарушений.

Наконец, четвертая группа объединяет экзогенно-гравитационные структурные новообразования. Они возникают в условиях нарушений гравитационной устойчивости породных масс в результате экзогеодинамических воздействий на них. В данную группу мы включаем: складки протыкания («диапиры») и выдавливания, возникающие в условиях неравномерной по площади эрозионной разгрузки толщ пластичных пород (например, галогенидов или глин) от массы вышележащих более жестких пород; гляциодислокации, вызванные давлением движущихся масс ледников; дислокации, возникающие при обрушении сводов карстовых пустот и оползневых деформациях и, наконец, мерзлотно-динамические дислокации (мерзлотные бугры, термокарстовые и некоторые другие нарушения).

Очевидно, что методы изучения и анализа структурных образований массивов пород перечисленных групп будут разными.

* К петрогенетическим относятся трещины, возникшие в процессе породообразования. Таковы, например, литогенетические трещины осадочных пород, образовавшиеся при литификации ликвальных масс осадков или контракционных магматических пород, развивающиеся в процессе остывания магмы.

Методы инженерной петрографии являются основными при изучении и инженерно-геологической оценке горных пород. При исследовании объемных структурных элементов и поверхностей раздела петротектонической группы первостепенное значение приобретают методы фациально-генетического и формационного анализа, палеогеографических реконструкций условий породообразования с широким использованием всего арсенала инженерно-петрографических исследований. С помощью перечисленных методов представляется возможным, например, устанавливать контуры распространения кровель и почв угольных пластов разной степени устойчивости, границы комплекса пород по горнотехнологическим характеристикам, выделяемых в так называемые горно-геологические ярусы и т. д. Структурные элементы третьей группы являются в конечном счете результатом геомеханических процессов, в основе которых лежат регионально-тектонические неуравновешенные напряжения в земной коре и вызываемые ими деформации горных пород. Поэтому при их изучении правомерно использование методов регионально-структурного анализа напряженно-деформационного состояния земной коры и методов геомеханики.

Наконец, при изучении структурных образований экзогенно-гравитационной природы в основном пользуются методами исследования экзогенно-геодинамических явлений и разработанными главным образом в практике инженерно-геологических исследований.

Геолого-структурный анализ в охарактеризованном объеме является базой для квалифицированного решения основных задач инженерной геологии массивов пород и фундаментальных вопросов проектирования горного предприятия (выбора способа вскрытия и системы разработки, выемочного оборудования, способа управления горным давлением и т. д., а также для обоснования горнотехнологических параметров — допускаемых размеров полей-панелей, порядка отработки месторождения и др.).

Геолого-структурный анализ приобретает самостоятельное значение при выявлении некоторых закономерностей пространственных изменений состояния и свойств пород, условий локализации различных горно-геологических явлений и предупреждения их опасных последствий.

§ 4. Горно-геологические ярусы массивов пород

При определении конкретных инженерно-геологических условий производства горно-строительных и горно-эксплуатационных работ на отдельных месторождениях возникает необходимость выделять так называемые горно-геологические ярусы геологического разреза массива. Ими являются комплексы пород, отличающиеся друг от друга по ряду горнотехнических характеристик и влияющих, например, на выбор горно-

проходческого оборудования, способ обеспечения устойчивости пород в обнажениях горных выработок и условий безопасности ведения работ и т. д.

При этом основанием для выделения горно-геологических ярусов могут служить также детали внутреннего строения массива, как, например, наличие в однородной толще несцементированных пород твердых включений или же прослоев и линз высокопрочных пород, т. е. когда исключается возможность использования при производстве вскрышных работ высокопроизводительной

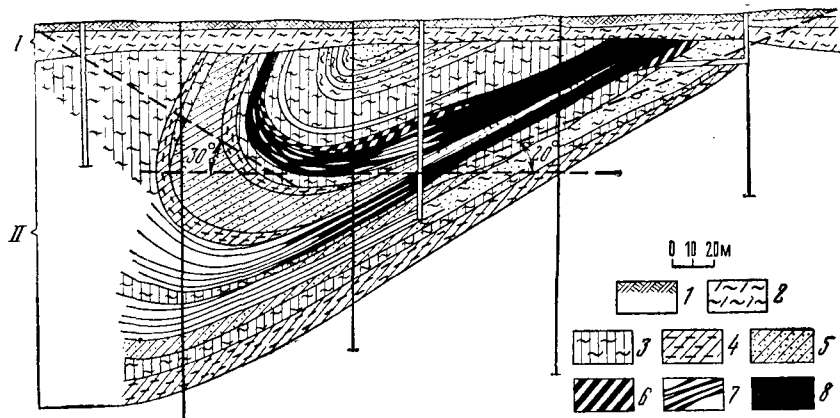


Рис. 45. Схема геологического строения бурогольных месторождений Челябинского бассейна:

I — покровный горно-геологический ярус (1 — глины; 2 — опоковидные глины); II — основной горно-геологический ярус (3 — аргиллит; 4 — алевролит; 5 — песчаник; 6 — углистые сланцы; 7 — уголь, переслоенный аргиллитами; 8 — уголь)

техники непрерывного действия. В ряде случаев основанием для выделения горно-геологических ярусов служат условия устойчивости высокопрочных пород в обнажениях горных выработок, определяемых наличием в их толще резкоослабленных пород или поверхностей ослабления и т. д.

Горно-геологическая ярусность массивов пород чаще всего вызывается качественными изменениями условий породообразования и последующих изменений состояния и свойств пород. Так, рэт-лейасовый угленосный комплекс бурогольных месторождений Урала формировался в обстановке межгорных впадин и мульд. В ходе тектонического погружения происходило формирование очень своеобразной по условиям залегания толщи пород состава от гравелитов до алевроитов и углей. Вышележащий (надугленосный) комплекс образовался в обстановке в значительной мере денудированных пространств и более спокойных движений земной коры главным образом колебательного характера (рис. 45).

Смена режимов и условий породообразования фиксируется в геологическом разрезе стратиграфическим или тектоническим

несогласием. Поэтому границы горно-геологических ярусов выражены четко со сменой режимов и условий породообразования. Обусловлены и те особенности состава и строения самих горно-геологических ярусов, примеры которых были приведены выше.

По признаку горно-геологической ярусности различаются массивы пород одно-, двух-, трех- и многоярусные (рис. 46). Горно-геологический ярус, заключающий полезное ископаемое, называется основным; вышележащие толщи составляют покровные и нижележащие — подстилающие горно-геологические ярусы.

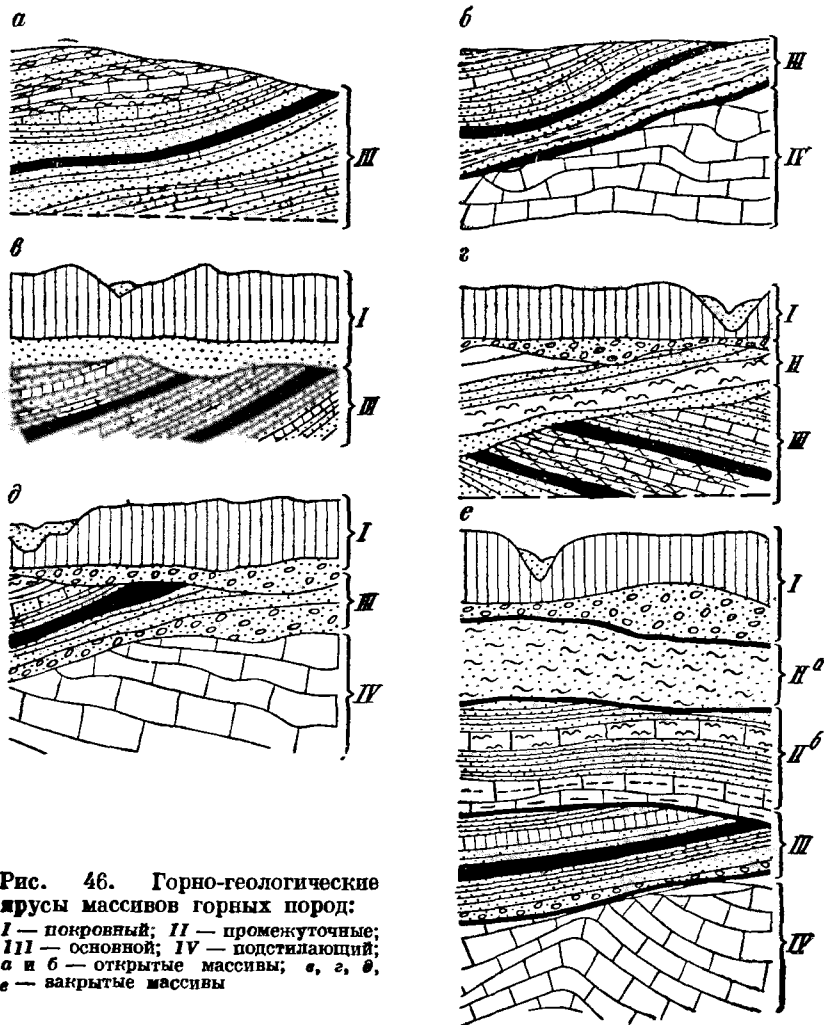


Рис. 46. Горно-геологические ярусы массивов горных пород:

I — покровный; II — промежуточные;
III — основной; IV — подстилающий;
а и б — открытые массивы; в, г, д,
е — закрытые массивы

В заключение следует заметить, что комплексам пород, составляющим горно-геологические ярусы, присущи некоторые «коллективные» свойства, параметры которых и используются при расчетах горнотехнологических задач. Среди этих свойств особое значение имеют механические свойства, последние зависят от многих деталей внутреннего строения горно-геологического яруса. Поэтому механические свойства комплексов пород правильнее называть структурно-механическими, т. е. имеющими отношение к данной совокупности пород с присущими ей особенностями внутреннего строения.

§ 5. Детали внутреннего строения горно-геологических ярусов

Петрографический и фациальный состав пород

По петрографическому составу выделяются горно-геологические ярусы двух основных типов: 1) в строении которых принимают участие горные породы только одного из трех петрофизических классов — твердые, глинистые или раздельнозернистые; 2) сложенные из пород разного петрофизического класса.

Первые целесообразно называть монопетрофизическими, вторые полипетрофизическими горно-геологическими ярусами. В составе первых различаются подтипы горно-геологических ярусов твердых, пластичных и раздельнозернистых пород. Вторая группа объединяет пять основных подтипов горно-геологических ярусов (табл. 30).

Т а б л и ц а 30

Классификация горно-геологических ярусов по петрофизическому составу

Петрофизические группы	Петрофизические подтипы
Монопетрофизические	1. Твердых горных пород 2. Пластичных (связных) пород различной степени литификации 3. Сыпучих (раздельнообломочных) пород
Полипетрофизические	1. Несцементированных пластичных и раздельнообломочных пород 2. То же, по включающих линзы, прослои твердых пород и твердые включения (обломки, стяжения) 3. Твердых пород, переслаивающихся с несцементированными породами 4. Твердых и полутвердых пород, интеецированных магматическими массами 5. Переслои пирокластических пород с нормальными осадочными породами или покровами эффузивов

По фациальному составу горно-геологические ярусы могут быть монофациальными и полифациальными, т. е. сложенными породами одного фациального комплекса пород или же двух и более фациальных комплексов.

Фациальные условия образования пород сказываются на их горно-геологических свойствах. Исследованиями А. П. Максимова и О. С. Алферова установлено, что песчаники русловых отложений угленосной толщи Донбасса склонны к внезапным вы-

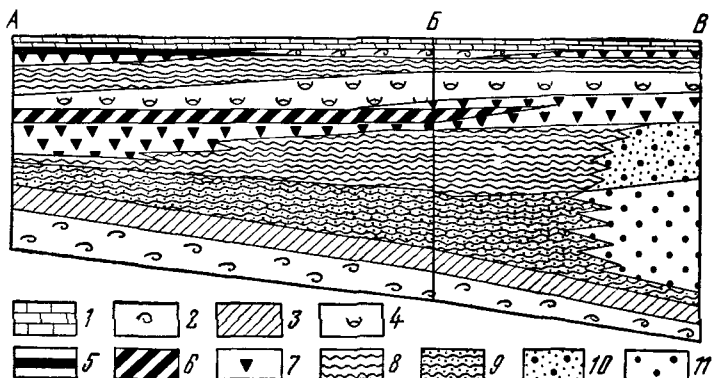


Рис. 47. Детальный фациальный профиль между тремя скважинами А, Б, В (Донбасс, Зверевский район).

Фации: 1 — морских карбонатных осадков, 2 — морских глинистых осадков с обедненной фауной, 3 — алевритовых осадков зоны волнений прибрежной части моря, 4 — глинистых осадков лагун и заливов с солоноватоводной фауной, 5 — торфяных болот, 6 — заливающих частей торфяных болот, 7 — застойных водоемов и болот (почвы и угольных пластов), 8 — алевритовых осадков зоны волновой ряби лагуно-заливного побережья, 9 — песчаных осадков зоны волновой ряби лагуно-заливного побережья, 10 — песчаных осадков прибрежных баров, кос, пересыпей, 11 — речных выносов (подводная часть дельты)

бросам. Песчаники других фациальных условий образования, как правило, невзрывоопасны.

Результаты фациального анализа представляются разрезами типа, показанного на рис. 47, и фациально-литологическими картами, например, пород кровли и почвы угольного пласта.

Пространственные взаимоотношения пород в составе фациально-литологических комплексов могут быть самыми разнообразными. В одних случаях они представлены серией выдержанных по составу и мощности напластований, в других наблюдается частое выклинивание и расщепление пластов, резкая изменчивость их состава и строения и т. д. В осадках параллического типа (прибрежно-морских равнин) наблюдается ритмичная сменяемость пород в вертикальном разрезе. В таком случае говорят о многослойном строении толщ — двух-, трех-, четырех-, пятичленным и более высоких порядков. По исследованиям Н. В. Логвиненко, многослой (циклы) основного горно-геологического яруса Донбасса чаще всего семичленные. Известны многослой более

сложного строения, например пятнадцатичленные, а также неполные многослои. В угленосных многослоях Донбасса чаще всего выпадают пласты известняков и угля.

Многослой обычно повторяются в геологическом разрезе несколько раз, иногда несколько сотен раз, тогда можно говорить о полициклическом строении горно-геологического яруса.

Значительное осложнение в строении горно-геологических ярусов вносят магматические внедрения. Залегая в виде секущих (жил, даек, истоков) или согласных интрузивных тел (силл, факколитов и др.) и обладая, как правило, более высокой прочностью по сравнению с вмещающими породами, они как бы армируют геологический разрез осадочного комплекса и таким образом вызывают его упрочнение. Армирующий эффект усиливается развитием ореолов контактово-метаморфических изменений вмещающих пород. Но вместе с этим отмечается значительное повышение общей физической неоднородности массива пород, что особенно характерно для ряда угольных месторождений Дальнего Востока и Сахалина.

При высокой степени насыщенности магматическими массами явления плутоно-метаморфизма вмещающих их пород приобретают всеобщий характер, когда отмечается некоторое выравнивание физических свойств массива пород.

Эффузивные покровы и потоки, чередующиеся с нормальными осадочными и пирокластическими породами, входящие в состав породных массивов, обычно составляют самостоятельный горно-геологический ярус с характерной для него повышенной «делимостью» пород по интенсивно развитой контракционной трещиноватости. Особое положение в этом отношении занимают нейки и диатремы (трубки вулканического взрыва), как известно, такие образования относятся к группе эффузивных.

Тектонические условия залегания пород в горно-геологических ярусах

Явления ритмичности в структуре осадочных напластований, сменяемость фациальных комплексов и характеристики их внутреннего строения тесно связаны с тектоническими движениями земной коры. Однако наиболее существенные изменения структуры горно-геологических ярусов, как и массивов пород в целом, вызываются дислокационными движениями земной коры. Последние создают новые тектонические формы и условия залегания пород, отражающиеся на всех горно-геологических условиях производства горно-строительных и горно-эксплуатационных работ.

По степени и характеру тектонических преобразований первоначальной структуры выделяются следующие структурно-тектонические группы горно-геологических ярусов (рис. 48): 1) тектонически ненарушенные (рис. 48, а); 2) с моноклинальным залеганием

пород (рис. 48, б); 3) простого складчатого строения (рис. 48, в); 4) сложного складчатого строения (рис. 48, г); 5) сложного складчато-разрывного строения интродуцированного магматическими массами (рис. 48, д); 6) сложного складчато-разрывного строения с интенсивной «вторичной» складчатостью и плейчатостью пород (рис. 48, е).

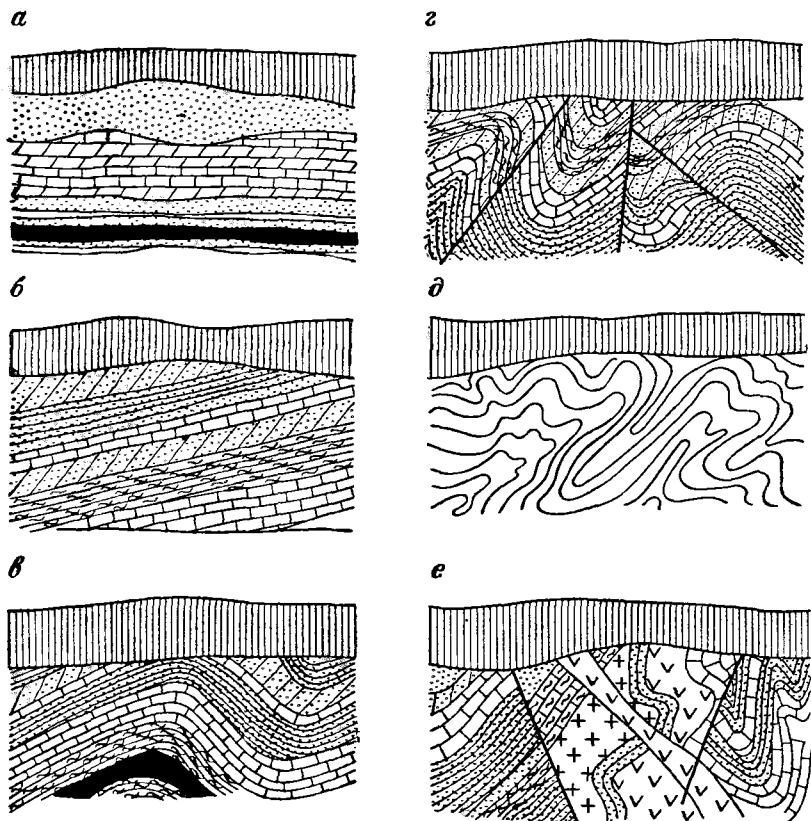


Рис. 48. Основные типы тектонического строения горно-геологических ярусов массивов горных пород

Своеобразным явлением в структуре некоторых горно-геологических ярусов представляются диапировые складки. Как уже отмечалось, они относятся к группе экзогенно-гравитационных структурных новообразований и по морфологическим характеристикам занимают как бы промежуточное положение между собственно тектоническими и нетектоническими структурными образованиями.

Перечень структурных образований данной группы приведен в табл. 29. Среди них заслуживают особого внимания карстовые образования и оползневые дислокации.

Примером карстовых нарушений структуры основного горно-геологического яруса являются резкие изменения гипсометрии угольного пласта, вызванные обрушением сводов карстовых полостей известнякового фундамента угленосной толщи Мосбасса. На отдельных участках нарушения сопровождались провалами угольных пластов и появлением карстовых воронок на поверхности.

Древние оползни обычно являются очагами крупных оползневых деформаций бортов карьера. В Магнитогорском железорудном карьере крупный оползень 1946 г. возник на месте древнего оползневого потока на склоне горы Атаг. Он захватил восемь уступов борта карьера и распространился по фронту работ на 200 м.

Определенные затруднения могут вызвать древние размыты (погребенные русла рек, оврагов, балок). При их вскрытии создаются трудные условия поддержания обнажений горных выработок. При открытых работах к ним приравниваются оползневые деформации бортов карьера. Понижение устойчивости в данных условиях нередко обусловлено ослаблением пород глинистого ложа древнеаллювиальных и делювиальных отложений в результате суффозионного выщелачивания солей из них, игравших роль цементирующего вещества. При проходке тоннелей под ними отмечается неожиданно высокое горное давление на крепь тоннеля.

Гляциодислокации известны в ряде буроугольных карьеров ГДР, а мерзлотно-динамические дислокации пользуются широким распространением в районах развития мощной суровой многолетней («вечной») мерзлоты.

В плане структурного анализа массивов пород и горно-геологических ярусов заслуживают особого внимания древние коры выветривания, примером которых может служить кора выветривания весьма сложного внутреннего строения протерозойских пород железорудного бассейна КМА. Богатые железные руды генетически связаны с древней корой выветривания кварцитов данного бассейна.

В заключение следует подчеркнуть емкость и многогранность понятия структура горно-геологического яруса и массивов пород. Изучение ее составляет наиболее трудную и важную в практическом и научном отношениях задачу в общем комплексе проблем инженерно-геологических исследований месторождений полезных ископаемых.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПЫ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. Основная характеристика массивов горных пород

Условия производства горных работ и подземного строительства отличаются исключительным разнообразием, обусловленным в основном различиями в инженерно-геологической структуре и гидрогеологических условиях массивов горных пород.

Гидрогеологические условия могут быть существенно изменены средствами, вполне доступными в современной инженерной практике, например, в процессе водопонижения или осушения месторождения.

В противоположность им инженерно-геологическая структура массива горных пород не поддается существенным изменениям. Кроме того, условия распространения и циркуляции, питания и дренажа подземных вод всецело зависят от инженерно-геологической структуры массива.

Поэтому инженерно-геологическую структуру следует считать основной, определяющей и наиболее устойчивой характеристикой массивов горных пород. По этой же причине типы массивов горных пород в практике горного дела должны выделяться по инженерно-геологическим структурам. Что же касается гидрогеологических условий, то они могут учитываться, например, при разработке специальных гидрогеологических классификаций и при общей инженерно-геологической оценке массивов горных пород.

§ 2. Границы массивов пород

Границы между массивами горных пород проходят через пункты, в пределах которых происходят существенные изменения в геологической структуре земной коры. Эти границы имеют характер весьма сложной поверхности или зоны, уходящей на неопределенно большую глубину. Верхней граничащей поверхностью массивов горных пород является земная поверхность. Положение нижней граничащей поверхности менее определено. Практически оно совпадает с нижней границей той зоны глубин, в пределах которой сосредоточены инженерные работы или распространяется влияние последних. При горных работах нижняя граница массива пород уходит на глубину, нередко измеряемую многими сотнями и даже первыми тысячами метров.

Массивы горных пород изучаются с целью определения условий производства инженерных (например, туннельных, горных и некоторых других) работ и эксплуатации сооружений. Разработка наиболее рациональных проектов производства работ и возведения даже наземных сооружений была бы невозможна без

всестороннего знания инженерно-геологической структуры массивов горных пород. Особо сложной и ответственной задачей инженерно-геологических исследований массивов горных пород следует считать прогноз изменений инженерно-геологической обстановки, происходящих в результате воздействия на них строительных и других работ, оценку степени опасности или же благоприятного влияния этих изменений на условия производства работ и эксплуатации сооружений.

§ 3. Инженерно-геологическая типизация массивов горных пород

Наиболее существенные изменения в инженерно-геологической структуре массивов пород происходят на границах тектонически обособленных частей земной коры.

Данный факт является простым следствием того, что все наиболее существенные различия в геологическом разрезе, условиях залегания пород и других структурно-геологических характеристиках массивов обуславливаются различиями в тектонической истории районов. Поэтому систематика массивов горных пород должна быть построена на геолого-структурных, точнее геотектонических признаках.

Основным геоструктурным элементам земной коры — платформам и горно-складчатым областям — соответствуют два типа массивов горных пород: платформенные массивы и массивы горно-складчатых сооружений.

Для платформенных массивов характерно наличие двух крупных структурных этажей, каждый из которых, в свою очередь, имеет довольно сложное, обычно многоярусное строение.

Нижний структурный этаж, иначе складчатый фундамент платформенных массивов, сложен из первичноосадочных и магматических горных пород, всегда интенсивно дислоцированных и метаморфизованных или полностью превращенных в глубоко метаморфизованные толщи.

Верхний структурный ярус, иначе платформенный чехол, складывается почти исключительно нормальными осадочными породами, залегающими без существенных тектонических нарушений или же с нарушениями платформенного типа (пологие, почти плоские прогибы и поднятия и сопутствующие им более мелкие дислокации). Магматические породы либо вовсе не развиты, либо не играют существенной роли. Они представлены особыми типами пород, среди которых можно отметить щелочные интрузии и базальтовые излияния типа сибирских траппов.

Строение горно-складчатых массивов исключительно разнообразно и сложно. Здесь также можно выделить структурные этажи. Из них самый нижний сложен преимущественно вулканогенно-осадочными образованиями, возникшими в начальных стадиях развития горно-складчатого сооружения. В средних этажах

преобладают карбонатные, сланцеватые и граувакковые толщи, нередко прорванные крупными массивами гранодиоритов. В верхнем структурном этаже получают развитие мощные, циклично построенные толщи типа флиша, молассы, паралические (т. е. образовавшиеся в прибрежно-морских условиях) угленосные и некоторые другие накопления.

Кроме вертикальной зональности (этажности) в строении горно-складчатых массивов наблюдается региональная зональность: в их пределах отчетливо выделяются линейно вытянутые на многие десятки и даже сотни и первые тысячи километров зоны или пояса с весьма своеобразным внутренним строением каждой из них. Главнейшие из них: срединные массивы, внутренние синклинории и мульды, интрузивные массивы, межгорные впадины, краевые прогибы. Последние (краевые прогибы) являются переходными от структурных зон горно-складчатых сооружений к структурам платформенных областей.

Как платформенные, так и горно-складчатые массивы могут быть разновозрастными. С этим связаны некоторые весьма существенные различия в их инженерно-геологических характеристиках. Поэтому по возрастному признаку представляется необходимым различать подтипы массивов горных пород.

Возраст платформенных массивов определяется по возрасту их фундамента. Если последний формировался в докембрии, массив горных пород относится к древним. Таковы массивы Русской, Сибирской, Северо-Американской, Южно-Американской, Африканской и некоторых других платформ.

Платформенные массивы Урало-Тяньшаньской складчатой зоны, перекрытые на больших пространствах слабодислоцированными мезо-кайнозойскими отложениями, являются примером относительно молодых платформ. Их складчатое основание герцинского возраста. Таковы, например, массивы горных пород, заключающие Соколово-Сарбайскую группу железорудных месторождений.

Возраст горно-складчатых массивов может быть нижнепалеозойским (каледонским), верхнепалеозойским (герцинским) или мезо-кайнозойским (альпийским). Их массивы составляют самостоятельные возрастные подгруппы.

Более дробные подразделения в систематике массивов горных пород будут соответствовать внутренним структурно- и территориально обособленным частям платформенных областей и горно-складчатых сооружений. В пределах платформ таковыми являются крупные положительные структуры типа антеклиз, валов и щитов, а также крупные отрицательные структуры типа синеклиз и прогибов. Они отличаются друг от друга глубиной залегания складчатого фундамента и строением верхнего структурного этажа — платформенного чехла. В пределах щитов платформенный чехол отсутствует, и породы фундамента здесь выходят на поверхность. В синеклизах и прогибах мощность платформен-

ного чехла велика (сотни и даже первые тысячи метров) и отличается многоярусным строением. Антеклизы и валы в этом отношении занимают промежуточное положение. В их геологическом разрезе часто отсутствуют целые толщи пород, распространенные в соседних синеклизах и прогибах, или же их мощность резко сокращается.

Описанным структурным частям платформенных областей соответствуют три основные группы массивов пород платформенного типа: массивы областей щитов, антеклиз и валов и, наконец, синеклиз и прогибов.

Структурные подразделения в горно-складчатых областях представлены в виде регионально вытянутых поясов (зон), перечисленных выше. Им соответствуют основные группы горно-складчатых массивов. Таковы срединные массивы, массивы внутренних синклиналий и мульд, интрузивные массивы, массивы межгорных впадин и краевых прогибов.

В группе массивов областей щитов различаются подгруппы массивов отдельных складчатых зон. Так, в пределах Балтийского щита можно различать группы массивов Кольской, Карельской, Финляндской и некоторых других складчатых зон.

Наиболее существенные различия в инженерно-геологических характеристиках массивов горных пород областей синеклиз и прогибов, равно как и антеклиз и валов, связаны с положением их на этих структурах.

Основные различия во внутигрупповых инженерно-геологических характеристиках массивов пород горно-складчатых областей

Т а б л и ц а 31

Инженерно-геологическая типизация массивов горных пород

Типы и подтипы	Группы	Подгруппы
А. Платформенные а) древние б) молодые	А₁. Областей щитов А₂. Антеклиз и валов А₃. Синеклиз и мульд	Различаются по положению в той или иной складчатой зоне щита Различаются по положению в той или иной части данной структурной области платформы
Б. Горно-складчатые а) каледонские б) герцинские в) альпийские	Б₁ — срединных массивов Б₂ — внутренних синклиналий и мульд Б₃ — интрузивных массивов Б₄ — межгорных впадин Б₅ — краевых прогибов	1. Тектонически активных высокогорных областей 2. Тектонически слабо активных низкогорных областей 3. Тектонически пассивных депрессивных областей

обусловлены главным образом неодинаковой активностью новейших тектонических движений и различной расчлененностью рельефа. По этим признакам выделяются подгруппы массивов: 1) тектонически активных высокогорных областей; 2) тектонически слабо активных низкогорных областей и 3) тектонически пассивных и частично пенеппенизированных (выровненных) областей горно-складчатых сооружений. С интенсивностью и масштабами современных тектонических движений, как известно, связаны сейсмичность, глубина и густота эрозионного расчленения массивов горных пород, интенсивность развития обвалов, оползней, лавин и многих других современных геологических явлений.

Таковы основания инженерно-геологической типизации массивов горных пород, схема которой представлена в табл. 31.

Более дробные подразделения массивов горных пород носят местный (региональный) характер, связанный с особенностями геологической истории и строения данной области или бассейна. Поэтому они не могут войти в общую классификацию массивов горных пород.

ГЛАВА 9

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

§ 1. Массивы пород и месторождения полезных ископаемых

Полезные ископаемые залегают в массивах горных пород, где они образуют естественные скопления, называемые *месторождениями*. Месторождения подразделяются на рудные (руды металлов и самородные элементы), горючих ископаемых (угли, торф, нефть, горючие газы) и нерудные (строительные материалы, химическое сырье, технические и драгоценные камни и пр.).

Чтобы обеспечить рациональную разработку месторождений полезных ископаемых, производится их изучение, в ходе которого выясняются геологические условия и формы залегания полезного ископаемого, качество и количество его, свойства вмещающих и покрывающих пород, обводненность месторождения и т. д. Таким образом, эти исследования являются *комплексными*, включающими геологическое, гидрогеологическое и инженерно-геологическое изучение месторождения и специальные исследования самого полезного ископаемого, необходимые для решения вопроса о его обогащении, комплексном использовании и т. д.

Геологические условия месторождения полезного ископаемого в основном определяются особенностями состава, строения и со-

стояния горных пород основного горно-геологического яруса массива и глубиной его залегания. По этим признакам различаются основные классы и подклассы месторождений полезных ископаемых. С генезисом месторождения органически связаны такие важные горно-геологические характеристики, как форма залегания и распределения полезного ископаемого в основном горно-геологическом ярусе, его сортность, качество и т. д. Так, для месторождений ископаемых углей паралического типа (т. е. прибрежно-морского происхождения) характерны выдержанные, но маломощные пласты, многократно повторяющиеся в геологическом разрезе основного горно-геологического яруса и являющиеся постоянными членами «многослоев» последнего.

Месторождения лимнического типа (озерно-болотного происхождения) отличаются невыдержанной, часто очень большой (до 100 м и более) мощностью угольных пластов, выклиниванием их на коротких расстояниях и очень сложным и фацциально невыдержанным строением вмещающей толщи.

Для рудных месторождений характерно значительно большее разнообразие форм залегания полезного ископаемого, чем для угольных месторождений, что связано с исключительным разнообразием геологических условий их образования. По генетическому признаку среди них различаются месторождения магматические (сегрегационные, ликвационные и др.), пегматитовые и жильные гидротермальные, метасоматические, контактово-метаморфические (скарны и др.), метаморфические первичноосадочные, осадочные, коры выветривания («остаточные»), россыпные, инфильтрационные * и др.

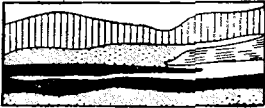
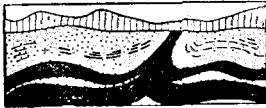
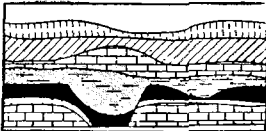
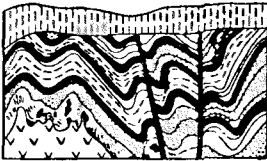
§ 2. Инженерно-геологические особенности угольных месторождений

Месторождения ископаемых углей являются типичными осадочными образованиями. По тектоническим условиям различаются угольные месторождения платформенного типа, горно-складчатых сооружений и переходного типа (табл. 32).

Угольные месторождения платформенного типа. Угленосная толща (основной горно-геологический ярус угленосного массива) сложена большей частью из несцементированных пород с преобладанием песков над глинами. Почти полностью отсутствуют грубообломочные породы. Угольные пласты простого строения, реже расщеплены породными прослойками. Угленосность непостоянна и чаще всего приурочена к пониженным участкам «фундамента» угленосной толщи. Гипсометрия угольного пласта в существенной мере повторяет неровности поверхности этого «фундамента».

* К инфильтрационным мы относим месторождения, образовавшиеся путем отложения рудных минералов из подземных вод инфильтрационного питания.

Классификация угольных месторождений по техническим условиям

Типы	Классы	Примеры месторождений	Принципиальная схема строения
I. Платформенные	а. Простого строения без вторичных нарушений	Райчихинское	
	б. Простого строения, но со вторичными, в частности, диапировыми нарушениями	Днепровский и Башкирский бурогольные бассейны	
	в. Сложного строения с древними размывами и карстовыми нарушениями угольной залежи	Подмосковный бассейн	
II. Горно-складчатого типа	а. Внутриплатформенных краевых прогибов	Центральная часть Донбасса	
	б. Областей краевых прогибов и синклинориев	Кизеловский бассейн	

Типы	Классы	Примеры месторождений	Принципиальная схема строения
II. Горно-складчатого типа	в. С интенсивным проявлением магматизма	Острова Сахалина	
	а. Бассейнов промежуточного типа	Минусинский бассейн	
III. Промежуточного типа	б. Переходных зон или областей некоторых бассейнов	Северных окраин Донбасса, центральных частей Кузбасса и Тунгусского бассейна	
	в. Межгорных депрессий	Северо-Уральские бурого угольные месторождения и месторождения Челябинского бассейна	

Угли относятся к низшим стадиям метаморфизации — землистые и плотные бурые угли. Вмещающие породы сыпучие, плавучие (в случае обводнения) или пластичные. Разделение платформенных месторождений на классы приведено в табл. 32.

Угольные месторождения горно-складчатых районов крайне разнообразны по инженерно-геологическим характеристикам. Общими для них чертами являются тектоническая нарушенность

(дислоцированность) и значительная мощность угленосной толщи, высокая степень метаморфизации (каменный уголь, антрациты) и окаменения угля и вмещающих пород, значительное число маломощных, но обычно хорошо выдержанных угольных пластов.

Эти месторождения разделяются на следующие основные классы:

а) месторождения внутриплатформенных краевых прогибов (например, большинство месторождений Донбасса). Сложены многокилометровой угленосной толщей, заключающей большое число маломощных, но выдержанных на больших пространствах угольных пластов, образовавшихся в прибрежно-морских условиях. Угольные пласты разделены слоями глинистых сланцев и песчаников, а иногда прослоями или пропластками известняков; распределены в толще более или менее равномерно и обладают выдержанным строением. Выдержан также характер боковых пород.

Тектоническая структура бассейна представляет сложную систему складок выдержанного простирания, нарушенных разрывными смещениями, а местами внедрениями магматических пород.

Явления регионального метаморфизма обусловили высокую степень углефикации и окаменения (литификации) углей и вмещающих пород. При наличии явлений контактного метаморфизма наблюдается местная частичная графитизация углей;

б) угольные месторождения областей краевых прогибов и синклинориев (например, Кизеловский бассейн) сложены угленосной толщей, собранной в асимметричные складки. Наряду с крупными наблюдаются мелкие складки, существенно затрудняющие выемку угля. Значительное осложнение вызывают разрывные нарушения взбросо-надвигового характера, а также карстовые явления в подстилающих угленосную толщу известняках. Характерна изменчивость состава и строения как вмещающей толщи, так и пластов угля, связанная с неустойчивыми условиями накопления угленосной толщи в болотно-русовой обстановке. Вмещающие породы — алевролиты, аргиллиты, песчаники, глины;

в) месторождения в районах интенсивного развития магматизма характеризуются тем, что наряду с осадочными породами в угленосной толще широким развитием пользуются магматические породы (андезиты, базальты, кварцевые порфиры и т. д.). Примером являются месторождения о-ва Сахалин. Вся угленосная толща здесь собрана в складки обычно асимметричного строения и нарушена множеством разрывных нарушений. Угленосная свита содержит свыше 30 пластов угля небольшой мощности сложного строения и выдержанных по простиранию на 6—8 км. Явления магматизма сильно осложняют распространение углей различных марок и определяют непостоянство физико-механических характеристик вмещающих пород и породных прослоев. Вследствие явлений магматизма некоторые месторождения вообще не пригодны для эксплуатации.

Угольные месторождения промежуточного типа отличаются значительной мощностью угленосных отложений, составляющей многие сотни метров, большим числом угольных пластов, обладающих известной выдержанностью, дислоцированностью (хотя и неинтенсивной) и, наконец, значительной уплотненностью или сцементированностью углевмещающих пород. Все это связывает их с месторождениями горно-складчатого типа. Однако слабое проявление регионального метаморфизма углей (угли главным образом гумусовые), более частая смена пород и меньшее постоянство угольных пластов сближают их с месторождениями платформенного типа. Примером месторождений данного типа может служить Минусинский бассейн. В структурном отношении данный бассейн представляет собой огромную межгорную котловину, выполненную мощной (до 2165 м) толщей угленосных отложений и со всех сторон окруженную горными хребтами — Кузнецким Алатау и Саянами. Угленосные осадки бассейна собраны в брахискладки обычно асимметричного строения, местами усложненные более мелкой складчатостью и небольшими разрывами сплошности. Промышленная угленосность сохранилась в брахисинклиналях, основными из которых являются Приенисейско-Абаканская, Абаканская и Алтайская мульды.

К промежуточному типу относятся также части других бассейнов, представленных в основном месторождениями платформенными или горно-складчатого типа. Таков ряд месторождений угля Тунгусского бассейна, расположенных между восточными типично платформенными и западными горно-складчатого типа месторождениями, а также месторождения северных окраинных частей Донбасса, центральных районов Кузбасса и др.

К промежуточному типу должны относиться и угольные месторождения межгорных депрессий. Для них особенно характерны резкая изменчивость геологического разреза на коротких расстояниях, частая смена гравелитов и песчаников аргиллитами и алевролитами, чередование их с угольными пластами переменной (нередко очень большой) мощности, изменчивость мощности пород между одноименными угольными пластами.

Угли — бурые, полублестящие и блестящие, более метаморфизованные, чем угли месторождений платформенного типа. Степень уплотненности (иногда сцементированность) вмещающих пород выше, чем в массивах платформенного типа, однако их прочность и стойкость в общем невысокие.

Значительные различия в прочности пород и типах углей обусловлены главным образом явлениями динамометаморфизма, а следовательно, различной интенсивностью тектонических явлений. Обычно угленосная толща собрана в простые складки, купола и мульды, в той или иной мере усложненные вторичной складчатостью и разрывными нарушениями (сбросами, сдвигами и небольшими надвигами). В этом случае вмещающие породы отличаются невысокой прочностью и стойкостью (слабая их литифици-

рованность). В случае более сложного тектонического строения прочность породы и зрелость углей повышаются. Примерами первых могут служить месторождения Волчановское, Богословское и Веселовское, а вторых — месторождения Челябинского бассейна.

Описанные выше основные типы и классы угольных месторождений могут быть открытыми, полукрытыми и закрытыми. Примером открытых являются месторождения Кузбасса. Здесь угленосная толща пермского и юрского возраста выходит на поверхность или под маломощный покров современных накоплений. К полукрытым следует отнести часть месторождений Донбасса, в которых угленосные отложения перекрыты маломощными отложениями. Центральная часть Донбасса является открытой. Типичные представители закрытых — месторождения Кизеловского, Челябинского, Печорского и некоторых других бассейнов.

Более дробные подразделения угольных месторождений устанавливаются по признакам, специфичным для отдельных типов и подтипов. Так, например, в условиях Кузбасса применительно к открытым разработкам необходимо различать месторождения: с крутыми, наклонными и пологопадающими мощными пластами; с пологопадающими пластами умеренной мощности в условиях спокойного рельефа. В Подмосковном бассейне важны гипсометрические условия залегания пород угленосной толщи по отношению к карбонатным породам «фундамента» и глубина залегания этой толщи.

§ 3. Инженерно-геологические особенности рудных месторождений

Рудные месторождения в отличие от угольных более разнообразны по условиям и формам залегания. В одних случаях они представляют собой более или менее выдержанные пластообразные или линзовидные залежи, распространенные на значительные пространства (рис. 49), а в других образуют глубоко уходящие (рис. 50), обычно линейно вытянутые тела в виде жил и даек или же оруденения менее выдержанных очертаний и размеров и представляющие собой минерализацию зоны контактов или разрывных тектонических нарушений (рис. 51). Известны рудные тела, не выходящие на поверхность рудоносной толщи и представляющие собой «слепые залежи». Особо сложны формы залегания рудных тел на контактах с магматическими породами (месторождения контактово-метаморфические) и месторождений коры выветривания древних метаморфических свит (остаточные руды). В последних вмещающая толща отличается весьма сложной структурой (интенсивная дислоцированность, развитие магматических тел). Рудные тела в них перемежаются с породами различной прочности и выветрелости. Сами руды также представляют собой сложное чередование отдельных их сортов и типов.

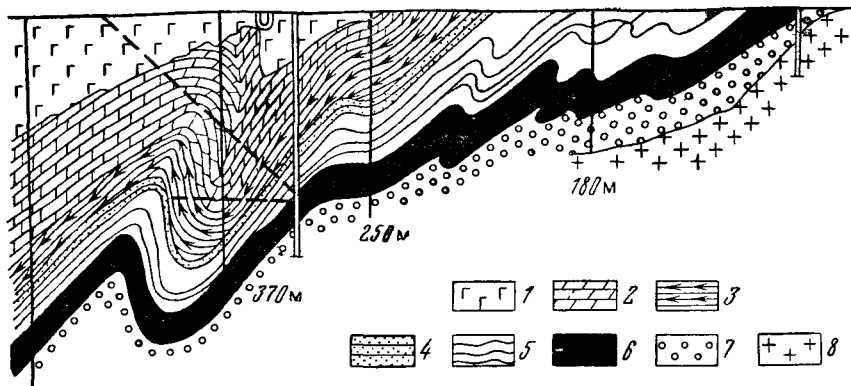


Рис. 49. Месторождение медистых сланцев:

1 — габбро, 2 — доломиты, 3 — тальковые сланцы, 4 — сланцы и кварциты, 5 — переслаивание кварцитов и сланцев, 6 — рудные сланцы, 7 — кварциты лежащего бока, 8 — гранит

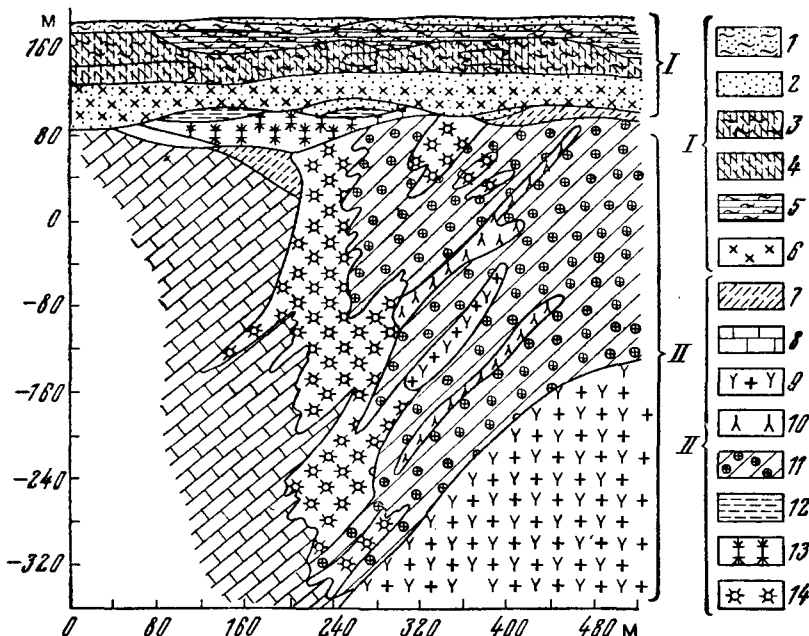


Рис. 50. Схема геологического строения Соколовского железорудного месторождения.

I — покровный горно-геологический ярус, II — основной горно-геологический ярус. 1 — лёссовидные суглинки; 2 — неогеновые пески (N); 3 — глины опоковые; 4 — опоки; 5 — глины сланцеватые с конкрециями марказита (P); 6 — пески кварц-глауконовые мелкозернистые (K₂); 7 — кора выветривания коренных пород; 8 — известняки (PZ); 9 — альбитовые гранит-порфиры, 10 — порфиры, 11 — эпидитовый скарн, 12 — валунчатые руды, 13 — бурожелезняковые руды, 14 — магнетитовые руды

Основные типы и подтипы, группы и подгруппы рудных месторождений различаются по тектоническим признакам (табл. 33). Более дробные подразделения представляется необходимым выделять по инженерно-геологическим особенностям рудовмещающей толщи (классы), глубине их залегания (подклассы) и генетическим признакам (семейства).

В результате все рудные месторождения подразделяются на два основных типа: платформенные и горно-складчатые. Примером

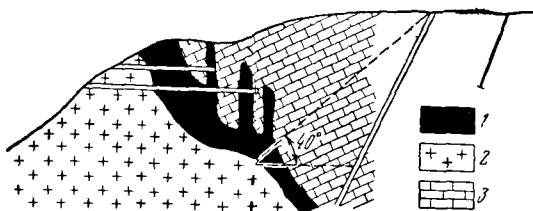


Рис. 51. Шеелитовое месторождение в скарпах:
1 — скарны с шеелитом,
2 — адамеллиты, 3 — известняки

месторождений платформенного типа с докембрийским кристаллическим основанием и основным ярусом в нижнем структурном этаже являются месторождения богатых железных руд и железистых кварцитов Курской магнитной аномалии (КМА). В структурном отношении они приурочены к Воронежской антеклизе Русской платформы, являющейся сосредоточием самого крупного в мире железорудного бассейна. Богатые руды бассейна представляют собой верхнюю зону коры выветривания железистых кварцитов (остаточные железные руды) или же продукты переотложения железистых образований коры выветривания (осадочные руды). Они залегают на «головах» крутопадающих пластов материнских пород — железистых кварцитов, заполняя неровности в их поверхности. Залежи руды представляют собой отдельные линейно вытянутые и глубоко вклинивающиеся в толщу кварцитов тела (линейный тип коры выветривания) или тела, занимающие значительную площадь и уходящие на сравнительно небольшую глубину (площадной тип коры выветривания). Минеральный состав, тип цементации и состав цементирующего вещества руд изменяются от прослоя к прослою. В силу этого среди руд различаются разновидности от глиноподобных или сыпучих до скальных (твердых) с временным сопротивлением на сжатие $200 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ и выше. В лежащем боку рудных залежей находятся филлитовые сланцы и кварциты, в висячем боку — филлитовые сланцы. Вся рудоносная толща смята в сложные изоклинальные складки, разорвана дизъюнктивами и обводнена. Обводнена и вышележащая толща «вскрышных» пород.

Основные различия в условиях эксплуатации железорудных месторождений КМА тесно связаны с их положением в той или иной части основной структуры бассейна — Воронежской антеклизе. По данному признаку в бассейне КМА выделяются три

района: северный, занимающий северо-восточный склон этой антеклизы к Подмосковной синеклизе, центральный, совпадающий со сводовой частью антеклизы, и южной, находящийся в пределах юго-западного борта этой структуры. Особенности железорудных месторождений этих районов охарактеризованы в табл. 34.

Рудные месторождения горно-складчатого типа чаще всего залегают в толщах твердых, трещиноватых и всегда в той или иной мере выветрелых пород. В том случае, когда рудовмещающей является толща метаморфических и особенно рассланцованных вулканогенно-осадочных пород, степень их выветрелости оказывается очень высокой. Это обстоятельство является основной причиной слабой устойчивости их обнажений и, в частности, крупных нарушений бортов карьеров. Нарушения их чаще всего происходят по контактам с сильно выветрелыми рассланцованными породами. Таковы, например, деформации бортов карьеров на месторождениях Благодатном, горы Магнитной и др. В первом из них деформации происходят чаще всего по контакту с графитизированными сланцами. В Магнитогорском карьере поверхность скопления крупного оползня 1945 г. проходила в основном в пределах сильно выветрелых (до полной каолинизации) ороговизированных туффов — атакита.

Обстоятельствами, значительно осложняющими условия эксплуатации многих рудных месторождений горно-складчатого типа, часто являются: 1) неправильная форма и весьма сложная конфигурация рудных тел и нередко пестрая перемежаемость руд различных типов и сортов; 2) многочисленные тектонические нарушения, наиболее крупные из которых расчленяют рудоносную толщу на отдельные блоки различной величины и с непостоянной амплитудой относительных смещений; 3) значительная пестрота пород и руд в отношении их прочностных, деформационных и водно-физических свойств; 4) неравномерная трещиноватость и выветрелость рудовмещающей толщи. Значительно усложняется эксплуатация некоторых рудных месторождений малодоступным высокогорным рельефом района.

Как уже отмечалось, рудные месторождения различных классов отличаются друг от друга главным образом по инженерно-геологическим особенностям рудовмещающей толщи. В этом отношении весьма интересны рудные месторождения вулканогенно-осадочных метаморфизованных толщ. К данному классу относятся, в частности, многие сульфидные месторождения цветных металлов. Эффузивные породы в них обычно превращены в кварцсерицитовые, хлоритовые, хлорит-талковые и другие сланцы, которые весьма неустойчивы в обнажениях, часто набухают даже при незначительном обводнении месторождения, а продукты выветривания их переходят в текучее состояние. В зонах обрушения последние переходят в пульпообразную массу, способную к весьма опасным прорывам в горные выработки. Месторождения

Классификация рудных месторождений по тектоническим условиям

Типы и подтипы	Группы	Подгруппы	Классы	Подклассы	Семейства (главные)
А. Платформенные а) древние б) молодые	А ₁ . Областей щитов	Различаются по положению месторождения в той или иной складчатой зоне щита	1. В толще поверхностных образований областей щитов	1. Открытые 2. Полуоткрытые	1. Первичноосадочные метаморфические 2. Магматогенные 3. Коры выветривания (остаточные)
	А ₂ . Областей антеклиз и впадов	В нижнем структурном этаже	2. В перестроенных продуктах коры выветривания пород кристаллического фундамента 3. В толще пород кристаллического фундамента	1. Открытые 2. Полуоткрытые 3. Закрытые	4. Пегматитовые и жильные гидротермальные 5. Контактново-метаморфические
	А ₃ . Областей синеклиз и мульд	В верхнем структурном этаже	1. В толще преимущественно карбонатных пород 2. В толще песчано-глинистых нецементированных пород 3. В толще сцементированных пород		1. Осадочные 2. Коры выветривания (остаточные) 3. Инфильтрационные 4. Россышные 5. Контактново-метаморфические
Б. Горно-складчатых сооружений а) каледонские б) герцинские в) альпийские	Б ₁ . Срединных массивов	1. Тектонически активных высокогорных областей	1. В вулканогенно-осадочной толще	1. Открытые 2. Полуоткрытые	1. Контактново-метаморфические 2. Осадочные метаморфизованные
	Б ₂ . Внутренних синклиналиев и мульд	2. Тектонически слабо активных низкотермальных областей	2. В толще карбонатных, сланцеватых и граувакковых пород		3. Собственно магматогенные (ликвационные и др.)
	Б ₃ . Интрузивных массивов	3. Тектонически пас-	3. В массивах кристал-		

Б ₄ . Межгорных впадин	синих областей	лических (интрузивных) пород		4. Пегматитовые и жильные гидротермальные 5. Осадочные 6. Коры выветривания (осадочные) 7. Россышные 8. Инфильтрационные 9. Метасоматические 10. Осадочные 11. Остаточные 12. Россышные
Б ₅ . Краевых прогибов		4. В пакично построенных толщах осадочных пород, прорванных магматическими интрузиями 5. В толще поверхностных образований и пород коры выветривания		

данного класса, находящиеся в условиях межгорных впадин и перекрытые часто мощной толщей рыхлообломочных сильно обводненных пород, опасны также в отношении прорывов подземных вод. Таковы, например, некоторые сульфидные месторождения Рудного Алтая.

Под влиянием процессов окисления сульфидные руды способны самовозгораться и вызывать подземные пожары. Это сильно осложняет и без того тяжелые условия ведения горных работ и требует особого режима и осуществления профилактических мер.

Месторождения, заключенные в твердых осадочных толщах, — известняках, песчаниках и граувакковых породах, — отличаются, как правило, более спокойными условиями. Основные затруднения возникают при их вскрытии и эксплуатации вследствие повышенной обводненности. Борьба с подземными водами перерастает в крупную и сложную инженерную задачу в месторождениях, заключенных в толще закарстованных известняков, залегающих на отметках ниже уреза воды близ находящихся водоемов или водотоков. Таково, например, Североуральское бокситовое месторождение, заключенное в толще закарстованных известняков девона. Рудовмещающие известняки здесь занимают тектоническую депрессию в известной на Урале полосе зеленокаменных горных пород. Известняки собраны в моноклиналильные складки и разорваны дизъюнктивами. Оруденение в виде пластообразных залежей заключено в нижней части известняков, суммарная мощность которых достигает 800—1000 м. Вся эта толща разбита мелкой трещиноватостью. Региональной выдержанностью отличаются трещины

Особенности железорудных месторождений КМА

Районы КМА	Структурное положение районов	Глубина залегания кристаллического фундамента	Особенности в условиях залегания рудной залежи	Характеристика горных пород основной кровли	Горно-геологические ярусы надрудной толщи	Гидрогеологические особенности месторождений
Северный	Северо-восточный склон Воронежской антеклизы	Закономерно погружается в северо-восточном направлении до 200—300 м с интенсивностью в среднем 2 м на 1 км	Рудные тела малой и средней мощностей, залегающие в основном среди среднеустойчивых и устойчивых пород	Устойчивые (средне- и верхнедевонские плотные глины, чередующиеся с известняками и песчаниками)	1. Комплекс четвертичных отложений 2. Мело-мергельная толща 3. Песчаная толща ант-неокома и сеномана 4. Сложно построенная и фациально невыдержанная толща бат-колловая 5. Плотные известковые глины, известняки и пески девона	Надежная изоляция рудного горизонта от вод мезо-кайнозойской толщи
Центральный	Сводная часть Воронежской антеклизы	80—100 м, а в районе Михайловского месторождения снижается до 25—40 м	Рудные залежи редко превышают 25—40 м, извилистого очертания, с окнами окисленных кварцитов, часто выступаю-	Слабоустойчивые и неустойчивые (часто плавучего типа) и континентальные прибрежно-морские песчано-	1. Комплекс четвертичных отложений 2. Мело-мергельная толща сантон-турона 3. Песчаный ком-	Обычно два основных водоносных горизонта, разделенных корскими глинами; из них нижний гидравлически

			щих на поверхности «фундамента» в виде высоких гребней	глинистые отложения юры	плекс альб-сеномана 4. Сложно построенный песчано-глинистый комплекс юры	связан с руднокристаллическим, а верхний — смергельно-меловым и четвертичным
Южный	Юго-западный борт Воронежской антеклизы	Закономерно погружается в юго-западном направлении до 400—450 м и более (Белгородский железорудный район) интенсивностью в среднем 7 м на 1 км	Рудные залежи расчленены на больших пространствах, образуя клинья, нередко уходящие на глубину 100—200 м и более. Залегают среди малоустойчивых и прочных пород	То плотные, то закарстованные известняки, переслоенные глинами, то бокситоносные или угленосные песчано-глинистые отложения, то, наконец, высокоподвижные и слабоустойчивые песчано-глинистые породы юры	1. Комплекс четвертичных отложений 2. Мощная (до 200 м) мергельно-меловая толща 3. Пески сеноман-альба 4. Толща нижне-волжских глин, известняков и песчаников 5. Киммеридж-оксфордские глины (отсутствуют на западе) 6. Среднекембрийская песчаная толща (в северной части) 7. Плотные глины байоса и баткедловей 8. Палеозойские карбонатно-глинистые породы (неповсеместно)	Весьма сложные: 1. Имеется до 6 самостоятельных водоносных горизонтов 2. Высокие напоры (до $50 \cdot 10^5$ Па) 3. Слабая водопроницаемость водоносных пород ($k_{\text{ф}} = 0,05—0,9$ м/сут)

напластования и две системы секущих крутопадающих трещин. Карстовые полости развиты главным образом по системам крутопадающих секущих трещин, особенно в местах их пересечения с трещинами других систем. Наибольшая концентрация карстовых полостей наблюдается по зонам тектонических нарушений, а также в приконтактной части известняков с рудной залежью.

Весьма интересны данные по степени закарстованности известняков. Установлено, что величина открытой закарстованности по всему объему пород в среднем составляет около 2,8%. Но вблизи поверхности она возрастает до 3,6%. С глубиной открытая закарстованность снижается и на глубинах 100—150 м достигает 1,1—1,7%.

Вследствие интенсивной трещиноватости и закарстованности известняков месторождение оказалось сильно обводненным. Однако из-за того, что известняковый массив в целом заключен в толщу вулканогенно-осадочных слабопроницаемых зелено-каменных пород, региональный подток воды в данную толщу ограничен. Следовательно, ограничены и динамические ресурсы вод известняковой толщи. Это обстоятельство при изоляции месторождения от речных вод создает благоприятные условия для осушения месторождения и шахтного строительства. Мощный водоотлив с суммарным расходом в 1954 г. до 10 000 м³/ч обеспечил снижение уровней подземных вод до 70—107 м.

Несмотря на это, на рудниках имели место многочисленные прорывы подземных вод с дебитами до 100—1700 м³/ч и один случай с катастрофическим притоком до 4300 м³/ч. Причиной послужила крайне неравномерная трещиноватость известняков, в связи с чем поверхность динамических уровней трещинно-карстовых вод была сформирована неравномерно. В данных условиях было необходимо рассредоточить водопонижительные узлы по отдельным шахтным полям, применить опережающее бурение из забоя, соорудить сеть подземных водопонижительных скважин и осуществить другие мероприятия, обеспечивающие предупреждение прорывов подземных вод. Интенсивное водопонижение и прорывы подземных вод вызвали размыв и переотложение глинистого материала, заполняющего карстовые пустоты и трещины, и механическую суффозию поверхностных глинистых накоплений, что привело к образованию суффозионных воронок, особенно крупных на участках поглощения поверхностных вод.

Ряд рудных месторождений заключен в интрузивных массивах, сложенных из разнородных магматических пород. Эти месторождения составляют самостоятельный инженерно-геологический класс. К ним относятся многие жильные, пегматитовые и собственно магматогенные (ликвационные, сегрегационные) и некоторые другие месторождения.

Интрузивные массивы обычно отличаются довольно сложным внутренним строением, обусловленным развитием разновозраст-

ных и разнородных интрузивных тел, наличием тектонических нарушений различного порядка (от крупных зон тектонических разломов до мелких смещений) и постоянной трещиноватостью пород и массива в целом. Решение основных вопросов инженерной геологии таких массивов тесно связано с изучением перечисленных элементов их внутренней структуры, выветрелости пород и раскрытости трещин, а также с исследованиями сил сопротивлений сдвигу и отрыву по поверхностям раздела массива различного рода. В тесной зависимости от перечисленных характеристик находятся такие горнотехнические факторы, как отделимость пород и руд от массива и, следовательно, расходы ВВ на извлечение 1 т руды и 1 м³ породы; водопроницаемость и обводненность месторождения; устойчивость обнажений горных выработок и др. Обычно месторождения данного класса слабо обводнены и практически безводны. Повышенной обводненностью отличаются лишь зоны тектонических нарушений (особенно в массивах кислых и средних по химическому составу магматических пород) и зальбандовые части многих жильных образований. В тех же местах наблюдается локализация наиболее крупных деформаций обнажений горных выработок.

Наиболее сложны условия вскрытия и разработки тех месторождений данного класса, в которых рудовмещающая толща перекрыта слабоустойчивыми и обводненными породами. Таковы, в частности, месторождения межгорных впадин, выполненных поверх рудовмещающей толщи рыхлыми песчано-гравелистыми и глинистыми породами.

Инженерно-геологические условия рудных месторождений последних двух классов близки к условиям соответствующих им классов угольных месторождений. Однако имеется и существенная разница, заключающаяся в большом разнообразии форм залегания рудных тел и распределения их в рудной толще, обусловленных различным способом образования месторождений. Так, в четвертом классе рудных месторождений можно различить до девяти генетических семейств, хотя пятый класс объединяет только три основных семейства: осадочные, россыпные и остаточные месторождения.

ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОДИНАМИКИ

ГЛАВА 10

ЭЛЕМЕНТЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

§ 1. Содержание и задачи инженерной геодинамики

При строительстве и эксплуатации горных предприятий часто приходится сталкиваться с проявлениями различных современных геологических процессов, осложняющих освоение и разработку месторождений полезных ископаемых.

В инженерно-геологическом отношении, т. е. с точки зрения определения геологических условий горно-строительных и горно-эксплуатационных работ, представляют интерес почти все современные геологические процессы, однако наибольшее внимание привлекают те из них, которые сопровождаются интенсивным разрушением территории строительства и слагающих ее горных пород, быстрыми, иногда катастрофическими смещениями горных пород или мощными динамическими воздействиями на сооружения. Таковы речная и овражная эрозия, абразия, оползни, обвалы, сели, мерзлотно-динамические и карстовые деформации земной поверхности, сейсмические процессы. Многие из перечисленных процессов вызывают необходимость предварительного проведения специальных инженерных мероприятий, например укрепления откосов, вертикальной планировки и др.

Для оценки условий производства горных работ имеют также значение геологические процессы, результаты которых обнаруживаются по истечении продолжительного времени. Таковы, например, процессы выветривания горных пород, некоторые явления аккумуляции (накопления) современных осадков, неотектонические движения земной коры и геотермические процессы.

Изменения инженерно-геологических условий при производстве горных работ всегда сопровождаются развитием различного рода явлений, называемых горно-геологическими. Они представляют собой особую группу инженерно-геологических явлений. В отличие от природных аналогов горно-геологические явления носят отпечаток не только геологической обстановки, но также рода и вида искусственного воздействия на нее.

Таким образом, современные геологические процессы и горно-геологические явления в совокупности определяют геодинамическую обстановку производства горных работ. Геодинамическая обстановка характеризуется состоянием геофизических полей, пронизывающих геологическую среду (полей напряжений и деформаций, геотермического, гидрогеодинамического) и горно-геологических явлений.

Раздел инженерной геологии, в котором рассматриваются современные геологические процессы и горно-геологические явления с позиции их влияния на условия разработки месторождений полезных ископаемых, называется **инженерной геодинамикой**.

Основными задачами геодинамики являются:

1) изучение современных геологических процессов с целью определения их влияния на устойчивость, надежность и долговечность горнотехнических сооружений;

2) прогноз изменений геодинамической обстановки района производства горных работ;

3) обоснование защитных инженерных мероприятий, обеспечивающих безопасное ведение горных работ, рациональное использование недр и охрану окружающей среды.

Перечисленные задачи решаются путем детального изучения структуры массива пород и его геодинамического состояния с широким привлечением методов инженерной петрографии (грунтоведения), натурного и модельного экспериментирования и механики структурированных сред. С усовершенствованием технических средств, применяемых в горном деле, создаются условия для использования разрушительных сил геологических процессов на пользу производству.

§ 2. Классификация геологических процессов

Все геологические процессы делятся на экзогенные (внешние) и эндогенные (внутренние).

Экзогенные геологические процессы происходят в результате воздействия внешних оболочек земли (гидросферы и атмосферы) на земную кору и охватывают ее поверхностные части. Они обнаруживают связь с внешними, в частности, климатическими условиями и обычно подчиняются климатической зональности.

По своей направленности экзогенные процессы подразделяются на денудационные и аккумулятивные, однако между собой они неразрывно связаны, как, например, связаны явления смыва, размыва и оврагообразования с процессами накопления делювия, овражного аллювия, отложений конусов выноса и т. д. Обычно достаточно точно выделяются части территории, в одних из которых преобладают денудационные процессы и процессы, их подготавливающие, тогда как в других сосредоточены главным образом процессы аккумуляции и литификации осадков. Подобное разгра-

Классификация экзогенных геологических процессов

Группы	Подгруппы	Представители процессов данной подгруппы	
		Денудационных	Аккумулятивных
I. Геологическая работа поверхностных вод	1. Геологическая работа рассредоточенных потоков атмосферных осадков и талых вод, скатывающихся по поверхности склона	Смыв	Накопление делювия
	2. Геологическая работа сосредоточенных временных водотоков	Размыв. Оврагообразование. Сели	Накопление овражного аллювия, конусов выноса и т. д.
	3. Геологическая работа постоянно действующих водотоков (ручьев, рек, речек)	Размыв русла. Подмыв берега и сопровождающие его явления (осыпи, обвалы)	Накопление аллювио-делювия, осыпей и т. д.
	4. Геологическая работа морского прибоя, приливно-отливной волны, прибрежных течений	Абразия морского берега. Размыв и транспортировка донных осадков	Накопление прибрежно-морских и пляжевых осадков
II. Геологическая работа подземных вод	1. Химическое и физико-химическое воздействие подземных вод на горные породы	Выщелачивание горных пород. Карстообразование. Просадки и провалы. Химическое выветривание горных пород	Цементация осадков, «залечивание» трещин и пустот. Вторичное засоление почво-грунтов
	2. Фильтрационное разрушение горных пород	Оплывание горных пород	Накопление размывных и оплывших масс горных пород
III. Геологическая работа атмосферы	Эоловые процессы	Ветровая коррозия пород. Развевание и навание. Движущиеся пески	Накопление эоловых отложений (лёссов, песков и др.)
IV. Геологическая работа подземных и поверхностных вод	1. Деформация береговых склонов в форме скольжения и течения масс горных пород	Различные виды оползневых деформаций. Пластическое течение и выдавливание (выпор) горных пород	Накопление оползневых масс
	2. Другие формы проявления поверхностных и подземных вод	Заболачивание местности и накопление болотных отложений	

Группы	Подгруппы	Представители процессов данной подгруппы	
		Денудационных	Аккумулятивных
V. Геологическая работа атмосферы и подземных вод	1. Процессы, происходящие под влиянием сезонных колебаний температуры и влажности горных пород 2. Деформации пород под влиянием промерзания и оттаивания подземных вод и пород	Сезонное «дыхание» почвы. Морозное и температурное выветривание горных пород Мерзотно-динамические явления (пурины, гидролакколиты, наледи, термокарсты, солифлюкция)	

ничество позволяет выделить особенности геодинамической обстановки и состояние и свойства горных пород покровной толщи изучаемой территории.

Экзогенные геологические процессы возникают в результате геологической работы поверхностных вод, подземных вод и атмосферы. Одни из них обязаны своим развитием в основном поверхностным водам (явления смыва и размыва, оврагообразования и т. д.), другие — подземным водам (карст, фильтрационное разрушение горных пород), третьи — атмосфере (ветровая коррозия горных пород, процессы развевания и навевания — движущиеся пески). Некоторые экзогенные процессы возникают в результате совместных действий подземных и поверхностных вод (например, оползни) или подземных вод и атмосферы (выветривание горных пород, разнообразные виды объемных деформаций почво-грунтов). По этому принципу выделяются естественные группы экзогенных геологических процессов (табл. 35).

Отметим, что экзогенные геологические процессы поддаются с различной степенью эффективности инженерному управлению, например, путем вертикальной планировки территории, регулирования подземного и поверхностного стока, режима влажности и температурного режима горных пород.

Эндогенные геологические процессы возникают под действием внутренней энергии, выделяемой землей. Из числа эндогенных геологических процессов, определяющих в наибольшей степени геодинамическую обстановку месторождения, наибольший интерес представляют сейсмические процессы, неотектонические движения земной коры и явления геотермии. Эндогенные геологические процессы не поддаются инженерному управлению, поэтому строительство и эксплуатация горных предприятий в зонах проявления этих процессов основывается на их прогнозировании

и создании надежных, приспособленных к данной геодинамической обстановке инженерных конструкций, а также технологических схем и методов разработки полезных ископаемых.

§ 3. Методы изучения геодинамической обстановки

Результаты почти всех геологических процессов можно наблюдать визуально. Они изменяют состояние и свойства горных пород, создают новые формы рельефа, и, наконец, изменяют геологическое строение местности. Поэтому изучение геодинамической обстановки начинают с визуальных геологических наблюдений и геологического картирования, т. е. нанесения на карту всех видимых проявлений новейших и современных геологических процессов. При этом составляются специальные карты, характеризующие геодинамическое состояние территории.

Для получения представления об изменениях геодинамического состояния территории во времени и об интенсивности этих изменений дополнительно проводят следующие исследования:

1) восстанавливают общий ход геологических процессов в районе за время, непосредственно предшествующее современности, путем изучения и детального картирования новейших геологических образований, установления исторической последовательности возникновения этих образований и развития новейших и современных геологических явлений и процессов;

2) выполняют повторные («дежурные») съемки геодинамического состояния территории, сопоставляют данные повторных съемок с материалами и данными наблюдений и исследований прежних лет;

3) организуют стационарные наблюдения с использованием точных средств инструментальных наблюдений за динамикой геологических процессов, за изменениями состояния и свойств горных пород, режимов подземных вод и т. д.

Таким образом, изучение геодинамической обстановки территории производится как методами геологической съемки и историко-геологического анализа, так и приемами стационарных наблюдений путем получения количественных характеристик процессов и сил, разрушающих территорию или вызывающих деформации массивов пород. Такого рода данные крайне важны для проектирования защитных мероприятий и расчета специальных конструкций сооружений, приспособленных к данным геодинамическим условиям.

Вспомогательное значение имеют графоаналитические исследования и методы моделирования геодинамических процессов и явлений. Последние используются при проектировании особо ответственных и дорогостоящих инженерных сооружений.

§ 4. Общая характеристика горно-геологических явлений

Горные породы, залегающие на некоторой глубине от поверхности земли, паходятся в напряженном состоянии, обусловленном действием массы вышележащих толщ и собственной массы. Естественное напряженное состояние массива получило наименование **первичного**.

В условиях физической однородности массива и равнинной местности следует ожидать равномерное нарастание напряжений с глубиной. В любой точке массива компоненты напряжений в этом случае могут быть определены по формулам

$$\sigma_z = \gamma h; \quad \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z \frac{\mu}{1-\mu};$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0,$$

где γ — средняя объемная масса покрывающей толщи горных пород;

h — глубина расположения точки наблюдения от земной поверхности;

μ — коэффициент бокового распора.

Реальные массивы горных пород, отличающиеся внутренней неоднородностью и нередко анизотропностью физических характеристик, обладают неоднородным полем сопротивления $\sigma_c(x, y, z, \alpha)$, чему должно соответствовать неоднородное поле напряжений $\sigma_n(x, y, z, \alpha)$. Иными словами, напряженное состояние массивов пород является структурным, отвечающим внутренней инженерно-геологической структуре массива. Кроме того, в условиях пересеченной местности отмечается влияние строения земной поверхности. Таковы местные источники внутренних напряжений и основные факторы структурности естественного напряженного состояния массивов. Источники внутренних напряжений и основные факторы структурности естественного напряженного состояния массивов горных пород могут иметь региональный характер. В этом случае возникают напряжения и вызываемые ими деформации регионального характера. Они известны как тектонические напряжения и деформации.

Таким образом, естественное напряженное состояние массивов пород складывается из двух более или менее самостоятельных явлений:

а) напряженного состояния, отражающего местные структурно-механические особенности массива;

б) напряжений регионального, тектонического характера.

С проведением горных выработок первичное напряженное состояние и условия равновесия горных пород в массиве нарушаются. Это происходит в результате перераспределения напряжений, приводящего к появлению очагов концентрации напряжений в одних местах и к ослаблению в других. В условиях не-

однородных в отношении структурно-механических характеристик массивов пород картина перераспределения напряжений представляется значительно более сложной.

Совокупность явлений, возникающих в массивах горных пород под влиянием горных работ, будем называть горно-геологическими явлениями.

По степени отличия от геологических явлений различают три категории горно-геологических явлений:

1) явления, в существенной мере подготовленные геологическими процессами; инженерные работы лишь ускоряют их появление и течение. Таковы, например, процессы выветривания горных пород, подготовляющие гравитационные деформации откосов карьеров;

2) явления, развивающиеся только в искусственно созданной горнотехнической обстановке. Таковы горные выстрелы, внезапные выбросы угольной пыли и газа и др.;

3) явления, отличающиеся от первых двух категорий тем, что они участвуют в технологическом процессе. Таковы оползни в рабочих бортах карьеров, используемые для повышения производительности труда на вскрышных работах, или отжим угля, используемый для интенсификации выемочных работ.

Все горно-геологические явления подразделяют на две группы:

а) возникающие при открытых разработках и б) связанные с подземными работами.

Важнейшая черта горно-геологических явлений — это их зависимость от горно-эксплуатационных факторов, к числу которых относятся:

1) при открытых разработках — способ вскрытия и система разработки, порядок отработки месторождения, генеральные углы заложения бортов карьера, число уступов и ширина берм, скорость продвижения забоев, мероприятия водопонижения, осушения и ограждения карьера от поверхностных вод и т. д.;

2) при подземных разработках — принятая система и порядок разработки месторождения, геометрические параметры и взаимное расположение выработок, длительность службы горных выработок, способ управления горным давлением, мероприятия по инженерной подготовке месторождения к разработке (осушение, водопонижение).

Горно-геологические явления представляют собой результат взаимодействия выработок и массива пород. Это обстоятельство важно в двух отношениях. Во-первых, оно обязывает изучать горно-геологические явления как результат совместного действия единой системы горная выработка — геологическая среда (массив породы) и, во-вторых, указывает на возможность управления горно-геологическими явлениями, так как данные явления зависят не только от геологических особенностей массива пород, но также от горно-эксплуатационных факторов, находящихся в распоряжении человека.

Таким образом, основная задача инженерно-геологических исследований в горном деле состоит в прогнозировании горно-геологических явлений и процессов и в разработке рекомендаций по их предупреждению.

ГЛАВА 11

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПОВЕРХНОСТНЫМ СТОКОМ

§ 1. Процессы смыва, размыва и оврагообразования

При смыве (абляции) происходит снос поверхностных образований мельчайшими струйками и ручейками талой или дождевой (в основном ливневой) воды. Данный процесс, называемый делювиальным, носит характер плоскостной эрозии.

Однако он легко переходит в струйчатую или ручейковую эрозию, т. е. в размыв ручейками, собирающими талые и дождевые воды с вышележащих частей склона. В результате размыва на поверхности склона возникают рытвины или промоины, в дальнейшем перерастающие в овраги. Оврагообразование является типичным примером линейной эрозии.

Процессы смыва протекают значительно медленнее, чем процессы размыва и оврагообразования. Они формируют делювиальный покров в нижних частях и в основании склонов и тем самым выполаживают склон.

Интенсивность смыва зависит от характера пород, уклона поверхности и наличия или отсутствия растительного покрова (табл. 36). Наиболее легко смываются и размываются суглинистые и супесчаные, особенно лёссовидные (макропористые) породы, отличающиеся слабой водостойкостью. С повышением содержания глинистой фракции, увеличением плотности и сил сцепления размываемость глинистых пород снижается. Однако в условиях континентального климата (резкие колебания температуры) при ливневом характере осадков и быстром сходе снежного покрова размываемость указанных пород резко возрастает.

Одерновка откосов является наиболее простым и надежным средством их защиты от разрушения. В условиях открытых работ, кроме того, прибегают к устройству ливнестоков и нагорных канав.

Борьба с оврагообразованием является более трудной задачей. В начальной стадии развитие оврага может быть приостановлено выравниванием промоин и рытвин, восстановлением растительного покрова и организацией ливнестоков. На следующей стадии, когда

овраг растет путем вреза в массив склона, а разрушение территории усиливается обвалами и осыпями его бортов, прибегают к устройству укрепленных заград — перепадов с целью приостановления донного размыва. В третьей стадии продольный профиль дна оврага выравнивается и поэтому донный размыв прекращается. Вместе с тем усиливается боковой размыв бортов. Интенсивное разрушение последних происходит путем образования

Таблица 36

Интенсивность смыва почвенных покровов в зависимости от уклона поверхности и наличия растительного покрова

Уклоны поверхности, градус	Количество смываемых пород в течение сезона (за 6 месяцев) с 1 м ² , г	
	с поверхности, покрытой травянистой растительностью	с обнаженной поверхностью
10	14	834
20	42	1368
30	51	3104

осышей, обвалов, а в некоторых случаях и оползней. Защиту склонов от разрушения осуществляют путем устройства плетней с земляной забивкой и древесным насаждением. Борьба с оползнями возможна с помощью более сложного комплекса мероприятий, включающего защиту бортов оврага от разрушающих сил подземных вод.

Четвертая стадия характеризуется затуханием эрозийных процессов на склоне. Борта оврагов приобретают устойчивость и постепенно покрываются растительностью, а дно оврага затягивается овражно-аллювиальными накоплениями.

На этой стадии следует избегать нарушения естественной устойчивости склона и бортов балок.

§ 2. Селевые потоки

Сели, иначе горные каменно-грязевые потоки, возникают во время сильных ливней или сильного снеготаяния на вершинах гор. Бурные потоки воды, зарождающиеся на крутых горных склонах, захватывают рыхлые продукты выветривания горных пород и с огромной разрушительной силой скатываются вниз по горным руслам. При выходе в предгорную равнину грязевой поток разливается по предгорью в виде веера и откладывает особый тип континентальных образований — **пролювий**.

Основными условиями возникновения селей являются:

а) значительные уклоны русел, превышающие 0,02, но иногда достигающие 0,35;

б) развитие в верховьях горных русел глин и глинистых сланцев и других нестойких к физическому выветриванию горных пород, дающих обильный мелкообломочный материал;

в) выпадение большого количества осадков за короткое время (обильные ливни) или же быстрое снеготаяние в горных вершинах.

Каменно-грязевой поток состоит из «гидромассы» и крупных частиц. Гидромасса представляет собой суспензию мелких минеральных частиц, удерживающихся во взвешенном состоянии потоком благодаря высокой их гидрофильности и отчасти вследствие больших скоростей перемещения потока. Крупные частицы, включая валуны и камни, перемещаются благодаря большим скоростям вихревого потока селя. Процесс перемещения можно представить в виде скачкообразного движения с различной высотой и длиной скачков, причем отрыву частиц от дна обычно предшествует качание. С увеличением скорости потока и его плотности («мутности») первыми отрываются от дна и совершают скачкообразные движения более мелкие частицы. При дальнейшем возрастании средней скорости потока и его плотности длина описываемых отдельными частицами траекторий увеличивается, а время пребывания на дне потока уменьшается. Одновременно с этим приходит в скачкообразное движение все более и более крупный обломочный материал (галька, валуны и камни). Подъемная сила потока, отрывающая их от дна, является результатом разности скоростей обтекания частиц на нижней и верхней границах *. В дальнейшем перемещение частиц в потоке происходит под действием динамической силы потока.

В зависимости от насыщенности селевой массы твердым материалом различной крупности выделяют связные (структурные) и текучие (турбулентные) селевые потоки. Последние объединяют водно-каменные и грязево-каменные потоки.

Сели могут представлять опасность для некоторых горных предприятий, располагающихся в высокогорных районах Тянь-Шаня, Памира, Кавказа, Забайкалья.

Основными профилактическими мерами по предотвращению селей являются сохранение и восстановление растительности в области питания селевого потока. Из специальных инженерных мероприятий назовем устройство стенок (запруд), перегораживающих горные русла. С помощью этих стенок удастся задержать часть несущихся вниз селевых масс, которая скапливается перед стенкой в виде клина.

После того как запруды заполняются наносами селевого потока, дно русла приобретает ступенчатое строение: оно будет состоять из отдельных отрезков меньшего уклона и перепадов. Поток, движущийся по такому руслу, уменьшает свою разрушительную силу вследствие потери энергии на трение о дно запруд и на удары при вертикальном падении селевой массы со ступени на ступень.

* Обычно скорость потока ниже частицы может быть принята равной нулю и подъемная сила определяется лишь скоростью выше частиц (М. А. Велikanов).

Для предохранения от разрушения дорог устраивают бетонные лотки, по которым сель сбрасывается выше или же ниже дороги. Для защиты некоторых строений прибегают к устройству защитных дамб и стен.

Борьба с селями сложное и дорогостоящее мероприятие *, оправданное и экономически целесообразное при защите крупных объектов. В качестве одного из основных средств обеспечения безопасности населенных пунктов и горных предприятий следует считать службу наблюдения за возникновением и перемещением селевых потоков. В последнее время для этих целей используются автоматические устройства — радиооповестители селя.

§ 3. Размыв русла, подмыв берегов и сопровождающие их явления

Явления размыва русел и подмыва берегов происходят под действием водотоков. Для движения масс водотоков достаточны ничтожные уклоны, во много раз меньшие, чем для процессов смыва, поэтому эти явления распространены в горных и равнинных областях.

Размыв русла рек обуславливается двумя самостоятельными внутренне связанными процессами: 1) отрывом минеральной частицы наноса от дна русла подъемными силами водотока, возникающими в результате неравномерного (асимметричного) обтекания лежащих на дне русла частиц; 2) вовлечением частиц внутрь потока и переносом их путем подъема падающих частиц под действием вихревого (турбулентного) перемещения массы водотока.

В условиях вихревого перемещения потока и подвижности наносов русла создаются условия для искривления динамической оси потока. Следствием его являются изгибы береговой линии потока и образование плесов и перекатов. В местах поворота динамической оси вода устремляется к вогнутому берегу вследствие инерции и подмывает его. На противоположном берегу происходит накопление наносов, что связано с возникновением поперечных придонных течений от вогнутой части потока к противоположному выпуклому. В результате долина потока приобретает асимметричное строение: подмываемый берег становится крутым, часто отвесным и поэтому неустойчивым; противоположный берег отлог и слагается осадками береговой косы.

Взаимоотношение потока и русла получило наименование **руслового процесса** (М. А. Великанов). Данным процессом можно управлять с помощью специальных струенаправляющих сооружений, в частности дамб и бун.

* Стоимость селезащитного комплекса г. Алма-Ата оценивается примерно в 50 млн. руб. (по Н. Н. Маслову).

Интенсивно подмываемые крутые и отвесные берега рек часто разрушаются с образованием обвалов и осыпей. В условиях равнинных рек подмываемые косогоры разрушаются вследствие обрушения нависших карнизов и отвесных обрывов горных пород. В том и другом случае они сопровождаются интенсивным смывом, размывом, оврагообразованием, а иногда оползнями.

Предотвращение небольших внезапных обвалов иногда достигается взрыванием нависающих скал или отделением их от массива клиновыми работами. В отдельных случаях оказывается достаточно эффективным цементирование трещиноватого массива, а иногда удержание глыб с помощью стальных скреп, опорных столбов, стенок (контрфорсов) и т. д. Иногда прибегают к устройству улавливающих полок. Однако активная борьба с крупными обвалами не всегда возможна. Поэтому в районах, где могут быть крупные обвалы, сооружения и населенные пункты размещаются в местах, достаточно удаленных от последних, во всяком случае, на расстояния, превышающие предельную дальность падения обвальных масс. Для этого выявляют места возможных обвалов и путем изучения следов бывших в данном районе обвалов устанавливают величину ожидаемого разброса глыбового материала.

Смещения отделившихся в результате выветривания мелких обломков и зерен горных пород называются осыпанием. В результате у подножия склона накапливается осыпь. В горных районах осыпи нередко имеют глыбовый состав. В этом случае их называют курумами, или каменными россыпями.

Осыпи могут представлять опасность на горных склонах, находящихся в сейсмических областях, так как под влиянием сейсмических толчков они способны прийти в движение. Такие явления называются осами. Массы осыпей могут прийти в движение также в результате водонасыщения после обильных дождей и в период снеготаяния. В этом случае они иногда переходят в селевые потоки.

В горных районах, где осыпи подвижны и приходят в движение, например при подрезке склона выемками, предпочитают проводить дороги на другом склоне, безопасном в отношении осыпей. Когда такая возможность исключена, дороги проходят полутуннелем, с перепуском осыпей через ее перекрытие, или туннелем.

Осыпание раздельнозернистых пород и мелкощебенистого материала обычно не вызывает особых осложнений. Борьба с ними осуществляется своевременной уборкой осыпей или установкой в опасных местах задерживающей сетки или бермы.

Более серьезные осложнения могут вызвать курумы, или каменные россыпи. Верхняя часть их толщи представляет собой рыхлый глыбовый навал. В нижних частях курумов промежутки между

глыбами частично или полностью выполнены суглинисто-щебенистым материалом. Если подстилкой курумов служат пластичные глинистые породы или же глинистые сланцы, то нередко наблюдаются общие смещения (сползание) курумов вниз по склону. При этом скорость смещения, например в Восточных Саянах, достигает 145 см в год (наблюдения Н. П. Костенко). При водонасыщении курумы некоторых районов (например, Северного Тянь-Шаня) переходят в ряд каменных потоков.

Курумы, смещающиеся по пластической глинистой подстилке, являются серьезным препятствием проведению дорог и возведению сооружений. Самоуплотнение курумов, сопровождающееся взаимным перемещением обломков и более плотной их «упаковкой», неопасно для сооружений. Данный процесс ускоряется развитием объемных напряжений в толще курума, возникающих вследствие переменного режима увлажнения, сезонного промерзания и оттаивания и колебаний температуры.

§ 4. Геологические процессы в прибрежной части морей, озер и водохранилищ

Геологические процессы береговой полосы морей и озер можно подразделить на две самостоятельные подгруппы: а) процессы, разрушающие береговой склон, и б) аккумулятивные процессы.

Разрушение береговой полосы в основном производится прибоем, т. е. постоянными ударами набегающих на берег волн. Меньшее значение в разрушении берега имеет химическое воздействие на горные породы (коррозия). В некоторых случаях действует особый, пневматический механизм разрушения скалистого берега. Набегающая с большой силой волна загоняет по трещинам скалистого массива морскую воду и сжимает воздух, заполняющий эти трещины. При отходе волны сжатый воздух с силой выбрасывает столб воды и захваченные им со стенок трещин обломки пород.

В результате ударов волны береговая полоса постепенно отступает, оставляя за собой ровную, слегка наклоненную к морю площадку — волноприбойную террасу. Данный процесс, связанный с работой прибоя, называется абразией. Рыхлые продукты, образующиеся при разрушении береговой полосы, а также привносимые реками, осаждаются в береговой полосе или на некотором отдалении от нее.

Формирование берегового профиля идет различно у приглубых (с большими глубинами у самого берега) и отмелых (с малыми глубинами) берегов. Приглубые участки побережья интенсивно абрадируются и разрушаются, особенно в тех случаях, когда они сложены легко размываемыми породами. У отмелых берегов происходит накопление продуктов разрушения берега и твердого

стока рек. На этих участках формируются пляжевые отложения и песчано-галечные валы.

Образование пляжей и усиленное накопление прибрежных донных осадков всегда сопровождается ослаблением, а затем полным прекращением абразии берега, а следовательно, и ослаблением других геологических процессов, разрушающих берег — обвалов, осыпей, оползней и т. д. Поэтому наиболее надежным и экономически целесообразным средством радикальной борьбы с разрушением побережий является управление динамикой прибрежно-донных осадков. С этой целью прибегают к устройству бун и волноломов, задерживающих размыв донных осадков и способствующих накоплению пляжа. Вспомогательное значение имеют волноотбойные стенки.

Описанные геологические процессы возникают также в береговой полосе инженерных гидротехнических сооружений — водохранилищах, хвостохранилищах, расслохранилищах. Значительные размеры искусственных бассейнов, в отдельных случаях сопоставимые с естественными, обуславливают возникновение волноприбойного фактора. При прогнозировании процессов переработки берегов необходимо исходить из срока службы бассейна. Степень опасности переработки может быть оценена по ширине подзона (табл. 37), выделяемых (по Е. Г. Качугину) в береговой полосе: а) подзона непосредственной угрозы; б) подзона обрушения берега за 20 лет; в) подзона конечной переработки.

Т а б л и ц а 37

Ширина подзоны (по Е. Г. Качугину)

Порода	Ширина от уреза высшего уровня, м		
	1-я подзона	2-я подзона	3-я подзона
Лёсс	60	160	Определяется расчетом (приближенио)
Песок мелкозернистый	20	40	
» среднезернистый	15	30	
Суглинки разные	10	20	
Песок крупнозернистый и галечники	5	10	

Расчеты устойчивости ограждающих дамб должны включать оценку волноприбойного фактора*.

* См., например, Д. Л. Меламут «Гидромеханизация в ирригационном и сельскохозяйственном строительстве». Стройиздат. М., 1967. Б. А. Пыпкин «Вопросы динамики берегов водохранилищ». Киев, Изд-во АН УССР, 1963 г.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ
С ПОДЗЕМНЫМ СТОКОМ

§ 1. Рассолонение глинистых горных пород

Процессы выщелачивания (растворения и выноса) солей из засоленных глинистых пород принято называть рассолонением. Этот процесс всегда сопровождается значительными изменениями физико-механических свойств, а иногда деформациями, частично или полностью нарушающими первоначальную структуру породы. Характер и степень изменения состояния и свойств горных пород в процессе их рассолонения зависят от химического состава и концентрации солей, а также от состава и строения самой породы.

Рассолонение некарбонатизированных пород, засоленных солями щелочных металлов (NaCl , Na_2SO_4 и др.), вызывает распад агрегатов минеральных зерен и соответствующее повышение дисперсности («глинистости») и гидрофильности породы. В карбонатизированных глинистых породах при их рассолонении мелкие частицы (от 0,001 мм и менее) сохраняются в агрегатном состоянии, образуя микроагрегаты различной прочности и размера. Наиболее прочными из них оказываются те, которые скоагулированы двухвалентными катионами (Ca^{2+} и Mg^{2+}), и наименее прочными — при коагуляции одновалентными катионами (Na^+ , K^+).

В глинистых породах со структурными связями в процессе выщелачивания наблюдается значительное снижение показателей сопротивляемости сдвигу и сжатию. В некоторых из них рассолонение сопровождается длительно протекающими и последовательно нарастающими дополнительными деформациями уплотнения (осадками). Данное явление получило наименование «скрытой» просадочности (Л. Н. Ломизе, Н. А. Кланатовская). По некоторым данным «скрытая» просадочность обнаруживается при содержании в породе гипса в количестве до 14%, а при смешанном типе засоления — при содержании солей в 2,5%. Скрытая просадочность наиболее характерна для макропористых глинистых пород.

Рассолонение иногда приводит к выносу коллоидальных и тонкообломочных минеральных частиц породы (явление коллоидной и механической суффозии). По исследованиям М. Н. Терлецкой, лёссовидные породы в районе одной ирригационной системы Грузинской ССР с содержанием гипса свыше 10% и с пористостью выше 40% являются суффозионно неустойчивыми. При меньшем содержании гипса и при более низких значениях пористости они обычно суффозионно стойки.

Коллоидная и механическая суффозия усложняют процесс рассолонения породы, нарушают плавность хода уплотнения (осадки) и изменений физико-механических свойств пород. В не-

которых случаях она приводит к полному прекращению фильтрации вследствие закупорки пор и трещин осевшей породой. Рассолонение суффозионно-стойких пород сопровождается более плавными изменениями их состояния и свойств.

В рассмотренных выше случаях выщелачивание засоленных пород происходит в условиях фильтрации подземных вод. Такой процесс принято называть *фильтрационным выщелачиванием*. Но процессы выщелачивания происходят также в толщах практически водонепроницаемых пород *диффузионным* путем. По лабораторным исследованиям В. А. Приклонского и Н. А. Окниной, диффузионное выщелачивание образцов хвалыньских глин приводит к почти полному выносу хлоридов и значительной части сульфатов уже в течение 87—126 сут. При этом наблюдается:

а) рассолонение в первую очередь за счет выноса легкорастворимого хлористого натрия;

б) рассолонение с замещением в поглощающем комплексе натрия на кальций;

в) увеличение емкости поглощения на 4,6—41,0%;

г) увеличение дисперсности («глинистости»);

д) изменение пластических свойств;

е) увеличение пористости образцов на 3,3—21,3% в результате набухания;

ж) уменьшение прочности влажных образцов на 65,2—90,7% (испытания конусом Ребиндера);

з) уменьшение прочности при раздавливании воздушно-сухих образцов на 41,0—60,2%.

Диффузионное выщелачивание глинистых пород протекает особенно интенсивно, когда оно сочетается с фильтрационным. Это имеет место в том случае, когда глинистая порода трещиновата или же переслаивается водопроницаемыми песчано-пылеватými прослоями, по которым происходит заметное перемещение (фильтрация) подземных вод.

§ 2. Карст и сопутствующие ему явления

Некоторые твердые горные породы (известняки, доломиты, гипсы, каменная соль и др.) отличаются повышенной растворимостью в воде. Благодаря этому в зонах активной циркуляции подземных вод наблюдается развитие пещер, каналов и других крупных подземных полостей, а также расширение трещин и увеличение размеров пор. Эти явления, развивающиеся в растворимых породах, объединяют понятием карст. В зависимости от характера карстующейся породы различают карбонатный, гипсовый и соляной карсты.

Карстовые явления коренным образом изменяют условия стока атмосферных осадков и внешних талых вод, а также обстановку циркуляции подземных вод. Поверхностные воды и осадки

часто полностью поглощаются карстовыми колодцами и воронками. Воды закарстованных толщ, циркулирующие через системы карстовых полостей, создают постоянную угрозу затопления подземных выработок, прорывов подземных вод и пливунов. Деформации карстовых полостей нарушают нормальные условия залегания вышележащих толщ пород. Когда в составе последних развиты полезные ископаемые (например, угольные пласты), они вызывают резкие местные нарушения гипсометрии полезного ископаемого, разубоживание его и т. д.

Как показали исследования Н. В. Родионова, Д. С. Соколова и др., большое влияние на развитие карста оказывают состав и строение растворимых пород. Так, например, при содержании глинистых минералов свыше 10—15% растворимость карбонатов снижается; чистые известняки растворимы и карстуются значительно легче. Структура породы влияет на характер и формы карстового процесса. При однородной структуре и трещиноватости карст развивается более или менее равномерно во всей карстующейся толще. Это приводит к развитию мелкой равномерно распределенной пустотности (кавернозности). При неоднородном строении и неравномерной трещиноватости пород в зонах ее повышенной пустотности и трещиноватости возникают крупные карстовые полости.

Растворимость горных пород в значительной мере определяется растворяющей способностью природных вод, которая повышается при увеличении концентрации углекислоты и ионов SO_4^{2-} и Cl^- .

В областях и зонах интенсивного поступления инфильтрационных и инфлюационных вод развитие карста идет наиболее быстро. Высокая активность карстового процесса наблюдается и в зонах повышенных скоростей боковой фильтрации в направлении к дренам. Повышение активности карста на придолинных склонах связано иногда со значительной раскрытостью трещин в этих местах (явление «бортовой» трещиноватости горных пород). Зоны разрывных тектонических нарушений также являются зонами повышенной активности карстового процесса.

Карст широко распространен на территории СССР — он встречается почти во всех областях развития карбонатных пород как в составе платформенного чехла Русской и Сибирской платформ, так и в составе складчатого комплекса горных районов. Ограничено развитие карбонатного карста в областях сильно метаморфизованных докембрийских толщ, а также в карбонатных флишевых формациях. Это связано с затруднительными условиями циркуляции подземных вод в них.

Известно, что гипс и соли являются высокопластичными породами. Благодаря этому при деформациях они обычно не дают трещин, доступных для проникновения и циркуляции подземных вод. По этой причине, несмотря на большую растворимость этих пород, гипсовый и соляной карст развиты значительно реже, чем карбонатный.

По Д. С. Соколову, гипсовый карст развивается только в районах положительных тектонических структур, в которых, по-видимому, создаются наиболее благоприятные условия для раскрытия трещин.

Довольно широко известны карстовые формы в районах распространения меловых пород Русской платформы (меловой карст).

При инженерно-геологической оценке условий возведения наземных сооружений учитывается густота распределения карстовых воронок и закономерность их приуроченности к определенным элементам рельефа и геологической структуре, геологический (по возможности абсолютный) возраст карстовых форм, степень активности карста и устойчивости закарстованной территории.

Густота распределения карстовых воронок оценивается числом последних на единицу площади или же коэффициентом закарстованности, численно равным отношению суммарной площади карстовых воронок к площади местности, на которой они зафиксированы.

Время образования карста устанавливается обычными методами стратиграфических сопоставлений карстующихся пород, пород, участвующих в карстовых деформациях и выполняющих карстовые полости и воронки. Иногда помогают данные спорово-пыльцевых анализов, а также свидетельства местных жителей.

О степени активности карстового процесса в настоящее время можно судить по величине химического стока подземных вод с территории карстующихся пород, т. е. по количеству растворимых солей, выносимых подземными водами за определенное время, например за тысячелетие. Количественно активность карстового процесса может быть выражена отношением (в %) объема растворенной породы, выносимой подземными водами из этого массива к общему объему карстующихся пород в определенное время. Это отношение Н. В. Родионов назвал степенью, или показателем активности карстового процесса:

$$A = \frac{v}{V} 100 \%,$$

где A — показатель активности карстового процесса;

v — объем растворенной породы за 1000 лет;

V — объем карстующегося массива.

По исследованиям Н. В. Родионова, показатель современной активности карбонатного карстового процесса составляет: для горной части Крыма — 0,08% за тысячелетие; для Сочи́нского района — 0,49% за тысячелетие; для одного из засушливых районов Средней Азии — 0,0001% за тысячелетие; для мергельно-меловых пород бассейна р. Северский Донец — 0,27% за тысячелетие.

Для гипсов (Башкирская АССР) показатель современной активности карста определен Г. Г. Скворцовым в 1,67%.

Степень устойчивости закарстованной территории устанавливается по совокупности данных о карстовом процессе и формах карста. В некоторых случаях она может быть определена по частоте появления карстовых провалов на единице площади, например на 1 км².

Как показывают наблюдения, степень закарстованности и степень трещиноватости карстующихся пород тесно связаны друг с другом. Обычно подземные карстовые полости в известняках проходят по трещинам в виде систем водопроводящих каналов и пустот размером от мелких каверн до крупных пещер объемом в несколько тысяч кубометров. Наиболее часто карстовые полости развиваются по системам крутопадающих трещин, особенно в местах их пересечения с трещинами других систем.

Подземные формы карста распространены в массиве обычно крайне неравномерно. Величина открытой закарстованности уменьшается с удалением от придолинных склонов в область водораздельных пространств. Но даже в пределах одних и тех же глубин и одной и той же части склона или водораздела открытая закарстованность крайне неравномерна. Наибольшая закарстованность приурочивается к мощным зонам дробления крупных тектонических нарушений. С удалением от этих зон закарстованность массива снижается.

Неравномерная закарстованность приводит к тому, что развитие депрессионной воронки вокруг водопонижающих установок протекает также крайне неравномерно. Так, по данным Северо-Уральского бокситового месторождения, на северном фланге шахты 7, обращенном к долине реки, напоры по отношению к нижнему горизонту достигают (6—8) 10^5 Па, а на южном составляют всего лишь (1,5—2,0) 10^5 Па. Высокие остаточные гидростатические напоры на отдельных участках явились причиной многократных прорывов подземных вод. Последние обычно сопровождались интенсивным размывом глинистого материала карстовых полостей.

В некоторых случаях суффозионные процессы достигали поверхности в виде суффозионных воронок.

В развитии подземных форм карста наблюдается вертикальная зональность. По Д. С. Соколову, она соответствует следующим зонам циркуляции подземных вод:

I — зона аэрации, где наблюдается преимущественно вертикальная фильтрация, приводящая к формированию вертикальных карстовых каналов и пустот;

II — зона сезонного колебания уровня подземных вод, в которой наблюдается развитие полостей и каналов как вертикальных, так и горизонтальных;

III — зона полного насыщения, находящаяся в сфере дренирующего действия гидрографической сети. Поток подземных вод направлен в сторону долин, а зона, где происходит циркуляция воды, захватывает подрусловый поток и сферу разгрузки подзем-

ных вод (IIIa). Такой характер движения подземных вод обуславливает развитие карста в дне долины и по берегам;

IV — зона глубокой циркуляции, где движение подземных вод замедленное и поэтому выщелачивание в этой зоне происходит медленно.

Подземные формы карста можно изучать с помощью буровых работ, некоторых методов опытных и стационарных гидрогеологических исследований и геофизическими методами разведки.

По кернам буровых скважин изучаются трещиноватость и общая пустотность пород, степень их разрушенности (размеры обломков породы, выход керна), изменения состава и состояния выветрелости пород, характер и состав выполнения трещин, пор и каверн. По этим исследованиям удается установить зоны глубин с различной закарстованностью и разрушенностью пород.

Обычно наблюдается связь между степенью закарстованности породы и ее фильтрационной характеристикой и водопоглощающей способностью. Путем производства опытных нагнетаний и откачек, а также систематических наблюдений за расходом промысловой жидкости в процессе проходки скважин получают данные о степени трещиноватости и закарстованности пород.

Имеются интересные опыты определения степени закарстованности пород по объему вытекающей воды при сработке уровня водоносного горизонта (О. Б. Скиргелло), путем наблюдений за скоростью восстановления уровня водоносного горизонта (Л. И. Смирнов), путем построения интегральных кривых повторяемости значений показателя водопроницаемости пород (Л. И. Коярова) и по величинам расхода реки до входа в предел закарстованного массива и по выходе из него.

В настоящее время для изучения карста привлекаются геофизические методы, в частности, электроразведка (электропрофилирование, электрокаротаж) и сейсморазведка.

§ 3. Фильтрационное разрушение горных пород

В зонах выклинивания подземных вод нередко можно наблюдать вынос мелких и мельчайших частиц пород, оплывание и некоторые другие формы разрушения горных пород. Эти явления составляют подгруппу форм фильтрационного разрушения горных пород.

Породы, подверженные фильтрационному разрушению, называются фильтрационно неустойчивыми. К ним относятся пески, чаще всего мелко- и тонкозернистые, слюдистые, особенно рыхлосложенные, а также некоторые пылевато-глинистые неводостойкие породы.

Сопrotивляемость пород фильтрационному разрушению, т. е. их фильтрационная стойкость, зависит от гидравлических характеристик потока подземных вод и в первую очередь от градиента фильтрации и скорости фильтрации. Фильтрационное разрушение начинается при некоторых критических их значениях.

В раздельнозернистых породах, где частицы (зерна) находятся в простом соприкосновении (сцепление $c = 0$), фильтрационное разрушение начинается при переходе ламинарного режима циркуляции в порых породы в турбулентный. Критические скорости и критические градиенты, при которых происходит такой переход, зависят прежде всего от диаметра пор и размеров зерен.

Фильтрационное разрушение глинистых пород затрудняется силами прилипания (сцепления) глинистых частиц и малыми размерами пор, поэтому разрушению подвержены лишь макроструктурные лёссовидные породы и лёссы, как известно, пронизанные крупными трещинами и порами и обладающие неводостойкой связностью частиц.

В природных условиях можно наблюдать два вида фильтрационного разрушения горных пород: оплывание и коллоидно-механическую суффозию.

Оплывание пород наблюдается при больших выходных скоростях фильтрации подземных вод из толщ фильтрационно неустойчивых отложений. Оплывание происходит под действием фильтрационного давления потока подземных вод. Силы сопротивления (внутреннего трения, отчасти сцепления) в этом случае оказываются недостаточными для преодоления фильтрационного давления, численно равного произведению удельной массы фильтрующейся жидкости (Δ_0) на градиент фильтрации потока, т. е. $R_\phi = \Delta_0 T$.

Оплывание чаще всего наблюдается при выходе на поверхность восходящих источников. Оплывная порода растекается наподобие вязкой жидкости и затем стабилизируется. При значительном содержании медленно осаждающихся частиц (глины, тонкого песка и пыли) стабилизация протекает медленно. Оплывание часто является причиной нарушения общей неустойчивости склона и возникновения обрушений, небольших обвалов и оползней.

Коллоидно-механической суффозией называют вынос фильтрационным потоком мелких и мельчайших (коллоидных) частиц породы. Данное явление можно называть также внутренним размывом породы.

Суффозия наблюдается в трех основных случаях.

1. Фильтрационно неустойчивая порода трещиновата, крупнопориста и скорости фильтрации по трещинам и крупным порам превышают критические скорости ($I_{\text{крит}}$). Фильтрационное разрушение в данных условиях начинается с растворения солей, инкрустирующих трещины и поры породы. Затем происходит постепенное расширение трещин и увеличение размеров пор породы путем размыва их стенок. В результате образуются псевдокарстовые полости.

2. Фильтрационно неустойчивая порода контактирует с водопроницаемой породой — галечниками, твердыми трещиноватыми или закарстованными породами; размыв происходит на контакте пород (так называемая контактовая суффозия).

Контактная суффозия может происходить и на значительных глубинах от поверхности земли, когда скорости или градиенты продольной фильтрации в хорошо водопроницаемом слое превышают их критические значения.

По исследованиям В. С. Истоминой, контактовая суффозия глинистых пород наблюдается при продольных градиентах фильтрации $1 \leq 0,6-0,8$; большое значение на интенсивность процесса оказывают плотность породы, ее водонасыщенность и водостойкость.

3. Фильтрационные породы залегают на приречных склонах, спад уровня воды в реке после паводка происходит быстро. Возникающие при этом градиенты и скорости фильтрации подпертого водоносного горизонта оказываются нередко выше критических.

ГЛАВА 13

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПОВЕРХНОСТНЫМ И ПОДЗЕМНЫМ СТОКОМ

§ 1. Оползни

Оползни — широко распространенный тип разрушения природных склонов.

Главная кинематическая особенность оползней — скользящее перемещение оторвавшихся от массива склона горных пород. Основными условиями отрыва пород от массива и их перемещения вниз по склону являются:

1) ослабление сил прочности массива пород склона в процессе выветривания в результате увлажнения, фильтрационного и осмотического выщелачивания, а иногда и фильтрационного разрушения;

2) повышение гидравлического уклона и скоростей фильтрации подземных вод, происходящее при резком спаде паводкового уровня реки или при подъеме уровня подземных вод после обильных дождей и при снеготаянии;

3) подрезка основания склона речным подмывом или волнобоем, приводящая к недопустимому для данных условий увеличению крутизны склона и потери упора у основания склона;

4) перегрузка склона делювиальными, иногда пролювиальными накоплениями.

Оползни вызывают существенные изменения в рельефе и геологическом строении склона. Они выполаживают и значительно усложняют строение поверхности склона. На ней появляется циркообразное понижение — оползневой цирк, сверху ограниченный более или менее вертикальной стенкой от-

рыва 2, а с бортов — ступенчато расположенными трещинами скольжения 6 (рис. 52 и рис. 53). Передний край оползня, его подножие, обычно представляет собой гряды в а л о в 4, возникших путем выдавливания пород основания склона сместившимися массами. Трещины бороздят также верхний край оползня, центральные части и валы выпирания. Трещины 1 верхнего края обычно раскрыты и являются трещинами растяжения. Располагаются обычно концентрически, полукругами, причем

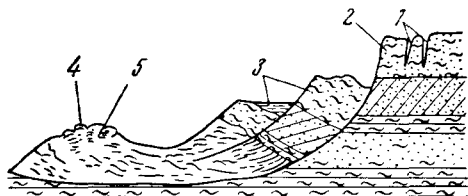


Рис. 52. Схема строения оползневого цирка в разрезе

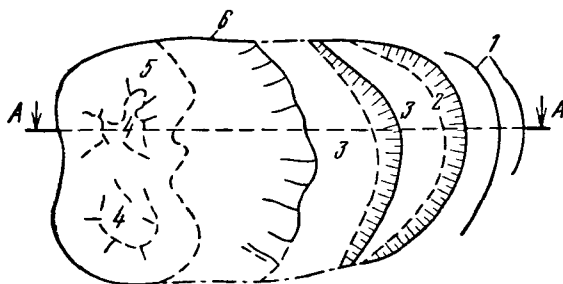


Рис. 53. Схема строения оползневого цирка в плане

нижнее плечо трещин опущено по сравнению с верхним. В нижней части склона на грядах выпирания обычно получают развитие трещины вспучивания 5. В центральной части оползня наблюдаются закрытые трещины смятия, а также открытые трещины растяжения, возникающие при относительно значительных подвижках нижней части оползня.

В целом поверхность оползня обычно изобилует буграми, западинами (обычно заболоченными). Деревья, произрастающие на оползневом склоне, принимают наклонное положение («пьяный лес»), а на древних оползнях — саблевидную форму.

Горные породы, участвующие в оползневых смещениях, образуют тело оползня. Снизу оно ограничено поверхностью скольжения, которая обнаруживается по зеркалам скольжения, а также бороздкам и штрихам скольжения. На начальных стадиях оползневого процесса обычно наблюдаются микроскольжения, распределенные более или менее равномерно во всей перенапряженной зоне массива склона. Они создают картину плавного, пластического деформирования склона в скрытую фазу оползневого процесса. Со временем наблюдается кон-

центрация микроскольжений в некоторой зоне массива склона и затем в общей поверхности смещения, часто называемой динамической поверхностью скольжения. Завершается процесс образованием трещин-заколов и быстрыми более или менее общими подвижками всего оползневого тела.

Описанная картина развития оползневого процесса обычно наблюдается в береговых склонах, сложенных несцементированными породами, примерно однородного или горизонтального

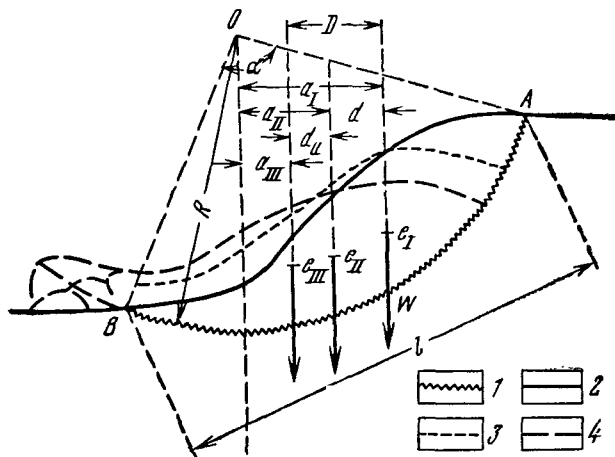


Рис. 54. Схема характерных (переломных) положений оползня при его смещении по круглоцилиндрической поверхности скольжения (по Е. П. Емельяновой)

1 — поверхность скольжения; 2 — поверхность земли до смещения оползня; 3 — положение тела оползня при достижении им предельного состояния, соответствующего уменьшившемуся в процессе смещения сопротивлению сдвигу; 4 — положение тела оползня после прекращения движения

слоистого сложения. Поверхность скольжения в этом случае состоит из верхней, почти вертикальной, и нижней сложнокриволинейной частей. В массивах пород с незначительным сцеплением ($c \neq 0$) и работающих в основном силами внутреннего трения, очертание нижней части поверхности скольжения приближается к логарифмической спирали (исследования С. С. Голушкевича и В. В. Соколовского). На рис. 54 представлена схема положений оползня при смещении от круглоцилиндрической поверхности скольжения. Следует отметить, что неоднородность и анизотропность физических характеристик пород склона осложняют математически правильную конфигурацию поверхности скольжения.

Главной фазе оползневых подвижек обычно предшествуют медленно протекающие пластические деформации. Нередко они сопровождают весь оползневой процесс. В этом случае имеют дело с особым типом деформаций, в которых скольжения сочета-

ются с пластическим течением оползневого тела. Имеются и такие оползни, которые протекают одновременно с явлениями оплывания и суффозии пород. В том и другом случае имеют дело со сложными пластическими и суффозионными оползнями и оползнями-оплывинами. В них поверхность скольжения замещена зоной интенсивного пластического течения или оплывания пород.

Кроме обычных (простых) и сложных оползней следует различать так называемые простые и сложные оскользны. Они наблюдаются в массивах пород прочных и средней прочности и отличающихся резко выраженной анизотропией физических характеристик. Скольжение оползневого тела при оскользнях происходит по поверхностям ослабления, падающим в сторону откоса и подрезанным в его основании речным подмывом, морской абразией или же искусственной выемкой. Такой тип деформации более характерен для массивов пород высокой прочности. В анизотропных массивах, сильно ослабленных процессами выветривания, повышенной трещиноватостью и т. д., деформация склона начинается обычно раньше момента полной или частичной подрезки поверхностей ослабления. В этом случае поверхность скольжения совпадает с поверхностями ослабления пород только в верхней своей части. Нижняя часть поверхности скольжения пересекает поверхностное ослабление пород под различными углами и выходит в основание откоса в восходящем направлении. Такого рода деформации относят к типу сложных оскользней.

В рассмотренных выше случаях в оползневых подвижках участвуют породы «коренного» массива склона. В природе известны многочисленные случаи оползания поверхностных образований по «коренным» породам. Таковы поверхностные оползни склонов и ложбин, вдавленных в поверхность склонов. Поверхностные оползни ложбин иначе называют глетчеровидными, или оползнями-потоками.

Уровень выхода поверхности (или зоны) скольжения тела оползня на земную поверхность является базисным уровнем оползня. На склонах большого протяжения и сложного литологического состава (чередование пород различной жесткости, пластичности и водопроницаемости) нередко можно наблюдать несколько базисных уровней оползня. Они обычно соответствуют отметкам выходов прочных пород на поверхность склона, сверху перекрытых пластичными глинистыми породами, являющимися водопором для вышележащего водоносного горизонта. В таких случаях на склонах появляются многоярусные оползни. Каждый ярус их привязан к своему базисному уровню — обычно выступам прочных горных пород.

От многоярусных оползней следует отличать многоступенчатые оползни, возникающие путем последовательного откола оползневых блоков от массива склона по мере смещения ранее отколывшихся блоков и размыва яруса оползня. Очевидно, что наиболее

древними из оползневых ступеней являются те, которые находятся в «языке» оползня, а наиболее молодыми те, которые занимают высокое гипсометрическое положение и прилегают к стенке отрыва оползневого тела.

Большой материальный ущерб, который приносят оползни, разрушая сооружения и транспортные пути, заставляют особенно серьезно подходить к оценке степени устойчивости склонов и к противооползневой организации территории склона.

Строительство на склоне, пораженном оползнями, допускается в случаях, когда нет возможности перенести строительную площадку или трассу дороги на другой, вполне устойчивый участок склона. Для предотвращения разрушения поверхности склона и сооружений, воздвигнутых или намеченных к строительству, осуществляется сложный комплекс противооползневых мероприятий и работ. В их состав входят прежде всего профилактические мероприятия; организация поверхностного стока (перехват и быстрый сброс внешних талых и дождевых вод по ливнестокам); сохранение и восстановление древесно-кустарниковой и травянистой растительности; запрещение производства взрывных работ и ограничение скоростей передвижения транспорта; запрещение подрезок склона, производства подсыпок на нем и некоторые другие.

К специальным противооползневым работам относится: проведение дренажных галерей, колодцев, взаимодействующих скважин и других сооружений для перехвата подземных вод; планировочные работы — съем оползших масс с целью разгрузки склона, устройство берм; искусственное упрочнение пород — цементация, силикатизация, электрохимическое закрепление, сооружение удерживающих устройств; ограждение оснований склона от подмыва и абразии.

§ 2. Болота

Из геологических явлений, связанных с подземными и поверхностными водами, болота занимают особое положение. На болотах происходят процессы накопления очень своеобразных осадков, в существенной мере состоящих из растительных остатков — торфа, сапропеля, заторфованных и сапропелевых илов, глин и песков, рыхлосложенных и поэтому сильно сжимаемых под действием даже собственной массы.

Болота являются аккумуляторами больших запасов атмосферных осадков, талых внешних и паводковых вод, а иногда и грунтовых вод, выклинивающихся в основаниях прилегающих склонов. Поэтому они могут служить дополнительным источником обводнения месторождений полезных ископаемых.

По условиям питания различают низинные болота (рис. 55, а), верховые болота атмосферного питания (рис. 55, г) и промежуточные болота смешанного питания (рис. 55, б, в). Низинные болота

располагаются в пониженных местах рельефа местности, которые когда-то были открытыми водоемами или периодически (во время весеннего паводка) затоплялись водами. Высота уровня воды в болотных накоплениях почти не опускается ниже поверхности болот. Среди низинных болот различаются трясинные, топяные и стоячие. В трясинных болотах торфянистая масса плавает на воде или же лежит на сапропелевом иле. В топяных болотах растительные накопления лежат на дне, а уровень воды располагается выше

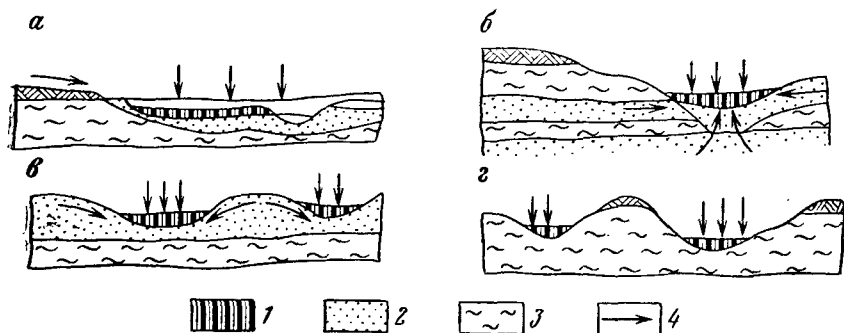


Рис. 55. Схема питания болот (по А. А. Маккавееву):

1 — торф, 2 — песок, 3 — водоупорные породы, 4 — источники питания болот

торфяного слоя. Стоячие болота характеризуются тем, что в них поверхность торфяной залежи находится несколько выше уровня воды.

Верховые болота располагаются на возвышенных, чаще всего плоских междуречных пространствах. Эти болота питаются в основном за счет атмосферных осадков и талых внешних вод, лишенных питательных минеральных веществ. Поэтому условия развития растительности и накопления торфа неблагоприятны и в силу этого мощность торфяных залежей незначительна. Промежуточные болота имеют признаки низинных и верховых болот.

При инженерно-геологическом изучении выясняют тип болот, геологическое строение и гидрогеологическую обстановку развития их; строение минерального дна впадины, занятой болотом; условия питания болота; мощность, строение, состояние и водно-физические свойства болотных накоплений.

Мелиорация и благоустройство заболоченных пространств и болот в основном заключаются в их осушении главным образом с помощью открытых канав. В зависимости от конкретных условий питания осуществляются также работы по перехвату и отводу поверхностных вод, поступающих с прилегающих более возвышенных частей местности, ограждению от паводковых вод, снижению статических уровней подземных вод и др.

Наблюдения показывают, что по мере осушения поверхность болот оседает.

В трясиновых болотах, где под слоем торфа находится разжиженная торфяная масса с водой, обычные приемы осушения оказываются непригодными. Очевидно, что на таких болотах производство каких-либо работ совершенно невозможно. Поэтому в необходимых случаях (например, при устройстве насыпей дорог) прибегают к засыпке таких болот. На неглубоких болотах низинного типа, а также на заболоченных с поверхности участках рекомендуется делать лишь сьем наиболее рыхлого верхнего слоя. Подсыпка насыпи в этом случае производится по мере уплотнения (осадки) основания или же непосредственно на минеральное дно.

ГЛАВА 14

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ С ДЕЙСТВИЕМ АТМОСФЕРЫ И ПОДЗЕМНЫМ СТОКОМ

§ 1. Выветривание

При выветривании горных пород наблюдаются следующие процессы:

1) дробление (механическая дезинтеграция) горной породы под влиянием суточных и сезонных колебаний температуры (температурное выветривание), замерзания и оттаивания воды, заключенной в порах и трещинах пород (морозное выветривание), и объемных деформаций некоторых минералов при их гидратации и некоторых других процессах (кристаллизационное растрескивание). Дробление начинается с вскрытия и расширения существующих волосных и скрытых трещин и завершается интенсивным развитием трещин выветривания. Мощность зоны механического дробления дезинтеграции изменяется в зависимости от континентальности климата от 1—2 до 7—10 м;

2) химическое и физико-химическое разложение минералов и образование новых минералов — продуктов выветривания при процессах окисления, гидратации, гидролиза и рассмотренных выше процессах фильтрационного и осмотического выщелачивания.

Окислению подвержены органические вещества, закисные соединения железа и марганца, сульфиды и некоторые другие минералы. Глубина зоны окисления горных пород и минералов в горных районах составляет 200—300 м, а на отдельных участках распространяется до 1 км и даже глубже; в равнинных заболоченных пространствах нижняя граница зоны окисления почти совпадает с поверхностью земли.

Для силикатов и алюмосиликатов наиболее характерны процессы гидролиза и гидратации, которые сопровождаются глубокой

перестройкой кристаллохимической структуры минерала и образованием вторичных глинистых минералов с характерными для них кристаллическими решетками типа каолина и монтмориллонита (рис. 56). Для продуктов гидролиза и гидратации силикатов и алюмосиликатов свойственны коллоидно-дисперсное состояние, высокая гидрофильность и пластичность. Их примазки на поверхностях существовавших и вновь возникших в процессе выветривания трещин резко снижают силы внутреннего трения горных пород в массиве (смазочный эффект глинистых примазок).

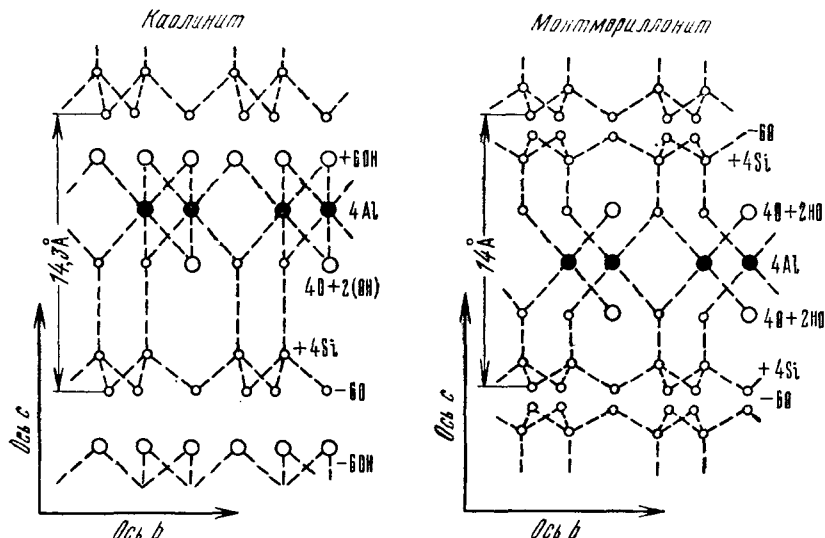


Рис. 56. Структуры каолинита с неподвижной решеткой и монтмориллонита с подвижной решеткой

Толщи горных пород, в той или иной мере захваченные процессами выветривания, образуют кору выветривания. По признаку преобладания физического или химического выветривания различают физический и химический типы коры выветривания. Первый из них характерен для арктических и пустынных (аридных) областей; второй — для областей избыточного увлажнения, особенно для тропических зон.

По времени образования различают современную и древнюю кору выветривания. Древняя кора выветривания в отличие от современной погребена под толщей позднейших напластований. Примером ее может служить кора выветривания пород докембрийского фундамента Русской платформы. В пределах железорудного бассейна КМА с нею связаны крупнейшие месторождения богатых железных руд, возникшие в результате выветривания железистых кварцитов.

По морфологическим признакам выделяются: площадной тип коры выветривания, распространенный на значительной площади, и линейный, глубоко вклинивающийся в толщу материнских пород преимущественно по тектонически ослабленным зонам.

Вследствие изменений физических условий и гидрогеологической обстановки выветривания с глубиной наблюдается вертикальная зональность коры выветривания. Отдельные зоны коры выветривания отличаются друг от друга по степени раздробленности (механической дезинтеграции) или же изменений химико-минерального состава породы. Н. В. Коломенский [30] в коре выветривания твердых горных пород для инженерно-геологических целей рекомендует выделять монолитную, глыбовую, мелко-обломочную, или щебенистую, зоны и зону полного дробления.

1. В монолитной зоне породы не имеют следов механической дезинтеграции (раздробленности). Отмечается некоторое ослабление прочности на сжатие и снижение сопротивления сдвигу, обусловленное процессами выветривания — нарушениями истинного контакта на плоскостях скрытой трещиноватости пород и заменой их пластицизованными контактами и контактами с глинистыми примазками.

2. В глыбовой зоне появляются трещины выветривания, разбивающие породу на отдельные глыбы; расширяются ранее имевшиеся трещины. Стенки трещины имеют примазку, а сами трещины частично или полностью заполнены занесенными сверху продуктами выветривания или песчано-глинистым материалом. Снизу вверх размер глыб постепенно уменьшается от нескольких десятков дециметров до 1 дм.

Породы глыбовой зоны обладают высокой фильтрационной способностью (порядка сотен метров в сутки); прочность пород в массиве определяется только силами внутреннего трения.

3. В мелкообломочной, или щебенистой (по И. В. Попову), зоне внешний облик породы не сохраняет общих черт с материнской породой. Вся порода состоит из мелких кусков от 2—3 дм и менее и даже отдельных зерен. Куски материнской породы часто рассыпаются от прикосновения. Они в значительной мере состоят из сильно выветрелых минералов материнской породы или продуктов полного их разложения. Фильтрационная способность пород данной зоны по сравнению с глыбовой зоной значительно снижается (до нескольких метров или сантиметров в сутки). Продолжают снижаться показатели сопротивления сжатию и сдвигу.

4. В зоне полного дробления порода отличается высокой степенью дробления. В основном она состоит из минералов коры выветривания; первичные минералы тонко раздроблены и являются примесью к вторичным. Коэффициент фильтрации снижается до тысячных долей сантиметра в сутки. Сжимаемость резко возрастает, сопротивление сдвигу уменьшается.

Порода приобретает связность, пластичность и способность набухать в присутствии воды.

Скорость выветривания разных пород различна. В некоторых случаях процессы выветривания протекают очень быстро, особенно в глинистых породах. Так, по Н. В. Коломенскому, свежие майкопские глины в откосе одного из опытных участков выветривались на значительную глубину и превратились в дресву в течение нескольких месяцев, а раздробление тех же глин на глубину 5—10 см потребовало всего лишь нескольких дней. Апшеронские глины и песчаники выветриваются и совершенно изменяют свои свойства в течение одного месяца на глубину 6—8 см; в течение пяти месяцев — на глубину 60—70 см; в течение 1,5 лет — до 3 м (наблюдения С. В. Дроздова).

Высокая скорость процессов выветривания характерна также для углисто-глинистых пород — углистых аргиллитов, алевролитов и глин, особенно пиритизированных их разновидностей. За счет выветривания наблюдается заметное сокращение сроков длительной устойчивости откосов карьеров, сложенных указанными породами, особенно в тех случаях, когда не выполняется работа по предварительному осушению месторождения.

При инженерно-геологическом изучении процессов выветривания выясняется:

- 1) мощность зоны и распространение коры выветривания;
- 2) геолого-петрографические и инженерно-геологические особенности пород по зонам выветривания;
- 3) скорость выветривания пород при вскрытии их горными выработками, котлованами и т. д.;
- 4) изменение интенсивности и характера процессов выветривания пород в зависимости от местных гидрогеологических, климатических и геологических условий залегания, экспозиции склона;
- 5) необходимые мероприятия по защите искусственных обнажений сильно выветривающихся горных пород.

Основными мероприятиями по борьбе с выветриванием горных пород, по Н. В. Коломенскому, являются: 1) устройство защитных покрытий из песка, суглинка и других материалов, а иногда из бетона; 2) пропитывание пород различными веществами — жидким стеклом, гудроном и т. д.; 3) искусственная нейтрализация некоторых активных агентов выветривания путем введения в породу солей, уменьшающих растворимость пород; 4) планировка территории и отвод вод.

§ 2. Мерзлотно-динамические явления

На территориях распространения мощной сезонной мерзлоты и в особенности в областях развития многолетней («вечной») мерзлоты сталкиваются с различного характера деформациями земной поверхности, вызванными замерзанием и оттаиванием воды,

заключенной в горных породах. К ним относятся пучины, гидролакколиты (булгуниахи), наледи, термокарст, течение почв (солифлюкция) и некоторые другие явления. Все они образуют единую группу мерзлотно-динамических явлений.

При оттаивании мерзлых пород происходит резкое изменение строения и физического состояния пород, которое приводит к деформациям в виде осадок и просадок. В условиях склонов оттаившие поверхностные слои испытывают течение (солифлюкция). При этом образуются взбугривания, «террасы», уступы, натeki, борозды и другие характерные формы усложнения поверхности склона в условиях многолетней мерзлоты. Подобного рода явления нередко можно наблюдать в весеннее время также в районах мощной сезонной мерзлоты. Вследствие ничтожного сопротивления скольжению оттаивших глинистых накоплений процессы солифлюкции нередко протекают очень интенсивно, особенно в том случае, когда эти накопления подстилаются сильно льдистыми породами или ископаемым льдом.

В процессе промерзания наблюдается значительное увеличение первоначального объема породы. Так как водонасыщенность пород и условия подтока воды к замерзающей зоне породы различны, то увеличение объема пород при промерзании протекает крайне неравномерно. В результате на поверхности земли возникают местные поднятия — морозные пучины. Последние появляются в начале зимы и растут до весны (до начала таяния породы), когда на их месте возникает впадина с разжиженной породой. Высота морозных пучин в среднеевропейских областях СССР измеряется несколькими сантиметрами, реже десятками сантиметров.

Под действием напряжений, возникающих при промерзании пород, наблюдается образование «морозобойных» трещин. Одни из них развиваются по мере роста бугров пучения, другие лишь под влиянием неравномерного охлаждения пород, обладающих различными тепло-физическими свойствами. Возникающие при этом напряжения часто оказываются более значительными, чем предел прочности уже смерзшейся породы.

Если после появления первых трещин происходит дальнейшее понижение температуры мерзлого массива пород, в ней возникают поперечные трещины. В результате весь промерзающий массив оказывается разбитым на отдельные полигоны. Трещины возникают также внутри мерзлого массива главным образом в горизонтальном направлении вследствие значительных напряжений при изгибе верхних слоев массива.

Попадающая в вертикальные трещины во время зимних оттепелей и весной вода замерзает с наступлением холодов. Таким образом возникают ледяные клинья. Последние в условиях многолетней мерзлоты являются многолетними образованиями и расширяются («растут») из года в год.

При промерзании деятельного слоя надмерзлотные воды часто оказываются под значительным напором; в этом случае они про-

рываются на поверхность, где замерзают, образуя наледь. Наледи могут образовываться также из межмерзлотных и подмерзлотных вод, выходящих на поверхность в виде источников. Они называются постоянными наледями. Известны наледи, возникающие при промерзании рек, когда на отдельных участках их течения остаются лишь очень узкие проходы, не способные пропустить весь подледный расход реки. Вода на этих участках прорывается через ледяной покров, изливается по поверхности льда и замерзает. Такого рода прорывы речной воды повторяются за зиму несколько раз, в результате чего образуются крупные ледяные бугры. Сила, с которой прорывается вода на этих буграх, бывает настолько велика, что при этом выбрасываются огромные глыбы льда.

Кроме поверхностных известны подземные наледи, образующиеся в толще многолетней мерзлоты. При их образовании вода не способна прорваться на поверхность, а только приподнимает вышележащие толщи пород, образуя бугры. Высота таких бугров в южных районах Сибири достигает 10 м, а в северных — 30 м. Размер их в поперечнике измеряется многими десятками метров. Внутри таких бугров обычно имеется куполовидная залежь льда (гидролакколит), иногда с полостью, заполненной водой. Такие бугры в Сибири называют булгуниями.

На обширных пространствах многолетней мерзлоты в ее толще можно встретить значительные по мощности (до нескольких десятков метров) и занимающие большие пространства (до многих квадратных километров) пласты и линзы ископаемого льда. Они образовались при замерзании озер или путем захоронения льдов ледников. Нередко они чередуются или покрываются прослойками торфа, а иногда и толщами суглинков, глин и песков.

При нарушении термического режима таких залежей возникают подземные полости, провал сводов которых вызывает появление на поверхности земли термокарстовых воронок. Часто такие провалы заполнены водой. Они известны как термокарстовые озера.

ГЛАВА 15.

ЭНДОГЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

§ 1. Тектонические процессы

Различного рода движения земной коры, в результате которых изменяется высотное положение поверхности слагающих ее горных пород, а также условия и формы их залегания, называются тектоническими движениями. Новые формы и условия залегания горных пород, а также новые формы рельефа, возникающие в результате тектонических движений земной коры, также называются тектоническими.

Различают две основные группы тектонических движений земной коры: колебательные (иначе эпейрогенические) и дислокационные. Колебательными движениями (медленными вековыми поднятиями и опусканиями) охвачена вся поверхность Земли — материки и дно Мирового океана, но темп и направленность их могут быть различными даже в соседних участках земной коры. Движениями единого направления обычно охватываются обширные площади и поэтому (а также в силу малых скоростей поднятий и опусканий) они не отражаются на устойчивости и долговечности сооружений. Однако колебательные движения за историческое время могут изменить высотное положение местности, вызвать обмеление одних участков морского побережья и затопление или углубление других, изменить положение базисов дренажа подземных вод. Эти движения следует учитывать при проектировании инженерных сооружений, рассчитанных на долгий срок службы, а также при составлении программ региональных инженерно-геологических исследований.

В отличие от колебательных дислокационные движения всегда сопровождаются нарушением первоначального залегания горных пород — пликативными (складчатыми) или дизъюнктивными (разрывными) нарушениями, либо теми и другими вместе. Дислокационные нарушения приурочиваются к относительно узким, чаще всего линейно вытянутым зонам и поясам земной коры и, кроме того, носят эпизодический (во времени) характер: периоды интенсивных дислокационных движений чередуются периодами относительного покоя, когда имеют место только спокойные колебательные движения. Нередко дислокационные движения совершаются в форме мгновенного сдвига, кручения и т. д. С ними связаны мощные подземные толчки — землетрясения.

Дислокационным движениям предшествует длительный, медленно протекающий процесс перераспределения напряжений в земной коре, когда в ее толще появляются очаги и зоны повышенного и пониженного напряжений, области сжатия и растяжения и т. д. Лишь тогда, когда эти напряжения превысят прочность горных пород и их массивов, начинаются интенсивные дислокационные движения, вначале в форме пластического деформирования; по мере дальнейшего роста напряжений они сменяются деформациями, сопровождающимися нарушением сплошности (разрывные дислокации). Неуравновешенность напряженного состояния земной коры в тектонически активных областях является причиной весьма сложной обстановки распределения сил горного давления в массивах горных пород.

Массивы горных пород, обладающие внутренней неоднородностью и анизотропностью физических свойств, характеризуются неоднородным полем сопротивления $\sigma_c(x, y, z, \alpha)$, чему должно соответствовать неоднородное поле напряжений $\sigma_n(x, y, z, \alpha)$. Иными словами, неуравновешенное напряженное состояние массивов горных пород является структурным, отвечающим внутрен-

ней геологической структуре массива. Кроме того, в условиях пересеченной местности имеет влияние строение земной поверхности. В том случае, когда источники внутренних напряжений и основные факторы структурности естественного напряженного состояния массива приобретают региональный характер, возникают напряжения и вызываемые ими деформации регионального характера. Они известны как тектонические напряжения и деформации.

При горных работах сталкиваются с явлениями напряженного состояния массивов горных пород как местного (локального), так и регионального (тектонического) характера. Последние в горном деле известны как «остаточные» тектонические напряжения. Их влияние на процессы и явления, происходящие в окрестностях горных выработок, может быть значительным, особенно в массивах молодых, тектонически активных горно-складчатых сооружений.

Интенсивность тектонических движений на территории СССР различна в разных геотектонических областях. Естественно, что интенсивность колебательных движений в платформенных областях ничтожно мала и обычно не превышает долей миллиметра в год.

В областях герцинской и в особенности южноальпийской складчатости интенсивность колебательных движений, как правило, не менее 1—3 мм в год, а в некоторых районах (например, на Кавказе) они измеряются даже десятками сантиметров в год (Л. А. Варданянц). Весьма активны современные тектонические процессы в Тихоокеанском горно-складчатом поясе, где на значительных пространствах (гряда Курильских островов, Камчатка) они сопровождаются современным вулканизмом и мощными землетрясениями.

§ 2. Землетрясения

Землетрясения значительно осложняют строительство, вызывая необходимость применения специальных антисейсмических конструкций зданий и сооружений. В пределах территории СССР выделяется несколько районов высокой интенсивности землетрясений:

а) пограничная область между азиатским материком и Тихоокеанской впадиной (сейсмические районы Камчатки, Курильских и Японских островов);

б) пояс альпийских горно-складчатых районов (Карпаты, Крым, Кавказ, Памир);

в) некоторые пограничные участки между платформенными и горно-складчатыми районами, в настоящее время испытывающие интенсивные тектонические движения (районы Тянь-Шаня и Прибайкалья).

Установлено, что интенсивность землетрясений (μ), измеряемая количеством выделяющейся при сейсмиче-

ском толчке энергии, находится в прямой зависимости от степени контрастности современных тектонических движений, т. е. от различий скоростей вертикальных движений (поднятий и опусканий) земной коры в соседних участках. Особенно разрушительны землетрясения на границах крупных сегментов или блоков земной коры с противоположно направленными движениями. К землетрясениям такого характера относится, например, Ашхабадское (1948 г.), которое возникло в зоне контакта поднимающихся горных сооружений Копет-Дага и опускающейся с севера депрессии.

Наблюдения показали, что самые слабые землетрясения, улавливаемые сейсмографами стандартного типа, излучают энергию около 10^5 Дж, а самые сильные из известных катастрофических землетрясений — до 10^{20} Дж. При таком большом диапазоне представляется удобным пользоваться не абсолютной величиной выделяющейся энергии, а ее логарифмом. Энергетический уровень самого слабого землетрясения (10^5 Дж) принимается за ноль, а примерно в 100 раз более сильному землетрясению соответствует единица, еще более сильному (в 10 000 раз большему по энергии, чем нулевое) соответствуют две единицы шкалы интенсивности землетрясений и т. д. Числа 1, 2, 3, . . . , 7 в такой шкале интенсивности землетрясений называются м а г н и т у д о й. Она определяет количество упругой энергии колебания, выделяемой во все стороны очагом землетрясения.

Сейсмические толчки действуют почти мгновенно. Длительность толчков во времени обычно колеблется от доли секунды до 10 с, реже более. Действие сейсмических толчков на сооружения и их элементы также мгновенно.

Сила сотрясения или проявления землетрясения на земной поверхности чаще всего определяется по визуальной сейсмической шкале в баллах. Разрушительные землетрясения начинаются с 7-го балла этой шкалы (табл. 38).

Для количественного определения силового воздействия землетрясений на здания и сооружения иногда пользуются коэффициентом сейсмичности, или коэффициентом сотрясения K , численно равным отношению ускорения колебательных движений частиц горных пород и почв α , приобретаемого ими в процессе землетрясения, к ускорению силы тяжести g . Под ускорением в данном случае понимается величина α , определяемая по формуле

$$\alpha = \frac{4\pi^2 Q}{T^2},$$

где Q — амплитуда колебаний; T — период колебаний.

Значения Q и T получают по инструментальным записям землетрясений — сейсмограммам. Коэффициент сотрясения может быть вычислен отдельно для горизонтальной и вертикальной составляющих сейсмической волны. Наиболее опасным является ускорение по горизонтальной составляющей, поэтому в расчетах

Визуальная сейсмическая шкала

Балл	Наименование землетрясения	Максимальное ускорение, мм/с ²	Коэффициент сотрясения, К	Максимальное относительное смещение, х ₀	Характеристика (сокращенная)
1	Микросейсмические колебания	До 2,5	0,0002	—	Обнаруживается только сейсмическими приборами
2	Очень слабое	2,5—5,0	0,0005	—	Ощущается в исключительных случаях, особенно в верхних этажах, при полном покое и далеко не всеми
3	Слабое	6—10	0,001	—	Ощущается немногими в форме легкого сотрясения
4	Умеренное	11—25	0,002	0,5	Вне зданий ощущается немногими. Внутри здания ощущается большинством людей. Наблюдается большинством людей. Отмечаются скрип полов, балок, звон посуды, дрожание мебели
5	Чувствительное	26—50	0,005	0,5—1,0	Раскачиваются слабые ветки деревьев. Внутри зданий напоминают точки от падения тяжелых предметов, качаются висячие предметы
6	Сильное	51—100	0,01	1,1—2,0	Ощущается всеми, обваливается штукатурка. Местами легкие повреждения зданий
7	Очень сильное	101—250	0,02	2,1—4,0	Значительно повреждаются ветхие дома. В обычных зданиях наблюдаются небольшие трещины, осыпаются штукатурка и лепные украшения. В реках и озерах заметно колебание и помутнение воды. Иногда наблюдаются оползни и осыпи
8	Разрушительное	251—500	0,05	4,1—6,0	Сильно раскачиваются деревья, часть из них ломается. Разваливаются прочные каменные ограды и некоторые фабричные трубы. Здания прочной современной постройки дают трещины и часто разрушаются. В грунте появляются трещины. Сдвигаются с места и падают монументы и памятники
9	Опустошительное	501—1000	0,10	8,1—16,0	Наблюдаются повреждения в сейсмостойких постройках. В обыкновенных домах разрушения весьма велики

Балл	Наименование землетрясения	Максимальное ускорение, мм/с ²	Коэффициент сотрясения, K	Максимальное относительное смещение, λ_0	Характеристика (сокращенная)
10	Уничтожающее	1001—2500	0,25	16,1—32,0	Деревянные дома и мосты разрушаются. Происходит деформация грунта. Разрушаются здания и фундаменты. Разрываются водопроводные и канализационные и прочие магистрали. Повреждаются насыпи, плотины, дамбы, искривляются ж.-д. пути, наблюдаются оползни и обвалы, выплескивание воды из рек и озер
11	Катастрофическое	2501—3000	0,50	32,0	Почти все каменные постройки разрушаются, массивные и каменные опоры для мостов (быки) разламываются. Плотины и дамбы разрушаются. Возникают широкие трещины в земной коре со сдвигом в вертикальном и горизонтальном направлениях. Искривляются мостовые фермы
12	Необыкновенно катастрофическое	Свыше 5000	0,50	—	Тяжелые разрушения всех сооружений. Изменяются русла рек, образуются водопады. Сильно изменяется поверхность земли, происходят обвалы, оползни и тому подобные явления. На поверхности земли появляются волны

сооружений обычно учитывают коэффициент сотрясения для этой составляющей.

Разрушительная сила землетрясения зависит не только от ускорения, но также от соотношения между периодом колебания почво-грунтов и собственным колебанием зданий и сооружений. Поэтому было предложено (С. В. Медведев) определять силу землетрясений с помощью прибора-сейсмометра, существенной частью которого является упругий сферический маятник с периодом затухания колебаний $T = 0,25$ с, таким же примерно, как у зданий обычного типа. Тогда сила землетрясения будет соответствовать относительному смещению λ_0 этого маятника под воздействием колебаний почво-грунтов, на которых воздвигнуто сооружение.

На территории СССР выделяются следующие сейсмические зоны: Прикарпатская, Крым, Кавказ, Копет-Дажская, Средняя Азия, Алтай, Прибайкалье, Верхоянская зона, Дальний Восток.

Сейсмическое районирование дает возможность определить сейсмическую балльность для отдельных областей и зон. Но в пределах зоны одинаковой балльности разрушительная сила землетрясения проявляется с различной интенсивностью в зависимости от местных условий — сейсмических характеристик пород покровной толщи, глубины залегания грунтовых вод и особенностей строения поверхности.

Основными сейсмическими характеристиками горных пород, по С. В. Медведеву, являются скорость распространения продольной сейсмической волны v и сейсмическая жесткость, представляющая собой произведение скорости распространения продольных сейсмических волн на величину плотности (массы в единице объема) породы. В табл. 39 даны приращения сейсмической балльности горных пород в зависимости от скорости распространения продольных сейсмических волн v .

Увеличение сейсмической балльности в зависимости от глубины залегания грунтовых вод в толщах супесей, суглинков и мелкозернистых песков характеризуется следующими данными:

Глубины залегания грунтовых вод, м	0—1	4	10
Приращение балльности	1	0,5	0

Как видно, при глубине залегания грунтовых вод свыше 10 м влияние их на балльность землетрясения не сказывается.

Перечень неблагоприятных и благоприятных местных условий, в той или иной мере влияющих на сейсмическую стойкость сооружений и разрушительную силу землетрясений, приведен в табл. 40.

Здания и сооружения, воздвигнутые на нецементированных рыхлых породах, подвержены значительно большей опасности разрушения, чем те же сооружения и здания, основанные на прочных твердых горных породах. По исследованиям С. В. Пучкова (1956 г.), предельная сила разрушительного землетрясения на твердых коренных породах не превышает 7—8 баллов. При переходе сейсмической волны из коренных пород в рыхлые покровные образования возможно увеличение силы землетрясения на 1—4 балла. Опыт строительства показывает, что при сейсмичности до 9 баллов на рыхлых, неустойчивых породах нельзя возводить насыпи выше 15 м и делать выемки глубже 12 м, а при сейсмичности до 7 и 8 баллов — соответственно выше 20 м и глубже 15 м. Мокрые породы в основаниях насыпей и откосов подлежат осушению на глубину не менее 2 м ниже отметки их подошвы. Иначе рыхлые раздельнозернистые породы в результате землетрясения могут перейти в текучее состояние.

Приращение сейсмической балльности горных пород в зависимости от скорости распространения продольных сейсмических волн

Категории горных пород	Скорость распространения продольных сейсмических волн v , км/с	Приращение балльности землетрясения
I. Скальные		
Граниты	5,6	0
Известняки, сланцы, гнейсы	3,5—4,5	0,2—0,4
Плотные песчаники	2,2—3,0	0,5—0,8
Выветрелые (нарушенные) известняки, сланцы, песчаники	1,5—2,3	0,7—1,1
II. Полускальные		
Гипсы	2,4—3,0	0,6—0,8
Мергели	2,0—2,6	0,7—1,0
Цементированные пески	1,4—1,9	1,0—1,2
III. Крупнообломочные		
Щебенистые и галечные породы	1,3—2,1	0,9—1,3
Гравийные (из кристаллических пород)	1,2—1,9	1,0—1,4
Гравийные (из осадочных пород)	1,1—1,7	1,1—1,5
IV. Песчаные		
Пески гравелистые и крупнозернистые	1,1—1,6	1,2—1,4
» среднезернистые	1,0—1,4	1,3—1,6
» мелкозернистые и пылеватые	0,7—1,2	1,4—1,8
V. Глинистые		
Глины	0,9—1,5	1,2—1,6
Суглинки	0,8—1,4	1,3—1,7
Супеси	0,7—1,2	1,4—1,8
VI. Насыпные грунты		
Насыпные грунты	0,3—0,5	2,3—2,6
Почвенные грунты	0,2—0,3	2,6—3,0
VII. Обводненные породы		
Гравийно-галечные	—	1,6—2,0
Песчаные	—	2,0—2,4
Глинистые (супеси, суглинки)	—	2,4—2,8
Насыпные и почвенные	—	3,3—3,9

Перечень местных условий, влияющих на сейсмическую стойкость сооружений и силу землетрясения

Неблагоприятные условия	Благоприятные условия
Расчлененный рельеф: крутые склоны, обрывистые берега, овраги, косогоры, ущелья Многослойность пород при значительных наклонах поверхности на контактах Наличие тонкого поверхностного слоя, перекрывающего скальные породы Выветрелость пород и значительная нарушенность физико-геологическими процессами. Периферические части конусов выноса Участки, на которых горные породы и грунты от сотрясения приобретают остаточные деформации под действием гравитационных сил: оползни, обвалы, осыпи, провалы сводов карстовых пустот и др. Зоны, расположенные вблизи наклонных поверхностей тектонических контактов: сдвигов, сбросов, надвигов и т. д.	Горизонтальные территории Частая смена пород при горизонтальном их залегании Толща рыхлых отложений мощностью сотни или тысячи метров Зоны более плотных отложений (например, осевые части конусов выноса) Участки, не подверженные остаточным деформациям Участки, удаленные от тектонических зон и линий нарушений

Условие равновесия откоса раздельнозернистых пород, по В. О. Цшохеру, можно выразить в следующем виде:

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{\operatorname{tg} \varphi - K}{1 - K \operatorname{tg} \varphi}, \quad (\text{III.1})$$

где β_0 — предельный угол устойчивого откоса;

K — коэффициент сотрясения;

φ — угол внутреннего трения породы.

Величина β_0 зависит, однако, не только от коэффициента сотрясения, но также и от величины угла выхода луча сейсмической волны v . С учетом влияния этого угла выражение (III.1) принимает вид

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{\sin \varphi - K \cos (\varphi - \gamma)}{\cos \varphi + K \sin (\varphi - \gamma)}. \quad (\text{III.2})$$

При землетрясениях наблюдаются тиксотропные процессы, а также явления сухого «оплывания» пород вследствие нарушения контактов между частицами за счет вибрации. К необратимым изменениям относятся явления уплотнения рыхлосложенных пород, разрыхления связных пород, образования трещин и др.

В задачи инженерно-геологических исследований в сейсмических районах прежде всего входит сбор сведений и изучение материалов о разрушительной силе землетрясений и динамических параметрах очагов

землетрясений. Динамическими характеристиками землетрясений являются: глубина расположения очага землетрясения, расстояние их эпицентра от данной местности, положение очагов в тектонической структуре района и направление движения блоков земной коры по тектоническим разрывам.

Микросейсмические условия территории строительства оцениваются с учетом влияния следующих основных факторов:

1) мощности и сейсмичности жесткости пород толщи поверхностного покрова;

2) петрографического состава, тектонических условий залегания и сейсмической жесткости пород коренной основы;

3) наличия тектонических нарушений, в особенности «живых» дизъюнктивов в районе строительства и в непосредственной близости от него;

4) контрастности и активности современных тектонических движений;

5) глубины залегания зеркала грунтовых вод и обводненности пород;

6) крутизны и устойчивости склонов, косогоров и условий возникновения на них оползней, обвалов и некоторых других деформаций.

Выяснение и картирование перечисленных элементов инженерно-геологической обстановки входит в основную задачу инженерно-геологических исследований. Результаты последних представляются в виде специальных карт сейсмических условий масштаба 1 : 100 000—1 : 5000.

Предсказание землетрясений является одной из самых сложных задач, пока не решенной удовлетворительно. Принципиально возможны следующие пути решения данной задачи:

1) путем стационарных наблюдений за развитием деформаций земной коры. В периоды, непосредственно предшествующие землетрясениям, наблюдаются резкие и частые изменения в направлении и скорости наклонов земной поверхности — так называемые бури наклонов. Поэтому с помощью высокочувствительных приборов — наклономеров иногда удается предсказать землетрясение;

2) путем стационарных наблюдений за развитием напряжений в земной коре. В период, предшествующий землетрясению, происходит концентрация и наращивание напряжений. Следствием этого являются некоторые изменения упругих характеристик горных пород и изменение скорости прохождения упругих волн через их толщи. Поэтому с помощью сейсмометрических методов представляется возможным установить процесс накопления упругой энергии деформирования и предсказать опасность сейсмической разрядки этой энергии;

3) путем наблюдений упругих колебаний различного характера, в том числе и звуковых, развивающихся перед землетрясением;

4) путем наблюдений за магнитными возмущениями, иногда предшествующими сейсмическим толчкам, а также за появлением электрических токов, которые возбуждаются в земной коре под воздействием нарастающих напряжений и деформаций (пьезо-электрический эффект).

Краткосрочные прогнозы землетрясений в условиях производства горных работ можно сделать по систематическому повышению горного давления, усилению явлений отскакивания кусков горных пород и угля от забоя и некоторым другим явлениям, сопровождающимся нередко звуковыми эффектами (треском, нарастающим гулом и т. д.).

ГЛАВА 16

ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

§ 1. Типизация горно-геологических явлений

К основным видам горно-геологических явлений, происходящих при открытой разработке месторождения, относятся: оползни, обрушения и обвалы, осыпи и оплывины, просадки.

Особое место занимает явление уплотнения (консолидации) глинистых пород бортовых массивов и отвалов.

Оползни на карьерах проявляются в различных формах (табл. 41). Они часто отличаются огромными объемами горных пород, участвующими в данном виде деформации. Можно различать оползни:

а) **м е л к и е** — объем оползневых масс измеряется сотнями и тысячами кубометров;

б) **с р е д н и е** — объем оползневых масс составляет десятки тысяч кубометров;

в) **к р у п н ы е** — объем оползневых масс составляет тысячи кубометров;

г) **о ч е н ь к р у п н ы е** — объем оползших масс измеряется миллионами кубометров.

Главной отличительной чертой оползней является скольжение оползневых масс вниз по откосу по некоторой поверхности, получившей наименование поверхности скольжения. Этому процессу нередко предшествуют другие явления, например оплывание или пластическое течение подстилающих пород. Такого рода явления часто сопровождают весь оползневой процесс. В этом случае можно говорить о сложных оползнях: оползнях оплывания, пластического течения и т. д. (рис. 57). В отличие от них простые оползни характеризуются явлением скольжения оползневых масс

Виды оползней на карьерах

Группы	Подгруппы	Типы оползней	Краткая характеристика типов	Основные условия возникновения оползней
Оползни бортов карьеров и уступов	Простые оползни бортов карьера и уступов	Собственно оползни	Поверхность скольжения сложного очертания: верхняя часть ее вертикальная, средняя и нижняя — криволинейные с обратным падением (в сторону массива) на нижнем отрезке	Массив несцементированных пород
		Оскольз-ни	Смещения подработанных блоков и пачек горных пород массива откоса по поверхностям ослабления, падающим в сторону откоса	Подрезка откосов поверхностей ослабления, падающих в сторону выработки
		Ополз-ни-оскольз-ни (сложные оскольз-ни)	То же, но поверхность скольжения проходит по направлению ослабления только в верхней части; нижняя ее часть пересекает поверхности ослабления под различными углами и выходит в откос в его основании	Падение поверхности ослабления в сторону выработки под углом, большим угла заоткоски бор-та
Оползни бортов карьера и уступов	Сложные оползни бортов и уступов карьера	Оползни выдавливания	Оползневому процессу предшествует и сопутствует пластическое выжимание слабых глинистых пород. Сползание происходит по пластически деформирующемуся (выжимающемуся) основанию	Наличие в массиве или в основании откоса слабых глинистых легковыжимающихся пород

Группы	Подгруппы	Типы оползней	Краткая характеристика типов	Основные условия возникновения оползней
		Оползни оплывания	Оползневому процессу предшествует и сопутствует оплывание пород основания или нижней части откоса. Сползание происходит по сплывшей породе	Наличие в основании или в нижней части откоса пород, способных оплывать под действием фильтрационного давления и вибрации
		Оползни проседания	Оползневому процессу предшествует и сопутствует уплотнение (проседание), а иногда просадка пород откоса, происходящие под влиянием вибрации и увлажнения или того и другого вместе	Наличие в разрезе откоса рыхло-сложенных или просадочных пород
Оползни внешних и внутренних отвалов	Простые оползни горных масс отвалов	Надподшвенные оползни	Смещение горных масс отвала по поверхностям, проходящим в толще отвала	Наличие в толще отвала переувлажненных линз и прослоев горных масс
		Подшвенные оползни	Смещение горных масс отвала по его основанию, наклоненному в сторону откоса	Падение поверхности основания отвала в сторону откоса
		Подподшвенные оползни	Смещения горных масс отвала по поверхностям ослабления, проходящим в толще основания отвала	Наличие в разрезе основания отвала поверхностей ослабления, наклоненных в сторону откоса
Оползни внешних и внутренних отвалов	Сложные оползни горных масс отвалов	Оползни выдавливания	Оползнию предшествует и сопутствует выдавливание слабых пластических глинистых масс отвала или его основания	Наличие в толще отвала или в его основании переувлажненных глинистых горных масс и пород

Группы	Подгруппы	Типы оползней	Краткая характеристика типов	Основные условия возникновения оползней
		Оползни оплывания	Оползнию предшествует и сопутствует оплывание водонасыщенных горных масс отвала	Наличие в толще отвала водонасыщенных горных масс, способных оплывать
		Оползни проседания	Оползнию предшествует и сопутствует самоуплотнение свежесыпанных горных масс отвала или уплотнение (иногда просадка) пород основания	Неравномерная отсыпка горных масс неодинаковой уплотняемости или же рыхлое сложение (иногда просадочность) пород основания

в чистом виде. Однако в начальных стадиях их развития имеют место явления микроскольжений, обычно рассеянные более или менее равномерно по всей перенапряженной зоне массива откоса. Они создают картину плавного, квазипластического деформирования откоса в подготовительную (скрытую) фазу развития оползня. Лишь со временем наблюдается постепенная концентрация микроскольжений в некоторой зоне массива откоса и затем в общей поверхности смещения сложнокриволинейного очертания. Появлением трещин-заколов завершается эта скрытая, подготовительная фаза деформирования и начинается собственно оползневой процесс.

При сложных оползнях смещение оползневых масс происходит по оплывшей породе или по зоне пластически деформирующихся пород, либо по толще пород, испытывающей осадку.

Особое положение занимают скольжение блоков и пачек горных пород по поверхностям ослабления бортового массива, падающим в сторону выработанного пространства. Это так называемые о с к о л ь з н и (рис. 57, а). В том случае, когда угол наклона пород бортового массива β равен или больше угла наклона уступа α , поверхность скольжения совпадает с поверхностью ослабления массива только в верхней своей части. Нижняя часть поверхности скольжения пересекает поверхности ослабления массива пород под различными углами и выходит в откос обычно вблизи его основания. Это так называемые сложные о с к о л ь з н и (рис. 57, б).

Оползни отвалов горных масс образуют самостоятельную группу оползневых деформаций. Среди них различают также

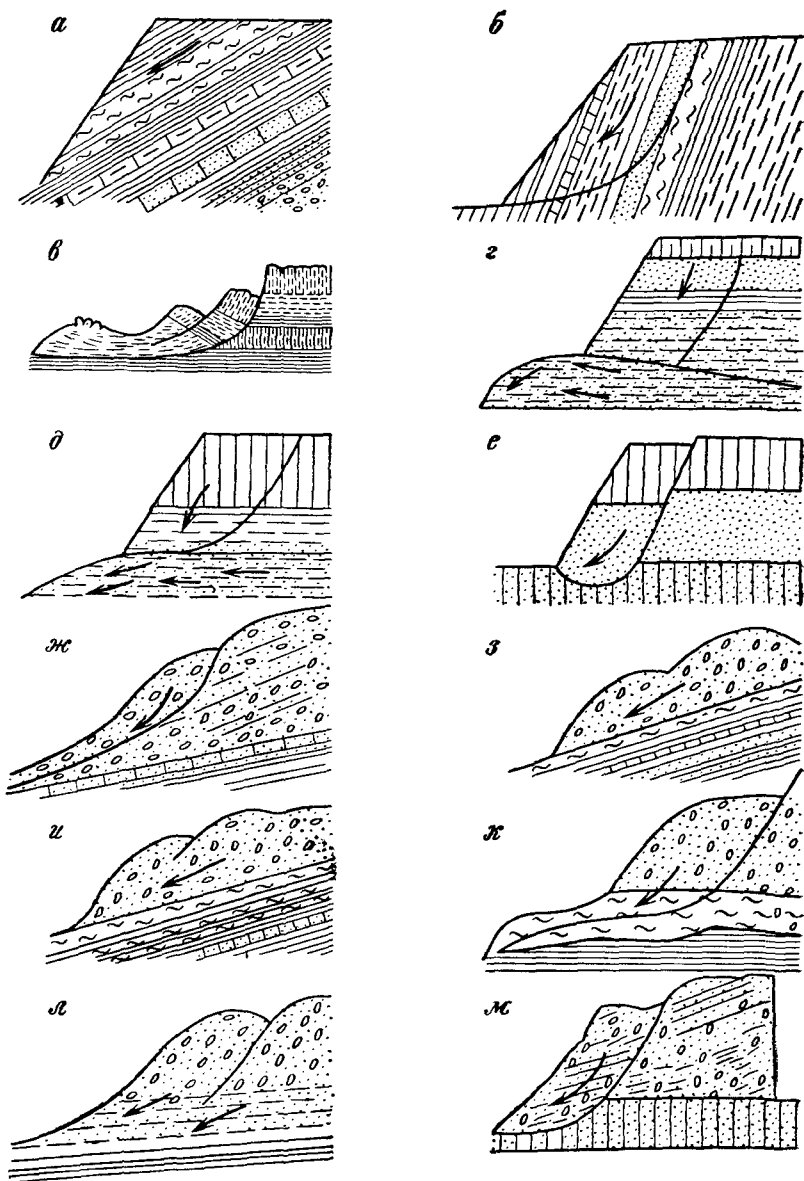


Рис. 57. Основные типы оползней откосов карьеров:

а — оползень, б — сложный оползень, в — собственно оползень, г — оползень выдавливания, д — оползень оплывания, е — оползень проседания, ж — надподошвенный оползень, з — подошвенный оползень, и — подподошвенный оползень, к — оползень выдавливания, л — оползень оплывания, м — оползень проседания

простые и сложные оползни (рис. 57, ж—м). В зависимости от положения поверхности скольжения С. И. Попов выделяет подподошвенные, подошвенные и надподошвенные оползни (рис. 57, ж—и).

Обрушения и обвалы характеризуются быстрыми смещениями и падением крупных блоков и пачек пород, оторвавшихся от уступов и бортов карьера. При своем падении блоки и куски пород опрокидываются и дробятся на более мелкие куски и пачки. Обрушения нередко начинаются с оскользней по подрезанным откосами карьера поверхностям ослабления.

Осыпи происходят в форме смещения и падения мелких обломков и зерен пород, отделившихся в результате выветривания и растрескивания (десквамации) их. Осыпание пород, вызванное или усиленное действием **вибрации** (например, буровзрывными работами), называется **осовами**.

Оплывины. В условиях обводненных карьеров, в бортах которых развиты фильтрационно неустойчивые породы, наблюдаются явления оплывания, суффозии, фильтрационного выпора и некоторые другие виды фильтрационного разрушения пород. Они особенно характерны для периода вскрытия и для начальных стадий разработки месторождений, когда дренарующее действие обнаженных поверхностей карьера и водопонижительных устройств проявлялось еще не в полной мере. Оплывание пород относится к числу наиболее распространенных и важных видов фильтрационного разрушения откосов несцементированных и обводненных пород карьера.

Просадки представляют собой вертикальное опускание прибортовых участков высокопористых рыхлых породных масс без образования сплошной поверхности скольжения.

Уплотнение (консолидация) пород бортовых массивов происходит за счет снятия эффекта гидростатического взвешивания и устранения действия фильтрационного давления при осушении обводненных месторождений полезных ископаемых. Уплотнение пород отвалов происходит под действием их собственной массы за счет уменьшения их пористости — влажности.

§ 2. Факторы, влияющие на устойчивость откосных сооружений

Поведение пород, слагающих уступы, борта и отвалы на карьерах, определяется физико-географическими, геологическими, гидрогеологическими, инженерно-геологическими и горнотехнологическими факторами.

К физико-географическим факторам относятся влияние рельефа местности, гидрологические и климатические условия района месторождения.

Рельеф района и растительность во многом определяют характер поверхностного стока. Так, бугристо-котловинный рельеф

исключает возможность стока атмосферных осадков и обуславливает заболачивание территории и обводненность слагающих месторождение пород; образование поверхностных водоемов в районе карьера способствует обводнению горных выработок; наклон основания в сторону откоса отвала ухудшает условия его устойчивости, — особенно в случаях, когда сопротивление сдвигу пород основания отвала или по контакту между отвалом и основанием ниже сопротивления сдвигу пород отвала; накопление дождевых и паводковых вод у нижней бровки стволов повышает влажность пород и снижает показатели их физико-механических свойств, что отрицательно сказывается на устойчивости отдельных откосов.

Систематизация нарушений устойчивости откосов на карьерах СССР, ГДР, КНР, ЧССР, НРБ, ФРГ и Италии показывает, что с атмосферными осадками связано более 25% деформаций откосов [19]. Количество атмосферных осадков, характер дождей, мощность снегового покрова и продолжительность таяния оказывают большое влияние на устойчивость пород в откосах.

Атмосферные воды насыщают породы в откосах отвалов и способствуют развитию оползней, обвалов, суффозии и других неблагоприятных явлений. Увлажнение пород отвала, увеличение зоны полного водонасыщения и снижение сопротивления сдвигу пород отвала в этой зоне происходят также в результате инфильтрации атмосферных вод, скапливающихся в межконусном пространстве и других впадинах на кровле отвальных уступов.

Температурный режим района, глубина сезонного промерзания и оттаивания пород наряду с экспозицией откосов сказываются на интенсификации процессов выветривания слабостойких пород, образовании осыпей, разрушении транспортных площадок и берм очистки. Особенно это характерно для северных и восточных районов СССР, где горные работы ведутся в суровых климатических условиях. Выпадающие на отсыпаемые в осенний период отвалы осадки просачиваются в тело отвала, образуя увлажненную зону.

При отрицательной температуре часть отвальных пород переходит в мерзлое состояние и вследствие выделения льда связность их возрастает. В процессе замораживания происходит подток воды к ним от нижележащих талых пород. При значительном притоке в отвальных породах образуются крупные линзовидные включения и прослойки льда. Процессу льдовыделений сопутствует процесс разрушения первоначальной структуры породных масс. Все это приводит к образованию ослабленных поверхностей в отвале и разупрочнению пород при оттаивании.

На устойчивости откосов сказывается также режим ветров (сила, продолжительность, направление), влияющий, в особенности в условиях сухого климата, на выветривание горных пород и развевание песчаных откосов.

Из геологических факторов основное значение имеют: литологический состав пород, процессы осадконакопления и литификации, формирующие прочностные характеристики пород; трещиноватость, слоистость и тектонические нарушения горных пород; показатели стойкости, набухания и размокания.

При проведении детальной разведки на месторождении следует обращать особое внимание на выявление трещиноватости глинистых отложений, поверхностей древних оползней на склонах долин и возвышенностей, ослабленных контактов между слоями глин, слоев пластичных глин в основании толщи вскрышных пород, диапировых складок, тектонических нарушений и тектонических трещин большого протяжения, так как эти геологические факторы во многом обуславливают устойчивость бортов карьеров.

На устойчивость отвалов влияет характер залегания пород их основания, а также физико-механические свойства пород отвалов и оснований.

При размещении отвалов на сильно сжимаемых глинистых породах могут возникать подподошвенные оползни. В случае залегания в основании водонасыщенных песчаных пород возможны надподошвенные оползни. Если основание имеет наклон в сторону откоса и представлено сложной неоднородной толщей, залегающей согласно поверхности основания (прочность пород вкрест слоистости обычно достаточно велика), устойчивость отвала определяется сопротивлением сдвигу по контактам слоев и углом наклона основания, а оползни отвалов имеют вид подошвенных и подподошвенных.

Устойчивость отвалов на прочных основаниях определяется прежде всего сопротивлением сдвигу слагающих их пород.

К числу гидрогеологических факторов, оказывающих большое влияние на устойчивость откосов, относятся гидростатическое и гидродинамическое давление подземных вод. Эти воды могут вызвать гидростатическое взвешивание пород и возникновение дополнительных сдвигающих сил. В большей мере подобные процессы проявляются при наличии несвязных и слабосвязных осадочных и сильно выветрелых скальных породах. При наличии водоносного горизонта в породах, непосредственно подстилающих отвал, нижняя часть насыпи увлажняется за счет капиллярного поднятия. Сопротивления сдвигу пород отвала могут также снижать напоры, возникающие в водоносном горизонте на некотором удалении от откоса. Давление подземных вод на глинистые породы основания отвалов уменьшает эффективные напряжения в них или может вызвать гидравлический разрыв глинистого слоя с прорывами напорных вод или плывунов.

Ухудшение условий устойчивости внутренних отвалов, при-слоненных к нерабочему борту, возможно за счет увлажнения отвальных пород водами водоносного горизонта вскрышной толщи. При неудовлетворительном дренаже подпитка водами этого

горизонта, а также атмосферными осадками отвала, сложенного склонными к тиксотропному оплыванию пылеватými породами, может привести к возникновению катастрофических оползней.

На устойчивость гидроотвалов существенное влияние оказывают гидростатическое взвешивание в песчаных породах и избыточное давление поровой воды в глинистых породах. Циклическое развитие фильтрационных деформаций в виде оплывания песчано-глинистых пород в откосах может привести к оползанию упорной призмы гидроотвала. При размещении гидроотвалов на слабых основаниях могут происходить оползни выдавливания.

На устойчивость в откосах твердых трещиноватых пород в обычных условиях гидрогеологические факторы не оказывают существенного влияния, так как пологая депрессионная воронка лишь в незначительной степени захватывает призму возможного обрушения, а устойчивость пород к набуханию и размоканию способствует сохранению характеристик прочности пород в течение длительного времени.

Среди горнотехнических факторов, оказывающих влияние на устойчивость откосов твердых горных пород и величину углов наклона бортов, наибольшее значение имеет способ производства буровзрывных работ. Под действием взрывной волны изменяется напряженное состояние массива, что уменьшает силы трения по наиболее слабой поверхности и при небольшом запасе устойчивости может привести к внезапным обрушениям бортов. Существенное влияние на величины углов наклона высоких бортов, сложенных скальными породами, и на безопасность работы в карьере оказывают ширина берм очистки и транспортных берм, частота их расположения, а также тип съезда. На устойчивость выветрелых, склонных к набуханию или размоканию пород влияет профиль площадок уступов, обеспечивающий сток атмосферных вод. Определенное влияние на устойчивость пород в откосах оказывает система разработки. Так, при отработке полезного ископаемого, залегающего в толще глинистых водонасыщенных пород наиболее целесообразной является разработка неширокими участками с заваливанием выработанного пространства вскрышной породой.

На устойчивость откосов отвалов в первую очередь оказывают влияние способы отвалообразования, режим горных и отвальных работ, а также масса оборудования и динамические нагрузки, возникающие при работе механизмов.

§ 3. Основные условия устойчивости откосных сооружений

Создаваемые при открытых разработках откосы в той или иной мере подвержены различного рода деформациям, поэтому можно говорить лишь об относительной устойчивости откосов. В горной практике сложилось понятие о к р а т к о в р е м е н н о й и д л и -

тедьной устойчивости откосов, что объясняется особенностями технологии ведения открытых работ, а также механизмом деформирования горных работ во времени.

Откосы рабочих бортов и уступов, отвальных насыпей имеют непродолжительный срок стояния, поэтому они должны отвечать условиям кратковременной устойчивости.

Откосы нерабочих бортов и уступов, капитальных траншей, упорных призм гидроотвалов должны сохранять устойчивость на протяжении всего срока службы горного предприятия, т. е. отвечать условиям длительной устойчивости.

Характерными прочностными показателями горных пород, составляющих откосы, являются: мгновенная прочность σ_0 — практически мгновенное сопротивление пород в начале загрузки; временная прочность σ_t — изменяющаяся во времени прочность, вызывающая разрушение породы за определенный промежуток времени t ; длительная прочность σ_∞ — прочность, которой обладает порода под воздействием нагрузок в течение весьма длительного периода времени. Для прогноза изменения прочности горных пород в откосах $\sigma = f(t)$ может быть использована упрощенная зависимость вида (I.35), где $t_{\text{пр}}$ заменяется на $t + 1$.

Устойчивость пород в откосах определяется их сопротивляемостью сдвигающим усилиям. Для раздельнозернистых пород сопротивление сдвигу характеризуется только трением ($\varphi \neq 0$; $c = 0$); сопротивление сдвигу связных (глинистых) пород характеризуется внутренним трением и незначительным сцеплением ($\varphi \neq 0$; $c \neq 0$); сопротивление сдвигу твердых пород, обладающих большим сцеплением, может быть охарактеризовано в основном силами сцепления.

Для раздельнозернистых горных пород (по Н. А. Цытовичу — идеально сыпучего грунта) условие равновесия в откосах требует, чтобы угол откоса не превышал угла внутреннего трения. Это условие вытекает из следующих соображений. Пусть на поверхности откоса AB (рис. 58), сложенного сыпучими породами и лежит твердая частица. Масса частицы Q , угол наклона поверхности откоса к горизонту α , угол внутреннего трения φ . Нормальная N и касательная S составляющие напряжения от силы тяжести Q равны:

$$N = Q \cos \alpha;$$

$$S = Q \sin \alpha.$$

Сила S будет стремиться сдвинуть частицу породы вниз откоса. Ей будет противодействовать сила трения $S' = fN$,

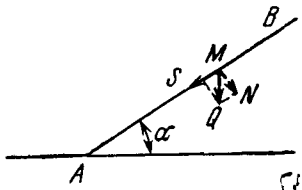


Рис. 58 Основное условие равновесия твердой частицы M на наклонной поверхности $A-B$

действующая параллельно поверхности откоса AB . Условие равновесия будет соблюдено, если $S = S'$.

Но так как S' равно произведению коэффициента трения на нормальное давление $S' = fN$, то для равновесия необходима $Q \sin \alpha - f Q \cos \alpha = 0$, откуда $\operatorname{tg} \alpha = f$, но так как $f = \operatorname{tg} \varphi$, то

$$\alpha = \varphi. \quad (\text{III.3})$$

Другими словами, предельный угол откоса в сыпучих породах равен углу внутреннего трения. Но так как для сыпучих пород угол внутреннего трения равен углу естественного откоса, то данное положение можно сформулировать следующим образом: предельный угол откоса в раздельнозернистых (сыпучих) породах равен углу естественного откоса и не зависит от высоты откоса.

Следует отметить, что в откосе сыпучей породы имеется семейство предельных криволинейных поверхностей, ограниченных предельной криволинейной поверхностью, пересекающей откос в нижней и верхней точках под углом $45^\circ - \varphi/2$, и предельной поверхностью откоса.

В связных и твердых горных породах, обладающих сцеплением и внутренним трением, возможно создание вертикальных откосов определенной высоты, называемой предельной высотой вертикального откоса — H_{90} . Для идеально связной горной породы ($\varphi = 0$; $c \neq 0$) величина H_{90} определяется выражением:

$$H_{90} = \frac{2c}{\gamma}, \quad (\text{III.4})$$

где γ — объемная масса горной породы;

c — сцепление.

Устойчивость откосов, представленных связными породами, оценивается по соотношению удерживающих $\Sigma F_{уд}$ и сдвигающих ΣT_i сил, действующих на призму возможного обрушения. Под призмой возможного обрушения понимают [60] объем породы в откосе, заключенный между поверхностью откоса и наиболее слабой поверхностью в массиве, по которой возможно смещение породных масс. В случае равенства единице отношения сил, действующих на поверхности смещения, т. е. $\Sigma F_{уд}/\Sigma T_i = 1$, эту поверхность называют предельно-напряженной, или поверхностью скольжения; соответствующий данному положению угол откоса является предельным.

Для откоса, представленного однородными неводонасыщенными породами, может быть принята круглоцилиндрическая поверхность скольжения. На наиболее крутом участке поверхности скольжения сдвигающие силы превышают удерживающие (силы сцепления и трения), вследствие чего равновесие для этой

части призмы обрушения возможно при наличии упора со стороны призмы обрушения, размещающейся на пологом участке поверхности скольжения. Верхнюю часть призмы возможного обрушения называют *призмой активного давления*, нижнюю — *призмой упора*. Устойчивость откоса повышается с уменьшением массы призмы активного давления и уменьшается при уменьшении массы призмы упора. Использование этого обстоятельства позволяет вести действенную борьбу с оползнями откосных сооружений.

Для водонасыщенных глинистых пород откосов оценку устойчивости производят по формуле

$$\frac{\sum \tau_{\text{доп}}}{\sum \tau_{\text{сдв}}} \geq 1, \quad (\text{III.5})$$

где $\sum \tau_{\text{доп}}$ — сумма допустимых касательных напряжений, взятых с графиков сопротивления сдвигу при соответствующих нормальных напряжениях; $\sum \tau_{\text{сдв}}$ — сумма сдвигающих напряжений, возникающих по наиболее слабой поверхности, используя общее сопротивление сдвигу пород в каждой точке наиболее слабой поверхности скольжения без разделения на силы трения и сцепления. Величина сопротивления сдвигу устанавливается по результатам испытаний пород на срез.

ГЛАВА 17

ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

§ 1. Классификация горно-геологических явлений

Деформации вследствие нарушения естественного напряженного состояния массива при проведении горных выработок могут появиться сразу же после проведения выработки (в массивах слабых пород) или же по истечении некоторого времени, необходимого для образования значительного пролета выработки, развития необратимых деформаций (явления ползучести и релаксации) горных пород и изменения состояния и свойств самих горных пород в результате изменений механических условий деформирования, происходящих по мере развития горных работ, а также гидрогеологической обстановки, степени выветрелости пород и т. д.

Деформации горных пород под влиянием горных выработок вызываются массой вышележащих пород. В обводненных массивах пород к ним добавляются силы фильтрационного давления потоков подземных вод, устремляющихся в выработку. Под

действием этих сил наблюдаются различные формы фильтрационного деформирования и разрушения горных пород.

Развитию деформаций препятствуют внутренние силы сопротивления (внутреннее трение и сцепление) горных пород и реактивные касательные напряжения, развивающиеся в подработанных массивах и стремящиеся удержать подработанную толщу пород в равновесии.

Как силы внутреннего сопротивления горных пород массива, так и реактивные касательные напряжения не остаются постоянными в пространстве и во времени. Возникает очень сложный процесс развития напряжений и деформаций горных пород около горных выработок, в настоящее время исследованный только в простейших случаях.

В табл. 42 приведена схематическая классификация основных разновидностей горно-геологических явлений при подземной раз-

Т а б л и ц а 42

Классификация горно-геологических явлений при подземной разработке

Группы явлений	Причины возникновения	Примеры
I. Гравитационные	Проявления горного давления	1. Различные формы сдвижения горных пород 2. Деформации подземных сооружений (выработок, целиков и пр.) 3. Пучение литифицированных глинистых пород 4. Отжим пород в зоне опорного давления 5. Горные удары 6. Внезапные выбросы угольной пыли и газов 7. Деформации породных отвалов
II. Гидродинамические	Нарушения гидрогеологического режима	1. Фильтрационный выпор 2. Прорывы подземных вод и плывунов 3. Суффозионный размыв пород 4. Депрессионные деформации пород в поле водопонижения
III. Гидрохимические	Нарушения влажностного режима, химического состава поровой влаги и минерального состава	1. Выщелачивание легкорастворимых пород 2. Пучение глинистых пород при их набухании 3. Проявления тиксотропных свойств истинных плывунов
IV. Геотермические	Нарушения температурного режима горных пород	Деформации мерзлых пород при их замораживании или оттаивании

работке месторождений полезных ископаемых. Возникновение горно-геологических явлений обусловлено одновременным действием естественной геологической обстановки и горнотехнологического процесса. В силу такой двойственной природы горно-геологического явления возникает возможность направленного воздействия (управления) с целью корректировки или изменения его параметров. В качестве примеров можно привести такие мероприятия, как управление кровлей в угольных лавах, уменьшение толщины крепи проходческих выработок за счет придания ей искусственной податливости, перераспределение напряжений в подработанном массиве пород путем изменения размеров и местоположения опорных целиков и пр.

Ниже подробно рассмотрены некоторые горно-геологические явления, наиболее распространенные при разработке месторождений полезных ископаемых и строительстве подземных сооружений.

§ 2. Распределение напряжений вокруг выработок

Причиной проявления горного давления * является сооружение в массиве горных пород выработки, что приводит к перераспределению напряжений в нем и возникновению зон разряджения и концентрации напряжений. Если представить, что естественное поле напряжений в массиве пород формируется только за счет гравитационных сил, то изостаты ** вертикальной составляющей напряжений до сооружения выработки будут иметь вид системы вертикальных параллельных линий.

Проходка горизонтальной горной выработки приводит к изменению картины напряжений, и изостаты вертикальной составляющей σ_z примут вид, показанный на рис. 59. На рисунке хорошо видно, что образуются зоны концентрации и разряджения напряжений. Количественные изменения σ_z в массиве пород, прилегающей к боковой стенке выработки, наглядно иллюстрируются эпюрой, изображенной справа от выработки. Пунктирной линией показана зона разгрузки пород, формируется в основном область необратимых деформаций и разрушений вокруг выработки, в частности, свод естественного равновесия в кровле. Размеры зоны разгрузки зависят не только от напряжений, но и от прочностных и деформационных характеристик пород, степени их структурной раздробленности.

Более сложный характер имеют напряжения в массиве пород при проведении очистных выработок. Здесь имеет место взаимное наложение полей напряжений различных выработок или их частей

* Термин «горное давление» по рекомендации Комитета технической герминологии АН СССР определяется как «силы в породах, окружающей горную выработку».

** Изостаты (или траектории главных напряжений) — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлениями главных напряжений.

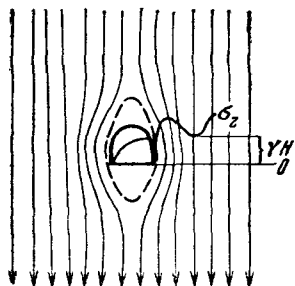
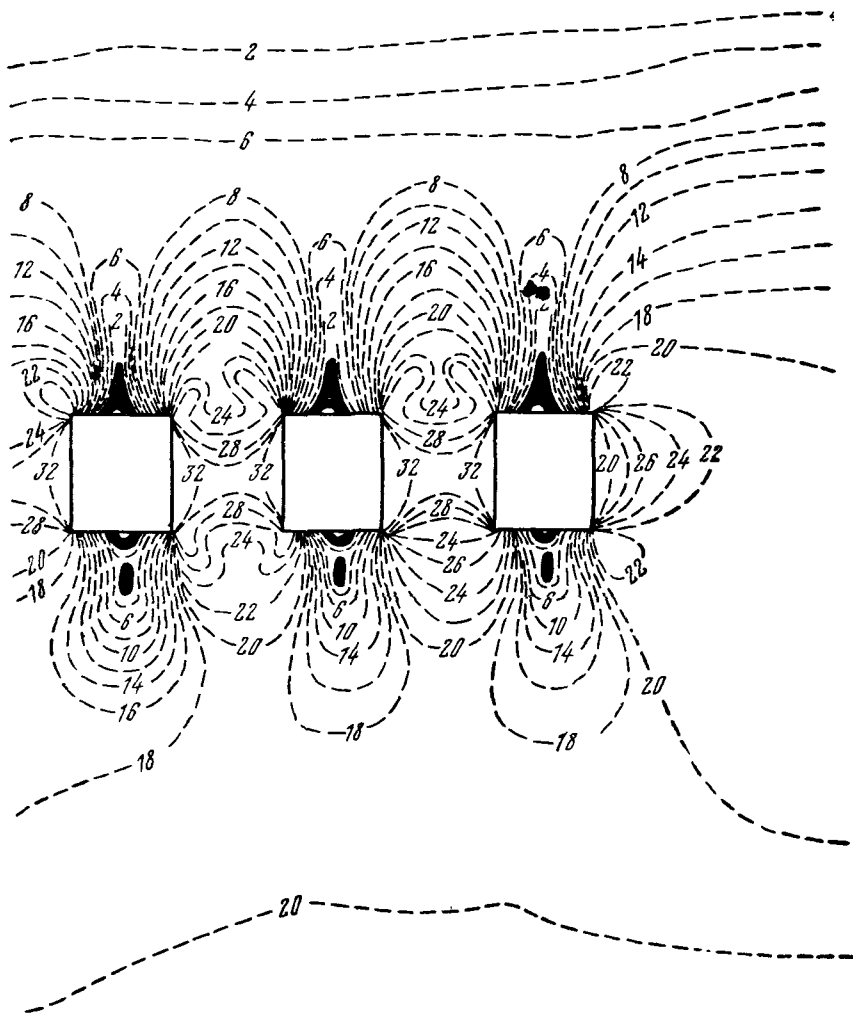


Рис. 59. Распределение напряжений в массиве при проходке горизонтальной горной выработки

Рис. 60. Картина изохром для очистной выработки (этажно-камерная система разработки рудных залежей)



как в пространстве, так и во времени. На рис. 60 показано распределение изохром* при этажно-камерной системе разработки рудных залежей. Можно заметить, что поле напряжений претерпело существенные изменения (до образования камер изохромы имели вид параллельных горизонтальных линий). Подобные картины изохром позволяют оценить не только качественные, но и относительные количественные изменения в полях напряжений, например, степень концентрации их на определенных участках.

Еще более осложняют напряженное состояние массивов пород и сооружений в нем такие дополнительные факторы, как тектонические силы, структурная раздробленность пород, литологическая их неоднородность, анизотропия свойств и многое другое. В результате совместного воздействия естественных и искусственно созданных факторов массивы горных пород находятся в весьма сложном напряженно-деформированном состоянии. Решающим здесь является то обстоятельство, что факторы, формирующие указанное состояние массива, в подавляющем большинстве имеют случайный характер. Современные методы, в том числе и вероятностно-статистические, не позволяют с достаточной надежностью оценить возможность и степень проявления любого из действующих факторов в конкретных условиях. Поэтому параметры горно-геологических явлений невозможно выразить в виде точных функциональных или иных зависимостей.

§ 3. Сдвигание горных пород

Сдвигание горных пород — это длительный и многостадийный процесс деформирования подработанных массивов пород, вызываемого перемещениями их в сторону выработанного пространства. В процессе сдвигания участки массива пород, попадающие в зону влияния выработанного пространства последовательно или одновременно испытывают все виды деформирования: изгиб, сдвиг, растяжение, сжатие.

Процесс сдвигания начинает развиваться от выработки. На рис. 61 показано перераспределение напряжений в массиве пород при сооружении в нем горной выработки. При этом в кровле выработки, в частности, образуется зона разгрузки, породы которой передают давления на слой пород, непосредственно прилегающий к кровле, или на крепь. При определенном соотношении прочностных и деформационных характеристик пород и размеров выработки (так называемый предельный пролет) породы кровли начинают изгибаться и разрушаться. Если обнажение пород в кровле достаточно велико или выработку постепенно расширяют, процесс разрушения захватывает новые зоны, достигая земной поверхности.

* Изохромы — линии, соединяющие точки с одинаковыми максимальными касательными напряжениями.

Часть массива пород, перемещающаяся в сторону выработанного пространства, образует область сдвижения горных пород. В общем случае в этой области различают несколько зон сдвижения (рис. 62). Зона обрушения характеризуется полной потерей связи между отдельными частицами массива и беспорядочным перемещением их в сторону выработанного пространства. Эта зона образуется лишь в тех случаях, когда залежь отрабатывается системами с обрушением налегающих пород (естественным

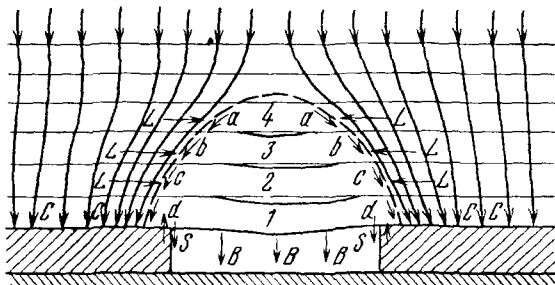


Рис. 61. Распределение сил над горизонтальной выработкой

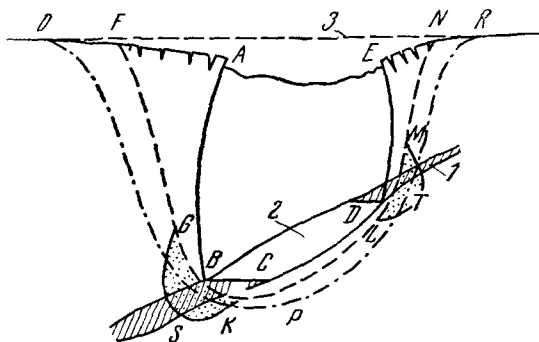


Рис. 62. Зоны сдвижения горных пород:

ABCDE — зона обрушения; FGKLMN — граница зоны трещин (сдвижения с разрывом сплошных пород); OPR — граница зоны плавных сдвижений; GSK и LTM — области опорного давления; 1 — залежь полезного ископаемого; 2 — отрабатанная часть залежи; 3 — положение земной поверхности до отработки залежи

или принудительным). Не во всех случаях зона обрушения может распространяться до земной поверхности. Это зависит от соотношения глубины разработки и вынимаемой мощности залежи, а также горно-геологических условий месторождения (размеров и угла наклона залежи, физико-механических характеристик пород). Для слепых рудных залежей А. Г. Акимовым [51] получена эмпирическая зависимость по определению возможности образования провала на земной поверхности:

$$H' \leq H_p = k \frac{42mL'}{7m + 5L'}$$

где H' — мощность коренных пород (рис. 63), равная $H - h$ (h — мощность наносов и выветрелых пород); m — мощность

рудной залежи; L' — горизонтальная проекция рудной залежи, равная $L' = L \cos \alpha + m \sin \alpha$; k — коэффициент, учитывающий крепость налегающих пород, принимаемый равным 1,0—0,8 для интервала крепостей $f = 2$ —10.

Характер деформирования подрабатываемой толщи пород существенно зависит от применяемой системы разработки. Так, если применяется система разработки с обрушением налегающих пород, то в подрабатываемой толще обязательно формируется зона обрушения, и различие может быть только в ее размерах. Обработка этих же залежей системами с поддержанием налегающих пород (например, закладкой, опорными целиками, крепью и т. п.), как правило, не приводит к образованию зоны обрушения и породы над выработанным пространством деформируются пликативно (т. е. без разрывов сплошности) или с образованием трещин на сравнительно небольшую глубину.

Непосредственно к зоне обрушения примыкает зона трещин, т. е. зона, где массив подработанных пород деформируется с разрывами сплошности, с образованием трещин различной ширины (от нескольких миллиметров до единиц метров) и протяженности. Для этой зоны характерно сохранение первоначальной ориентировки в пространстве частиц массива, несмотря на значительную (местами — полную) потерю связи между ними. Между зоной обрушения и зоной трещин нет четкой границы.

Зона трещин образуется в результате деформаций изгиба и сдвига отдельных слоев и участков пород в периферийной части массива, прилегающего к обрушенным породам. В процессе развития зоны обрушения за счет зоны трещин пограничные участки пород образуют консольные зависания, которые, прогибаясь в сторону зоны обрушения, отделяются от массива. На поверхности при этом образуются уступы в виде террас, разделенные трещинами, параллельными границам зоны обрушения.

Последняя, крайняя, из зон сдвижения горных пород — это зона плавных сдвижений. Здесь перемещения и деформации пород происходят без разрыва сплошности. Размеры зоны и величины деформаций в большей мере зависят от прочностных и деформационных характеристик пород. Так, в породах слабых, рыхлых, пластически деформирующихся (пески, глины, сланцы и т. п.) размеры зоны плавных сдвижений наибольшие, соответственно велики и абсолютные величины перемещений и деформаций. Следует отметить, что в таких условиях зона трещин сравнительно мала или вообще отсутствует. Во многих случаях

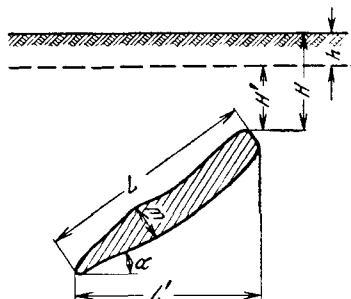


Рис. 63. Схема к определению возможности образования провала на земной поверхности

данные породы не образуют зоны обрушения, и выработанное пространство заполняется за счет пликативного прогиба пород вышележащей толщи.

В породах высокой прочности и хрупких зона плавных сдвижений весьма мала по размерам, а деформации очень незначительны, иногда их даже трудно наблюдать. В этих условиях наружные границы зоны трещин и зоны плавных сдвижений внешне совпадают.

Деформации пород в окрестностях горной выработки происходят, как правило, по имеющимся естественным поверхностям ослабления. В еще большей степени это положение относится к перемещениям и деформациям элементов и подработанного массива в целом при сдвижении горных пород. Эта особенность поведения пород при сдвижении и аналогия процесса с механизмом пластических деформаций среды впервые использована С. Г. Авершиным [2].

Учет структурной раздробленности массива подработанных пород в теоретических изысканиях и практических расчетах может осуществляться: а) путем введения коэффициента структурного ослабления, характеризующего уменьшение прочности массива по сравнению с прочностью слагающих его пород; б) отождествлением углов сдвижения пород с углами наклона наиболее вероятных систем трещин; в) рассмотрением крупной тектонической трещины (зоны) в качестве возможной поверхности сдвига пород и т. д.

Явление сдвижения горных пород принято характеризовать определенными геометрическими и временными параметрами, характеризующими не сам процесс, а состояние его на конечной или на некоторых промежуточных стадиях. Эти параметры позволяют не только качественно, но и количественно оценить явление и используются при расчете величин сдвижения пород, при определении и установлении мер охраны сооружения и природных объектов.

Наиболее примечательным проявлением сдвижения горных пород на земной поверхности является мульд сдвигения, представляющая собой площадь поверхности над выработанным пространством, точки которой претерпели вертикальные и горизонтальные перемещения. Размеры мульды сдвижения (площадь), как правило, больше проекции площади выработанного пространства.

На рис. 64 показано распределение максимальных перемещений и деформаций земной поверхности и толщи пород в мульде сдвижения для случая пликативной деформации пород, характерное например, для отработки угольных месторождений.

В настоящее время приняты следующие формулировки и методы вычисления указанных параметров:

а) максимальное оседание η_0 — наибольшая величина вертикальных перемещений точек земной поверхности;

- б) максимальное горизонтальное сдвигение ξ_0 — наибольшее горизонтальное перемещение точек земной поверхности;
- в) максимальный наклон i_0 — отрезок на контуре мульды сдвигения, имеющий наибольший наклон к горизонту, определяется как наибольшее отношение разности оседаний соседних точек к горизонтальному расстоянию между ними.

$$i_{1-2} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{l_{1-2}}; \quad (\text{III.6})$$

- г) максимальная кривизна k_0 — наибольшее изменение наклона контура мульды — определяется как наибольшее из отношений разности наклонов двух смежных отрезков к полусумме горизонтальных длин этих отрезков

$$k_2 = \frac{2(i_{1-2} - i_{2-3})}{l_{1-2} + l_{2-3}}; \quad (\text{III.7})$$

- д) максимальное расстояние или сжатие ε_0 участка мульды сдвигения — определяется как наибольшее отношение разности горизонтальных длин определенного интервала контура мульды, полученных до начала и после окончания процесса сдвигения к первоначальной длине интервала:

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{l'_{1-2} - l''_{1-2}}{l'_{1-2}}; \quad (\text{III.8})$$

- е) угол наклона линии максимальных оседаний θ — определяется как угол наклона к горизонту прямой линии, соединяющей точку с максимальным оседанием на поверхности с серединой выработанного пространства (см. рис. 66);

- ж) продолжительность процесса сдвигения — период, в течение которого массив пород и земная поверхность находятся в состоянии сдвигения; за начало процесса сдвигения принимают момент, соответствующий началу очистных работ, а за окончание процесса сдвигения — момент, когда перемещения наблюдаемых точек мульды сдвигения прекращаются вообще, или чаще всего момент, после которого суммарное годовое оседание точек мульды сдвигения не превышает определенной заданной величины (например, 50 мм/год).

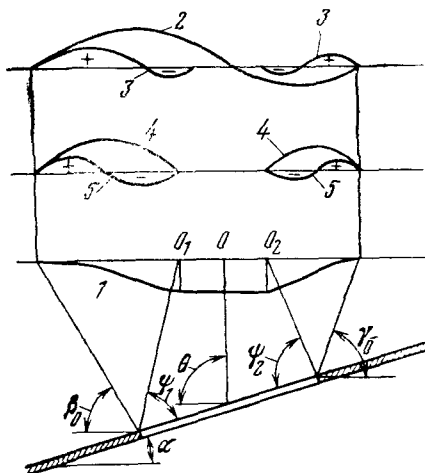


Рис. 64. Графики распределения сдвижений и деформаций в мульде сдвигения:

1 — оседания; 2 — горизонтальные сдвигения; 3 — горизонтальные деформации сжатия и растяжения; 4 — наклоны; 5 — кривизна; O_1O_2 — плоский участок мульды сдвигения

Весьма важными, повсеместно и широко используемыми геометрическими параметрами, характеризующими сдвигание горных пород, являются углы сдвига и углы разрывов сплошности.

Углами сдвига называют углы наклона к горизонту линий, соединяющих границы выработанного пространства с границами зоны опасных сдвижений (рис. 65). За границу зоны опасных сдвижений принимают линию на земной поверхности,

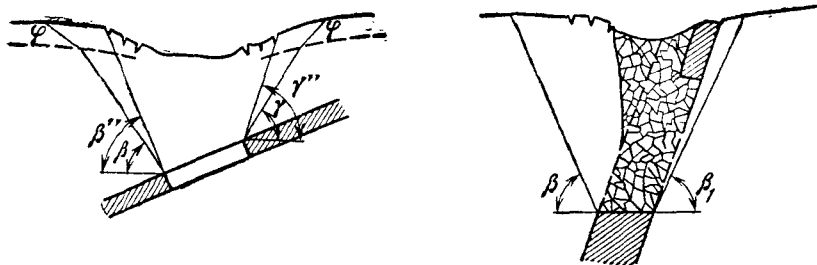


Рис. 65. Углы сдвига и разрывов на разрезах вкрест простирания при пологом и крутом падении залежи

на поверхности контакта коренных пород с наносами (или любой другой поверхности в массиве пород), которая соединяет точки с одинаковыми значениями оседаний, горизонтальных сдвижений и др., признанными опасными для сооружений.

Углы сдвига строятся и определяются в вертикальных плоскостях, проведенных через характерные участки мульды сдвига по простиранию и вкрест простирания залежи. В соответствии с этим различают углы сдвига: в висячем боку у нижней границы выработанного пространства β и у верхней его границы γ ; в лежащем боку у нижней границы выработки β_1 ; по простиранию залежи у нижней границы выработки δ . В наносах углы сдвига φ принимаются одинаковыми во всех направлениях.

Следует помнить, что углы сдвига пород так же, как и линии, их образующие, параметры условные. Как показали многочисленные наблюдения в натурных условиях, эксперименты на моделях и теоретические обобщения [28], граница зоны сдвига горных пород не является в вертикальном сечении прямолинейной. Приложение методов теории пластичности, в частности методов статики и динамики сыпучей среды, показывает, что одной из возможных математических интерпретаций криволинейной границы зоны сдвижений может быть линия параболического очертания (рис. 66).

Углы разрывов β'' , β''_1 , γ'' , δ'' , соответствующие углам сдвига, образуются линиями, соединяющими контур выработанного пространства с крайними видимыми трещинами на земной

поверхности. Эти параметры, так же как и углы сдвижения, являются условными, не отражают действительной области трещинообразования в массиве, а служат лишь для определения границ зоны трещин на поверхности при решении технических задач по охране сооружений и природных объектов.

Наиболее надежным методом определения параметров сдвижения горных пород следует считать непосредственные натурные наблюдения на поверхности и в подрабатываемом массиве пород эксплуатируемого месторождения. Наблюдения содержат комплекс измерений, который включает: а) закладку сети реперов на земной поверхности и в подрабатываемых выработках подземных горизонтов и периодическое определение пространственных координат их методами маркшейдерской съемки; б) закладку глубинных реперов в скважины, пробуренные в подрабатываемую толщу пород с целью определения вертикальных перемещений отдельных точек массива и наблюдения за развитием зоны обрушения; в) детальную структурную съемку массива пород месторождения с целью качественной и количественной характеристик структурной расчлененности его; г) съемку провалов и наблюдения за появлением и развитием трещин разрывов на поверхности, промежуточных горизонтах и глубине массива (специальными приборами) и др.

Однако не всегда имеется возможность получить параметры сдвижения на основе материалов натурных измерений, в частности, это относится к месторождениям полезных ископаемых с неизученным характером сдвижения и в первую очередь проектируемым к отработке. В этом случае параметры сдвижения горных пород принимают по аналогии с другими или путем предрасчета.

§ 4. Пучение горных пород

Явление деформаций пород почвы и стенок подземных горных выработок, протекающее в форме выдавливания, выширания пород в сторону обнажения, называют пучением*. Наиболее часто с этим явлением сталкиваются при разработке угольных, каменносолевых, рудных месторождений. Известно оно и в практике

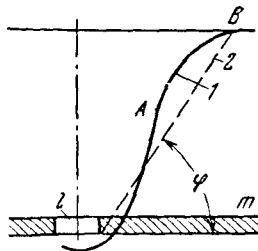


Рис. 66. Граница зоны сдвижения горных пород:

m — разрабатываемая залежь; l — горная выработка; 1 — граница зоны сдвижения пород в виде $y^* = 2\phi x$; 2 — граница зоны сдвижения пород в виде прямой линии под углом ϕ к горизонту

* В инженерно-геологической и горнотехнической литературе это явление характеризуют также терминами: «вспучивание», «поддувание», «дутье», «набухание», «выдавливание», однако наиболее широкое распространение получил термин «пучение».

гидротехнического дорожного, промышленного строительства (при сооружении и эксплуатации транспортных и водосборных панелей, подземных хранилищ нефтегазопродуктов и др.). Особенно широко развито пучение на шахтах Подмосковского бассейна, Ахалцихского месторождения в Грузии, Артемовского месторождения на Дальнем Востоке, Никополь-Марганцевого бассейна.

В результате пучения уменьшаются размеры поперечного сечения выработок, разрушаются крепи, вентиляционные и транспортные магистрали. Известны случаи полного заполнения выработки выдавливаемой породой в течение 4—5 суток (Артемовское бурогольное месторождение).

Увеличение объема работ по восстановлению выработок наносит огромный ущерб народному хозяйству. По данным А. П. Максимова, стоимость ремонта выработок в этих условиях достигает 100 руб. в год на 1 м выработки. Пучение свойственно главным образом глинистым породам, обладающим незначительным сцеплением и внутренним трением. С увеличением глубины заложения выработок пучению подвергаются породы значительной прочности (глинистые и песчаные сланцы, плотные и прочные аргиллиты и алевролиты, иногда песчаники). Так, по данным А. П. Максимова, при глубине свыше 700 м большинство глинистых и песчано-глинистых сланцев выдавливается в выработки даже тогда, когда они заложены в нетронутом массиве. Процесс пучения глинистых пород развивается под действием сил горного давления, набухания породы, фильтрационного давления подземных вод, явления гидратации и окисления. Первопричиной пучения является нарушение естественного напряженного состояния массива после проведения выработки. При наличии благоприятных условий (обводненности или влажного воздуха) глинистые породы набухают, увеличивая свою пластичность. Набухание глины возрастает при увеличении содержания в породе коллоидных и глинистых частиц, глинистых минералов с подвижной кристаллической решеткой, замещения в диффузном слое двух- и трехвалентных катионов одновалентными, а также нарушении их естественной структуры. Изменение естественного состояния пород приводит к повышению интенсивности и величины давления набухания во времени.

При градиентах фильтрации, близких или превышающих критические значения ($I_{кр}$), наблюдается вначале гидродинамическое взвешивание, а затем выпучивание породы, нередко завершающееся прорывом воды в горную выработку. Деформации в этом случае носят характер в ы п о р а. В некоторых случаях (например, в угольных шахтах Нелидовского района Мосбасса) наблюдается непосредственная связь между градиентами фильтрации и величиной давления пучащих пород на крепь. Такого рода явления свидетельствуют об особом типе пучения породы — пучение под действием фильтрационного давления. Основными средствами борьбы с ними являются снятие гидростатических

напоров водоносных горизонтов и максимально возможное снижение величины горного давления.

В некоторых случаях отмечается своеобразное набухание пород вследствие приращения объема некоторых минералов в результате их гидратации, окисления и некоторых других процессов выветривания. Надо полагать, что средства, используемые для борьбы с явлениями выветривания, могут оказаться полезными и для борьбы с явлениями пучения такой природы.

Предварительное осушение обводненных месторождений является наиболее универсальным и эффективным способом борьбы с пучением глинистых пород. С его помощью достигается снижение как горного, так и фильтрационного давления, во многих случаях играющих основную роль в деформациях пучения пород.

На процессы пучения кроме чисто горнотехнологических факторов оказывают влияние сложение породы, прочность и жесткость вмещающих пород и условия и форма залегания пучащейся породы. Слоистое сложение, наличие обводненных прослоек и линз, увеличение мощности породы способствует пучению. Жесткие породы, перекрывающие и подстилающие пучащуюся породу, играют роль своеобразных тисков и также способствуют пучению. Влияние формы и тектонических условий залегания, по-видимому, сказывается через перераспределение напряжений в окрестностях горных выработок. Например, в условиях синклинального залегания давление пучения заметно возрастает; наоборот, в осевых частях антиклинальных складок оно уменьшается. Повышается склонность к пучению пород и в зонах тектонических нарушений, как известно, всегда характеризующихся повышенным горным давлением.

§ 5. Отжим горных пород и горные удары

Если в кровле пласта развиты породы, допускающие прогиб без видимого нарушения сплошности, или породы опускаются крупными блоками, то происходит явление отжима пород угля. Отжим начинается со слабых прослоек угля или породы. Прочные породные прослои и включения, например в угольном пласте, резко снижают отжимаемость. Снижают отжимаемость и слабые породы кровли. Очевидно, что отжимаемости будут способствовать все факторы, повышающие горное давление на забой.

По исследованиям в Донбассе (В. И. Кравченко) наличие слабых прослоек, расположенных в нижней части пласта, способствует движению верхней пачки угля. Мягкие прослойки или пачки угля в верхней части пласта способны исключить возможность отжима. Отжим наблюдается при разработке как каменных углей, так и антрацитов. Трещины кливажа, образующие плоскости наименьшего сопротивления, способствуют отжиму, особенно в том случае, когда забой расположен по кливажу. Отжим в условиях Донбасса наблюдается на пластах различной мощности

как пологого, так и наклонного падения. Однако на крутопадающих пластах величины смещений обычно меньше. В пластах, нарушенных сбросами, пережимами и т. д., отжим не наблюдается. Он проявляется в максимальной степени при условии спокойного залегания пород и угля. Трещины в породах кровли, ориентированные по направлению забоя лавы, уменьшают отжим угля или полностью его исключают. Отжим угля происходит при отсутствии спайности угля с боковыми породами. Гладкие зеркальные поверхности и прослойки глины способствуют отжиму, а «поддувающие» породы почвы препятствуют ему. Минимальная глубина разработок, при которой в Донбассе наблюдается отжим угля, 70 м. Обводнение месторождения ухудшает явления отжима. Из горно-геологических факторов наибольшее влияние на отжим угля оказывают: система разработки и длина лав, взаимное расположение лав и скорость их продвижения, способ управления кровлей. Использование влияния этих факторов на многих шахтах значительно повысило производительность труда при разработке угля.

Горные удары и внезапные выбросы угля и газа представляют наиболее грозную опасность при горных работах. Разрушение горных пород и угля при этих явлениях носит характер внезапного взрыва, сопровождающегося сильным гулом, сотрясениями и воздушным ударом. В результате крепь выработок повреждается или полностью разрушается, выработки заваливаются выброшенной породой и углем, а породы кровли, ослабленные ударом, теряют свою устойчивость и часто обрушаются, заваливая выработку. Горному удару обычно предшествуют усиление горного давления на целики и крепь выработок, выпучивание почвы, выдавливание целиков и некоторые другие проявления горного давления.

Горные удары возникают при высокой прочности и жесткости вмещающих пород и способности их накапливать энергию упругой деформации. Они наблюдаются на участках максимальных концентраций напряжений и в момент мгновенного перераспределения последних при нарушении сплошности высокопрочных пород кровли, обычно в наиболее расслабленных зонах. Интенсивная дислоцированность пород всегда благоприятствует данным явлениям. Внезапные удары большой силы наблюдаются в калийных рудниках и при извлечении оставленных целиков в угольных шахтах.

Внезапные выбросы угля и газа (метана, углекислого) приурочиваются к призабойным частям угольного пласта. В большинстве случаев они начинаются с глубины 250 м, однако отмечены случаи выбросов и на меньших глубинах.

Геологические нарушения — вздутя и пережимы, флексуробразные перегибы и местные разрывы угольного пласта способствуют появлению внезапных выбросов. Частота внезапных выбросов возрастает в пределах пласта с увеличением углов паде-

ния и мощности. Обводненность пород ослабляет явление внезапного выброса угля и газа. Ослабевают они и с повышением газоносности. С увеличением глубины, по-видимому, падает зависимость частоты и интенсивности внезапных выбросов от нарушений угольного пласта.

В настоящее время ведутся исследования с целью использования сил горного давления, проявляющихся при горных ударах, для облегчения безлюдной выемки угля путем искусственного вызова горных ударов.

§ 6. Депрессионные деформации пород в поле водопонижения

Предварительное водопонижение при разработке месторождений полезных ископаемых, интенсивные откачки подземных вод для водоснабжения, добычи нефти и газа резко изменяют природную гидрогеологическую обстановку массивов горных пород.

В зоне развития депрессионной воронки происходит перераспределение напряжений вследствие снятия эффекта гидростатического взвешивания в пластах. Известно, что нагрузка от массы пород P_z в массиве воспринимается скелетом породы (эффективное напряжение — $P_э$) и поровой водой (нейтральное давление — P_n). Величина эффективного напряжения в массиве на глубине h будет равна

$$P_э = P_z - P_n = \Delta_{ср} h - H \Delta_n, \quad (III.9)$$

где $\Delta_{ср}$ — средневзвешенное значение объемной массы пород, залегающих над рассматриваемой точкой;

H — высота столба воды над этой точкой;

Δ_n — объемная масса воды.

При снижении уровня воды в водоносном горизонте на величину ΔH увеличивается напряжение $P_э$ в скелете породы

$$P'_э = \Delta_{ср} h - \Delta_n (H - \Delta H). \quad (III.10)$$

Приращение эффективных напряжений в пласте за счет снижения гидростатических напоров составит:

$$\Delta P_э = \Delta H \Delta_n = \Delta P_n. \quad (III.11)$$

Значительное снижение нейтрального (порового) давления в пластах в зоне развития депрессионной воронки обуславливает депрессионное уплотнение горных пород, повышение напряжений в скелете пород, увеличение их прочности. При этом породы, представляющие водоносные горизонты, уплотняются по всей их мощности. Перераспределение напряжений и деформации глинистых пород могут происходить как по всей мощности пласта, так и лишь по его части, называемой зоной уплотнения.

Мощность зоны уплотнения зависит от величины приращения напряжений у дренирующего контакта пласта и значения начального градиента фильтрации.

Наибольшее влияние оказывает депрессионное уплотнение на прочностные свойства тонкозернистых, пылеватых, глинистых песков и глин. При уменьшении влажности глинистых пород происходит повышение свободной поверхностной энергии на границе раздела твердой и жидкой фаз, исчезают переходные диффузные слои, значительно возрастает величина сцепления. Изменения напряженного состояния породного массива в результате снижения гидростатических напоров в основном определяют деформации как дренируемых, так и контактирующих с ними пластов. На участках производства водопонижительных работ депрессионные воронки занимают огромные площади и обычно имеют незначительные уклоны, что обуславливает в основном вертикальные линейные деформации пластов, т. е. осадки. Осадки пластов, вызванные снижением гидростатических напоров, отмечены в ряде районов различных стран.

Так, на Южно-Белозерском железорудном месторождении под влиянием снижения гидростатических напоров в бучакском и рудно-кристаллическом водоносных горизонтах на 200—300 м и более произошли крупные деформации пород осадочной толщи и выветрелых докембрийских образований. В течение 10 лет проведения дренажных мероприятий на месторождении (1963—1972 гг.) суммарная величина осадка пластов составила более 2,5 м. Вертикальные смещения некоторых пластов в процессе водопонижения значительно превосходили расчетные величины осадок и вызвали крупные нарушения крепи шахтных стволов.

Оседание дневной поверхности под влиянием дренажных мероприятий наблюдалось также на территории Челябинского угольного бассейна. За период 1931—1944 гг. осадка составила 35—40 см, что явилось причиной возникновения в крепи стволов трещин шириной до 30 см [44]. Отмечены также осадки под влиянием водопонижения на Александрийском и Львовско-Волинском угольном месторождениях, Чиатурском марганцевом месторождении, Рейнско-Вестфальском, Альтенбургском угольных месторождениях и др.

Вертикальные смещения поверхности территории наблюдаются также в районах крупных водозаборов и на участках разработки нефти и газа. При этом оседание пластов и дневной поверхности часто носит региональный характер. Площадь мульд оседания охватывает десятки, сотни и тысячи квадратных километров. Так, площадь мульды оседания в дельте р. По составляет 730 км², в долине Сан-Хоаким — 3500 км². За 50-летний период откачек подземных вод в районе г. Токио осадка дневной поверхности достигла более 3 м, в районе г. Осака — более 2 м.

В районе г. Мехико под влиянием вызванного откачками снижения пьезометрического уровня подземных вод происходит де-

прессионное уплотнение мощной толщи (90—300 м), представленной комплексом переслаивающихся миоценовых и четвертичных галечников, песков, известняков, глин и илов аллювиального, озерного и вулканогенного происхождения. Средняя величина оседания поверхности за 76 лет составила 5,6 м, а на отдельных участках к 1960 г. достигла 7 м. Неравномерные осадки массива сопровождаются разрушением некоторых зданий, нарушением водопроводной и канализационной сети.

Значительные осадки поверхности под влиянием водопонижения наблюдаются в районах городов Москвы, Лондона, Ленинграда, Парижа, Киева, Берлина и др.

При расчетах осадок под влиянием водопонижения необходимо учитывать также процессы усадки глинистых пород в результате «подземного испарения»: механическую суффозию, химическую суффозию и диффузное выщелачивание пород.

При прогнозировании напряженно-деформированного состояния породных массивов в поле водопонижения необходима постановка специальных экспериментов, позволяющих определять параметры прочности и деформации пород с учетом как изменения их напряженного состояния, так и явлений, не связанных с общим приращением напряжений в скелете породы.

§ 7. Деформации породных отвалов угольных шахт

При разработке угольных месторождений подземным способом возникает необходимость попутного извлечения и перемещения углевмещающих пород, что требует создания специальной службы породного хозяйства. В практике горных работ сложилось три основных направления организации породного хозяйства:

а) выдача породы на поверхность с последующей укладкой (отвалообразование);

б) выдача породы на поверхность для переработки (например, получение закладочных или строительных материалов);

в) размещение породы в выработанном пространстве.

Наибольшее распространение получило первое направление, что можно объяснить относительной простотой технологических схем и меньшими по сравнению с двумя другими капитальными затратами.

Формирование породных отвалов угольных шахт производится путем отсыпки отвальных масс с использованием различных средств транспортировки (автомобильный, железнодорожный транспорт, канатная откатка в скипах и вагонетках и др.). В ряде случаев при наличии водных ресурсов, благоприятного рельефа местности и значительного объема извлекаемых пород применяют методы гидромеханизации.

Складируемая в отвалы масса разнородна по своему составу, она включает: различной крупности куски угля, углистых сланцев, аргиллита, полупродукта (сростков пустой породы с углем),

пирита, пустой породы, а также лесоматериалы (обломки крепи, шпалы и др.) и различные металлические предметы (куски труб, рельсов). Наличие горючего материала обычно приводит к самовозгоранию отвалов, что резко ухудшает условия их эксплуатации, отравляя воздух пожарными газами, и способствует возникновению деформаций. В табл. 43 приведена составленная в МакНИИ классификация породных отвалов по тепловому состоянию.

Деформации породных отвалов угольных шахт, возникающие в процессе эксплуатации, составляют особую группу горно-геологических явлений.

Т а б л и ц а 43

Классификация породных отвалов по тепловому состоянию

Группа	Показатель
Негорящие	Отсутствуют признаки горения поверхностного слоя (дым, пар, пожарные газы, открытый огонь, участки раскаленной породы)
Горящие	На поверхности отвалов имеются видимые очаги горения или температура пород на глубине 0,5—3 м от поверхности составляет 150° С и выше
Интенсивно горящие	От горения отвалов загазованность воздуха на расстоянии 300 м превышает предельно допустимые нормы (концентрация окиси углерода 6 мл на 1 м ³ , сернистого газа 0,5 мг на 1 м ³ атмосферного воздуха)

Основными видами деформаций следует считать различного типа оползни, обрушения, осыпи, уплотнения пород отвала и их основания под действием гравитационных сил, некоторые формы проявления сдвижения пород в результате подработки территории отвальных площадей подземными горными выработками.

Факторы, определяющие возникновение этих деформаций, носящих порой катастрофический характер, можно разделить на две группы: природные (геологическая и гидрогеологическая обстановка, действие силы тяжести, воды, ветра, солнечной энергии) и искусственные, вызванные деятельностью человека (характер отвалообразования, вид транспортировки отвальных масс, план ведения горных работ на шахте и отвале, порядок разработки отвала, схемы рекультивации).

Следует, однако, иметь в виду, что деформации породных отвалов являются, как правило, результатом совместного действия выделенных факторов.

Характерными горно-геологическими явлениями на отвалах угольных шахт следует считать термические оползни — обрушения и выбросы породы. Основная причина этих процессов — горение

Виды термических оползней-обрушений (по П. А. Леонову и
Б. А. Сурначеву)

Виды оползней	Краткая характеристика	Основные условия возникновения
1. Сухой термический оползень-обрушение	Возникает в ясную погоду, иногда при слабых осадках. Перемещение отвальной массы из откосов за контур основания отвала с образованием полости в виде циркообразной воронки и облака раскаленной породной и горячей угольной пыли. Образование воронки сопровождается обрушением пород у ее кромки	Нарушение равновесия пород отвала вследствие изменения после их обжига силы сцепления и угла внутреннего трения
2. Ливневый термический оползень-обрушение	Возникает только в сильный ливневый дождь. Перемещение отвальной массы из откосов за границу основания отвала с образованием полости в виде циркообразной воронки, кромки которой быстро обрушаются, и облака раскаленной породной и горячей пыли. В некоторых случаях это облако может отсутствовать	Нарушение равновесия пород отвала вследствие нарушения их устойчивости водой, проникающей в раскаленные массы пород
3. Термический выброс — оползень-обрушение	Этот сложный оползень возникает только в сильный ливневый дождь. Вначале при попадании воды внутрь отвала происходит выброс (от давления пара) с образованием воронки. Затем вода через воронку проникает в раскаленные участки отвала. В результате происходит оползень (перемещение породы за контур основания отвала, образование циркообразной воронки, а иногда облака раскаленной породы и горячей угольной пыли). Затем начинается обрушение крутых стенок полости оползня	Наличие в теле породной полости или трещин. Они необходимы для возникновения первоначального выброса. Нарушение равновесия пород отвала вследствие изменения водой, проникающей на раскаленные массы породы, их устойчивости

отвальных масс. В зависимости от условий возникновения различают [31] три вида термических оползней-обрушений (табл. 44). Выбросы породы происходят под действием пара, образующегося в теле отвала (пустотах, трещинах) при попадании туда воды.

Все перечисленные виды деформаций породных отвалов угольных шахт и сопутствующих им процессов (выделение ядовитых и вредных газов) представляют серьезную опасность для обслуживающего персонала, оборудования, сооружений, окружающей среды. Поэтому предупреждение подобных горно-геологических явлений рассматривается как одна из важнейших задач горного производства.

Прогнозирование состояния породных отвалов производят по результатам инженерно-геологических исследований, включающих:

- а) оценку геодинамической обстановки территории;
- б) определение физико-механических свойств пород основания и тела отвала;
- в) расчеты оптимальных параметров отвала (высоты и угла наклона);
- г) расчеты осадок пород основания и тела отвала.

§ 8. Процессы деформаций подземных выработок в неоднороднослоистых массивах

В последнее десятилетие в мировой практике нашли широкое применение способы подземного хранения нефтегазопродуктов в специальных камерах, создаваемых различными способами (шахтный, метод внутренних взрывов, метод растворения). Одним из наиболее перспективных следует считать геотехнологический метод, при котором емкость формируется в отложениях каменной соли путем ее растворения пресной водой.

Достоинствами подземного способа хранения являются относительная простота технологической схемы сооружения емкости, отсутствие потерь хранимого продукта от испарения при сезонных и суточных колебаниях температуры, значительное сокращение расхода металла, уменьшение земельных угодий, отводимых под строительство, противопожарная безопасность.

К настоящему времени еще не накоплен представительный материал, позволяющий оценить устойчивость и прочность создаваемых подземных емкостей по сооружениям-аналогам, при этом отметим трудность осуществления натурного контроля характеристик деформируемости пород на контуре и в окрестности емкости. Поэтому необходимо изучать и в соответствии с конкретными условиями применять богатый опыт, накопленный при разработке месторождений каменной и калийной солей. Известно, что эти месторождения разрабатываются двумя способами: шахтным и методом подземного выщелачивания. При шахтном спо-

собе принята камерная система разработки с оставлением междукамерных целиков. Способ подземного выщелачивания подразделяется на шахтный, предусматривающий проведение подготовительных горных выработок и характеризующийся образованием специфических камер-луговен, бассейнов, колоколов, и подземное выщелачивание через буровые скважины.

Устойчивое положение выработки во многом определяется глубиной ее заложения и типом соляной структуры. Для пластовых соляных месторождений пролет камер на глубине 100 м составляет 20 м и уменьшается до 9 м при глубине 1500 м. Для купольных соляных структур пролет камер, заложенных на глубинах порядка 100 м, составляет 56 м и уменьшается до 15 м при увеличении глубины до 900 м.

В общем виде условие появления области неупругих деформаций для пространственного случая имеет вид:

$$\gamma H > \frac{1}{3} \alpha k \operatorname{ctg} \rho, \quad (\text{III.12})$$

где γ — объемная масса породы
 H — глубина заложения емкости;
 k — коэффициент сцепления;
 ρ — угол внутреннего трения;
 $\alpha = \sin \rho/1 - \sin \rho$.

Интенсивность пластических деформаций возрастает с глубиной; подобное явление наблюдалось рядом экспериментаторов при проходке глубоких стволов и штреков, расположенных на больших глубинах. Пластический характер деформирования калийных солей отмечен на руднике Alw insal (Канада), где наблюдалось выдавливание тонких прослоек глины в почве горизонтальной выработки, пройденной на глубине 850 м в силвинитовых слоях.

Наблюдения на шахте им. Свердлова (Артемовское месторождение) показали, что характеру поперечных деформаций междукамерных целиков отвечает начальная стадия ползучести. Максимальная величина поперечной деформации достигла 0,4—0,6 мм на 1 м ширины целика (глубина разработки — 140—180 м, пролет и высота камер соответственно — 17, 12—14 мм; ширина целика 9—13 м). В одной из камер шахты 1 отмечено выдавливание почвы: раскрытие трещины составило около 2 см, почва в центре камер имеет значительное поднятие.

Многочисленные наблюдения на шахтах Солотвинского месторождения указывают на пластический характер деформирования, проявляющийся в виде выпирания стенок выработок, увеличения поперечных размеров целиков и стенок.

Пластический характер деформирования пород соленосной толщи, сопровождающийся уменьшением сечения выработок и выдавливанием глинистых прослоек, отмечен на Аванском солеруднике.

При строительстве и эксплуатации подземных емкостей следует учитывать возможность развития процесса выдавливания глинистых прослоек в емкость.

Обращаясь к процессу деформирования неоднороднослоистых сред, можно отметить, что определяющими являются свойства пород, напряжения, характер деформирования. Выдавливание глинистых прослоек в емкость, обусловленное структурно-механическими особенностями основного горно-геологического яруса, происходит тогда, когда эта порода переходит из упругопластического состояния в вязкопластическое течение (по результатам натурных наблюдений на Аванском солеруднике скорость выдавливания примерно постоянна).

При решении задачи о деформируемости пород в окрестности сооружения, возводимого в слоистой среде, характеризующейся наличием глинистых прослоек (однофазная среда), может быть использовано допущение о том, что течение глинистого слоя подчиняется закону Бингама — Шведова. Решение позволяет определить скорость перемещения глинистых пород в пределах слоя и величину изменения объема выработки.

Для случая полного водонасыщения глинистых прослоек (двухфазная среда) прогноз деформации целесообразно осуществить на основе теории фильтрационной консолидации с использованием полученного Ю. К. Зарецким [21] решения задачи о напряженном состоянии полого толстостенного грунтового цилиндра при плоской осесимметричной деформации и последующего учета ползучести минерального скелета глинистой породы.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

ГЛАВА 18

**ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

**§ 1. Изучение инженерно-геологических
особенностей месторождения при его разведке,
проектировании и эксплуатации горного предприятия**

Для геологоразведочного процесса характерны следующие стадии: геологосъемочные работы, поисковые работы, предварительная и детальная разведка, выполняемые специализированными геологоразведочными организациями, и эксплуатационная разведка, проводимая, силами горнодобывающего предприятия.

Проектирование горного предприятия ведется обычно в три этапа: 1) составление технико-экономического обоснования (ТЭО) или технико-экономического доклада (ТЭДа); 2) составление технического проекта и 3) подготовка рабочих чертежей.

Разведка месторождения и проектирование горного предприятия находятся между собой в определенной взаимосвязи.

На основе результатов предварительной разведки разрабатываются временные кондиции на минеральное сырье*.

По результатам детальной разведки разрабатываются постоянные кондиции, которые должны обеспечить правильную геолого-экономическую оценку запасов минерального сырья в недрах при их подсчете и утверждении. Кроме того, постоянные кондиции используются при разработке проектов горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, планировании и проведении горно-эксплуатационных работ и решении вопросов, связанных с охраной недр.

При составлении кондиций учитываются горнотехнические, гидрогеологические и инженерно-геологические условия место-

* Кондиции на минеральное сырье — совокупность требований к качеству полезных ископаемых в недрах, горно-геологическим и иным условиям разработки; соблюдение которых при окомтуривании и подсчете запасов позволяет правильно разделить запасы полезных ископаемых по их народно-хозяйственному значению на балансовые и забалансовые.

рождения, на основе которых определяются способы разработки. Инженерно-геологическое изучение месторождения является неотъемлемой частью геологоразведочного процесса. Известен ряд работ, в которых дается оценка гидрогеологических и инженерно-геологических условий строительства и эксплуатации горных предприятий.

Н. И. Плотников [46] разделяет рудные месторождения по степени сложности гидрогеологических и инженерно-геологических условий их разработки открытым способом на четыре группы: простые, сложные, весьма сложные и особо сложные. К первой группе отнесены месторождения, для которых характерны благоприятные литологические, гидрогеологические и инженерно-геологические условия. Поэтому месторождения этой группы не требуют специальных мер для открытой разработки, кроме изоляции дождевых вод. Ко второй группе относятся месторождения, имеющие неблагоприятные литологические, гидрогеологические и инженерно-геологические условия. При промышленном освоении таких месторождений открытыми работами требуются специальные меры по защите карьерного поля от обводнения и обеспечению устойчивости бортов карьеров. В третью группу включены месторождения, характеризующиеся весьма сложными гидрогеологическими и относительно простыми инженерно-геологическими условиями. Для промышленной разработки рудных месторождений этой группы открытым способом во многих случаях необходимо предварительное осушение карьерного поля, а при эксплуатации — постоянное водопонижение и полная изоляция поверхностных вод. В четвертую группу входят месторождения с особо сложными гидрогеологическими и инженерно-геологическими условиями. Для таких месторождений необходим комплекс мер по предварительному осушению карьерного поля и снижению напора подземных вод.

В табл. 45 приведена типизация месторождений твердых полезных ископаемых по сложности инженерно-геологических условий их разработки [25].

Классификационными признаками для отнесения месторождений к той или иной группе являются:

- масштаб инженерно-геологических явлений, которые могут возникнуть в процессе отработки месторождений;
- необходимость проведения защитных мероприятий, направленных на повышение устойчивости пород.

К месторождениям с простыми инженерно-геологическими условиями отнесены месторождения или их участки, разработка которых подземным или открытым способом не приводит к развитию инженерно-геологических явлений в размерах, осложняющих разработку.

К месторождениям с условиями средней сложности относятся месторождения или их участки, при разработке которых подземным или открытым способом могут возникать инженерно-геоло-

гические явления, осложняющие разработку. Для проведения горных работ требуется осуществление мероприятий, направленных на повышение устойчивости пород, в частности их предварительное осушение.

К месторождениям со сложными инженерно-геологическими условиями относятся месторождения или их участки, для разработки которых подземным или открытым способом требуется применение специальных методов проходки и предварительное осуществление защитных мероприятий, причем их выполнение затруднено особо неблагоприятными свойствами горных пород, сложными условиями залегания, а также гидрогеологическими условиями.

Г. Л. Фисенко [60] предложена классификация инженерно-геологических комплексов горных пород по условиям устойчивости бортов карьеров. В основу этой классификации положены физико-механические свойства пород и литолого-структурные особенности комплексов. По степени прочности пород инженерно-геологические комплексы разделены на три группы: к первой группе отнесены комплексы крепких скальных пород с прочностью на сжатие в образце $\sigma_{сж} > 800 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$; во вторую группу входят комплексы измененных скальных и полускальных пород с прочностью на сжатие в образце $\sigma_{сж} = (80-800) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$; в третью группу включены комплексы слабых пород с прочностью на сжатие в образце $\sigma_{сж} < 80 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

По степени сложности условий залегания каждая группа комплексов делится на три подгруппы: 1-я подгруппа — простые условия; 2-я подгруппа — условия средней сложности; 3-я подгруппа — сложные условия.

С учетом этой классификации даны рекомендации относительно объема инженерно-геологических изысканий.

Инженерно-геологические работы при разведке месторождений включают следующие этапы:

1. Подготовительные работы:

а) сбор и анализ фондовых и литературных материалов, а также данных по опыту эксплуатации шахт и карьеров, если таковые имеются в районе;

б) составление инженерно-геологического раздела проекта на разведку месторождения.

2. Полевые работы:

а) инженерно-геологическая съемка или инженерно-геологическое обследование района;

б) инженерно-геологическое обследование действующих шахт и карьеров (объектов-аналогов);

в) бурение инженерно-геологических скважин и проходка горно-разведочных выработок;

г) инженерно-геологическая документация скважин и выработок;

д) изучение свойств горных пород полевыми методами;

Типизация месторождений твердых полезных ископаемых по сложности инженерно-геологических условий их разработки

Категория сложности инженерно-геологических условий	Характеристика особенностей разработки месторождений или их участков	Месторождения, приуроченные к различным породам		
		Тип 1. Преимущественно несвязные (песчаные, гравийные и др.) или связные (глинистые) или их переслаивание	Тип 2. Преимущественно полускальные	Тип 3. Скальные
а. Простые	Разработка не вызовет развития инженерно-геологических явлений в размерах, осложняющих горные работы. Для проведения горных работ не потребуются осуществления предварительных защитных мероприятий	Тип 1а. Необходимые несвязные или твердопластичные связные, залегающие на небольших глубинах (чаще выше местного базиса эрозии)	Тип 2а. Полускальные мало дислоцированные и мало выветрелые, слабообводненные	Тип 3а. Массивные мало дислоцированные и мало выветрелые скальные
б. Средней сложности	При разработке будут возникать инженерно-геологические явления, осложняющие горные работы. Для проведения их потребуются мероприятия, направленные к повышению устойчивости пород (например, предварительное осушение пород усиленное крепление и др.). Однако осуществление таких мероприятий возможно без особых осложнений, обусловленных геологическими и гидрогеологическими условиями	Тип 1б. Обводненные несвязные и связные. Величины гидростатических напоров не превышают 100 м. Несвязные породы имеют удовлетворительную водоотдачу и водопроницаемость (коэффициент фильтрации более 1,0 м/сут), что позволяет осушать их в сравнительно короткие сроки	Тип 2б. Полускальные дислоцированные, ослабленные трещиноватостью, выветриванием или прослоями пород с малой прочностью. Закарстованные полускальные породы. Двухэтажное строение, причем верхний этаж состоит из толщи обводненных несвязных и связных слоистых пород, а нижний из полускальных дислоцированных пород	Тип 3б. Скальные дислоцированные, трещиноватые, с наличием зон дробления, выветривания. Сильно закарстованные. Карстовые полости содержат рыхлый заполнитель. Двухэтажное строение, причем верхний этаж состоит из толщи обводненных слоистых несвязных и связных пород а нижний из скальных дислоцированных пород

в. Сложные	При разработке будут возникать интегсивные инженерно-геологические явления, в связи с чем потребуются осуществление крупных защитных мероприятий (например, осушительных, по отводу поверхностных вод и др.). Выполнение этих мероприятий может быть затруднено неблагоприятными свойствами пород (слабая водоотдача, сильная тектоническая нарушенность и др.), большой глубиной или сложными условиями их залегания	Тип 1в. Обводненные не-связанные породы большой мощности, иногда переслаивающиеся со связными. Величины гидростатических напоров превышают 100 м. Поро-ды обладают особо неблагоприятными инженерно-геологическими свойствами или условиями залегания (частое фациальное изменение, наличие связанных пород с текучей или мягкопластичкой консолидацией и пр.). Осушительные мероприятия затруднены в связи со слабой водоотдачей пород	Тип 2в. То же, что и 2б, но залегающие на больших глубинах. Двухэтажное строение, причём верхний этаж состоит из мощных толщ обводнённых пород различного состава, а нижний из сложенно-дислоцированных полускальных пород	Тип 3в. То же, что и 3б, но залегающие на больших глубинах. Двухэтажное строение, причём верхний этаж состоит из мощных толщ обводнённых пород различного состава, а нижний из сложенно-дислоцированных скальных пород
------------	--	--	---	---

е) отбор образцов горных пород и проб воды;

ж) геофизические исследования структурных особенностей породного массива и пр.

3. Лабораторные исследования состава и свойств горных пород.

4. Камеральная обработка материалов и составление отчета.

Для снижения общих затрат на разведку месторождения при инженерно-геологических работах в максимальной мере должны использоваться разведочные буровые скважины и горно-разведочные выработки, предназначенные для выявления и оценки запасов полезных ископаемых.

В результате проведения инженерно-геологических работ на стадиях поисковой и детальной разведки должны быть получены данные:

— о структурных особенностях массива горных пород (тектонической нарушенности, слоистости, трещиноватости и пр.);

— о физико - механических свойствах полезного ископаемого и вмещающих пород;

— об основных закономерностях распространения толщ многолетнемерзлых пород (если они имеются) и их характеристике;

— о геологических процессах и явлениях, которые могут осложнить разработку месторождения.

В особо сложных условиях при разведке месторождения должно проводиться специальное инженерно-геологическое и гидрогеологическое изучение месторождения.

§ 2. Цель и задачи прогнозирования

Существуют два типа прогнозов инженерно-геологических условий разработки месторождений: региональные и локальные.

Прогнозы первого типа проводятся для бассейна или группы месторождений и имеют целью установить общий характер распределения геологических и гидрогеологических факторов. Для прогнозирования составляется комплект карт и разрезов инженерно-геологического районирования в масштабе от 1 : 500 000 до 1 : 25 000. С помощью этих карт и разрезов выявляются районы с наиболее благоприятным и неблагоприятным сочетанием факторов, проводится обоснование основных направлений в инженерно-геологическом изучении данного региона.

Прогнозы второго типа проводятся для месторождения в целом и (если это необходимо) для отдельных его участков. Цель локальных прогнозов — выявить закономерности изменения геологических и гидрогеологических факторов на месторождении. Для этого составляются инженерно-геологические планы и разрезы в масштабе 1 : 100 000—1 : 1000. На основе этих планов и разрезов выявляются участки с различными условиями вскрытия и эксплуатации месторождения, делаются прогнозы возможных очагов деформации и решается вопрос о необходимости и целесообразности проведения дополнительных инженерно-геологических исследований. Естественно, что локальные прогнозы базируются на региональных, дополняя и детализируя их.

Конечная цель прогнозирования — получение научно обоснованной информации, позволяющей принять такие решения о способе вскрытия, системе разработки и основных видах горно-транспортного оборудования, которые смогли бы обеспечить минимальную себестоимость добычи 1 т руды и максимальную безопасность горных работ.

В задачи прогнозирования входит оценка:

- природных условий, в которых будет строиться и эксплуатироваться горное предприятие;
- изменения этих условий в процессе освоения месторождения;
- необходимости проведения защитных инженерных мероприятий.

Решение этих задач должно основываться на определенных теоретических и методических положениях.

Теория прогнозирования инженерно-геологических условий месторождения — это система основных идей в области инженерной геологии, гидрогеологии, геофизики, математики, геомеханики и горного дела, позволяющих для каждой стадии освоения месторождения обосновать с заданной степенью точности количественную и качественную оценку состава, строения, свойств и состояния массива горных пород и ожидаемых процессов и явлений с целью принятия оптимальных решений, касающихся раз-

ведки месторождения, проектирования, строительства и эксплуатации горного предприятия.

Следовательно, прогноз должен быть тесно увязан с горными работами. Причем эта увязка не замыкает процесс прогнозирования, а определяет направленность и объем информации, которую надлежит собрать при инженерно-геологическом изучении месторождения.

Естественно, что эта информация будет отличаться по объему и надежности в зависимости от стадии освоения месторождения.

В методологическом отношении прогнозирование основывается на следующих пяти принципах: непрерывности; избирательно-информативном; генетическом; геолого-структурном; технологическом, или принципе обратной связи.

Принцип непрерывности заключается в том, что прогнозирование ведется на всех стадиях освоения месторождения, включая его разведку, проектирование, строительство и эксплуатацию горного предприятия. Причем информация, полученная на ранних стадиях, впоследствии уточняется, корректируется и детализируется.

В табл. 46 приведены рекомендации относительно общего содержания инженерно-геологической информации и форм ее последующего использования на различных стадиях освоения месторождения.

Сущность избирательно-информативного принципа состоит в том, что из общего числа показателей, характеризующих состав, строение, свойства, состояние массива горных пород, процессы и явления, изучению и прогнозированию подлежат только те, информация о которых необходима для принятия решений по конкретным технологическим вопросам на данной стадии освоения месторождения.

С этой целью рекомендуется предварительно строить модель, отражающую связи технологических решений и информационного обеспечения.

В соответствии с **генетическим принципом** качество породы, выражающееся через ее состав, строение, состояние и свойства, зарождается в процессе генезиса породы и претерпевает изменения в течение всей ее геологической жизни.

В соответствии с **геолого-структурным принципом** предполагается, что напряженно-деформированное состояние и свойства массива горных пород определяются его структурой, условиями залегания и свойствами пород в образце [42, 53].

Технологический принцип (обратных связей) заключается в том, что технология горных работ, определяемая инженерно-геологическими условиями месторождения, существенно воздействует на эти условия, изменяя их в процессе отработки месторождения.

Например, количественные характеристики свойств массива подвергаются значительным изменениям за счет разгрузки

Содержание инженерно-геологической информации на различных стадиях освоения месторождений

Стадия прогнозирования		Форма использования результатов прогноза
До начала проектирования горного предприятия	Предварительная разведка	Рекомендации для составления проекта инженерно-геологического изучения месторождения на стадии детальной разведки. Исходные инженерно-геологические данные для укрупненной проработки технологических решений при составлении проекта временных кондий
	Детальная разведка	Исходные инженерно-геологические данные для разработки постоянных кондий и технического проекта горного предприятия. Предварительный прогноз инженерно-геологических процессов и явлений в массиве горных пород
В период проектирования горного предприятия	Инженерно-геологические изыскания	Уточнение инженерно-геологических условий площадок строительства объектов горного предприятия на стадии рабочего проектирования
	Инженерно-геологические исследования	Уточнение инженерно-геологических условий площадок под объектом горного предприятия в процессе строительства
В период строительства горного предприятия	Инженерно-геологические изыскания	Уточнение инженерно-геологических условий площадок под объектом горного предприятия в процессе строительства
	Инженерно-геологические исследования	Оценка результатов предварительного прогноза инженерно-геологических особенностей вскрытия месторождения. Уточнение проектных решений. Прогноз инженерно-геологических условий эксплуатации месторождений
В период эксплуатации месторождений	Инженерно-геологические изыскания	Исходные инженерно-геологические данные для обоснования реконструкций или расширения горного предприятия
	Эксплуатационная разведка	Уточнение инженерно-геологических особенностей эксплуатации месторождения для обоснования (или корректировки) оперативных технических решений

Стадия прогнозирования	Форма использования результатов прогноза
	Инженерно-геологические исследования Оценка результатов прогноза инженерно-геологических условий эксплуатации месторождений. Изучение закономерностей изменения инженерно-геологических условий под влиянием технологических факторов. Обоснование (или корректировка) оперативных технических решений

массива, его осушения и прочих факторов, сопутствующих проведению горных выработок. Эти изменения в известной мере могут быть выявлены путем испытания образцов, отобранных через большой интервал времени на одних и тех же участках месторождения.

§ 3. Методы инженерно-геологических прогнозов

Основная задача инженерно-геологических исследований в горном деле состоит в прогнозировании горно-геологических явлений и в разработке рекомендаций по их предупреждению.

К основным методам прогноза горно-геологических явлений относятся [23]: 1) метод аналогии; 2) метод оценки действующих факторов; 3) аналитический метод; 4) метод моделирования.

Метод аналогий заключается в использовании инженерно-геологических сведений о детально изученном месторождении для прогноза горно-геологических явлений на новом месторождении, имеющем сходные геологические, гидрогеологические и горно-технические условия.

Наиболее удовлетворительные (достоверные) результаты метод аналогии дает при горно-эксплуатационных работах и при разведке месторождения, часть которого уже эксплуатировалась. В отдельных случаях успешной оказывается экстраполяция показателей состояния и свойств массива пород на неизученные участки, что также может быть отнесено к одному из приемов или разновидностей метода аналогий.

Метод оценки действующих факторов заключается в выявлении и оценке возможного характера и степени влияния различных естественных и технологических факторов на ход развития процесса и соответствующих ему горно-геологических явлений.

Как правило, в каждом конкретном случае отбирается характерный для данных условий комплекс действующих факторов. Однако чаще всего в этом перечне фигурируют такие факторы, как структура и тектоника участка, литологический и петрографический состав массива пород, деформационно-прочностные характеристики пород, величины и характер распределения напряжений

в массиве, обводненность пород, глубина горных работ, способ разработки месторождения (открытый, подземный и др.), искусственное изменение состояния и свойств пород (осушение, замораживание, химическое укрепление и т. д.).

Аналитические методы получили широкое развитие за последние два-три десятилетия. Заключаются они в получении расчетным путем параметров, характеризующих горно-геологическое явление. Существующие аналитические методы в подавляющем большинстве базируются на основных положениях механики сплошных деформируемых сред и позволяют давать количественную оценку горно-геологическим явлениям. Например, расчетным путем можно получить величины деформаций земной поверхности при проведении подземных очистных работ или при глубоком водопонижении, можно определить размеры опорных целиков, устойчивые параметры выработок, прогнозировать деформацию пород во времени и др.

Однако следует помнить, что механико-математическая модель, являющаяся основой любого расчетного метода, весьма приблизительно отражает реальные условия горно-геологического явления, что отражается на точности и надежности полученных результатов. В связи с этим не всегда можно воспользоваться аналитическим методом, несмотря на его простоту и оперативность.

Метод моделирования заключается в выборе и создании физической или математической модели с фиксируемыми и управляемыми параметрами, которая с заданной достоверностью отражает реальные горно-геологические явления и их условия. Существует несколько разновидностей модели: из эквивалентных материалов, из оптически-активных материалов, электрические (электрогидродинамических аналогий, электролитические), математические (на сеточных или цифровых ЭВМ).

ГЛАВА 19

ПРОГНОЗНЫЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

§ 1. Инженерные методы расчета устойчивости карьерных откосов

Для количественной оценки устойчивости карьерных откосов используется коэффициент запаса — отношение суммы всех сил, удерживающих откос, к сумме всех сил, сдвигающих его:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \varphi \sum N + cL + A}{\sum T + B}, \quad (\text{IV.1})$$

где $\operatorname{tg} \varphi \Sigma N + cL$ — сумма сил трения и сцепления, действующих на поверхности скольжения длиной L ;

A — другие силы, удерживающие откос;

ΣT — сумма обусловленных массой пород сдвигающих касательных сил, действующих по расчетной поверхности;

B — другие силы, сдвигающие откос.

Если по слабейшей поверхности действуют только силы, обусловленные массой пород, то устойчивое равновесие по поверхности с коэффициентом запаса η можно рассматривать как предельное равновесие с новыми характеристиками прочности пород, которые меньше исходных характеристик в η раз.

Величину коэффициента запаса устойчивости откосов принимают в зависимости от следующих факторов: степени достоверности исходных физико-механических характеристик и изменения их с течением времени вследствие ползучести, выветривания и набухания; степени геологической и гидрогеологической разведанности; времени стояния откосов; погрешности методов расчета; влияния динамических нагрузок.

Обычно η принимают равным от 1,2—1,3 (для расчетов общей устойчивости бортов или рабочих одиночных уступов и отвалов) до 1,5—2 (для одиночных нерабочих уступов).

Конечной целью расчетов устойчивости является выбор устойчивых и экономичных (в отношении объемов горных работ) контуров откосов. Различаются контуры откосов выпуклого, плоского и вогнутого профилей. Отстройка наиболее эффективных в экономическом отношении выпуклых откосов бортов возможна при возрастании прочности пород с глубиной и исключается при наличии в нижней части интенсивно деформирующихся глин и обводненных песков.

Расчеты устойчивости откосов основываются на теории предельного равновесия так называемой сыпучей среды — идеализированной среды, не допускающей больших растягивающих напряжений (как и горные породы). При этом отсутствие сил сцепления ($c = 0$) рассматривается как частный случай (т. е. обычно принимается $c > 0$).

Из известных в настоящее время методов расчета устойчивости сложенных однородными породами откосов наиболее обоснованным в математическом отношении считается метод предельного напряженного состояния, разработанный В. В. Соколовским и С. С. Голушкевичем. С помощью этого метода решаются задачи, в которых условие предельного равновесия выполняется в каждой точке рассматриваемой области.

Сущность метода заключается в последовательном определении координат точек пересечения двух семейств поверхностей скольжения, при этом определяются и координаты точек поверхности откоса. Если поверхность откоса задана, то расчетом определяется нагрузка, распределенная по горизонтальной площадке, прилега-

ющей к откосу, при которой откос будет находиться в предельном напряженном состоянии.

Важным элементом решения плоской задачи предельного напряженного состояния сыпучей среды является установление конфигурации зон минимального и максимального напряженного состояний, называемых соответственно зонами оседания и выпирания.

Зона оседания — часть деформирующегося массива, по поверхности которого распределена активная нагрузка интенсивностью

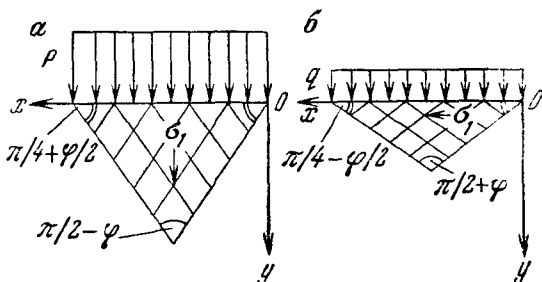


Рис. 67. Сетки линий скольжения:

а — в призме оседания; б — в призме выпирания

q , вызывающая появление площадок скольжения и смещения всей зоны в направлении действия этой нагрузки.

Зона выпирания — прилегающая к обнаженной поверхности часть деформирующегося массива, подвергающаяся выпиранию под влиянием давления со стороны области выпирания; при этом поверхность зоны выпирания может быть свободной или нагруженной некоторой нагрузкой интенсивностью q .

Положение площадок скольжения в этих зонах по отношению к направлению наибольшего главного напряжения σ_1 показана на рис. 67.

Предельное напряженное состояние в зонах оседания и выпирания возникает при минимальной величине σ_1 , равной временному сопротивлению породы на одноосное сжатие:

$$\sigma_1 = \sigma_{сж} = 2c \operatorname{ctg} (45^\circ - \varphi/2), \quad (\text{IV.2})$$

где c и φ — соответственно сцепление и угол внутреннего трения породы.

По поверхности зоны оседания такая величина σ_1 создается упругим слоем горных пород вертикальной мощностью

$$H_{90} = \frac{\sigma_{сж}}{\gamma}, \quad (\text{IV.3})$$

где γ — объемная масса пород.

Формула (IV.3) аналогична формуле (III.12) и используется для определения максимальной высоты вертикальных обнажений пород в откосах.

Основные недостатки методов предельного напряженного состояния — их непригодность для условий слоистых анизотропных сред и занижение углов откосов.

Для практических расчетов используются инженерные методы, основанные на установлении условий предельного равновесия по поверхностям скольжения, положение которых определяется путем последовательных приближений.

К числу инженерных относятся методы алгебраического суммирования сил по круглоцилиндрическим и монотонным криволинейным поверхностям многоугольника сил. Применяются также комбинации этих методов и методов предельного напряженного состояния.

Перечисленные инженерные методы усовершенствованы Г. Л. Фисенко, который разработал расчетные схемы применительно к различным горно-геологическим условиям.

На предположении круглоцилиндрической поверхности скольжения основана группа методов (Феллениуса, Крея, Терцаги). Принимается, что ограниченный поверхностью скольжения массив представляет собой «жесткий клин», а ожидаемое смещение массива рассматривается как вращение «жесткого клина» вокруг оси, параллельной откосу и служащей осью кругового цилиндра. В плоской задаче круглоцилиндрическая поверхность скольжения превращается в дугу, а ось этой поверхности — в точку. В методах круглоцилиндрической поверхности удовлетворяется только одно условие статики — равенство нулю моментов, условие же равенства нулю проекций сил на координатные оси не удовлетворяется, что является существенным недостатком этого метода. Положительная черта данного метода — возможность производить весьма простое алгебраическое сложение сдвигающих и удерживающих сил, возникающих в основании каждого элементарного блока породы. Метод круглоцилиндрической поверхности, когда в массиве откоса нет согласно падающих в сторону карьера поверхностей ослабления, дает достаточную точность расчета.

Положение поверхности скольжения в откосе определяется подбором. Так, для отыскания положения этой поверхности по способу Феллениуса необходимо выполнить от трех до пяти построений, причем часто построенные таким путем поверхности не являются наиболее слабыми.

Поверхность скольжения в однородном массиве плоского откоса проще и быстрее находится способом Г. Л. Фисенко, разработанным на основе теории предельного равновесия сыпучей среды (рис. 68). Площадки скольжения строятся, начиная с глубины H_{90} . Для построения линии скольжения в соответствии со схемой на рис. 68 через точку на откосе проводим окружность, пересекающую откос под углом $(45^\circ - \varphi/2)$, и линию BC под углом, равным $(90^\circ - \varphi)$. От откоса проводим линию MK под углом $(45^\circ - \varphi/2)$ к откосу. В точке пересечения откоса линия MK должна касаться круга. Другая касательная будет параллельна. Отрезки пересека-

ющихся касательных, которые заключаются между линиями AM и BC , должны быть равны. На линиях MK и DC от точек M и C отложим по два равных отрезка $MP = CL$ и $MN = CF$ и через их концы проведем линии, параллельные AM и BC , до их взаимного пересечения в точках F и E . Линия EF будет являться геометрическим местом точек касательных к окружностям, пересекающих линию AM под углом $(45^\circ - \varphi/2)$, а линию BC — под углом $(90^\circ - \varphi)$. Продолжим EF до пересечения с MK в точке O , которая

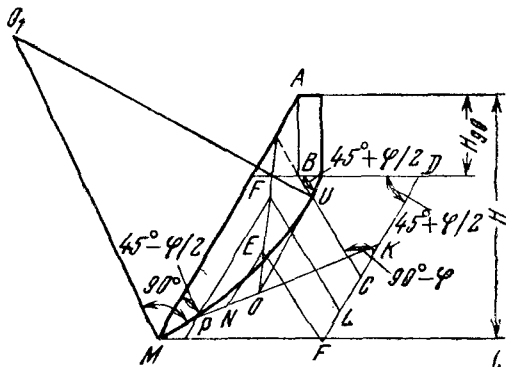


Рис. 68. Построение поверхности скольжения (по способу Г. И. Фисенко) в однородном массиве плоского откоса

и будет являться точкой пересечения касательных к отыскиваемой окружности. Через точку O проведем линию OU , параллельную DC . Из точек M и U восставим перпендикуляры к касательным до их взаимного пересечения в точке O_1 , которая является центром отыскиваемой окружности. Затем произведем алгебраическое суммирование сил по найденной криволинейной поверхности (формула IV.1).

В откосе выпуклой формы поверхности скольжения также начинаются на глубине H_{90} от поверхности откоса и в верхней части наклонены под углом $(45^\circ - \varphi/2)$ к вертикали; постепенно выполаживаясь, они пересекают откос в его нижней точке.

Форму поверхности скольжения можно принимать круглоцилиндрической и ее построение производить в следующем порядке. Через точку на глубине H_{90} от поверхности откоса проводится отрезок, наклоненный под углом $(45^\circ - \varphi/2)$ к вертикали, касательной в этой точке к поверхности скольжения. Второй точкой окружности, частью которой является поверхность скольжения, будет нижняя точка откоса. Две точки окружности и направленные касательной к ней в одной из точек позволяют построить окружность. Для этого соединяют точки хордой и на ней, как на основании, строят равнобедренный треугольник, одна сторона его должна быть перпендикулярна к касательной. Вершина треугольника является центром искомой окружности.

К недостаткам метода круглоцилиндрической поверхности скольжения и алгебраического сложения сил по монотонной кри-

волинейной поверхности можно отнести занижение величин нормальных напряжений в области призмы активного давления и завышение в области призмы упора вследствие неучета реакций между смежными блоками. Однако, как установлено Г. Л. Фисенко, суммы нормальных напряжений по всей поверхности скольжения в однородных породах при расчетах по этим методам и методу предельного напряженного состояния отличаются на величины, не превышающие точности расчетов.

Наиболее универсальным и в то же время математически обоснованным является метод многоугольника сил, применяемый как в отечественной, так и в зарубежной практике.

В этом методе используются сосредоточенные силы, действующие по площадкам, разграничивающим смежные блоки массива, заключенного между линией скольжения и контуром откоса. При правильной ориентировке площадок, разграничивающих смежные блоки, и реакций между ними точность метода многоугольника сил не отличается от точности метода предельно напряженного состояния. Метод многоугольника сил позволяет производить расчеты устойчивости откосов как в однородных, так и в слоистых трещиноватых породах при любой форме поверхности скольжения. Таким образом, возможности использования этого метода для целей расчета устойчивости откосов практически неограниченны.

При отсутствии в массиве горных пород поверхностей ослабления (горизонтальных или падающих в сторону выемки) поверхность скольжения принимается круглоцилиндрической; для определения предельной высоты откоса при заданных величинах физико-механических характеристик горных пород можно использовать график (рис. 69), полученный [60] по результатам большого количества решений. По оси абсцисс здесь отложены углы откоса, по оси ординат — его высота. Масштаб графика определяется из соотношений

$$\frac{H_0}{H_{90}} = \frac{1}{M},$$

где H_0 берется с графика, а H_{90} вычисляют по формуле:

$$H_{90} = \frac{2c}{\gamma} \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2)_0 \quad (\text{IV.4})$$

Порядок расчета следующий:

- 1) определяют величину H_{90} ;
- 2) на оси абсцисс берут заданный угол откоса и по соответствующей ординате проводят линию до кривой с заданным углом внутреннего трения; определив условную высоту откоса H' , уменьшают ее на величину H_{90} , получая таким образом определяемую высоту откоса;

3) если необходимо определить угол откоса при заданной его высоте, вычисляют условную высоту из соотношения

$$H' = \frac{H}{H_{90}}$$

и при заданном угле внутреннего трения находят на оси абсцисс угол откоса.

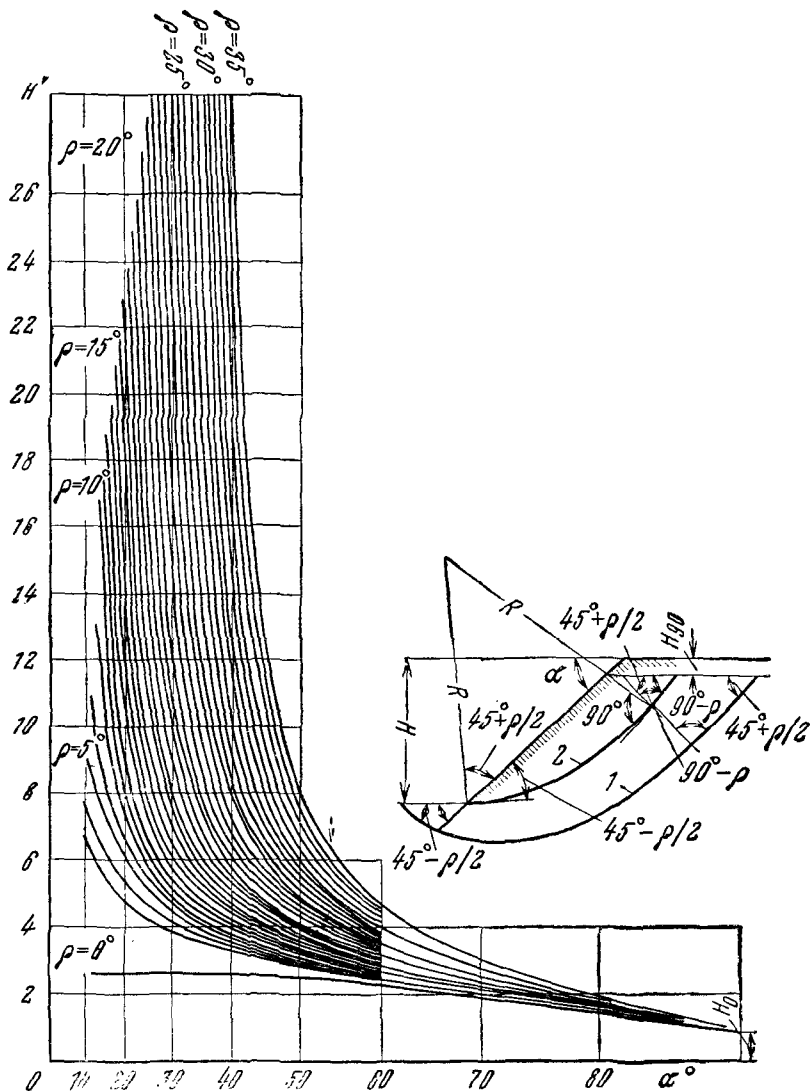


Рис. 69. График зависимости между высотой плоского откоса и его углом для различных значений расчетных характеристик (по Г. Л. Фисенко)

Расчет устойчивости или углов откосов глинистых пород, нагруженных массой оборудования, производится на предельное равновесие по наиболее слабой поверхности. В качестве расчетных характеристик кроме c , γ , φ используются ширина « b » опорной части оборудования и масса P , приходящаяся на 1 м длины опорной части.

Рассмотрим решение плоской задачи для случая, когда нагруженный откос должен иметь коэффициент запаса такой же, как и без нагрузки. В этом случае ширина бермы безопасности будет превышать ширину призмы возможного обрушения нагруженного откоса, ограничиваемую положением поверхности скольжения. Порядок расчета следующий. В массиве уступа проводится ряд поверхностей скольжения (рис. 70); в верхней части эти поверхности наклонены к вертикали под углом, равным $45^\circ - \varphi/2$; если удельное давление оборудования на 1 м² опорной части P/b больше величины σ_0 , рассчитываемой по формуле

$$\sigma_0 = 2c \operatorname{tg}(45^\circ - \varphi/2), \quad (\text{IV.5})$$

площадки скольжения возникают непосредственно под опорной частью оборудования, если $\frac{P}{b} < \sigma_0$, площадки скольжения возникают начиная с глубины

$$H' = \frac{\sigma_0 - \frac{P}{b}}{\gamma},$$

а выше образуется вертикальная трещина отрыва.

В средней и нижней частях поверхности скольжения имеют вид круглоцилиндрических или плавных криволинейных поверхностей. Для каждой из построенных поверхностей скольжения определяется дополнительная нагрузка, при которой обеспечивается заданный коэффициент запаса устойчивости

$$\eta = \frac{cL + \operatorname{tg} \varphi \sum N + P \cos \omega \operatorname{tg} \varphi}{\sum T + P \sin \omega}, \quad (\text{IV.6})$$

где P — допускаемая дополнительная нагрузка опорной части оборудования;

c , φ — расчетные характеристики прочности пород в уступе;
 L — длина поверхности скольжения;

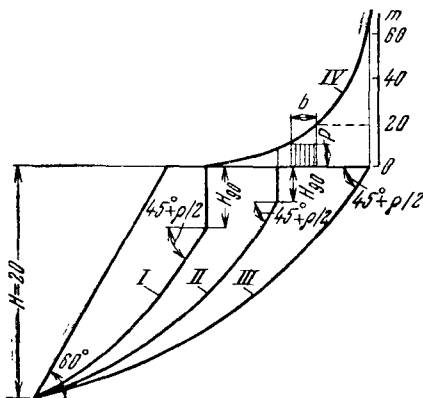


Рис. 70. Схема к упрощенному расчету допустимых нагрузок на откос

ΣN , ΣT — сумма нормальных и касательных составляющих от массы блоков породы;

ω — угол наклона поверхности скольжения в верхней части ($\omega = 45^\circ + \varphi/2$).

Величина P определяется по формуле

$$P = \frac{c_n L + \operatorname{tg} \varphi_n \Sigma N - \Sigma T}{\cos \omega (\operatorname{tg} \omega - \operatorname{tg} c_n)}, \quad (\text{IV.7})$$

где c_n , φ_n — расчетные характеристики прочности породы в уступе, разделенные на коэффициенты запаса устойчивости.

После расчета величины P строится кривая IV зависимости допускаемых нагрузок от расстояния от верхней бровки уступа.

Многообразие форм расчетных поверхностей скольжения, связанное с характером геологических условий, определяет метод сложения сил по этой поверхности и соответственно схему расчета устойчивости откоса. В табл. 47 приведены наиболее типичные формы поверхностей скольжения и соответствующие им методы сложения сил.

Расчеты параметров подрезных щелей, создаваемых с целью искусственного обрушения уступов и подготовки пород к выемке, также базируются на теории предельного равновесия сыпучей среды. При этом в расчетных формулах учитывается сопротивление породы растягивающим усилиям σ_p , возникающим при отрыве в подрезанных породах блоков от массива.

Расчет общей устойчивости обводненных откосов отличается от расчета сдренированных откосов наличием сил гидростатического взвешивания и гидродинамического давления. Суммарное влияние гидростатического взвешивания и гидродинамического давления на призму возможного обрушения проявляется как гидростатическое давление, распределенное по поверхности скольжения, нормальное к ней и изменяющее только нормальную составляющую. Уравнение равновесия с учетом давления воды D , равного в каждой точке поверхности скольжения разности отметок этой точки и высоты пьезометрического уровня над ней, приобретает вид

$$\eta = \frac{\Sigma \operatorname{tg} \varphi_i (N_i - l_i D_i) + \Sigma c_i l_i}{\Sigma T_i}, \quad (\text{IV.8})$$

где φ_i , c_i — угол внутреннего трения и сцепления по основанию блоков;

N_i , T_i — нормальные и касательные составляющие массы элементарных блоков породы без учета гидростатического взвешивания;

l_i — длина наклонного основания блоков;

D_i — величина гидростатического давления в середине оснований блоков.

На рис. 71 представлена схема к расчету устойчивости фильтрующего откоса, в котором водоносный слой с депрессионной

поверхностью AB залегает на плотных водоупорных глинах. В качестве поверхности скольжения рассматривается поверхность $CBEF$.

Расчет устойчивости фильтрующих подтопленных откосов представляет наибольший интерес для котлованов плавучих земснарядов. Схема к расчету устойчивости подтопленного откоса представлена на рис. 72.

Согласно приближенному методу ВНИИМ расчет ведется в такой последовательности: на расчетный разрез наносятся депрес-

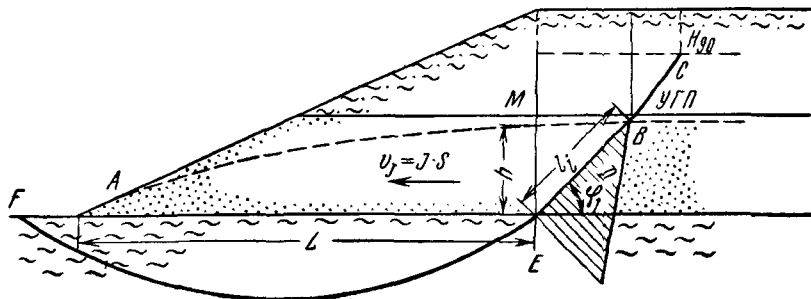
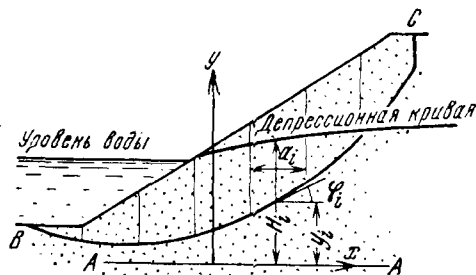


Рис. 71. Схема к расчету устойчивости фильтрующего откоса (по Г. Л. Фисенко)

Рис. 72. Схема к расчету устойчивости подтопленного откоса (В. А. Мироненко)



сионная кривая и линии равных напоров, построенные на приборе ЭГДА; определяется положение наиболее опасной поверхности скольжения (без учета гидростатических и гидродинамических сил); выделенный указанным образом «оползневой клин» разбивается вертикальными линиями на отдельные блоки; результирующая гидростатических и гидродинамических сил в пределах i -ого блока определяется по формуле

$$F_i = \gamma_b (H_i - Y_i) \frac{a_i}{\cos \alpha_i} \quad (\text{IV.9})$$

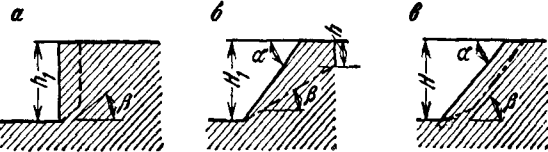
где γ_b — объемная масса воды;

H_i и Y_i — соответственно напор и ордината кривой скольжения, средние в пределах блока;

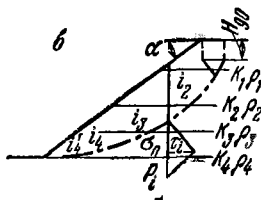
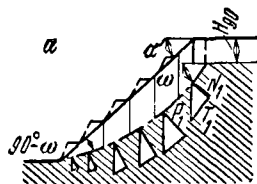
a_i — ширина блока;

α_i — средний угол наклона касательной к кривой скольжения в пределах блока.

Схемы расчета устойчивости бортов карьеров (по Г. Л. Фисенко)

№ схемы расчета	Расчетные схемы в различных условиях залегания пород	В каких условиях применяется схема	Формулы и графики
I		При определении высоты вертикального откоса и трещины отрыва при благоприятном залегании поверхностей ослабления; в случае «г» $\beta < \rho'$	$H_{90} = \frac{2k_{\pi}}{\gamma} \operatorname{tg} \omega_{\pi}$
II III IV		При определении высоты уступов и бортов при неблагоприятном залегании поверхностей ослабления $\beta > \rho'$	$h_1 = \frac{k'_{\pi} \cos \rho'_{\pi}}{\gamma \cos \beta \sin (\beta - \rho'_{\pi})};$ $h_1 \leq H_{90};$ $H_1 = h_1 \frac{1}{1 - \sqrt{\operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \beta}};$ $\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg} \beta \left(1 - \frac{h_1}{H_1} \right)^2;$ $H = H_{90} \frac{1}{1 - \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \rho'_{\pi}};$ $\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg} \rho'_{\pi} \left(1 - \frac{H_{90}}{H} \right)$

V



а. Плоский борт при отсутствии неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления

б. Горизонтальное залегание слоев при отсутствии ослабленных контактов:

$$k_{\Pi} = \frac{\sum k_{\Pi i} l_i}{\sum l_i};$$

$$\operatorname{tg} \rho_{\Pi} =$$

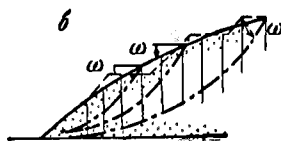
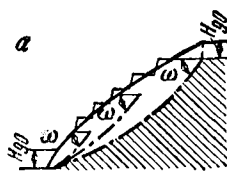
$$= \frac{\sum l_i \sigma_{\Pi i} \operatorname{tg} \rho_{\Pi i}}{\sum l_i \sigma_{\Pi i}}$$

Алгебраическое суммирование сил по круглоцилиндрической поверхности скольжения; условие устойчивости

$$k_{\Pi} L \frac{\operatorname{tg}}{\sum T_i} \rho_{\Pi} \sum N_i = 1.$$

Углы откосов определяются по графику (рис. 69)

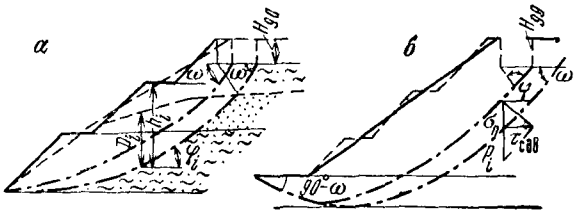
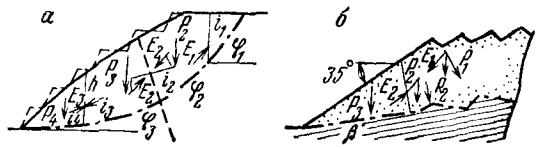
VI



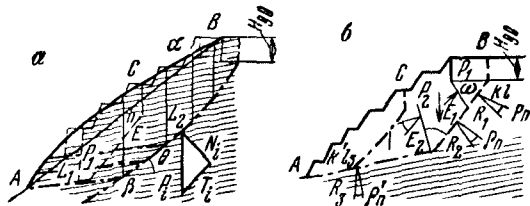
а. Борт выпуклого профиля при отсутствии неблагоприятных поверхностей ослабления и пластичных слоев в основании

б. Многоярусные отвалы рыхлых пород на устойчивом основании

Расчет на предельное равновесие по круглоцилиндрическим или плавным криволинейным поверхностям, пересекающимся в нижней точке откоса; используется также метод предельного напряженного состояния

№ схемы расчета	Расчетные схемы в различных условиях залегания пород	В каких условиях применяется схема	Формулы и графики
VII		а. Борт сложен обводненными рыхлыми породами $k < \frac{1}{2} H \gamma \times$ $\times (1 - \operatorname{tg} \rho_n) \times$ $\times \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\rho_n}{2}\right)$ б. В основании борта или отвала залегает слой пластичных глин $k_{осн} < 0,4H$	Алгебраическое суммирование сил по плавной криволинейной поверхности Условие устойчивости $\frac{\sum \tau_{уд}}{\sum \tau_{сдв}} > 1,$ $\tau_{уд} = f \sigma_n$ — по графику сопротивления сдвигу; $\sigma_n = h_l \gamma \cos^2 \varphi_l - D;$ $\tau_{сдв} = \frac{1}{2} h_l \gamma \sin 2\varphi_l$
VIII		а. В борту имеется ряд неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления. б. Отвалы на слоистом основании	Метод многоугольника сил $l_m = \frac{E_{m-1} \sin \theta (\operatorname{ctg} \theta - \operatorname{tg} \rho'_n)}{k'_n + \frac{1}{2} h \gamma \cos^2 \varphi_m \times$ $\times (\operatorname{tg} \rho'_n - \operatorname{tg} \varphi_m)$ $\theta = \varphi_{m-1} - \varphi_m$

IX



Борт висячего бока
при горизонтальном
или пологом согласо-
ном залегании слоев
при условии:

$$\alpha > \rho'; \quad \beta < \rho'; \\ H > H_1; \quad \text{а) } \beta < 10^\circ, \\ \text{б) } \beta_1 > 10^\circ$$

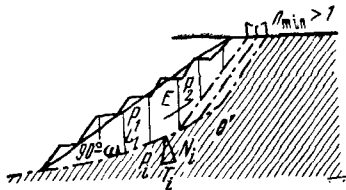
а. Алгебраическое суммирова-
ние сил на участке призмы ак-
тивного давления

$$E = \sum T - \operatorname{tg} \rho \sum N - k_n L_2;$$

$$L_1 = \frac{E \sin \theta (\operatorname{ctg} \theta - \operatorname{tg} \rho'_n)}{k'_n + \frac{1}{2} h_1 \gamma \cos^2 \beta \times \\ \times (\operatorname{tg} \rho'_n - \operatorname{tg} \beta)}$$

б. Метод многоугольника сил

X



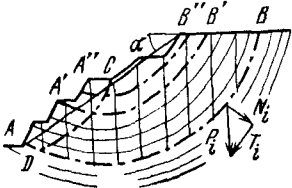
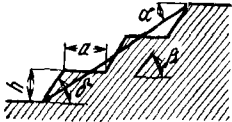
Борт лежачего бока
при условии
 $\rho < \alpha < \beta < 80^\circ$

Алгебраическое суммирование
сил на участке призмы упора

$$E = \operatorname{tg} \rho_n \sum N_i + k_n L_1 - \sum T_i;$$

$$P_2 = \frac{E \sin \theta (\operatorname{ctg} \theta + \operatorname{tg} \rho'_n) + k'_n L_2}{\cos \beta (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \rho'_n)}.$$

Углы α могут быть определены
по графику с поправкой по таб-
лице П. Д. Козленко

№ схемы расчета	Расчетные схемы в различных условиях залегания пород	В каких условиях применяется схема	Формулы и графики
XI		При мульдообразном залегании слоев пород $\alpha > \rho'_n$	Условие устойчивости $\sum T_i < k_n L + \operatorname{tg} \rho'_n \sum N_i$ сохраняется по всем поверхностям: ADB; A'B; A''B'' и ADC
XII		В породах весьма крепких слаботрещиноватых или при небольшой высоте бортов и средней прочности пород $\delta = \rho \quad \text{при } \beta > 30^\circ;$ $\text{при } \beta < 20^\circ \quad \delta = 65^\circ.$	$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\sum h_i}{\sum a_i + \sum h_i \operatorname{ctg} \delta_i};$ $\alpha = \beta \quad \text{при } 20^\circ < \beta < 30^\circ$

H, α — высота и угол наклона борта; h, δ — высота и угол откоса уступа; $H_{\text{во}}$ — предельная высота вертикального откоса; β — угол падения слоев и поверхностей ослабления; $\omega = 45^\circ + \frac{1}{2} \rho_n^0$ — угол наклона расчетной поверхности скольжения в верхней части; φ_i — угол наклона поверхности скольжения в любой точке; k_n, ρ_n — расчетные величины сцепления и угла внутреннего трения пород; k'_n, ρ'_n — то же по поверхности ослабления; γ — объемная масса пород; L — площадь поверхности скольжения; D_i — гидростатическое давление; P — масса элементарных блоков.

Коэффициент запаса устойчивости определяется из выражения

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left[P_i^B \cos \alpha_i + P_i^B \frac{\cos (\beta - \alpha_i)}{\cos \beta} - F_i \right] \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i \right\}}{\sum_{i=1}^n \left[P_i \sin \alpha_i - P_i^B \frac{\sin (\beta - \alpha_i)}{\cos \beta} \right]}, \quad (\text{IV.10})$$

где P_i — масса i -ого блока вместе с заключенной в нем водой;

P_i^B — масса объема воды над поверхностью откоса;

β — угол откоса.

Суммарное воздействие гидростатических и гидродинамических сил на общую устойчивость борта может быть оценено с помощью метода Р. Р. Чугаева. Согласно этому методу, гидростатическое и гидродинамическое давление приводятся к одной результирующей объемной силе F . Для нахождения величины и направления вектора F предварительно строится поле соответствующей потенциальной функции.

Воздействие гидростатических и гидродинамических сил на общую устойчивость откосов будет существенным при условии, что значительная часть призмы возможного оползания находится ниже депрессионной (пьезометрической) кривой, или же при больших перепадах напоров в прибортовой зоне. Поэтому особенно большое значение эти силы (по В. А. Мироненко) приобретают:

— при наличии в основании откоса ведренируемых напорных горизонтов;

— при расположении карьера вблизи реки или открытого водоема;

— при подтопленном откосе.

Если подтопленный откос сложен невзвешиваемыми породами, то для оценки его устойчивости целесообразно применять метод многоугольника сил.

Оценку устойчивости откосных сооружений гидроотвалов (упорных призм и дамб обвалования) следует производить с учетом сил гидростатического взвешивания и гидродинамического давления, а также нестабилизированного состояния глинистых водонасыщенных пород.

Для расчета устойчивости нестабилизированных породных масс гидроотвалов наиболее пригодны методы алгебраического суммирования сил (при монотонной криволинейной поверхности скольжения) и многоугольника сил.

Избыточное давление воды в порах глинистых пород (поровое давление) оказывает существенное влияние на устойчивость откосных сооружений. Поровое давление возникает в результате восприятия поровой водой внешней нагрузки. Уплотнение и упрочнение пород определяются скоростью рассеивания порового

давления. При возникновении порового давления уменьшаются эффективные (воспринимаемые минеральным скелетом породы) напряжения и соответственно уменьшается сопротивление породы сдвигу. Поровое давление снижает силы трения, и формула Кулона (уравнение сопротивления породы сдвигу) при наличии порового давления приобретает вид

$$\tau = (\sigma - P_n) \operatorname{tg} \varphi' + c', \quad (\text{IV.11})$$

где τ — сопротивление породы сдвигу;

σ — полное нормальное напряжение;

φ' и c' — угол внутреннего трения и сцепление, определенные по эффективным напряжениям.

Для малосвязных водонасыщенных глинистых пород гидротвалов характерна нелинейная зависимость $\tau = f(\sigma)$. В этих случаях и при определении прочности водонасыщенных породных масс в стадии незавершенного уплотнения, когда поровое давление фигурирует в графике сопротивления сдвигу в неявном виде, расчет устойчивости отвалов целесообразно производить по методу Г. Л. Фисенко, с учетом общего сопротивления пород сдвигу, без разделения на силы трения и сцепления. Для этого производится развертка расчетной поверхности скольжения, на которой в соответствующих точках восстанавливаются ординаты, равные действующим касательным напряжениям и сопротивлениям сдвигу.

Сдвигающие касательные напряжения

$$\tau_{\text{сд}} = \frac{1}{2} h_i \gamma \sin 2\alpha_i,$$

где h_i — высота породного отсека в расчетной точке поверхности скольжения;

γ — объемная масса пород;

α_i — угол наклона поверхности скольжения.

Сопротивление породы сдвигу (удерживающее касательное напряжение $\tau_{\text{уд}}$) определяется на графике сопротивления сдвигу по величине нормального напряжения $\sigma_n = h_i \gamma \cos^2 \alpha_i$. Концы ординат соединяются плавными кривыми и определяются площади фигур, ограниченных этими кривыми и осью абсцисс. Площади фигур численно равны соответственно сумме сдвигающих и удерживающих сил.

Коэффициент запаса устойчивости откоса определяется как отношение площади эпюр удерживающих и сдвигающих касательных напряжений.

При расчете устойчивости обводненных откосов, сложенных подверженными влиянию гидростатического взвешивания породами, сопротивление сдвигу в каждой точке поверхности скольжения снимается с графика сопротивления сдвигу при нормаль-

ном напряжении, уменьшенном на величину гидростатического давления в этой точке.

Если поверхность скольжения не является монотонной и криволинейной, для расчетов устойчивости применяются модификации метода многоугольника сил. При этом используются значения φ и c для консолидированной глинистой породы и дополнительно учитывается поровое давление (а также равнодействующая сил гидродинамического давления и гидростатического взвешивания).

При наличии графиков сопротивления глинистых пород сдвигу, соответствующих различным стадиям их уплотнения, расчет устойчивости ведется при значениях φ и c , которые получены по тотальным напряжениям. Графики $\tau = f(\sigma)$ принимаются с учетом соответствующих расчетным моментам времени значений порового давления.

При криволинейной монотонной поверхности скольжения метод многоугольника сил применяется для проверочных расчетов.

При использовании метода многоугольника сил коэффициент запаса устойчивости откосов определяют построением замкнутого многоугольника при расчетных значениях параметров сопротивления сдвигу

$$\varphi_p = \arctg \left(\frac{\Phi}{\eta} \right) \text{ и } C_p = \frac{c}{\eta}$$

или введением значения η в расчетную величину сдвигающих сил, которая для одного блока массой P_i с углом наклона основания α_i имеет вид

$$T_i^p = \eta P_i \sin \alpha_i.$$

На рис. 73 приведен пример расчета по методам касательных напряжений и многоугольника сил устойчивости откоса сложенной глинистыми породами насыпи, в основании которой залегают сильносжимаемые водонасыщенные гумусированные суглинки. Установлено, что даже наличие контрбанкета, создаваемого для усиления призмы упора, не обеспечивает достаточного коэффициента запаса устойчивости системы основание — откос для принятых геометрических параметров насыпи. При расчете учитывались следующие силы: E — реакции между блоками; P — масса блоков; R_0 — реакции в основаниях блоков; cl — сила сцепления в основаниях блоков; P_n — поровое давление в водонасыщенных глинистых породах основания насыпи.

Универсальность и математическая обоснованность метода многоугольника сил дают основание рекомендовать его для проведения массовых расчетов, трудоемкость которых существенно снижается при применении электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ).

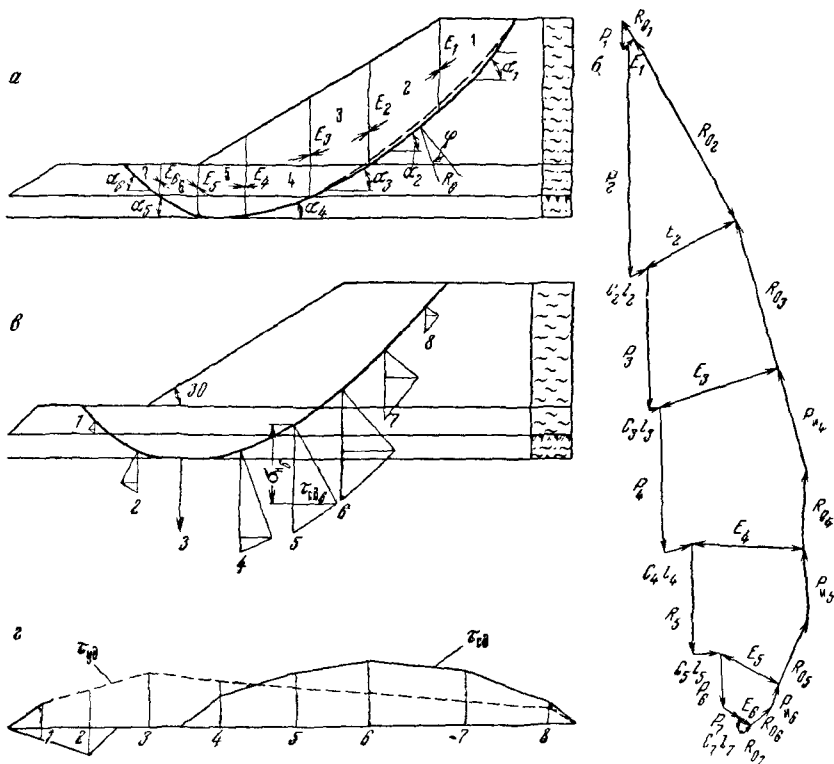


Рис. 73. Расчет устойчивости насыпи по методам многоугольника сил и касательных напряжений:

а — разбивка оползневого клина на блоки (для построения многоугольника сил); б — многоугольник сил (коэффициент запаса устойчивости $\eta = \tan \varphi / \tan \varphi_p = C/C_p = 1,06$); в — расчетная схема к методу касательных напряжений (для определения сдвигающих τ_{cd} и нормальных σ_n напряжений); г — эпюры сдвигающих τ_{cd} и удерживающих $\tau_{уд}$ касательных напряжений ($\eta = S_{уд}/S_{cd} = 1,12$)

При углах откосов положе 45° и большом числе блоков границы между ними можно принимать вертикальными, а направления реакций — совпадающими с наклоном площадок скольжения в основании последующего блока. Тогда реакция между блоками определяется по формуле

$$E = \frac{\eta P_i \sin \alpha_i - (P_i \cos \alpha_i - P_{n_i}) \tan \varphi - c l_i + E_{i-1}}{\cos \delta_i - \sin \delta_i \tan \varphi_i}, \quad (\text{IV.12})$$

где P_i — масса пород в пределах блока;

α_i — угол наклона основания блока;

δ_i — угол наклона реакции E_i к основанию рассматриваемого блока.

Коэффициент запаса вводится лишь для блоков в пределах призмы активного давления. Условием равновесия откоса при коэффициенте запаса η является равенство нулю реакции E_n для последнего блока. С помощью ЭЦВМ легко производится перебор значений η для получения $E_n = 0$ с заданной точностью. Контуры оползневого клина при введении данных в выражение (IV.12) должны задаваться уравнениями.

При оценке возможностей наращивания гидроотвалов, размещения на их площадях «сухих» отвалов или рекультивации расчеты устойчивости откосных сооружений должны дополняться проверкой несущей способности намывных масс.

Пространственно-геометрический метод решения задачи оценки устойчивости откосов в условиях сложной конфигурации поверхности ослабления [40, 41] обладает рядом преимуществ по сравнению с инженерными методами: учитывается структурная неоднородность массива; расчет устойчивости производится по поверхностям ослабления или расчленения любой сложности, реализующихся в поверхности скольжения; учитываются силы взаимодействия по вертикальным граням смежных объемных элементов; устойчивость откоса оценивается по величине оползневого давления в его нижней части, т. е. в зоне концентрации слагающих напряжений; представляется возможность выявить изменение состояния бортового массива в процессе ведения горных работ; решается объемная задача устойчивости откосов глубоких карьеров при фиксированных поверхностях скольжения.

Расчет устойчивости рекомендуется производить в следующей последовательности.

1. Составляется топографический план опасной поверхности скольжения. Для этой цели используются материалы инженерно-геологического изучения массива борта карьера.

2. Путем совмещения топографического плана поверхности скольжения с топографическим планом борта карьера в заданном его положении составляется план изомощностей пород оползневого клина (способом вычитания поверхностей топографического порядка).

3. Оползневой клин разбивается на элементарные блоки с равными площадями на плане, при этом контуры блоков для удобства ориентируются нормально к простиранию борта откоса или параллельно направлению фронта работ.

4. По характерным точкам рельефа дневной поверхности участка и поверхности скольжения в блоках выделяются элементарные отсеки, для которых вычисляются удерживающие и сдвигающие силы. Для этого определяются средние удельные давления на основании элементарных блоков путем умножения средней мощности оползневого клина в пределах каждого блока на средневзвешенное значение объемной массы пород, составляющих колонку элементарного блока.

Тогда сдвигающая сила будет равна

$$S_{сдв_i} = P_i \sin \alpha_i, \quad (IV.13)$$

где $P_i = \gamma_{ср} h_i f_i$ — масса элементарного блока;
 $\gamma_{ср}$ — средневзвешенное значение объемной массы пород;
 h_i — средняя мощность пород в пределах каждого отсека;
 f_i — площадь поперечного сечения отсека;
 α_i — угол наклона основания отсека (поверхности скольжения) к горизонту.

Удерживающие силы равны

$$S_{уд_i} = P_i \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + c f_i, \quad (IV.14)$$

где φ и c — показатели сопротивления сдвигу по поверхности ослабления.

5. При необходимости учета равнодействующей сил гидродинамического давления и гидростатического взвешивания, а также величины избыточного порового давления вводятся поправки в величину удерживающих сил путем уменьшения нормальной составляющей массы блоков.

6. Учитывается величина оползневое давления E , т. е. давления со стороны смежных блоков и отсеков, а также силы трения и сцепления между смежными блоками.

7. Условия равновесия каждого элементарного блока рассматриваются по отсекам сверху вниз. Для этого берется сумма проекций сил на направление возможного смещения в пределах каждого отсека.

Определение оползневого давления производится с использованием формулы Шахунянца — Фисенко:

$$E_i = \frac{\pm P_i \sin \alpha_i \eta - P_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i - c F_i + E_{i-1}}{\cos \delta_i \pm \sin \delta_i \operatorname{tg} \varphi_i} \quad (IV.15)$$

где P_i — масса отсека;
 η — коэффициент запаса устойчивости;
 F_i — поверхность, по которой учитываются силы сцепления;
 δ_i — угол перегиба, т. е. изменение угла наклона поверхности скольжения при переходе от предыдущего отсека к последующему.

Эпюры оползневых давлений позволяют оценить не только общую устойчивость блоков и участка в целом, но и установить изменение состояния участка по мере его отработки, т. е. оценить устойчивость рабочего борта с учетом динамики горных работ. Представляется возможность запланировать мероприятия для обеспечения устойчивости борта в зонах, характеризующихся положительными значениями оползневого давления. В качестве таких мероприятий могут быть рекомендованы: уменьшение призм активного давления за счет более интенсивной разработки

верхних горизонтов (выполаживание борта); ускоренная проходка неустойчивой зоны, если она невелика и если это не вызывает осложнений технологического порядка.

§ 2. Прогноз изменений состояния породных массивов во времени

Процесс деформирования глинистых пород откосов носит реологический характер (затухающая и незатухающая ползучесть, снижение прочности во времени, релаксация напряжений), для описания которого используют эмпирические уравнения, не связанные между собой.

На основании представлений структурной механики грунтов (по Тан Тьонг Ки) законы деформирования обусловлены структурой породы, изменяющейся в процессе деформирования. Исследования С. С. Вялова, Р. В. Максимьяк и Н. К. Пекарской показали, что в ходе деформирования грунта происходит смещение минеральных частиц, их переупаковка и переориентация в направлении сдвига. Снижению прочности способствуют дефекты структуры (микротрещины размером больше максимального размера частиц) и микротрещинообразование, развивающееся при значениях касательного напряжения τ больше предельного τ_{∞} (размер микротрещин от долей микрометра и более). Количественными характеристиками служат плотность дефектов ω (относительное содержание объема микротрещин в единице объема грунта) и степень ориентации глинистых частиц в направлении сдвига Ω (относительное содержание ориентированных частиц в направлении сдвига в единице объема грунта). Для затухающей ползучести $0 < \omega < \omega_n < 1$, для незатухающей ползучести $\omega_n < \omega < \omega_p < 1$ (ω_n — начальная плотность дефектов, ω_p — плотность дефектов при разрушении). Разрушение глинистого грунта происходит в момент времени t_p при достижении величиной плотности трещин ω критического значения ω_p , являющегося для данного грунта постоянным. Величина Ω пропорциональна длительности процесса деформирования, при $t \rightarrow \infty$ $\Omega \rightarrow 1$. С учетом реологических уравнений состояния, предложенных Ю. К. Зарецким, уравнение длительной прочности можно записать в виде

$$\tau = \tau_0 - (\tau_0 - \tau_{\infty}) \frac{t_p}{T_p + t_p}, \quad (\text{IV.16})$$

где

$$T_p = \frac{1}{\chi} \ln \frac{1 - \omega_n}{1 - \omega_p},$$

здесь

$$\chi = \frac{\ln [(1 - \omega_n)/(1 - \omega_{\tau})]}{T_{\tau}}$$

(T_{τ} — параметр, имеющий размерность времени).

Уравнение (IV.16) позволяет оценивать состояние горных пород в различные периоды времени (от $t = 0$ до $t = \infty$).

Математический аппарат структурно-механических процессов деформирования грунтов целесообразно использовать для прогнозирования оползневых деформаций откосов. Так, скорость относительной деформации сдвига $\dot{\gamma}$ и момент начала прогнозирующего течения t_p связаны соотношением

$$\frac{\dot{\gamma}_i^T}{\tau_{сдв}} = \frac{a}{t_p^\delta}, \quad (IV.17)$$

где $\dot{\gamma}_i^T = v_i^T/h_i$;

v_i^T — скорость смещения рабочего репера;

h_i — высота i -го оползневого клина по нормали к вектору смещения;

$\tau_{сдв}$ — сдвигающее касательное напряжение в рассматриваемом блоке;

$a = (\tau - \tau_\infty)/(\tau_0 - \tau)$ — уровень напряжений.

Сведения о характере снижения во времени прочности пород откосов могут быть получены по результатам обратных расчетов оползней откосов со значительными сроками стояния.

Для построения кривых скольжения обычно используют данные инструментальных наблюдений на оползневых участках, корректируемые при необходимости определениями поверхности скольжения путем разбуривания оползневых тел. Результаты маршейдерской съемки являются исходными данными при расчетах устойчивости, выполняемых методами алгебраического суммирования сил по поверхности скольжения и касательных напряжений.

Выполненные А. П. Могилко обратные расчеты для условий оползневых процессов на некоторых карьерах Украины показали, что сопротивление сдвигу глинистых пород откосов снижается (значительно) во времени. Так, первоначальная величина сопротивления сдвигу при $\sigma_n = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ составляла $1,3 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, через 6 месяцев — $0,55 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, через 10 лет — $0,35 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ [39].

Достоверность полученных из обратных расчетов данных может быть повышена на основе учета пространственного положения оползневого тела с использованием пространственно-геометрического метода в сочетании со способом многоугольника сил.

Основным процессом, с которым связано изменение состояния отвальных пород во времени, является их уплотнение под действием внешней нагрузки (для основания) или собственной массы (для тела отвала). В зависимости от водонасыщенности породных масс отвалов для прогнозных расчетов их уплотнения используется аппарат теорий фильтрационной консолидации или ползучести.

В инженерной практике при численном определении величины порового давления используют решение одномерной задачи фильтрационной консолидации*. Уравнение одномерной консолидации полностью водонасыщенной породы в случае приложения постоянной равномерно распределенной нагрузки к породному слою мощностью n имеет вид

$$\frac{\partial H}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 H}{\partial y^2}, \quad (\text{IV.18})$$

где H — напор в поровой воде в рассматриваемый момент времени t ;

H^* — напор в поровой воде, соответствующий стабилизированному состоянию породы;

$C_v = k_{\phi} (1 + \epsilon_{\text{ср}}) / \gamma_v a$ — коэффициент консолидации;

k_{ϕ} — среднее значение коэффициента фильтрации;

$\epsilon_{\text{ср}}$ — среднее значение коэффициента пористости породы для рассматриваемого диапазона уплотняющих нагрузок;

a — коэффициент сжимаемости породы;

γ_v — объемная масса воды.

Решение уравнения (IV.20) при определенных неизменных краевых условиях: $t = 0$; $0 \leq y \leq h$; $H = H^0 = q / \gamma_v$; $t \neq 0$; $y = 0$; $H = 0$ или $\partial H / \partial y = 0$; $t \neq 0$; $y = h$, осуществляемое методом разделения переменных Фурье, может быть представлено в виде [61]:

$$H = \frac{4q}{\pi \gamma_v} \sum_{i=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \frac{1}{i} \exp \left(- \frac{C_v i^2 \pi^2 t}{h^2} \right) \sin \frac{i \pi y}{h}. \quad (\text{IV.19})$$

При фронтальной отсыпке отвалов величину порового давления $P_u = H \gamma_v$ в водонасыщенных глинистых породах основания и тела отваловых насыпей следует определять с учетом темпа роста уплотняющей нагрузки, так как использование в этом случае решений теории уплотнения для мгновенно приложенной нагрузки дает завышенные значения порового давления и приводит к занижению расчетных показателей сопротивления пород сдвигу и допустимых параметров откосов.

Решение задач консолидации позволяет определять осадки породных масс и оценить устойчивость гидроотвалов.

* Предпосылки теории фильтрационной консолидации: 1) рассматриваются полностью водонасыщенные породы, в порах которых содержится свободная, несжимаемая и гидравлически непрерывная вода; 2) скелет породы принимается линейно деформируемым, напряжения в нем мгновенно вызывают деформации; 3) порода не обладает структурной прочностью, и приложенное к ней внешнее давление в первый момент времени полностью передается на воду; 4) фильтрация воды в порах породы подчиняется закону Дарси.

Исходя из специфики формирования гидроотвалов, используются решения следующих задач [10]:

1. Уплотнение слоя породы, мощность которого постепенно возрастает от нуля до некоторой заданной величины.
2. Уплотнение слоя после окончания намыва под действием собственной массы слагающей его породы («отдых» слоя).
3. Уплотнение слоя под действием постепенно возрастающей нагрузки от вышележащих слоев.
4. Уплотнение слоя после окончания намыва вышележащих слоев.

§ 3. Управление карьерными откосами на основе прогнозных расчетов

Исследование закономерностей изменения во времени напряженно-деформированного состояния породных толщ позволяет разработать систему управления карьерными откосами, обеспечивающую оптимальное планирование режимов горных пород. Научные принципы управления состоянием пород в массиве (по В. В. Ржевскому) включают следующие положения:

- параметры карьерных откосов должны обеспечивать безопасное и экономичное ведение работ;
- назначение коэффициента запаса устойчивости должно производиться дифференцированно для различных стадий освоения месторождений;
- при больших глубинах разработки и сложных горно-геологических условиях необходимы специальные инженерные мероприятия для управления состоянием карьерных откосов;
- на карьерах необходимо создание специальной службы наблюдения за устойчивостью откосов и контроля проводимых инженерных мероприятий.

Реализация перечисленных принципов предусматривает гибкое реагирование на изменения состояния породного массива в ходе разработки месторождения. Поэтому повышенные требования предъявляются к учету фактора времени при инженерно-геологических прогнозах. Сложность задачи определяется слабой изученностью закономерностей деформирования в природных условиях пород различных инженерно-геологических комплексов в зависимости от их состава, напряженного состояния и времени состояния откосов.

При оценке влияния фактора времени на поведение пород в карьерных откосах необходимо учитывать:

- изменение положения откосов во времени и в пространстве в связи с динамикой горных работ;
- влияние обусловленных технологией горных пород динамических воздействий различного вида на состояние массива;
- изменение состояния, свойств и условий деформирования пород с глубиной;

— влияние геолого-структурных особенностей на перераспределение напряжений и локализацию деформаций в бортовых массивах глубоких карьеров;

— возрастание роли осушения породного массива в обеспечении безопасности горных пород при освоении глубоких обводненных месторождений.

Осушение породных толщ рассматривается как один из способов инженерного воздействия на массив и не исключает использования способов искусственного закрепления горных пород или создания противофильтрационных завес в целях сохранения ресурсов подземных вод.

В табл. 48 приведена общая классификация факторов, влияющих на открытую разработку месторождений в сложных инженерно-геологических условиях. Эта классификация может быть использована при прогнозировании условий освоения какого-то конкретного месторождения.

При прогнозировании нестационарных геомеханических процессов в бортах карьеров и отвалах должны учитываться специфические особенности развития этих процессов в зависимости от вида горнотехнических сооружений.

Изменение во времени состояния обводненных нецементированных и полускальных пород в бортах глубоких карьеров схематически представим следующим образом: вследствие водопонижения происходит увеличение эффективных напряжений и уплотнение (упрочнение) породных слоев (при этом мощные глинистые слои уплотняются в пределах зон активного сжатия, размеры которых зависят от величины начального градиента фильтрации); при отстройке борта изменение вследствие депрессионного уплотнения породы разупрочняются из-за снижения петростатической нагрузки; в сформировавшихся откосах развивается процесс снижения во времени прочности слагающих их пород. Таким образом, на процесс упрочнения бортового массива за счет снятия гидродинамического и гидростатического давления «накладывается» процесс снижения во времени прочности этих пород, влияние которого определяется сроком стояния откосов и естественно наиболее значительно для нерабочих бортов. С учетом совместного влияния отмеченных процессов для обеспечения устойчивости нерабочих бортов может потребоваться постепенное выполаживание их или проведение дополнительных инженерных мероприятий с целью достижения запланированных экономических показателей разработки месторождения.

Устойчивость рабочих бортов для различных периодов эксплуатации месторождений может обеспечиваться преимущественно путем маневрирования скоростью подвигания фронта горных работ и интенсивностью осушения.

Масштаб изменений во времени состояния слагающих борта глубоких карьеров скальных пород определяется прежде всего уровнем напряжений. Наиболее существенно здесь, очевидно,

Классификация факторов, влияющих на открытую разработку месторождений в сложных инженерно-геологических условиях (по М. Е. Певзнеру)

Группа факторов	Факторы	Формы проявления факторов	Влияние факторов на технологию горных пород	Рекомендации по учету и снижению вредного воздействия факторов
Климатические	Большое количество атмосферных осадков	Разлив откосов карьеров; увлажнение основания внутренних и внешних отвалов, снижение несущей способности берм	Осложняет строительство и эксплуатацию карьеров, ухудшает условия устойчивости откосов, снижает производительность горнотранспортного оборудования	Уменьшение времени стояния откосов в предельном контуре карьера, применение песчано-гравийных подушек в основании отвалов, разработка специальных мероприятий по предотвращению налипания горных пород и повышению проходимости горнотранспортного оборудования
	Наличие многолетней мерзлоты	Снижение несущей способности берм при протаивании пород, деформации откосов	Осложняет работу горнотранспортного оборудования, ухудшает условия устойчивости откосов	Разработка специальных мероприятий по повышению проходимости горнотранспортного оборудования, расчет параметров устойчивых откосов с повышенным коэффициентом запаса
	Большие колебания температуры воздуха	Образование у поверхности уступов зоны пород пониженной прочности, интенсивное выветривание пород	Ухудшает условия устойчивости откосов, вызывает дополнительные затраты на очистку берм	Уменьшение времени стояния откосов в предельном контуре карьера
	Наличие поверхностных вод, пересекающих карьерное поле или находящихся в непосредственной близости от него	Фильтрация воды в карьер; фильтрационные деформации откосов	Осложняет строительство и эксплуатацию карьеров; ухудшает условия устойчивости откосов	Изоляция карьера от поверхностных вод

Гидрогеологические	Наличие во вмещающих породах и рудном теле водоносных горизонтов Обводненность контактов слоев и структурных нарушений Карст	Фильтрационные деформации откосов; увеличение влажности полезного ископаемого; увлажнение основания внутренних отвалов; развитие процессов растворения, выщелачивания и набухания; фильтрация воды в карьер Деформации откосов; внезапный прорыв воды в карьер Просадка и обрушение участков	Осложняет строительство и эксплуатацию карьеров; ухудшает условия устойчивости откосов; ухудшает качество полезного ископаемого; снижает производительность горнотранспортного оборудования Осложняет строительство и эксплуатацию карьеров; ухудшает условия устойчивости откосов Вызывает аварии горнотранспортного оборудования, ухудшает условия устойчивости откосов	Осушение карьерного поля Осушение карьерного поля Предварительное изучение и картирование карстовых полостей
Геологические	Наличие мощной толщи вскрыши, представленной глинистыми породами Неблагоприятно ориентированная структура массива пород Низкая водопроницаемость пород (коэффициент фильтрации 1 м/сут)	Деформации откосов Деформации откосов То же	Обуславливает необходимость выполнения бортов и применения малоэффективных систем разработки, ограничивает проходимость горнотранспортного оборудования в период строительства карьера Осложняет строительство и эксплуатацию карьеров; ухудшает условия устойчивости откосов Осложняет и удорожает осушение карьерного поля, строительство и эксплуатацию карьеров	Отстройка бортов по предельно допустимым устойчивым углам наклона Прогнозирование участков, опасных в деформационном отношении. Изменение направления движения фронта горных работ Создание прибортовых песчано-гравийных пригрузок, электроосмотическое осушение пород

Группа факторов	Факторы	Формы проявления факторов	Влияние факторов на технологию горных работ	Рекомендации по учету и снижению вредного воздействия факторов
	Склонность пород к набуханию	Снижение прочности пород; деформации откосов	Осложняет строительство и эксплуатацию карьеров	Применение специальных средств дренажа набухающих пород. Определение устойчивых параметров откосов с учетом возможного снижения прочности пород
	Низкая несущая способность пород	Просадка уступов и отвалов под влиянием внешних нагрузок	Ограничивает применение горнотранспортного оборудования с большим удельным давлением	Применение специальных покрытий (железобетонные и металлические плиты, песчано-гравийные подушки). Искусственное укрепление пород; применение горнотранспортного оборудования с незначительным удельным давлением
	Низкое сопротивление сдвигу	Деформации откосов	Выполаживает углы откосов уступов и бортов; увеличивает объемы вскрышных работ; ограничивает предельную глубину карьера	Отстройка бортов по предельнодопустимым устойчивым углам наклона
	Тиксотропность	Разжижение пород	Ухудшает проходимость и вызывает просадку горнотранспортного оборудования	Разработка мероприятий по снижению величины вибрации горнотранспортного оборудования

проявляется влияние длительной прочности и выветривания. Кроме того, при наличии зон ослабления массива в виде заполненных глинистым материалом трещин на величину порового давления в глинистом заполнителе (и соответственно величину сопротивления его сдвигу) весьма существенное влияние оказывают водопонижение и разгрузка массива в результате отсройки контура борта.

В случае, когда технико-экономическими расчетами установлена необходимость проведения дополнительных инженерных мероприятий, большое практическое значение приобретают исследования процесса снижения во времени прочности пород, искусственно измененных путем инъецирования в бортовой массив специальных закрепляющих и стабилизирующих материалов. Получение экспериментальных кривых длительной прочности позволяет регламентировать масштабы работ по искусственному закреплению пород с учетом срока службы откосов.

Важным элементом проектирования открытых разработок является определение высоты и объема карьерных отвалов, а также потребных для их размещения площадей.

Для отвалных насыпей первоственный интерес представляет оценка их начальной устойчивости, так как в связи с перемещением фронта отвала откосы возобновляются по истечении весьма непродолжительных периодов (порядка нескольких месяцев). В случаях, когда основание или тело отвала сложены глинистыми породами, привлечение аппарата теории консолидации позволит определить геометрические параметры насыпей с учетом ряда технологических факторов, оказывающих совокупное влияние на сопротивление пород сдвигу. При этом степень уплотнения породных слоев следует устанавливать с помощью зависимостей, в которые вводится скорость подвигания фронта отвала, и затем использовать выбранный по величине степени уплотнения график сопротивления пород сдвигу для оценки устойчивости откосов. Таким образом, производится проверка режима отвалообразования с позиций устойчивости откосов и оценивается эффективность мероприятий инженерной подготовки слабых оснований.

Нарушение земель горными работами может быть уменьшено за счет максимального использования овражно-балочной сети для размещения гидроотвалов, а также увеличения их высоты и емкости на основе управления процессами уплотнения породных масс. Управление состоянием намывных глинистых пород возможно при послойном намыве, для проверки режима которого целесообразно применение решений задач фильтрационной консолидации, соответствующих различным этапам работы намывных слоев. Использование указанных теоретических зависимостей позволяет определять осадки породных масс и производить оценку устойчивости гидроотвалов с учетом изменения во времени прочности пород их тела и основания. Внедрение послойного намыва на комбинированных и грунтовых гидроотвалах обеспе-

чивает получение значительного экономического эффекта за счет увеличения емкости отвалов и ускорения сроков подготовки их территорий для последующего использования.

Первичная информация о показателях изменения во времени напряженно-деформированного состояния пород, используемых при прогнозе нестационарных геомеханических процессов, может быть получена в ходе разведочных работ. При этом с целью оперативного и надежного определения этих характеристик следует отдавать предпочтение натурным исследованиям: прессиометрическим испытаниям, замерам порового давления в глинистых породах и осадок породных толщ, сжимаемых в результате водопонижения или под действием нагрузок от опытных отвалов.

Для уточнения первичной информации при строительстве и эксплуатации карьеров необходима постановка широкого комплекса наблюдений и натурных экспериментов, обеспечивающих непрерывность проектирования и принятие оптимальных решений по управлению откосами на различных этапах освоения месторождения. К основным элементам контроля свойств и состояния пород в массиве на действующих объектах следует отнести: определение положения депрессионных кривых для различных моментов времени; определение водно-физических характеристик пород; уточнение характеристик деформируемости и сопротивления пород сдвигу; инструментальные наблюдения за вертикальными и горизонтальными смещениями пород в бортах карьеров, отвалах и их основаниях; определение фактической степени уплотнения слоев глинистых пород и коэффициента запаса устойчивости откосов с помощью натурных измерений порового давления; комплексное зондирование песчано-глинистых пород в бортах карьеров и отвалов.

ГЛАВА 20

ПРОГНОЗНЫЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ РАБОТАХ

§ 1. Прогноз напряженного состояния массива при подземных горных работах

В настоящее время существует несколько гипотез горного давления и соответствующих им расчетных методов. Несмотря на некоторые существенные различия, практически все современные гипотезы и методы механики горных пород (в том числе и горного давления) основываются на положениях механики сплошных деформируемых сред и используют ее основные закономерности.

1. Гипотезы, исходящие из представления о массиве пород как среде сплошной, упругой.

Во многих случаях для решения задач горного давления применение методов теории упругости оказывается достаточно удовлетворительным по точности и полноте получаемых результатов. С другой стороны, методы теории упругости более полно разработаны среди других в механике сплошных сред и наиболее широко используются в других прикладных областях, например строительной механике. В качестве примера рассмотрим расчетный метод акад. Л. Д. Шевякова по определению размеров опорных целиков. Предполагается, что давление на целики равно массе столба налегающих пород от кровли камеры до земной поверхности. Основанием столба служит площадка величиной, равной сумме площадей горизонтальных сечений опорного целика и камер, прилегающих к длинной и короткой сторонам целика, т. е.

$$S = S_{\text{ц}} + S_{\text{к}}^* + S_{\text{к}}^{**}. \quad (\text{IV.20})$$

Тогда давление на целик будет

$$P = \gamma HS, \quad (\text{IV.21})$$

где γ — средняя объемная масса пород налегающей толщи;
 H — глубина разработки (до кровли камер).

Прочные размеры целика в этом случае должны удовлетворять условию

$$\gamma HS \leq \frac{S_{\text{ц}} \sigma_{\text{сж}}}{K}, \quad (\text{IV.22})$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ — предел прочности пород целика на сжатие;
 K — коэффициент запаса прочности.

В более сложных задачах, например: когда требуется определить действующие напряжения, их распределение в некоторой области массива, выявить наиболее опасные участки и т. д., решение осуществляется с учетом перемещений точек массива и деформаций. В этом направлении метод получил развитие в работах К. В. Рушнейта, М. А. Липсона, В. Ф. Трумбачева и др.

В последние годы получил распространение комплексный метод решения: в натурных условиях определяются основные параметры, характеризующие свойства и состояние массива (деформационные характеристики, естественное напряженное состояние, прочностные свойства, качественная и количественная характеристики структурной раздробленности, предельно допустимые обнажения и др.); с учетом геометрии и морфологии месторождения и объекта расчета выбирается механико-математическая модель и на основе исходной информации разрабатывается расчетный метод. Примером такого подхода может служить решение объемной задачи напряженно-деформированного состояния совокупности камер и целиков для разработки этажно-камерной системой железистых кварцитов большой горизонтальной мощности (КМА), приведенное ниже.

Пример. Целью решения этой задачи является определение рациональных размеров опорных целиков и потолочины камер. В качестве основного критерия выбраны допустимые нормальные напряжения сжатия с одновременным контролем величин максимальных прогибов потолочного целика. Для определения величин напряжений и прогибов принята схема расчета на изгиб свободно опертой по контуру прямоугольной плиты, нагруженной равномерной поперечной нагрузкой и лежащей на упругом основании.

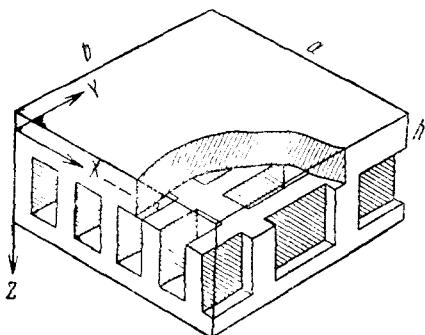


Рис. 74. Схема расчета размеров опорных целиков и потолочины камер

Экспериментальные исследования позволили сделать следующие выводы:

1) величины измеренных в массиве пород и в элементах системы разработки напряжений не превышают $(600-700) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ и существенно ниже предела упругости пород, равного $(1800-2000) 10^5 \text{ Н/м}^2$;

2) при испытании образцов горных пород путем многократных циклов нагрузки и разгрузки не обнаружено остаточных деформаций;

3) массив пород имеет умеренную степень структурной раздробленности (в среднем 2—3 трещины на 1 пог. м), характеризуется высокой акустической жесткостью;

4) наибольшая горизонтальная составляющая естественных напряжений в 2,5—3,0 раза превышает величину вертикальной составляющей. Главные (нормальные) напряжения ориентированы по направлениям, близким к горизонтальным и вертикальному;

5) деформационные и прочностные показатели пород характеризуются высокими значениями и составляют: модуль нормальной упругости $E = 10 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $\mu = 0.22-0.25$; предел прочности на сжатие $\sigma_{сж} = (2200-2700) 10^5 \text{ Н/м}^2$; предел прочности на растяжение $\sigma_r = (70-110) 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Приведенные сведения показывают, что в данных условиях расчетная схема на изгиб свободно опертой по контуру плиты на упругом основании наиболее полно отражает реальные условия работы механической системы «потолочина — целики».

Определение статических напряжений и перемещений в потолочном и опорных целиках производим по следующей схеме.

Общее дифференциальное уравнение изгиба прямоугольной плиты в системе координат, показанной на рис. 74, имеет вид:

$$\nabla^2 \nabla^2 W = \frac{q}{D} - \frac{kW}{D}, \quad (\text{IV.23})$$

где ∇^2 — оператор Лапласа;

q — равномерная поперечная нагрузка;

W — величина прогиба потолочины;

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ — цилиндрическая жесткость;

E — модуль упругости пород потолочины;

μ — коэффициент Пуассона;

h — толщина потолочины;

$k = \frac{E}{h_{п}(1-\mu^2)} \lambda$ — коэффициент постели;

$h_{ц}$ — высота целиков;

$\lambda = 1 - \frac{cd}{(c+\delta)(d+\delta)}$ — коэффициент потерь руды в опорных целиках;

c, d — характерные размеры прямоугольных камер;

δ — толщина опорных целиков.

Решения уравнения (IV.23) удобно представляется с помощью двойного тригонометрического ряда:

$$W = \frac{16q}{\pi^2} \sum_m \sum_n \frac{\sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b}}{mn \left[\pi^4 D \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) + k \right]}, \quad (IV.24)$$

где a, b — характерные размеры потолочины;

$m, n = 1, 3, 5$.

Если ввести обозначение

$$f = \frac{k}{\pi^4 D} = \frac{12}{\pi^4 h^3 h_{ц}}, \quad (IV.25)$$

то необходимые формулы для расчета прогибов и напряжений можно получить в виде:

$$W = \frac{16q}{\pi^6 D} \sum_m \sum_n \frac{1}{mn \left[\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 + f \right]} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (IV.26)$$

$$\sigma_x = \frac{192qz}{\pi^4 h^3} \sum_m \sum_n \frac{\left(\frac{m}{na^2} + \mu \frac{n}{mb^2} \right)}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 + f} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (IV.27)$$

$$\sigma_y = \frac{192qz}{\pi^4 h^3} \sum_m \sum_n \frac{\left(\frac{n}{mb^2} + \mu \frac{m}{na^2} \right)}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 + f} \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (IV.28)$$

При этом максимальное давление на сплошное упругое основание со стороны потолочины равно

$$P_{\max} = kW_{\max}. \quad (IV.29)$$

Приведенный пример решения объемной задачи методами теории упругости иллюстрирует преимущества сочетания экспериментального и аналитического методов при решении сложных задач. Однако на практике встречается множество случаев, когда решение задач горного давления методами теории упругости неправомерно. Например, в случае, когда толща пород представлена глинами, песками или подобными им по механическим свойствам породами, упругая механико-математическая модель среды не отражает действительных параметров горно-геологических явлений в массиве.

2. Гипотезы, исходящие из представления о массиве пород как среде сплошной, пластически деформирующейся, разработаны применительно к массивам, сложенным связными пластическими породами (глины, сланцы, мергели, суглинки), несвязными пластически деформируемыми породами (пески, глино-песчаные и другие сыпучие разности), а также применительно к сильно-трещиноватым скальным и полускальным породам. Предполагается, что породы деформируются преимущественно пластически, а доля упругих деформаций незначительна.

Большинство отечественных гипотез этого направления базируются на разработанной В. В. Соколовским в общей форме теории предельного равновесия связной пластической и сыпучей сред. Характерной особенностью метода является установление границ областей предельного напряженного состояния и построение кривых скольжения, заполняющих эти области и определяющих форму поверхностей скольжения.

В качестве иллюстрации рассмотрим задачу определения прочных размеров опорных целиков в трещиноватых твердых породах (по К. В. Рушнейту). Вначале определяем нагрузку на среднее сечение целика, при которой целик переходит в состояние предельного равновесия; среднее значение нагрузки на целик определяют по формуле

$$\left. \begin{aligned} \frac{P}{2} &= 2k \left(\operatorname{arctg} \frac{b}{n} + \frac{h}{b} \sin^2 \mu_0 \right) - H, \\ k &= (2\mu_0 - \sin^2 \mu_0) H, \\ H &= k \operatorname{ctg} \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.30})$$

где k — величина сцепления по плоскостям трещин;

φ — угол трения по плоскостям трещин;

$2b$ — ширина целика;

h — высота целика;

μ_0 — некоторый коэффициент, определяемый из второго уравнения системы.

Затем рассчитываем фактическую нагрузку на целик любым из известных методов (например, как масса столба пород над целиком до поверхности), сравнивая полученные величины предельной (разрушающей) и фактической нагрузки на целик, определяем коэффициент запаса прочности целика.

Подавляющая часть слабых и значительная часть полускальных (особенно трещиноватых) пород обладают достаточно выраженными реологическими свойствами. В связи с этим при решении задач горного давления принимаются сложные механико-математические, вязкопластические, упруго-вязкопластические и другие модели. Это позволяет более достоверно отразить реальные условия и параметры горно-геологических явлений.

Рассмотрим использование этих принципов на конкретном примере.

Пример. Решается задача определения нагрузки на крепь вертикальных стволов, пройденных в слоистом массиве песчано-глинистых пород. Анализ строения толщи пород и наблюдения за поведением образцов их под нагрузкой позволяют сделать вывод о том, что влажные глины, водонасыщенные пески, мел, мергели удовлетворяют нелинейно-упруговязкой модели поведения материалов.

Схему формирования силового поля и работу механической системы представим в следующем виде.

Напряженное состояние во всех слоях массива определяется собственной массой пород, т. е. вертикальная составляющая равна $\sigma_z = \gamma H$; горизонтальные напряжения принимаем одинаковыми по любому направлению в горизонтальной плоскости, а величины их зависят от значений коэффициентов бокового распора. В массиве пород проходит вертикальная цилиндрическая выработка, в которой систематически, по мере проходки, устанавливается и вводится в работу крепь. По окончании работ крепь и окружающий массив пород образуют единую механическую систему, нагруженную силами массы пород и работающую в условиях стесненной радиальной деформации.

Исходим из следующих предположений о деформационных процессах в рассматриваемой системе:

1) к моменту ввода крепи в работу в выработке успевают развиваться радиальные смещения, которые будем называть начальными и обозначать U_0 ;

2) после ввода крепи в работу устанавливается непосредственный контакт по внешнему контуру между крепью и массивом и дальнейшему смещению стенок выработки препятствует крепь;

3) при совместной работе крепи и массива пород радиальные перемещения на контуре выработки имеют место, так как крепь обладает определенной податливостью;

4) по истечении достаточно большого промежутка времени ($t = \infty$) процесс совместного деформирования крепи и массива пород прекращается и на внешнем контуре выработки установятся максимальные перемещения $U_{\max}$;

5) в связи с тем, что внутренняя поверхность ствола свободна от нормальных напряжений (т. е. имеет место разгрузка внутренней поверхности ствола), должны возникнуть вертикальные деформации крепи и околоствольного массива. Однако на достаточной глубине благодаря жесткости толщи вышележащих пород разгрузка в ограниченной области приведет к передаче некоторого дополнительного давления на окружающий массив, который воспринимает его без существенных деформаций. Теоретические и экспериментальные исследования подтверждают наличие зоны разгрузки вокруг ствола;

6) радиальные давления (напряжения) на достаточном удалении от ствола будут соответствовать по величине напряжениям в нетронутом массиве, а на внешнем контуре ствола их величина будет зависеть от податливости крепи.

Изложенное позволяет решать задачу в условиях плоской деформации. В основу решения положен метод, основанный на условии равновесия элементов системы и неразрывности деформаций для нелинейно-упруговязкой среды, разработанный А. С. Строгоновым. Рассмотрим многослойную комбинарованную крепь ствола, применяющуюся в особо сложных гидрогеологических и инженерно-геологических условиях (рис. 75) и состоящую из двух колец тубинговой крепи, пространство между которыми заполнено монолитным бетоном.

Вначале рассмотрим напряженно-деформированное состояние внутреннего тубингового кольца, нагруженного радиальным давлением P_r на внешнем контуре кольца. Механическое уравнение состояния чугунного тубин-

гового кольца при соблюдении граничного условия $\sigma_r/r = a = 0$, может быть записано в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \tau_s \ln \frac{\tau_s + 2GU_B \frac{b}{a^2}}{\tau_s + 2GU_B \frac{b}{r^2}} + 2\mu V_B b \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{r^2} \right); \\ \sigma_y &= \frac{4GU_B \frac{b}{r^2}}{\tau_s + 2GU_B \frac{b}{r^2}} \tau_s + \tau_s \ln \frac{\tau_s + 2GU_B \frac{b}{a^2}}{\tau_s + 2GU_B \frac{b}{r^2}} + \\ &+ 2\mu V_B b \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{r^2} \right); \\ \sigma_z &= \frac{2GU_B \frac{b}{r^2}}{\tau_s + 2GU_B \frac{b}{r^2}} \tau_s + \tau_s \ln \frac{\tau_s + 2GU_B \frac{b}{a^2}}{\tau_s + 2GU_B \frac{b}{r^2}} + \\ &+ 2\mu V_B \frac{b}{a^2},\end{aligned}\quad (IV.31)$$

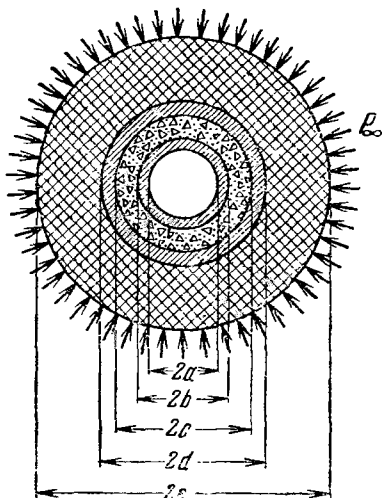


Рис. 75. Схема к расчету давления на многослойную крепь ствола

где $U_B = \bar{U}_d (d/b)$; $V_B = \bar{V}_d (d/b)$.

Рассматривая последовательно напряженно-деформированное состояние бетонного заполнителя и внешнего тубингового кольца, получаем аналогичные выражения для радиальной нагрузки на внешнем контуре бетонного заполнителя P_c и тубингового кольца соответственно P_d :

где σ_r , σ_y , σ_z — соответственно радиальное, тангенциальное (окружное) и осевое напряжения в тубинговом кольце;

τ_s — предел текучести чугуна;

G — начальный модуль сдвига для чугуна;

μ — коэффициент пластической вязкости;

U_B , V_B — величина и скорость перемещения на внешней поверхности ($r = b$) внутреннего тубингового кольца.

С учетом линейности связи между U_B , V_B и перемещениями U_d и скоростями сдвига для V_d на внешнем контуре комбинированной крепи выражение для радиальной нагрузки ($\sigma_z = P_B$) можно записать в виде:

$$\begin{aligned}P_B &= \tau_s \ln \frac{\tau_s + 2G\bar{U}_d \frac{d}{a^2}}{\tau_s + 2G\bar{U}_d \frac{d}{b^2}} + \\ &+ 2\mu \bar{V}_d d \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right),\end{aligned}\quad (IV.32)$$

$$P_c = \left\{ \left[H_6 + \tau_s \ln \frac{\tau_s + 2G\bar{U}_d \frac{d}{a^2}}{\tau_s + 2G\bar{U}_d \frac{d}{b^2}} + 2\mu\bar{V}_d d \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \right] + 2\mu_6\bar{V}_d \frac{d}{b^2} \right\} \times \\ \times \left[\frac{\operatorname{tg} \psi_6 + 2G_6\bar{U}_d \frac{d}{b^2} (1 - \operatorname{tg} \psi_6)}{\operatorname{tg} \psi_6 + 2G\bar{U}_d \frac{d}{c^2} (1 - \operatorname{tg} \psi_6)} \right]^{\frac{\operatorname{tg} \psi_6}{1 - \operatorname{tg} \psi_6}} - 2\mu_6\bar{V}_d \frac{d}{c^2} - H_6; \quad (\text{IV.33})$$

$$P_d = P_c + \tau_s \ln \frac{\tau_s + 2G\bar{U}_d \frac{d}{c^2}}{\tau_s + 2G\bar{U}_d \frac{1}{d}} + 2\mu\bar{V}_d d \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{d^2} \right), \quad (\text{IV.34})$$

где H_6 — гидростатическое давление, эквивалентное сцеплению в бетоне; ψ_6 — угол внутреннего трения бетона.

Затем решается контактная задача для комбинированной крепи, сопряженной с окружающим массивом пород и определяется давление со стороны неограниченного массива на крепь

$$P_d = (H_n + P_\infty) \left[\frac{\operatorname{tg} \psi_n}{\operatorname{tg} \psi_n + 2G_n (U_{d_0} - \bar{U}_d) (1 - \operatorname{tg} \psi_n) \frac{1}{d}} \right]^{\frac{\operatorname{tg} \psi_n}{1 - \operatorname{tg} \psi_n}} - \\ - 2\mu\bar{V}_d \frac{1}{d} - H_n, \quad (\text{IV.35})$$

где P_∞ — заданное давление (горизонтальное напряжение) на бесконечно удаленной ($r = \infty$) цилиндрической поверхности;

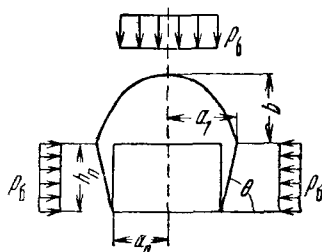
H_n, ψ_n, G_n, μ_n — характеристики породы, аналогичные указанным ранее; U_{d_0} — первоначальный зазор между крепью и массивом пород.

Приравнявая (IV.35) и (IV.34), получим дифференциальное уравнение для $d\bar{U}_d/dt$, решая которое (численным интегрированием), получаем значения $\bar{U}_d$ и $\bar{V}_d$. Подстановка значений $\bar{U}_d$ и $\bar{V}_d$ для заданных интервалов времени t в формулу (IV.34) дает возможность определить контактное давление P_d и изменение его во времени.

Далее нетрудно определить нагрузки P_c и P_n , подставив полученные значения P_d в соответствующие формулы (IV.31) и (IV.33).

3. Гипотезы, исходящие из представления о массиве пород как сыпучей, несвязной среде, получили широкое распространение при изучении горного давления и расчете крепи горных выработок. Объясняется это, с одной стороны, большим распространением пород и грунтов, которые могут быть отнесены к категории несвязных или малосвязных. С другой стороны, эти гипотезы наиболее просто объясняют физическую сущность механизма горного давления, так как имеют по существу одну физическую константу — угол трения. Поэтому аналитические выводы гипотез сыпучей среды более стройны и просты.

Наиболее известной в отечественной горной науке является гипотеза М. М. Протодяконова. На основе экспериментальных и теоретических исследований он показал, что над выработкой образуется свод естественного равновесия пород, имеющий параболические очертания, и что давление на крепь выработки равно по величине массе объема пород, заключенного в пределах свода равновесия. С некоторыми корректировками метод расчета крепи по гипотезе свода естественного равновесия представляется в следующем виде (расчетная схема приведена на рис. 76). Высота свода равновесия определяется из условия



$$b = \frac{a}{f}, \quad (\text{IV.36})$$

где $f = \operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент трения (при угле внутреннего трения пород φ);
 a_1 — полупролет свода.

Рис. 76. Расчетная схема определения высоты свода

Величина полупролета свода равновесия может быть найдена как

$$a_1 = a_n + h_n \operatorname{ctg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (\text{IV.37})$$

где a_n — полупролет выработки;
 h_n — высота выработки.

Угол сползания пород в боках выработки

$$\theta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}. \quad (\text{IV.38})$$

Интенсивность нагрузки в кровле выработки обычно принимается (с некоторым завышением) в виде

$$P_b = \gamma b. \quad (\text{IV.39a})$$

Величина боковой нагрузки может быть приближенно оценена как

$$P_\delta = \gamma (b + 0,5h_n) \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (\text{IV.39б})$$

Основные положения статики сыпучей среды использованы при разработке (Борисенко, 1960) метода расчета размеров целиков для условий крутопадающих рудных месторождений. Этот метод заключается в следующем [6, 7].

В предположении, что междукамерные целики можно рассматривать как подпорные стенки, удерживающие вмещающие

(налегающие) породы от сдвижения (рис. 77), делаются следующие допущения:

1) поверхность сдвижения призмы сползания ($ABFE$) является плоской;

2) целики под действием нагрузки деформируются, что создает условия для формирования призмы сползания.

Метод позволяет определять размеры целиков как по предельному состоянию, так и по предельным напряжениям. Однако

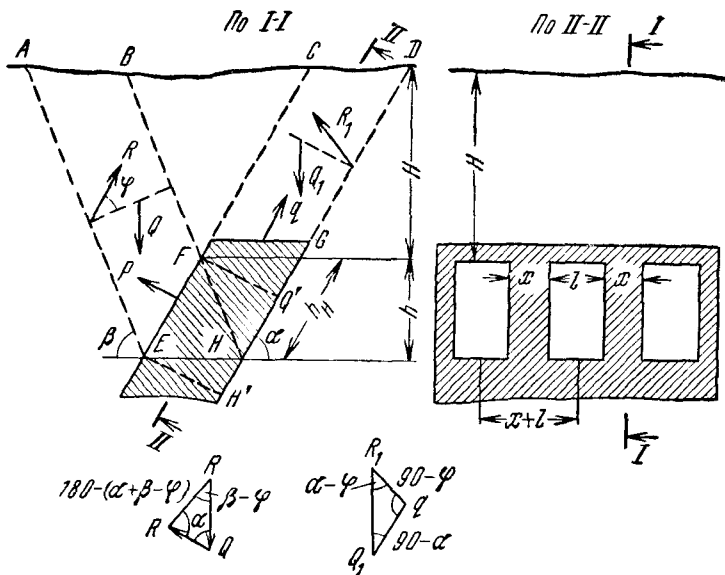


Рис. 77. Схема к расчету междуканнерных целиков (по А. А. Ивлищкому)

определение предельной нагрузки, как правило, трудновыполнимо, поэтому более распространена вторая расчетная схема, основанная на допускаемых напряжениях в целике.

Согласно приведенным на рис. 77 схемам нагрузок и геометрическим соотношениям ширина целика получается равной

$$a = \frac{PB}{\sigma_{сж}b - P}, \quad (IV.40)$$

где P — боковая нагрузка на целик;

B — ширина призмы сползания;

b — высота призмы сползания;

$\sigma_{сж}$ — допустимое напряжение материала целика на сжатие, принимаемое равным $\sigma_{сж} = \sigma_{пр}/n$ (здесь $\sigma_{пр}$ — предел прочности на сжатие, n — коэффициент запаса прочности).

Величину бокового давления на целик при этом определяют по формуле

$$P = \frac{\gamma h (H + 0,5h) (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta) \sin (\beta - \varphi)}{\sin (\alpha + \beta - \varphi)}, \quad (\text{IV.41})$$

где h — высота целика;

H — глубина разработки;

γ — средняя объемная масса налегающих пород;

α — угол падения залежи;

β — угол сдвижения пород висячего бока;

φ — угол внутреннего трения пород налегающей толщи.

В этом варианте предполагается, что основное силовое воздействие на целик оказывает масса призмы сползания пород в висячем боку, а вертикальное давление сравнительно мало и не искажает результатов. Однако это не всегда так, и для сравнения во многих случаях необходимо определять и вертикальную нагрузку. Последняя зависит от состояния подработанных пород.

Если налегающие породы обрушены или имеют природную несвязную структуру, вертикальная нагрузка на целик может быть определена по аналогии с давлением сыпучего на дно пирамидальных бункеров

$$q_1 = \frac{\gamma R}{fk}, \quad (\text{IV.42})$$

где γ — объемная масса пород;

$R = F/S$ — гидравлический радиус основания, равный отношению его площади к периметру;

$f = \operatorname{tg} \varphi$, где φ — угол внутреннего трения;

$k = (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi)$ — коэффициент подвижности пород.

Если подрабатываемые породы имеют связи между частицами, то вертикальное давление можно определить исходя из массы призмы скольжения *CFGD* (см. рис. 77)

$$q_2 = \frac{\gamma H m \sin (\beta_1 - \varphi)}{\cos \varphi}, \quad (\text{IV.43})$$

где m — горизонтальная мощность залежи;

β_1 — угол сдвижения пород лежачего бока залежи.

§ 2. Расчеты сдвижения горных пород

Существующие методы расчета сдвижений горных пород разработаны в основном для массивов, деформирующихся при их подработке пликативно. Наиболее фундаментальные исследования в этой области выполнены С. Г. Авершиным [2], предложившим метод расчета, основанный на решении задачи определения скоростей перемещения точек пластически деформирующейся полуплоскости.

Исходя из этих представлений, С. Г. Авершин предложил для предрасчета вертикальных оседаний в главных сечениях мульды следующую формулу:

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^n e^{\frac{m}{e} x}, \quad (\text{IV.44})$$

где η — оседание точки дневной поверхности с абсциссой x ;

η_0 — наибольшая величина оседания;

L — расстояние от границы мульды до точки с наибольшим оседанием;

n — некоторая постоянная величина;

e — основание натурального логарифма.

Величина η_0 определялась С. Г. Авершиным по формуле Бригса

$$\eta_0 = \frac{a}{a + \sqrt{H}} m, \quad (\text{IV.45})$$

где a — коэффициент, определяемый для каждого бассейна опытным путем;

H — глубина горных работ;

m — мощность залежи.

Разработаны также и другие аналитические методы определения параметров движения, основанные на иных механико-математических моделях. Общим недостатком этих методов является трудность получения надежных значений различных коэффициентов и величин, входящих в расчетные формулы, и то обстоятельство, что все они правомерны в какой-то узкой области, т. е. определенных условиях.

Изложенные обстоятельства побудили исследователей разработать эмпирические формулы для определения отдельных параметров сдвижения.

В последние годы во ВНИМИ разработан ряд методик предрасчета сдвижений горных пород для основных месторождений СССР, которые дают хорошую сходимость с практическими данными.

Например, для условий Донбасса при первичной подработке пласта с углом падения α в пределах $0 < \alpha < 70^\circ$: а) величина максимального оседания дневной поверхности определится из выражения

$$\eta_m = 0,8m \cos \alpha \sqrt{t_1 t_2},$$

где m — вынимаемая мощность пласта;

$$t_1 = 0,9 (D_1/H - \Delta a_1 - \Delta a_2);$$

$$t_2 = 0,9 (D_2/H - \Delta a_3 - \Delta a_4);$$

$\Delta a_1, \Delta a_2$ — поправки за счет влияния целиков между лавами, расположенных у верхней и нижней границ лавы;

$\Delta a_3, \Delta a_4$ — поправки за счет влияния целиков на границах лавы по простиранию пласта;

D_1, D_2 — размеры выработки по падению и простиранию пласта;

б) максимальный наклон поверхности

$$i = \left(1,5 - \frac{\alpha}{57^\circ}\right) \frac{m}{H};$$

в) максимальная кривизна k_0

$$k_0 = \frac{\eta_m}{L} S_{(z)},$$

где L — длина полумульды;

$S_{(z)}$ — поправочный коэффициент;

г) максимальное горизонтальное сдвигение

$$\xi_0 = (0,3 + 0,7 \operatorname{tg} \alpha) \eta_m;$$

д) максимальное растяжение и сжатие

$$\varepsilon = \left(0,6 + 0,9 \frac{\alpha}{57^\circ}\right) \frac{m}{H} \cos \alpha.$$

§ 3. Прогноз некоторых вязкопластических деформаций пород в окрестностях подземных выработок

При строительстве и эксплуатации горных выработок в неоднороднослоистых средах возможен процесс механического выдавливания глинистых прослоек за контур выработки, причину которого можно объяснить вязкопластическим течением пород.

Основным условием проявления пластического состояния является проведение горных работ. В ненарушенном слоистом массиве глинистые породы могут находиться в состоянии пластического равновесия, нарушение которого — создание выработки — приводит к течению пород в сторону обнажения. В пластическое состояние глинистые породы могут перейти также в процессе сооружения выработки. Однако вне зависимости от условий возникновения причиной пластического состояния является достижение породой предела текучести.

Дифференциация показателей физико-механических свойств пород слоистого массива обуславливает процесс смещения пропластков. Если деформации нарастают медленно и процесс можно охарактеризовать как равновесный и необратимый, следует говорить о процессе вязкопластического течения и рассматривать глинистые породы как вязкопластическую среду.

Представление горных пород моделью вязкопластической среды применялось рядом исследователей (Т. А. Крыжановская, А. П. Максимов, В. А. Лыткин, И. Салустович, А. А. Репко,

М. И. Весков) для описания проявления горного давления в подземных выработках.

Достоинство подобной аппроксимации — получение решения в скоростях, что позволяет определять величину смещения пород в любой промежуток времени.

При исследовании давления горных пород на крепь горизонтальных выработок Т. А. Крыжановской произведено описание вязкопластического течения пород с помощью уравнений гидродинамики вязкой жидкости (уравнение Навье — Стокса). Течение горных пород предлагается описывать уравнением ньютоновской жидкости при условии преодоления предельного напряжения сдвига, т. е. рассматривается установившийся процесс.

Максимальная скорость сдвижения пород кровли в вертикальном направлении определяется выражением

$$v_{\max} = \frac{\gamma}{2\mu} (a - y_0)^2 - \frac{Rn}{abH} \left(\frac{a^2 - y_0^2}{2\mu} \right), \quad (\text{IV.46})$$

где γ — объемная масса породы;

$2a$ — ширина выработки;

y_0 — координата;

H — глубина работ;

n — количество стоек на 1 м выработки;

R — реакция стойкости;

b — расстояние между стойками.

При изучении процессов выдавливания («пучения») глинистых пород А. П. Максимов, используя уравнение Шведова — Бингама, на основе математических выкладок приходит к выводу, что для исследования деформаций бингамова тела в области напряжений, обуславливающих его течение, можно применять уравнение гидродинамики вязкой жидкости, не накладывая ограничений на скорость движения. Вязкопластическое течение среды подчиняется закономерностям ньютоновской вязкой жидкости при условии, когда касательные напряжения превзойдут предельное сопротивление сдвигу.

Формула для определения скорости течения породы в выработку имеет вид

$$v = \frac{Q (\cos 2\theta - \cos \alpha)}{r (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)}, \quad (\text{IV.47})$$

где Q — объем породы, поступающей в выработку в единицу времени;

α — угол между образующими выработки;

θ — угол между осью выработки и радиусом;

r — радиус.

Процесс выдавливания горных пород за контур выработки рассматривался В. А. Лыткиным, при этом породы аппроксимировались моделью Шведова — Бингама. Выдавливание тонкого

слоя, заключенного между жесткими слоями пород неограниченно большой толщины, уподоблялось процессу выдавливания материалов в пазы матриц при холодной штамповке металлов. Расчетные формулы получены на основе теории, разработанной А. Н. Ильюшиным.

Формула для определения скорости выдавливания пород в выработку имеет вид

$$v = \frac{3h_0}{4Et_{rel}a} \left(\frac{Ph_0}{b + 4h_0} - 2\tau_s b \right), \quad (IV.48)$$

где P — нагрузка на единичную полосу длины целика;

h_0 — толщина слоя;

E — модуль упругости;

t_{rel} — время релаксации;

$2a$ — ширина выработки;

$2b$ — ширина целика;

τ_s — предел текучести пород.

Для определения смещений на контуре незакрепленной круглой выработки А. Салунович рекомендует формулу

$$U_t = U_\infty \sqrt{1 - e^{-\alpha(t_0 + t)}}, \quad (IV.49)$$

где U_∞ — максимальное смещение на контуре;

t_0 — постоянная величина, определяемая из условия, что в первоначальный момент распространения зоны пластичности радиус зоны равен радиусу выработки;

t — время, отсчитываемое от момента проведения выработки;

$\alpha = 2 \sin \varphi / (1 - \sin \varphi)$;

φ — угол внутреннего трения.

Величина U_∞ определяется выражением

$$U_\infty = \frac{\tau_s r e^{2\alpha} \sqrt{3}}{\alpha 3 \eta e^{2\alpha}},$$

где η — коэффициент вязкости пород;

r — радиус выработки;

τ_s — предел текучести породы, определяемый, исходя из условия Губера — Мизеса:

$$z = \frac{P - \frac{2}{\sqrt{3}} \tau_s}{\frac{4}{\sqrt{3}} \tau_s},$$

здесь P — вертикальное давление в массиве.

Величина пластической зоны определяется из выражения

$$R_\infty = r e^z.$$

По мнению А. А. Репко, процесс выдавливания глинистых пород при проходке вертикальных стволов можно уподобить случаю выдавливания вязкопластического слоя, заключенного между двумя жесткими плитами, в одной из которых имеется круглое отверстие. Исходя из представления вязкопластической среды моделью Шведова — Бингама, решение задачи проводится с использованием уравнений гидродинамики вязкой жидкости.

Скорость течения пород в сторону обнажения имеет вид

$$v_{\max} = -\frac{1}{2\mu} \left[\frac{P_z}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} + \frac{3\tau_0}{2h} \left(\frac{r_2 - r_1}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \right) \right] (h - h_0), \quad (\text{IV.50})$$

где τ_0 — предельное напряжение сдвига;

μ — коэффициент динамической вязкости среды;

P_z — действующее давление;

h — половина мощности выдавливаемого слоя;

h_0 — размер ядра течения;

r_1 — внешний радиус слоя, равный зоне возмущений;

r_2 — внутренний радиус слоя, равный радиусу ствола.

Рассмотренные задачи решались применительно к условиям угольных и рудных месторождений и конкретной горно-геологической обстановке.

§ 4. Прогноз деформаций массива при глубоком водопонижении

Проведение водопонижения на месторождениях полезных ископаемых со сложными гидрогеологическими условиями — высоким напором подземных вод и большой водообильностью — приводит к изменению напряженно-деформированного состояния массива. При прогнозировании деформаций массивов необходимо учитывать величину пачального градиента фильтрации, структурную прочность пород, ползучесть минерального скелета и динамику роста депрессионной нагрузки.

С учетом значительных размеров полей водопонижения в плане для прогноза напряженно-деформированного состояния осушаемых породных массивов вполне допустимо применять решения одномерных задач уплотнения. Депрессионная нагрузка $q = \Delta H \gamma_v$ (где ΔH — снижение напора, γ_v — плотность воды) приводится к полосовой путем разбивки профилей депрессионной воронки на блоки. Положение депрессионной поверхности принимается по данным гидрогеологических расчетов (на стадии проектирования) или натурных наблюдений (при освоении месторождения).

Экспериментальными исследованиями процессов консолидации осушаемых породных толщ, выполненными ВНИМИ, ВИОГЕМ и МГИ применительно к условиям месторождений Запорожского и Белгородского железорудных узлов, установлено, что для

прогноза уплотнения отдельных слоев с различным литологическим составом следует использовать решения следующих задач:

1) фильтрационной консолидации слоя квазидвухфазной породы (для песков и глин);

2) ползучести слоя квазиоднофазной породы (для карбонатных пород);

3) фильтрационной консолидации и ползучести слоя двухфазной породы (для выветрелых глиноподобных сланцев).

Перечисленные случаи одномерной деформации породных слоев следует рассматривать для различных этапов их уплотнения (под постепенно возрастающей и постоянной депрессионной нагрузкой соответственно для периодов развития стабилизации депрессионной кривой).

Фильтрационные явления в плотных глинистых породах сдерживаются из-за наличия начального градиента, достигающего, например, для киевских глин Южно-Белозерского месторождения $I_0 \approx 40$ (по данным натурных наблюдений), а для бат-байосских глин Яковлевского месторождения $I_0 \approx 30$ (по данным испытаний в универсальных стабилOMETрах). Мощность зоны активного уплотнения в пределах рассматриваемого слоя глинистых пород с учетом величины I_0 при заданном снижении напора ΔH определяется из соотношения

$$h_a = \frac{\Delta H}{I_0}.$$

Процесс уплотнения развивается лишь после превышения депрессионной нагрузкой структурной прочности породы.

Структурная прочность породы $P_{стр}$ приближенно учитывается путем уменьшения на ее величину депрессионной нагрузки (т. е. расчетная величина уплотняющей нагрузки $q^p = q - P_{стр}$).

Формула для определения осадки слоя квазиоднофазной породы с учетом закономерностей линейной наследственной ползучести имеет вид

$$S(t) = a_k^0 h \left[q(t) + \int_0^t K(t, \tau) q(\tau) d\tau \right]. \quad (IV.51)$$

При наиболее распространенном экспоненциальном типе ядра ползучести $K(t - \tau) = \delta e^{-\delta_1(t-\tau)}$ и $q = \text{const}$ осадка определяется из следующего выражения:

$$S(t) = a_k^0 q h \left[1 + \frac{\delta}{\delta_1} (1 - e^{-\delta_1 t}) \right], \quad (IV.52)$$

где a_k^0 — «первичный» коэффициент компрессионного сжатия; δ и δ_1 — параметры ползучести.

Параметр δ_1 равен тангенсу угла наклона графика зависимости приведенной скорости развития осадки при компрессии от времени; величина δ определяется из соотношения

$$\frac{S_{\infty}}{S_0} = 1 + \frac{\delta}{\delta_1},$$

где S_0 — условно-мгновенная осадка.

При постепенном возрастании уплотняющей нагрузки упрощенные зависимости для расчета осадок получаются путем подстановки в исходное выражение.

Для случаев, когда уплотнение породных слоев протекает при одновременном развитии процессов фильтрации воды в порах и ползучести минерального скелета, напорную функцию и степень уплотнения слоев при постоянной депрессионной нагрузке целесообразно определять с использованием решения одномерной задачи консолидации и ползучести квазидвухфазных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авершин С. Г.* Сдвигение горных пород при подземных разработках. М., Углетехиздат, 1947. 245 с. с ил.
2. *Авершин С. Г.* Горные работы под сооружениями и водоемами. М., Углетехиздат, 1954. 324 с. с ил.
3. *Айзаксон Э.* Давление горных пород в шахтах. М., Госгортехиздат, 1961. 176 с. с ил.
4. *Бондарик Г. К.* Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. М., «Недра», 1971. 272 с. с ил.
5. *Бондарик Г. К., Коренева С. Л., Горячева Д. С.* Методические рекомендации по определению деформационных и прочностных свойств глинистых пород методом прессиометрии. М., ВСЕГИНГЕО, 1971. 40 с. с ил.
6. *Борисенко С. Г.* Расчет междукammerных целиков на прочность. — Изв. ДГИ, 1955, т. 23, с. 95—105 с ил.
7. *Борисенко С. Г., Копица Ф. А.* Камерная система разработки в горнорудной промышленности. М., Госгортехиздат, 1960. 400 с. с ил.
8. *Вережагин Н. П.* Прогноз изменения напряженного состояния массивов глинистых пород под влиянием водоопонижения. — В сб.: «Вопросы инженерной геологии при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений шахт и карьеров». Л., 1969, вып. 1, с. 46—49 с ил.
9. *Взаимодействие массивов горных пород с крепью вертикальных выработок.* М., «Недра», 1966. 314 с. с ил. Авт.: Г. А. Крупенников, Н. С. Булычев, А. М. Козел, Н. А. Филатов.
10. *Гальперин А. М.* Специальные вопросы инженерной геологии при гидромеханизации открытых разработок. М., МГИ, 1974. 72 с. с ил.
11. *Гальперин А. М., Костовицкий В. П.* Использование пространственно-геометрического метода при прогнозе устойчивости бортов карьеров. — В кн.: Материалы Всесоюзного совещания по проблемам теории прогноза инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых. Белгород, ВИОГЕМ, 1975, с. 167—169 с ил.
12. *Гармонов И. В., Коноплянцев А. А.* Влияние искусственного водоопонижения уровня подземных вод на состояние дневной поверхности. — «Разведка и охрана недр», 1964, № 2, с. 44—48 с ил.
13. *Гармонов И. В., Коноплянцев А. А., Котлов Ф. В.* Оседание земной поверхности в связи с интенсивной откачкой подземных вод, эксплуатацией месторождений нефти и газа. — В кн.: Некоторые вопросы теории прогноза оседаний. М., 1965. 61 с. с ил.
14. *Геомеханика отвалных работ на карьерах.* М., «Недра», 1972. 184 с. с ил. Авт.: П. Н. Панюков, В. В. Ржевский, В. В. Истомин, А. М. Гальперин.
15. *Голодковская Г. А., Шаумян Л. В., Демидюк Л. М.* Геолого-структурные основы прогнозной оценки инженерно-геологических условий глубоких месторождений рудных полезных ископаемых. — В сб.: Материалы Всесоюзного совещания по проблемам теории прогноза инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых. Белгород, ВИОГЕМ, 1975, с. 13—19 с ил.
16. *Гольштейн М. Н.* Механические свойства грунтов. М., Стройиздат, 1971. 369 с. с ил.
17. *Горькова И. М.* Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных пещях. М., Стройиздат, 1975. 151 с. с ил.
18. *Грунтоведение.* М., Изд-во МГУ, 1973. 387 с. с ил. Авт.: Е. М. Сергеев, Г. А. Голодковская, Р. С. Зиянгиров и др.
19. *Демин А. М., Александров В. К.* Деформации уступов и бортов в карьерах. М., ЦНИИТЭИУголь, 1963. 73 с. с ил.

20. *Ержанов Ж. С.* Теория ползучести горных пород и ее приложения. Алма-Ата, «Наука», 1964. 175 с. с ил.
21. *Зарецкий Ю. К.* Теория консолидации грунтов. М., «Наука», 1967. 270 с. с ил.
22. *Зарецкий Ю. К., Вялов С. С.* Вопросы структурной механики глинистых грунтов. — «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1971, № 3, с. 1—5 с ил.
23. *Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий при разведке и освоении месторождений твердых полезных ископаемых.* М., «Недра», 1969. 408 с. с ил. Авт.: В. Д. Бабушкин, Д. И. Пересунько, С. П. Прохоров, Г. Г. Скворцов.
24. *Илиевский А. А.* Методы расчета междукламерных целиков и потолочий при разработке крутопадающих рудных месторождений. — Сб.: «Методы определения размеров опорных целиков и потолочий». М., Изд-во АН СССР, 1962. с. 95—104 с ил.
25. *Инструкция по изучению инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых при их разведке.* М., «Недра», 1975. 51 с. с ил.
26. *Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости.* Л., ВНИМИ, 1971. 188 с. с ил. Авт.: Г. Л. Фисенко, А. М. Мочалов, В. И. Веселков и др.
27. *Истомина В. С.* Фильтрационная устойчивость грунтов. М., Госстройиздат, 1957. 295 с. с ил.
28. *Казикаев Д. М.* К вопросу подземной разработки рудных месторождений с обрушением обводненных залегающих пород. — В кн.: Новые методы и технические средства производства маркшейдерских работ. Белгород, ВЮГЕМ, 1975, с. 122—127 с ил.
29. *Коган Л. Л.* Аппаратура и методика определения порового давления в глинистых грунтах. М., Гидропроект, 1960. 26 с. с ил.
30. *Коломенский Н. В.* Методические указания по изучению процессов выветривания горных пород для инженерно-геологических целей. М., Госгеол-издат, 1952. 68 с. с ил.
31. *Леонов П. А., Сурначев Б. А.* Породные отвалы угольных шахт. М., «Недра», 1970. 112 с. с ил.
32. *Ломтадзе В. Д.* Инженерная геология. Инженерная петрология. Л., «Недра», 1970. 528 с. с ил.
33. *Маслов Н. Н.* Основы механики грунтов и инженерной геологии. М., «Автотрансиздат», 1961. 708 с. с ил.
34. *Материалы семинара по пенетрационно-каротажным методам, применяемым в инженерной геологии.* М., ВСЕГИНГЕО, 1969. 72 с. с ил.
35. *Мельников Н. В.* Будущие горные разработки. — В кн.: Рациональное использование земной коры. М., «Недра», 1974, с. 18—27 с ил.
36. *Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов.* М., «Наука», 1966. 131 с. с ил. Авт.: С. С. Вялов, С. Э. Городецкий, В. Ф. Ермаков и др.
37. *Методические указания по определению деформационных прочностных и фильтрационных характеристик горных пород в стабиометрах.* Белгород, ВЮГЕМ, 1973. 70 с. с ил. Авт.: П. Н. Панюков, Н. П. Верещагин, Э. М. Добров, С. В. Кравчук.
38. *Мироненко В. А., Шестаков В. М.* Основы гидрогеомеханики. М., «Недра», 1974. 296 с. с ил.
39. *Могилако Л. Н., Кузавев Н. Н.* Определение длительной прочности пород методом обратных расчетов оползней. — «Уголь Украины», 1969, № 11, с. 19—21 с ил.
40. *Панюков П. Н.* Инженерная геология. М., Госгортехиздат, 1962. 344 с. с ил.
41. *Панюков П. Н.* Инженерная геология глубинных зон земной коры — В кн.: Инженерная геология в государственном планировании. Международ-

ный геологический конгресс XXIII. Доклады советских геологов. Проблема 12. М., «Наука», 1968, с. 44—48 с ил.

42. *Панюков П. Н.* Об основных объектах и новых задачах инженерно-геологических исследований. — В кн.: Материалы Всесоюзного совещания по проблемам теории прогноза инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых. Белгород, ВИОГЕМ, 1975, с. 9—13 с ил.

43. *Панюков П. Н.* Пути дальнейшего развития инженерной геологии. — «Материалы дискуссии к первому Международному конгрессу по инженерной геологии». М., МГУ, 1974, с. 97—103 с ил.

44. *Петухов И. А.* Деформации крепления шахтных стволов в Челябинском бассейне. — «Уголь», 1950, № 3, с. 18—19 с ил.

45. *Писанец Е. П., Мироненко В. А.* Водопонижение на карьерах КМА. М., «Недра», 1968. 135 с. с ил.

46. *Плотников Н. И.* Гидрогеологические и инженерно-геологические условия строительства и эксплуатации карьеров. — «Горный журнал», 1959, № 6, с. 24—28 с ил.

47. *Рац М. В.* Неоднородность горных пород и их физических свойств. М., «Наука», 1968. 107 с. с ил.

48. *Ржевский В. В., Ревязов М. А.* Принципы управления состоянием бортов глубоких карьеров. — «Горный журнал», 1975, № 1, с. 38—40 с ил.

49. *Родионов Н. В.* Инженерно-геологические исследования в карстовых районах. М., Госгеолгиздат, 1958. 183 с. с ил.

50. *Родионов Н. В., Барановский А. М.* Некоторые вопросы изучения инженерно-геологических свойств горных пород при устройстве карьеров и глубоких выемок. — «Разведка и охрана недр», 1957, № 3, с. 49—57 с ил.

51. *Сдвигение горных пород на рудных месторождениях.* М., «Недра», 1971. 224 с. с ил. Авт.: М. А. Кузнецов, А. Г. Акимов, В. И. Кузьмин и др.

52. *Сидоров Н. Н., Сипидин В. П.* Современные методы определения характеристик механических свойств грунтов. Л., Стройгиздат, 1972. 136 с. с ил.

53. *Скворцов Г. Г.* Состояние и задачи развития теоретических основ прогнозирования инженерно-геологических условий разработки месторождений полезных ископаемых. — В кн.: Материалы Всесоюзного совещания по проблемам теории прогноза инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых. Белгород, ВИОГЕМ, 1975, с. 3—9 с ил.

54. *Смирнов Б. В.* Использование моделирования для прогноза инженерно-геологических условий разработки месторождений полезных ископаемых. М., «Недра», 1975. 99 с. с ил.

55. *Справочник по инженерной геологии.* Под ред. В. М. Чуринова. М., «Недра», 1968. 540 с. с ил.

56. *Терцаги К.* Теория механики грунтов. М., Госстройиздат, 1961. 508 с. с ил.

57. *Троянский С. В., Велицкий А. С., Чекин А. И.* Общая и горнорудничная гидрогеология. М., Госгортехиздат, 1960. 391 с. с ил.

58. *Трумбушев В. Ф., Молодцова Л. С.* Применение оптического моделирования для исследования напряженного состояния пород вокруг горных выработок. М., Изд-во АН СССР, 1963. 95 с. с ил.

59. *Укрепление горных пород.* М., «Недра», 1973. 96 с. с ил. Авт.: В. Ф. Беляев, М. Е. Певзнер, А. В. Пястолов, М. А. Ревазов.

60. *Фисенко Г. Л.* Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., «Недра», 1965. 378 с. с ил.

61. *Флорин В. А.* Основы механики грунтов, т. II. М., Госстройиздат, 1961. 543 с. с ил.

62. *Цытович Н. А.* Механика грунтов. М., «Высшая школа», 1963. 636 с. с ил.

63. *Цытович Н. А.* Механика мерзлых грунтов. М., «Высшая школа», 1973. 448 с. с ил.

64. *Чаповский Е. Г.* Инженерная геология. М., «Высшая школа», 1975. 296 с. с ил.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абразия 168
Активность карста 173
Анизотропность 28, 42, 52, 57, 61
Аргиллиты 56
- Базис оползня 180
Битумизация 104
Болото 181
Бугры пучения 187
Болотные отложения 181, 182
Быстрый сдвиг 80
- Вал выщурения 178
Вечная мерзлота 94
Верхний предел пластичности горной породы 68
Водоопонижение 102, 223, 285
Выветривание 183
Вязкость 83
- Галогенные породы 60
Геологические процессы 157, 163, 170, 177, 183, 188
Глинистые породы 62
Глинистые фракции 62, 66
Глинистые минералы 62
Горно-геологические явления 5, 161, 198, 203, 210
Горное давление 211
Горный обвал 167
Горный удар 221
Гранулометрический состав 48
Грунт 6
Грунтоведение 10
- Давление воды расклинивающее 75
— — набухания 74
Действующий (эффективный) диаметр частиц 49
Деформации вязкопластические 32
— необратимые 33
— обратимые 32
— пластические 33
Диаграмма сопротивления сдвигу 40, 79
Длительная прочность 40, 80
Естественная влажность 68
- Закон Кулона 39, 256
Замораживание пород 104
Зацепление 90
Зона выветривания 183
Зондирование 119
- Инженерная геодинамика 8, 156
— геология 5, 8
— геология массивов пород 8, 9, 110
— геология региональная 9
— геология специальная 9
— петрография 8, 9, 11
Инженерно-геологическая классификация пород 20
Инженерно-геологические явления 5
Инженерная мелнорация грунтов 99
Искусственное укрепление горных пород 103
— уплотнение горных пород 99
- Каолинит 184
Карбонатные породы 53
Каротаж 121
Карст 171
Классификация глинистых пород по гранулометрическому составу 62
— обломочных пород по гранулометрическому составу 50
Клываж 43
Кольматаж 104
Компрессионная кривая 74
Компрессионные испытания 73
Консолидация 76
Коэффициент бокового давления 83, 94, 161
— внутреннего трения 37
— водонасыщения 68
— запаса устойчивости 240, 247
— компрессии 76
— консолидации 263
— крепости пород 22
— неоднородности 49
— объемного сжатия 41
— отсортированности 50
— плотности 90
— просадочности 87
— пористости 66
— Пуассона 41
— сжимаемости 75
— структурного ослабления 113
Кривая консолидации 77
— ползучести 34
Критическая пористость 91
- Лёсс 86
Лёссовидные породы 87, 170
Липкость 70
Льдистость 96

- Магматические породы 27
 Макропористость 87
 Массив горных пород 123, 125, 136
 Медленный сдвиг 80
 Мерзлотно-динамические явления 186
 Мерзлые породы 94
 Метаморфические породы 42
 Метод аналогий 239
 — оценки действующих факторов 239
 — многоугольника сил 245, 252, 257
 — моделирования 240
 Многоярусные оползни 180
 Модуль всестороннего сжатия 41
 — динамический 41, 46
 — статический 41, 46
 — сдвига 34
 — упругости 40
 Монтмориллонит 71
 Морозные пучины 187

 Набухание 69
 Надмерзлотные воды 187
 Насыщенные грунты 107
 Начальный градиент 73
 Несущая способность горных пород 98
 Нижний предел пластичности 68

 Обвалы 203
 Обломочно-цементированные породы 58
 Объемное напряженное состояние 81, 161
 Объемная масса 29, 45, 54
 Одноосное сжатие 81
 Оползень 177, 193
 Осовы 167

 Параметры компрессионной кривой 75, 76
 — прочности пород 36
 — сопротивления сдвигу 80, 88
 Пластическая деформация 33, 35, 46, 229
 Пластичность горных пород 64
 Плотность 29, 44, 67
 Подмерзлотные воды 188
 Ползучесть 34
 Пористость 18, 29, 45
 Поровое давление 121, 255
 Предельная нагрузка 36
 Прессиометр 120
 Природа прочности горных пород 35
 Просадки 86
 Прочность 36, 45
 Прочность длительная 40
 — условно мгновенная 41, 207
 Пустотность 18, 52
 Пучение 219

 Размягчаемость 37
 Результативные характеристики 31, 36, 41, 45, 47, 54, 59
 Растворение 171
 Релаксация 34
 Реологические модели 84
 — свойства 83

 Сдвижение горных пород 213, 280
 Сезонномерзлые породы 94
 Сжимаемость 73, 92
 Силикатизация двухрастворная 105
 — однорастворная 106
 Стабидометр 81

 Статическое зондирование 121
 Степень активности карста 173
 Структура горных пород 17, 27
 Структурная прочность 76
 Структурные мотивы 15
 Схема испытаний пород на сдвиг 80
 Сценарие 37, 40, 80, 118

 Твердость 16
 Текстура 19, 28, 48
 Теории прочности 37
 Термическое закрепление 103
 Тексотропия 65, 87
 Типы болот 182
 — структур кристаллической решетки 14
 — цементации пород 53
 Трехосное сжатие 81

 Угол внутреннего трения 38, 40
 — естественного откоса 90, 208
 — сдвига 19
 Уплотнение грунтов 100
 Упругость глинистых отложений 69
 Усадка 69
 Устойчивость горных пород 203

 Факторные характеристики 12, 20
 Фльтрационная консолидация 263
 Филтрационные деформации 176

 Химическое укрепление пород 104

 Цементация горных пород 106
 Цементационные структурные связи 65

 Экзогенные геологические процессы 163, 170, 177, 183, 198, 209
 Электроосмос 103
 Электрофорез 103
 Электрохимический способ закрепления пород 103
 Эндогенные процессы 188, 190

 Ярусы (горно-геологические) 128

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
§ 1. Задачи и объекты инженерно-геологических исследований	5
§ 2. К истории инженерно-геологических знаний	6
§ 3. Структура и задачи инженерной геологии	8
 Раздел первый Основы инженерной петрографии	
Глава 1. Принципы инженерно-геологического изучения и классификация горных пород	11
§ 1. Горные породы как объекты инженерно-геологических исследований	11
§ 2. Факторальные характеристики (признаки) и физические свойства горных пород	12
§ 3. Межминеральные (структурные) связи в горных породах	12
§ 4. Вещественный состав горных пород	14
§ 5. Структура и текстура горных пород	17
§ 6. Общая инженерно-геологическая классификация горных пород	20
Глава 2. Инженерно-геологические особенности магматических горных пород	27
§ 1. Геолого-петрографические особенности	27
§ 2. Показатели плотности — пористости	29
§ 3. Механические свойства твердых горных пород	32
Глава 3. Инженерно-геологические особенности метаморфических горных пород	42
§ 1. Геолого-петрографические особенности	42
§ 2. Плотность и пористость	44
§ 3. Механические свойства	45
Глава 4. Инженерно-геологические особенности осадочных горных пород	47
§ 1. Общие сведения	47
А. Твердые осадочные породы	52
§ 1. Карбонатные породы	53
§ 2. Известково-глинистые породы (мергелн)	55
§ 3. Окаменевшие глинистые и песчано-глинистые породы	56
§ 4. Обломочно-цементированные породы	58
§ 5. Галогенные породы	60
Б. Глинистые породы	62
§ 1. Общие сведения	62
§ 2. Структурно-текстурные особенности	66
§ 3. Водно-физические свойства	68
§ 4. Механические свойства	73
§ 5. Вязкопластические и реологические свойства глинистых пород	83

§ 6. Просадочные и некоторые другие явления в глинистых породах	86
В. Раздельнозернистые (сыпучие) породы	
§ 1. Общие сведения	88
§ 2. Сопротивление сдвигу	88
§ 3. Сжимаемость	92
Г. Мерзлые породы	
§ 1. Общие сведения	94
§ 2. Физико-механические свойства мерзлых пород	96
Глава 5. Способы изменения состояния и свойств горных пород и искусственные грунты	99
§ 1. Общие сведения	99
§ 2. Механические методы	99
§ 3. Физические методы	102
§ 4. Физико-химические методы	104
§ 5. Насыпные грунты и горные массивы отвалов карьеров	107

Раздел второй

Инженерная геология массивов горных пород

Глава 6. О свойствах горных пород в образце и массиве	110
§ 1. Предварительные сведения	110
§ 2. Явления неоднородности горных пород в образцах и в массиве	111
§ 3. Трещиноватость горных пород в массиве	112
§ 4. Масштабный фактор	114
§ 5. Влияние окружающей геологической среды на свойства горных пород в массиве	116
§ 6. Влияние гидрогеологических условий	117
§ 7. Полевые методы определения свойств горных пород	117
Глава 7. Массив пород как объект инженерно-геологических исследований	123
§ 1. Предварительные сведения	123
§ 2. Структура физической поверхности массивов пород	124
§ 3. Внутреннее строение массива пород	125
§ 4. Горно-геологические ярусы массивов пород	128
§ 5. Детали внутреннего строения горно-геологических ярусов	131
Глава 8. Инженерно-геологические типы массивов горных пород	136
§ 1. Основная характеристика массивов горных пород	136
§ 2. Границы массивов пород	136
§ 3. Инженерно-геологическая типизация массивов горных пород	137
Глава 9. Инженерно-геологические особенности месторождений полезных ископаемых	140
§ 1. Массивы пород и месторождения полезных ископаемых	140
§ 2. Инженерно-геологические особенности угольных месторождений	141
§ 3. Инженерно-геологические особенности рудных месторождений	146

Раздел третий

Основы инженерной геодинамики

Глава 10. Элементы геодинамической характеристики месторождений полезных ископаемых	158
--	------------

§ 1. Содержание и задачи инженерной геодинамики	156
§ 2. Классификация геологических процессов	157
§ 3. Методы изучения геодинамической обстановки	160
§ 4. Общая характеристика горно-геологических явлений	161
Глава 11. Геологические процессы, связанные с поверхностным стоком	163
§ 1. Процессы смыва, размыва и оврагообразования	163
§ 2. Селевые потоки	164
§ 3. Размыв русла, подмыв берегов и сопровождающие их явления	166
§ 4. Геологические процессы в прибрежной части морей, озер и водохранилищ	168
Глава 12. Геологические процессы, связанные с подземным стоком	170
§ 1. Расслоение глинистых горных пород	170
§ 2. Карст и сопутствующие ему явления	171
§ 3. Фильтрационное разрушение горных пород	175
Глава 13. Геологические процессы, связанные с поверхностным и подземным стоком	177
§ 1. Оползни	177
§ 2. Болота	181
Глава 14. Геологические процессы, связанные с действием атмосферы и подземным стоком	183
§ 1. Выветривание	183
§ 2. Мералогно-динамические явления	186
Глава 15. Эндогенные геологические процессы	188
§ 1. Тектонические процессы	188
§ 2. Землетрясения	190
Глава 16. Горно-геологические явления при открытых разработках месторождений полезных ископаемых	198
§ 1. Типизация горно-геологических явлений	198
§ 2. Факторы, влияющие на устойчивость откосных сооружений	203
§ 3. Основные условия устойчивости откосных сооружений	203
Глава 17. Горно-геологические явления при подземной разработке месторождений полезных ископаемых	206
§ 1. Классификация горно-геологических явлений	209
§ 2. Распределение напряжений вокруг выработок	211
§ 3. Сдвигание горных пород	213
§ 4. Пучение горных пород	219
§ 5. Отжим горных пород и горные удары	221
§ 6. Депрессионные деформации пород в поле водопонижения	223
§ 7. Деформации породных отвалов угольных шахт	225
§ 8. Процессы деформаций подземных выработок в неоднородно-слоистых массивах	228

Раздел четвертый

Прогнозирование инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых

Глава 18. Основы инженерно-геологического прогнозирования	231
§ 1. Изучение инженерно-геологических особенностей месторождений при его разведке, проектировании и эксплуатации горного предприятия	231
	295

§ 2. Цель и задачи прогнозирования	236
§ 3. Методы инженерно-геологических прогнозов	239
Глава 19. Прогнозные расчеты при открытой разработке месторождений полезных ископаемых	240
§ 1. Инженерные методы расчета устойчивости карьерных откосов	240
§ 2. Прогноз изменений состояния породных массивов во времени	261
§ 3. Управление карьерными откосами на основе прогнозных расчетов	264
Глава 20. Прогнозные расчеты при подземных работах	270
§ 1. Прогноз напряженного состояния массива при подземных горных работах	270
§ 2. Расчеты сдвижения горных пород	280
§ 3. Прогноз некоторых вязкопластических деформаций пород в окрестностях подземных выработок	282
§ 4. Прогноз деформаций массива при глубоком водопонижении	285
Список литературы	288
Алфавитный указатель	291

ИБ № 2483

Пантелеймон Николаевич Панюков

Инженерная геология

Редактор издательства *А. И. Панова*
 Переплет художника *Ф. Н. Бударова*
 Художественный редактор *В. В. Ефремов*
 Технические редакторы *А. Е. Матвеева, Б. А. Илсова*
 Корректор *Г. Г. Болясова*

Сдано в набор 06.10.77. Подписано в печать 23.01.78. Т-02728.
 Формат 60×90¹/₁₆. Бумага № 2. Гарнитура обычн. Печать высокая.
 Печ. л. 18,5. Уч.-изд. л. 19,83. Тираж 22 300 экз.
 Заказ 551/5035-2. Цена 1 руб.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
 Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете
 Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
 196006, Ленинград, Московский пр., 91.