

**В.В.РЖЕВСКИЙ**  
**Г.Я.НОВИК**

# **ОСНОВЫ ФИЗИКИ ГОРНЫХ ПОРОД**

*Издание четвертое, переработанное  
и дополненное*

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



МОСКВА «НЕДРА» 1984

**Ржевский В. В., Новик Г. Я.** Основы физики горных пород: Учебник для вузов.— 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Недра, 1984.— 359 с.

Изложены сведения о физико-технических свойствах горных пород. Освещены физические явления, происходящие в горных породах при воздействии механических, тепловых и электрических полей. Рассмотрена зависимость физических процессов горного производства от свойств и состояния пород. Приведены технические решения, учитывающие эту зависимость при добыче, перемещении и обогащении полезных ископаемых. В четвертом издании (3-е изд.— 1978) обновлено содержание разделов, даны расчетные методы и диаграммы по оценке параметров пород, свойств их в массиве и разрушенном состоянии.

Для студентов горных вузов и факультетов.

Табл. 42, ил. 160, список лит.— 40 назв.

Рецензент — кафедра физики Карагандинского политехнического института (зав. кафедрой проф., д-р техн. наук *М. П. Тонконогов*)

В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» совершенствование производства в горно-добывающих отраслях народного хозяйства неразрывно связано с широким применением новых физических и химических методов воздействия на горные породы при их добыче, обработке, комплексным освоением недр, рациональным использованием минеральных ресурсов, расширением областей добычи полезных ископаемых, повышением мощностей и производительности горных предприятий, созданием новой технологии, комплексной механизацией и автоматизацией горного производства.

Решение всех этих задач невозможно без серьезных исследований физических процессов горного производства, без познания физической сущности горных пород.

Современный горный инженер должен хорошо разбираться в физических явлениях, происходящих в породах, должен знать принципы использования свойств пород в практике горного дела.

Развитие физики горных пород в настоящее время характеризуется дифференциацией решаемых вопросов, углублением в область физической сущности происходящих в горных породах процессов, с одной стороны, и рассмотрением горных пород как сложных геологических объектов, взаимодействие которых определяет их поведение,— с другой.

Сейчас внимание исследователей обращено на изучение горных пород не только как относительно однородных, изолированных твердых тел (образцов), но и как элементов горного массива в естественной геологической обстановке.

Актуальность приобретают также исследования горных пород, уже подвергшихся горно-техническому воздействию, — разрыхленной горной массы.

Поэтому в настоящем издании учебника в отличие от предыдущего (1978 г.) рассматриваются физические свойства горных пород последовательно в образце, массиве и разрыхленном состоянии, что соответствует принципу изучения материала от более простого к более сложному.

Авторы стремились к конкретному изложению физической сущности рассматриваемых явлений, наглядному показу значения свойств пород при решении горно-технических задач с представлением физических данных в числовом виде.

Физика горных пород — это учение о физико-технических свойствах и физических процессах в горных породах, закономерностях изменения свойств и принципах их использования при решении задач горного производства.

Физика горных пород, оформившаяся в самостоятельный раздел горной науки в 60-х годах, положила начало новому подходу к породе как геологическому телу, объекту физических исследований и горных разработок одновременно.

Место физики горных пород и процессов среди других наук определяется объектами, методами и направленностью исследований.

По объектам исследований физика горных пород близка к геологическим наукам, а именно кристаллографии, минералогии, петрографии. Без знания минерального состава и структурно-текстурных особенностей пород и условий их залегания невозможно изучение физических свойств пород, обоснованное объяснение физических явлений, происходящих в них. Поэтому данные о составе, строении, генезисе пород, их залегании физика горных пород заимствует у геологических наук и использует для своих исследований.

По методам исследований физика горных пород близка к физике твердого тела: явления и свойства объясняются и изучаются с позиций современной физики твердого тела, используются ее математический аппарат и экспериментальные методы.

Однако изучаемые физикой горных пород объекты значительно разнообразнее, более сложны и зависят от большего количества случайных факторов, чем в физике твердого тела. Законы возникновения и влияния всех этих факторов учесть одновременно практически невозможно. В связи с этим в физике горных пород широко применяется аппарат теории вероятностей и математической статистики, используются экспериментально установленные закономерности и корреляционные зависимости, а физические явления в породах описываются феноменологически.

Направленность исследований физики горных пород и горной науки одна и та же. Физика горных пород решает вопросы совершенствования горного производства, изыскивает резервы повышения производительности труда через познание свойств горных пород.

Как известно, горное производство в общем виде представляет собой следующую технологическую цепочку: бурение, взрывание, выемка взорванной массы, транспортирование по-

род, складирование их, первичная обработка и измельчение полезного ископаемого и, наконец, его обогащение. Стадии процесса добывания полезного ископаемого неразрывно связаны с воздействиями на породу различных машин и механизмов. Наибольшая эффективность горных работ достигается при оптимальном соответствии параметров машин и механизмов физическим характеристикам пород.

Так как свойства пород меняются в широких пределах, эффективность работы механизмов будет высокой только при наличии соответствующих устройств, способных давать информацию о свойствах, составе и состоянии массивов пород. Следовательно, необходима разработка методов контроля состояния пород и физических процессов.

Физические параметры пород не являются константами, ими можно управлять. Например, свойства пород могут меняться при нагреве, охлаждении, насыщении их жидкостями, воздействии на них электрического тока и т. д. Поэтому возникает проблема исследования результатов таких воздействий на породу.

Из вышеизложенного вытекают следующие научные и практические задачи физики горных пород.

1. Исследование физических свойств горных пород, в том числе:

установление значений физико-технических параметров пород, необходимых для расчета режимов работы и производительности существующего горного оборудования, при проектировании горных предприятий и планировании их работы;

установление закономерностей изменения физических свойств горных пород в условиях внешнего воздействия, при непостоянном составе и строении пород.

2. Исследование физических процессов в горных породах, в том числе:

разработка новых методов воздействия на породы, выявление областей их применения, расчет их эффективности;

разработка принципиально новой технологии производства горных работ;

создание систем контроля состава, состояния и поведения горных пород в процессах горного производства.

По признаку физических полей, взаимодействие которых с породами изучается, физику горных пород подразделяют на следующие разделы:

механику пород, изучающую механические свойства пород и явления (в том числе и горное давление), происходящие в породах при механическом воздействии на них в процессе разработки месторождений;

акустику пород, изучающую распространение и поглощение упругих колебаний в породах и все физические процессы, с ними связанные;

термодинамику пород, в область исследований которой входят тепловые свойства и тепловые процессы в горных породах, вызванные как естественными, так и искусственными факторами;

электродинамику и радиационную физику пород, исследующую электрические, магнитные, радиоволновые и ядерные свойства и явления в горных породах.

Анализ исторических сведений позволяет считать, что одними из первых физических параметров, изученных в естественных телах, были магнитные.

Простейшие магнитные свойства магнетита были известны еще в древней Греции, Египте и Китае. А в 1640 г. в Швеции впервые был использован компас для получения информации о массивах при поиске магнетитовых руд.

Изучение Галилеем (1590 г.) законов падения твердых тел под действием силы тяжести положило начало исследованиям плотностных свойств горных пород.

Фундаментом, на котором начали развиваться исследования механических свойств пород применительно к механике грунтов, явились работы французского ученого XVIII в. Ш. Кулона.

Более поздние попытки прогнозировать землетрясения привели к изучению законов распространения упругих волн в земной коре — возникновению сейсмологии (Малле, 1854 г.), а затем и сейсмического метода разведки (Шмидт, 1888 г.).

Со временем все более широкий спектр физических свойств горных пород вовлекался в сферу внимания ученых-геофизиков. На базе исследований свойств пород получила развитие прикладная геофизика, решающая задачи поиска полезных ископаемых.

В горном производстве практически до середины XX в. должного значения физическим свойствам пород не придавалось. Горняки пользовались лишь весьма ограниченным количеством физико-механических свойств, начало изучению которых было положено в России в XIX в. В. И. Курдюмовым и П. А. Миняевым. В это же время акад. В. М. Севергин впервые ввел в обиход термин «горные породы».

Развитие подземных горных работ потребовало изучения деформаций и напряжений в породах при проведении в них горных выработок. Проф. М. М. Протодьяконов (старший) впервые разработал теорию горного давления. С его именем связано также начало систематического изучения прочностных свойств пород. В 1926 г. он создал первую классификацию горных пород по крепости, широко применяемую в горном деле и в настоящее время.

Исследования механических свойств горных пород, их поведения в условиях горного давления продолжили советские профессора П. М. Цымбаревич, Г. Н. Кузнецов, Н. А. Цытович, Л. И. Барон, М. М. Протодьяконов (младший), И. А. Турчани-

нов. В настоящее время в этой области работают акад. АН КазССР Ж. С. Ержанов, профессора Ю. А. Векслер, И. В. Баклашов, С. В. Кузнецов и многие другие.

Проблемы разрушения горных пород машинами, инструментом и взрывом в различных условиях изучались акад. П. А. Ребиндером, профессорами К. В. Руппенейтом, Л. А. Шрейнером, Н. Г. Домбровским. Их исследования продолжают сейчас профессора А. И. Берон, Б. Н. Кутузов, А. Н. Ханукаев и многие другие советские исследователи. Исходные данные по остальным свойствам пород для задач горного дела были взяты из геофизики.

Так, тепловые свойства горных пород исследовались вначале применительно к выявлению тепловых полей в земной коре, затем в связи с развитием термических методов разведочной геофизики и, наконец, с целью внедрения термических методов обработки и разрушения горных пород. В этой области сейчас работают профессора А. П. Дмитриев, Ю. Д. Дядькин, С. А. Гончаров и др.

Магнитные исследования пород Курской магнитной аномалии под руководством академиков П. П. Лазарева и И. М. Губкина были начаты в 1918 г.

Сейсмические исследования массивов горных пород и разработка новых методов сейсморазведки в СССР были осуществлены акад. Г. А. Гамбурцевым.

В области радиометрических исследований горных пород большой вклад внесли работы акад. В. И. Вернадского, А. И. Заборовского и др.

Весьма широкие систематические исследования по электрометрии горных пород были проведены А. А. Петровским в 1924 г. Теоретические работы в этом направлении выполнены А. И. Заборовским, А. Г. Тарховым, В. Н. Дахновым, М. П. Воларовичем и Э. И. Пархоменко.

Вопросам электрометрии, а также электрических методов воздействия на горные породы посвящены научные труды профессоров М. П. Тонконогова, Ю. И. Протасова и других ученых.

До 60-х годов исследования были недостаточно полными как по количеству изучаемых типов пород и полезных ископаемых, так и по числу определяемых физических параметров, в них отсутствовало обобщение данных по свойствам.

В 1962 г. вышла в свет монография В. Н. Кобрановой, в которой были обобщены физические свойства пород применительно к разведке и разработке нефтяных и газовых месторождений (петрофизика).

В том же году В. В. Ржевским были впервые сформулированы основные принципы физики горных пород и процессов.

Большой вклад в развитие исследований по физике горных пород внес акад. Н. В. Мельников.

В настоящее время в области физики горных пород обширные исследования ведут проблемная лаборатория и физико-технический факультет Московского горного института, Институт проблем комплексного освоения недр АН СССР, Горный институт Кольского филиала АН СССР, Институт горного дела СО АН СССР, ИГД им. А. А. Скочинского, ВНИМИ, Ленинградский горный институт, Карагандинский политехнический институт, Институт геотехнической механики АН УССР и другие организации.

Дальнейшее развитие физики горных пород вызвано возрастающими потребностями горного производства в изучении физических процессов, происходящих в массивах пород. Успешное удовлетворение этих потребностей возможно лишь при условии усвоения горными инженерами знаний о физических свойствах горных пород, методах прогноза свойств и управления ими, а также овладения принципами физического воздействия на горные породы с целью их эффективной разработки.

## Раздел I

# Основные определения физики горных пород

---

## 1. МИНЕРАЛЫ И ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

### 1.1. СТРОЕНИЕ И СОСТАВ МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД

Под минералом понимают природное тело, приблизительно однородное по химическому составу и физическим свойствам, образующееся в результате физико-химических процессов в земной коре. К минералам относятся все самородные металлы и неметаллы. Всего известно около 3000 различных минералов. В большинстве это твердые кристаллические химические соединения.

Устойчивые агрегаты (парагенетические ассоциации) одного или нескольких минералов, образующие самостоятельные геологические тела, называются горными породами.

Кристаллы минералов имеют свою пространственную решетку, соответствующую закону распределения вещества внутри кристалла. Известно семь типов (сингоний) кристаллических решеток, характеризующихся отношениями величин кристаллических осей  $a$ ,  $b$  и  $c$  (наименьших расстояний между узлами решетки в трех направлениях) и углов между ними  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  (рис. 1.1).

Кристаллические агрегаты минералов имеют определенную макроструктуру, характеризующуюся размерами, формой кристаллов и их взаимным расположением.

По химическому составу минералы делятся на шесть основных групп: самородные элементы, сульфиды, оксиды, силикаты, соли кислородных кислот, галогениды.

Тип и название горных пород определяются их минеральным составом (относительным содержанием в породе минералов) и строением (видом сложения горных пород из минералов и минеральных агрегатов).

В строении горных пород различают структуру и текстуру. Структура — это размеры, форма и взаимное расположение минералов в породе. Текстура — особенности, взаимное расположение и ориентировка более крупных составных частей породы (минеральных агрегатов).

Физика горных пород изучает состав и строение пород с целью выявления количественных зависимостей от них свойств, состояния и физических процессов в породах.

В связи с этим параметры строения и состава пород должны быть выражены количественно.

Практически любая порода состоит из минерального и порового объема. Поровый объем оценивается относительным объемом всех пор (пустот), заключенных в породах между минеральными частицами или их агрегатами. Относи-

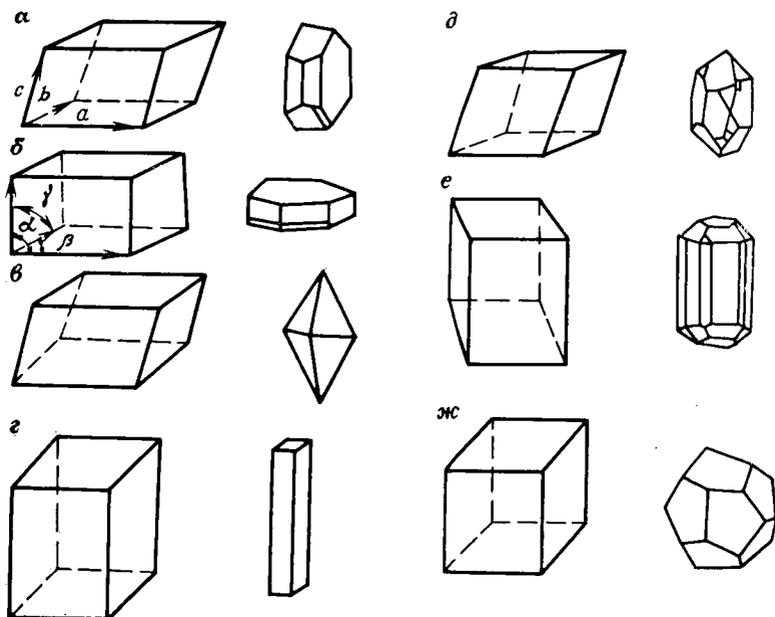


Рис. 1.1. Схемы кристаллических решеток разных сингоний: а — триклинной; б — моноклинной; в — ромбической; г — тетрагональной; д — тригональной; е — гексагональной; ж — кубической

тельный объем называется общей пористостью  $P$  (%) и выражается формулой

$$P = [V_n / (V_o + V_n)] 100, \quad (1.1)$$

где  $V_n$  — объем пор,  $m^3$ ;  $V_o$  — объем минерального скелета,  $m^3$ .  
Отношение объема пор к объему минерального скелета породы

$$k_n = V_n / V_o \quad (1.2)$$

называется коэффициентом пористости.

Из формул (1.1) и (1.2) вытекает, что

$$P = [k_n / (1 + k_n)] 100. \quad (1.3)$$

По происхождению поры делятся на первичные, сформированные при образовании пород, и вторичные, появившиеся

в результате процессов метаморфизма, выщелачивания, перекристаллизации и т. п.

По величине поры подразделяются на субкапиллярные (диаметр пустот менее 0,2 мкм), капиллярные (диаметр пустот 0,2—100 мкм) и сверхкапиллярные (диаметр пустот более 100 мкм). Практически к порам в породах следует относить пустоты любых размеров и форм, однако такие пустоты в породах, как трещины и каверны, принято выделять и рассматривать отдельно.

По форме поры могут быть самого различного типа — межзеренные, пузырьчатые, каналовидные, щелевидные, ветвистые и т. д. Форма и размер отдельных пор и их взаимная связь определяют форму порового пространства породы. Последняя, в свою очередь, обуславливает различные физические процессы, например перемещение в породах воды и газов.

Поры часто могут соединяться с внешней средой и между собой, образуя сплошные извилистые каналы. Общий объем таких пор, отнесенный к объему всей породы, называется открытой (эффективной) пористостью  $P_{эф}$ . При этом  $P_{эф} < P$ .

Пористость горных пород изменяется в значительных пределах: бывают породы практически непористые и такие, в которых пористость достигает 90 %. В среднем же пористость горных пород составляет 1,5—30 %.

Высокой пористостью обладают осадочные породы. Средняя пористость сланцев равна 8 %, песчаников — 15 %, известняков — 5—10 %. Пористость магматических пород обычно незначительна. Исключение составляют изверженные разности пород, таких, как туфолавы, трахит ( $P = 55 \div 60$  %). Выветрившиеся магматические породы также имеют высокую пористость.

Пористость зависит от формы и размеров зерен, слагающих породу, степени их отсортированности, сцементированности и уплотненности. Если породы сложены частицами одинакового размера, то наименьшей пористостью обладают породы с окатанными зёрнами, наибольшей — с угловатыми плоскими. Даже при одних и тех же размерах и форме частиц горной породы пористость может быть различной из-за разного взаимного их расположения.

У равномерно-зернистых сцементированных пород пористость больше, чем у неравномерно-зернистых, так как в последнем случае промежутки между крупными частицами заполняются более мелкими.

Минеральный объем породы описывается следующими параметрами строения: размером и формой зерен; неоднородностью зерен по размерам и форме; относительным содержанием составляющих зерен каждого размера и каждой формы; взаимной ориентацией зерен; степенью связи между зёрнами породы.

Из приведенного перечня параметров взаимная ориентация относится к текстурным признакам породы, остальные параметры — к структурным.

По размеру зерен породы делятся на крупно-, средне- и мелкозернистые, скрытокристаллические и стекловатые.

По форме минеральных зерен метаморфические породы бывают гранобластовые (изометричные зерна), лепидобластовые (пластинчатая форма), нематобластовые (столбчатая форма) и др.

По неоднородности в размерах и форме зерен выделяют различные порфиновые или порфировидные структуры.

По ориентации частиц породы и наличию пустотности породы подразделяют на массивные, пористые и слоистые.

Перечисленные характеристики строения пород имеют количественное выражение.

Так, размер минеральных зерен оценивают по среднему их диаметру  $d_{\text{ср}}$ . Форма минеральных зерен и пор характеризуется коэффициентом  $k_{\text{фр}}$ , являющимся отношением их максимальных размеров  $l$  к взаимно перпендикулярным минимальным  $d$ .

Неоднородность зерен по размерам определяют по вариационным графикам, на которых по оси ординат откладывают относительное содержание частиц соответствующего диаметра, а по оси абсцисс — значения их диаметров (рис. 1.2, а).

Отношение максимального диаметра зерен, занимающих 90 % площади образца ( $d_{90}$ ), к максимальному диаметру зерен, занимающих 10 % площади образца ( $d_{10}$ ),

$$k_{\text{н. р}} = (d_{90}/d_{10}) \geq 1 \quad (1.4)$$

называется коэффициентом неоднородности породы по размерам зерен.

Аналогично коэффициент неоднородности формы зерен (рис. 1.2, б)

$$k_{\text{н. ф}} = k_{\text{фр } 90}/k_{\text{фр } 10} \quad (1.5)$$

Для определения коэффициента ориентации путем изучения шлифа находят суммарные относительные размеры  $a'$ ,  $b'$  и  $c'$  всех кристаллов данного минерала в четырех главных направлениях I—IV (рис. 1.2, в и г). Результат может быть представлен в виде эллипса ориентации. Коэффициент ориентации  $k_0$  равен отношению наиболее длинной оси эллипса  $b'$  к взаимно перпендикулярной оси  $c'$ . При этом указывается направление большой оси эллипса анизотропии (если образец был предварительно привязан к элементам залегания массива).

Слоистость горных пород оценивают численно при помощи коэффициента относительной слоистости  $P_c$ , равного количеству прослоев (или плоскостей ослабления), приходящихся на единицу размера образца, перпендикулярного слоистости.

Поровое пространство пород может быть также количественно описано всеми перечисленными параметрами строения ( $d_{ср}$ ,  $k_{фр}$ ,  $k_{н.р}$ ,  $k_{н.ф}$ ,  $k_0$ ).

Минеральный состав, пористость и строение горных пород определяются их генезисом и воздействием различных внешних

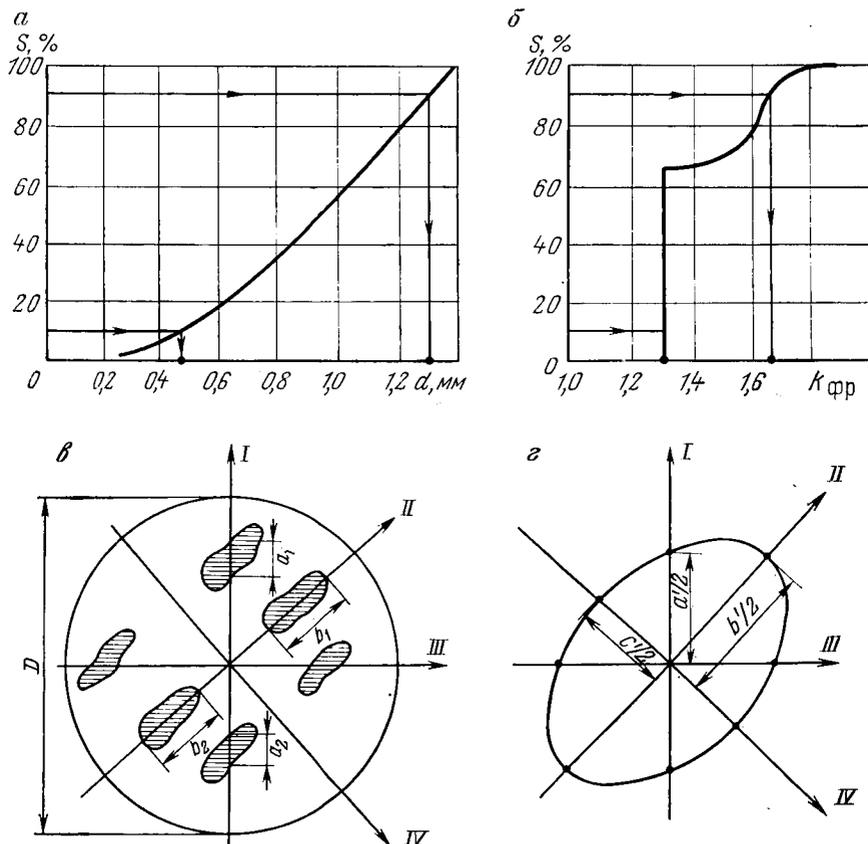


Рис. 1.2. К расчету параметров строения: коэффициентов неоднородности по размерам  $k_{нр}$  (а) и форме  $k_{н.ф}$  (б) зерен лабрадорита; коэффициента ориентации по шлифу (в) и эллипса анизотропии (г):  
 $a' = \Sigma(a_i/D)$ ;  $b' = \Sigma(b_i/D)$ , где  $D$  — диаметр шлифа

факторов (движением земной коры, деятельностью ветра и воды, давлением, температурными колебаниями) в течение всего периода их существования.

Как известно, горные породы по происхождению делятся на три большие группы: магматические, осадочные и метаморфические.

Отдельные частицы горных пород могут иметь различную степень взаимного сцепления, обусловленного силами структурных связей между ними.

По своей природе структурные связи могут быть химическими (кристаллизационными, обладающими наибольшей энергией связи — до 1,4 МДж/моль), молекулярными (вандерваальсовыми, с наиболее слабой энергией связи — до 45 КДж/моль) и ионно-электростатическими (с энергией связи до 0,7 МДж/моль).

В зависимости от характера преобладающего типа связей выделяют следующие основные типы пород:

**рыхлые** (раздельно-зернистые) — связи между зернами молекулярные и часто практически отсутствуют, породы представляют собой механические смеси частиц одного или нескольких минералов (пески, гравий, галечник);

**твердые** (скальные) — связь между частицами минералов жесткая, химическая (песчаники, граниты, диабазы, гнейсы);

**связные** — связи между дисперсными частицами породы сильно меняются в зависимости от влажности — от молекулярных в плотном сухом состоянии до ионно-электростатических в увлажненном состоянии (глинистые породы, лёсы, суглинки).

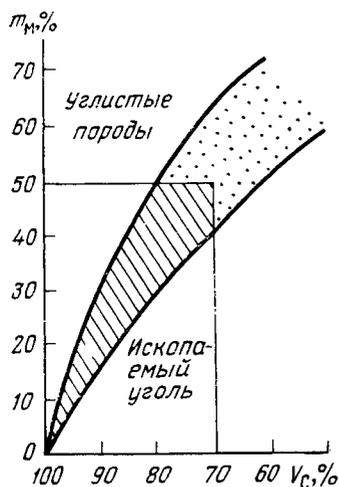


Рис. 1.3. Соотношение объемного содержания углерода  $V_m$  и массового содержания минеральных компонентов  $t_m$  в промышленных углях (заштриховано) и углистых породах

Среди осадочных горных пород по своим параметрам состава и строения особо выделяется группа пород органического происхождения, представляющих собой смеси соединений углерода с водородом, азотом, серой, кислородом. Эти породы являются важнейшим источником энергии. По оценкам специалистов, природные ресурсы энергии, заключающиеся в органических ископаемых, составляют  $2 \cdot 10^{17}$  МДж.

Наибольшее значение среди горных пород органического происхождения имеют ископаемые угли. Состав углей характеризуют отдельно по органической массе и минеральным включениям.

Органическая масса углей оценивается по содержанию углеродных микрокомпонентов, различимых под микроскопом: витрена, кларена, дюрена и фюзена.

Витрен — однородная черная блестящая и хрупкая разновидность угля. Кларен — полублестящий уголь. Дюрен — вяз-

кий матовый и зернистый уголь. Фюзен — волокнистый рыхлый серовато-черный уголь.

Молекулярная структура органической массы угля ввиду своей сложности до настоящего времени исследована не полностью. По существующим представлениям угольное вещество рассматривается или как коллоидная система, или как среда, имеющая надмолекулярное строение.

Содержание углерода в сухой беззольной массе углей зависит от степени их метаморфизма. Так, наименее метаморфизованные длиннопламенные угли содержат 76—79 % углерода, антрациты — 93—95 %.

Неуглеродные составляющие угля присутствуют в нем в виде минеральных включений и элементов-примесей. Включениями в угле могут быть различные минералы — кварц, глины, пирит, кальцит и др. Относительное массовое содержание этих минеральных компонентов, переходящих при сгорании углей в золу, называется зольностью углей. Она находится в пределах 5—50 % (рис. 1.3).

Качество углей снижается при наличии в них серы. Общее содержание серы в углях колеблется от долей процента до 5—6 %. Каменные угли Кузбасса, например, содержат серы в 5—10 раз меньше, чем угли Донбасса.

Элементы-примеси в углях представлены обычно германием, галлием, ураном, медью, бериллием, молибденом, ванадием. Содержание микроэлементов в углях достигает 500—600 г/т.

## **1.2. ГОРНЫЕ ПОРОДЫ КАК ОБЪЕКТ РАЗРАБОТКИ. МАССИВ. ГОРНАЯ МАССА. ОБРАЗЕЦ**

Объектами горных разработок являются все виды горных пород: коренные, залегающие в толще земной коры по месту своего образования, и покрывающие их наносы — породы измельченные, переотложенные или перенесенные. При разработке породы подвергаются различного рода воздействиям, главным образом механическим: ударам, сдвигу, уплотнению, перемещению, в результате чего изменяется их состояние. В общем случае различают естественное или искусственно измененное (взрывом, механическим разрушением, водопонижением, химическим укреплением и т.п.) состояния горных пород.

Для ведения горных работ в забое необходимо знать характеристики горных пород в их естественном состоянии. Для других целей (погрузки, перемещения, складирования, дробления и др.) определяют и учитывают свойства пород в искусственно измененном состоянии.

Цели воздействия на породы различны, и они определяют пределы знаний тех или иных свойств пород. Характеристики свойств пород в различных объемах могут отличаться друг от друга, например, из-за блочной трещиноватости.

Поэтому при изучении горных пород выделяют понятия породного массива, горных пород в массиве, разрыхленных горных пород (горных масс) и отдельных изолированных кусков (образцов) горных пород (рис. 1.4).

Породный массив (сокращенно «массив») — это геологическое тело, состоящее из совокупности горных пород, сформировавшееся в определенной геолого-структурной обстановке и характеризующееся присущими ему физическими и геологическими особенностями.

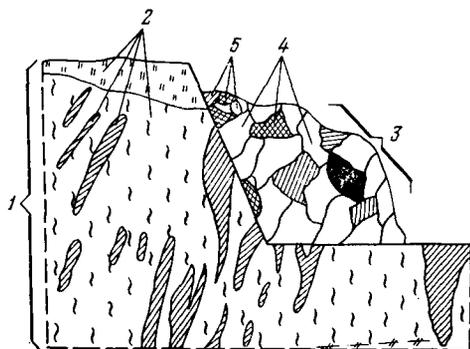


Рис. 1.4. Состояние изучаемых горных пород:

1 — массив горных пород с вертикальной ориентацией; 2 — горные породы в массиве; 3 — разрыхленная порода (горная масса); 4 — куски (образцы) горной породы; 5 — минералы (зерна) в горной породе

Горная порода, находящаяся в массиве в естественном состоянии, называется горной породой в массиве.

Разрушенные горные породы — это разрыхленные, раздробленные искусственно или в результате сдвижений массивов твердые или связанные горные породы. Естественно рыхлые породы также могут перейти в группу разрушенных вследствие нарушения их первоначальной укладки и сцепления в результате, например, поручно-транспортных работ.

Отдельные части скальных и связанных пород, а также малые объемы рыхлых пород представляют собой образцы горных пород.

Следовательно, образцы горных пород — это те исходные элементы, сочетание которых образует более сложные конструкции — горную породу в массиве, массив горных пород, разрушенную породу.

Измельчение горных пород, выделение из них полезных компонентов, контроль состава связаны с разделением минералов, свойства которых определяют технику и технологию измельчения и обогащения. Поэтому физика горных пород изучает также всю совокупность минералов, слагающих породы.

Подобно тому как свойства массива горных пород обусловлены свойствами, расположением и взаимной связью образующих его пород, свойства образца обусловлены свойствами, расположением и связью слагающих его минералов.

Основные физические закономерности наиболее четко проявляются при изучении образцов горных пород и минералов.

Основные физические закономерности наиболее четко проявляются при изучении образцов горных пород и минералов.

Отличия в свойствах и поведении пород в образце и в массиве, а также массива горных пород и горной массы обусловлены:

различием в составе (в образце минеральный состав не всегда соответствует составу породы в массиве или разрыхленной породы; массив пород сложен разнородными по составу породами);

различием в строении — расположении основных структурных элементов, их формы, ориентировки (так, в образце может отсутствовать слоистость, в то время как массив горных пород слоистый);

различными внешними условиями, в которых находится порода: давлением, температурой, электрическими полями, степенью и характером насыщения пород газами и жидкостями и т. д.;

силами связей, контактными условиями и степенью нарушения пород — образец чаще всего менее нарушен трещинами и пустотами, чем порода в массиве, массив горных пород или разрушенная горная порода.

Нарушенность пород проявляется в их трещиноватости.

Трещиноватость — это совокупность трещин, имеющих в породном массиве. Как правило, все горные породы имеют ту или иную степень трещиноватости.

Наличие пор, пустот и трещин в породах предопределяет их многофазность, так как все пустоты в естественных условиях обычно бывают заполнены газами, жидкостями или инородными телами, что обуславливает возникновение в породах множества физических эффектов, отличающих их поведение от классических твердых тел.

## **2. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ПОРОД И ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

### **2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД. БАЗОВЫЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ**

Минеральный состав и строение, а также многофазность горных пород предопределяют различное их поведение при воздействии нагрузок, тепла, электрического поля, т. е. различные их физические свойства.

Под физическим свойством породы понимают ее особое поведение (ответную реакцию) при воздействии на нее определенных физических полей или сред.

Численно каждое физическое свойство породы оценивается одним или несколькими параметрами (показателями,

характеристиками), являющимися количественной мерой свойства.

Свойства пород и соответствующие им параметры, характеризующие ответную реакцию пород на воздействие определенных инструментов (например, буровых), механизмов или технологических процессов (например, взрыва), называют горно-технологическими.

Всю совокупность физических и горно-технологических параметров пород, описывающих их поведение в процессах разработки, принято называть физико-техническими параметрами.

Факторы, обуславливающие численное значение тех или иных физико-технических параметров горных пород и минералов и их изменчивость, подразделяют на две группы. Это внутренние факторы, своей сущностью связанные с породой (минералом) и определяющие ее название (минеральный состав и строение для пород, химический состав и кристаллическая решетка для минералов), и внешние (различные физические поля, внешнее воздействие, окружающие и проникающие в породу среды), обобщенно называемые внешним полем.

В физике горных пород под понятием «внешнее поле» подразумевают тот вид энергии или вещества, под воздействием которого в данный момент находится порода.

Физико-технические параметры подразделяют по виду соответствующих внешних полей, вызывающих ответную реакцию породы.

Исходя из этого выделяют механическое поле (давление) и соответствующие ему механические свойства пород, тепловое поле (температура, тепловой поток) и тепловые свойства, электрическое, магнитное и радиационное поля и такие же свойства пород. Кроме того, существует еще вещественное поле (флюиды) и соответствующие ему гидравлические и газодинамические свойства. Воздействие знакопеременных нагрузок на горные породы описывается акустическими свойствами, воздействие электромагнитных волн — электромагнитными свойствами.

Как те, так и другие связаны с волновыми процессами и поэтому могут быть объединены в общую группу волновых свойств.

Как следует из определения, горно-технологические параметры соответствуют конкретным условиям и средствам воздействия на породы.

Горно-технологические параметры пород подразделяются на несколько групп по принципу принадлежности к определенным процессам технологического воздействия:

1) характеризующие общую разрушаемость пород механическим способом, например твердость, крепость, вязкость и дробимость;

2) характеризующие разрушаемость пород определенными механизмами, например буримость, сопротивляемость резанию, экскавируемость, зарубаемость, взрываемость, удельные усилия внедрения и т. д.;

3) оценивающие воздействие породы на инструмент, например абразивность;

4) оценивающие качество полезных ископаемых, например коксуемость для углей, морозостойкость и термостойкость для строительного камня;

5) устанавливающие производительность или эффективность иных процессов воздействия на горные породы (кроме разрушения), например обогатимость, флотуруемость, устойчивость в отвалах и т. д.;

6) определяющие особое поведение пород при разработке месторождений полезных ископаемых, например выбросоопасность, метаноносность, самовозгораемость и др.;

7) оценивающие эффективность воздействия на горные породы различными немеханическими методами с целью их разрушения, упрочнения, плавления и т. д.; например термобуримость, критерий эффективности нагрева токами высокой частоты, электротермомеханическая разрушаемость и др.

Физико-технические параметры, описывающие объемный, накопительный процесс, являются скалярными и не зависят от направления действия внешнего поля (например, плотность, теплоемкость).

Остальные параметры зависят от направления поля действия и степени ориентации минеральных частиц и поэтому в общем виде описываются векторами и тензорами. Они называются тензорными.

Классификация наиболее часто применяемых физико-технических свойств и параметров пород приведена в табл. 2.1. Определения параметров даны при рассмотрении соответствующих свойств горных пород в образце.

Известно более ста физико-технических параметров пород, измерить такое количество их для всех видов и разновидностей пород не представляется возможным.

С целью сопоставления разных пород, совместного их рассмотрения, анализа и классификации выделяют некоторую ограниченную группу физико-технических параметров, являющуюся минимально необходимой и достаточной для характеристики породы как физического и геологического тела и объекта горной разработки одновременно. Такие параметры горных пород носят название базовых (табл. 2.2).

К базовым отнесено 12 элементарных, исходных и независимых физических параметров, позволяющих вычислять максимальное количество других параметров пород.

Базовые физические параметры служат общим фундаментом для изучения всех пород. Поэтому их определение является обязательным.

Таблица 2.1. Классификация наиболее часто применяемых физико-технических параметров пород

Группа свойств	Подгруппа свойств	Физические параметры	Обозначение
Механические	—	Плотность, объемная масса Удельный вес Пористость (общая, эффективная) Коэффициент пористости	$\rho_0, \rho$ $\gamma_0$ $P, P_{эф}$ $k_p$
	Упругие	Модуль Юнга Коэффициент Пуассона Модуль сдвига Модуль всестороннего сжатия Модуль одностороннего сжатия Предел упругости	$E$ $\nu$ $G$ $K$ $M$ $\sigma_E$
	Пластические	Коэффициент пластичности Модуль деформации	$k_{пл}$ $E_{деф}$
	Прочностные	Предел прочности при сжатии Предел прочности при растяжении Предел прочности при сдвиге Сцепление Угол внутреннего трения	$\sigma_{сж}$ $\sigma_p$ $\tau_{сдв}$ $C$ $\varphi$
Тепловые	Реологические	Параметры ползучести Период релаксации Длительная прочность Предел длительной прочности	$\alpha_p, \delta$ $t_0$ $\sigma_{дл}$ $\sigma_\infty$
	Проводимость	Коэффициент теплопроводности Температуропроводность	$\lambda$ $a$
	Поглощение	Удельная теплоемкость	$c$
	Воздействие	Температура и теплота плавления Коэффициенты теплового расширения Температура фазовых превращений	$T_{пл}, Q_{пл}$ $\alpha, \gamma_T$ $T_\phi$
Электрические	Проводимость	Удельное электрическое сопротивление Удельная электрическая проводимость	$\rho_э$ $\sigma_э$
	Поглощение	Относительная диэлектрическая проницаемость Тангенс угла диэлектрических потерь	$\epsilon_r$ $\operatorname{tg} \delta$
	Воздействие	Пробивная напряженность (электрическая прочность)	$E_{э. п}$

Продолжение табл. 2.1

Группа свойств	Подгруппа свойств	Физические параметры	Обозначение
Магнитные	Поглощение	Остаточная намагниченность Магнитная проницаемость Магнитная восприимчивость	$I_{\text{ост}}$ $\mu$ $\chi$
	Воздействие	Температура Кюри Коэрцитивная сила	$T_c$ $H_c$
Волновые	Акустические	Скорости распространения волн Коэффициент поглощения Удельное волновое сопротивление Коэффициент отражения Коэффициент преломления Критический угол полного внутреннего отражения	$v_p, v_S, v_L$ $\theta$ $z$ $k_{\text{отр}}$ $n$ $i$
	Электромагнитные	Скорости распространения волн Коэффициент поглощения Коэффициенты отражения Коэффициенты преломления Волновое сопротивление	$v, c$ $\theta_{\text{эм}}$ $K_n, K_n$ $n_g, n_n$ $z_{\text{эм}}$
Радиационные	Естественные	Естественная радиоактивность	$\Gamma_{\text{акт}}$
	Поглощение	Коэффициенты поглощения Эффективные сечения рассеяния и поглощения	$\theta_p, \theta_\Gamma$ $\Sigma_p, \Sigma_s$
	Проводимость	Длина замедления нейтронов Время замедления нейтронов $t_4$	$L_3$ $t_3$
Гидрогазодинамические	Поглощение	Влагоемкость Коэффициент водонасыщенности Коэффициент водоотдачи	$\omega_p, \omega_m, \omega_k$ $k_{\text{вн}}$ $\xi$
	Проводимость	Коэффициент проницаемости Коэффициент фильтрации	$k_{\text{пр}}$ $k_\phi$
	Воздействие	Растворимость Коэффициент набухания Коэффициент водопрочности	$k_{\text{раст}}$ $k_n$ $\eta_p$
Горно-технологические	Общие	Показатель трудности разрушения Коэффициент крепости Твердость Коэффициент абразивности Дробимость Коэффициент трения	$P_{\text{тр}}$ $f$ $H, \rho_k, \rho_{\text{ш}}$ $k_{\text{аб}}$ $D$ $f_{\text{тр}}$
	Частные	Взрываемость Удельное усилие резания Показатель трудности бурения Экскавируемость	$q, q_3$ $K_F$ $P_6$ $P_3$

Таблица 2.2. Базовые физико-технические параметры горных пород

Свойства	Основные параметры	Обозначение	Единицы измерения	Определение	Пределы изменения
Плотностные	Объемная масса	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	Масса единицы объема сухой горной породы с естественной ненарушенной структурой (с порами, трещинами и т. д.)	1500—3000
	Пористость	$P$	%	Относительный объем всех пор, заключенных в единице объема породы	1,5—30
Механические	Предел прочности при сжатии	$\sigma_{сж}$	Па	Критическое значение одноосного сжимающего напряжения, при котором происходит разрушение породы	$10^7—3 \cdot 10^8$
	Предел прочности при растяжении	$\sigma_p$	Па	Критическое значение одноосного растягивающего напряжения, при котором происходит разрушение породы	$0—2 \cdot 10^7$
	Модуль упругости Юнга	$E$	Па	Коэффициент пропорциональности между действующим нормальным напряжением и соответствующей ему продольной упругой деформацией	$10^9—3 \cdot 10^{11}$
	Коэффициент Пуассона	$\nu$	—	Коэффициент пропорциональности между упругими продольными и поперечными деформациями при одноосной нормальной нагрузке	0,1—0,45

				(отношение относительных поперечных деформаций к продольным)
Тепловые	Коэффициент теплопроводности	$\lambda$	Вт/(м·К)	Количество тепла, проходящего в единицу времени через единицу сечения в направлении, перпендикулярном к сечению при перепаде температур, равном 1 К, на единицу расстояния
	Удельная теплоемкость	$c$	Дж/(кг·К)	Количество тепла, необходимое для повышения температуры 1 кг вещества на 1 К
	Коэффициент линейного теплового расширения	$\alpha$	К <sup>-1</sup>	Относительное удлинение тела при нагреве его на 1 К
	Электромагнитные	Удельное электрическое сопротивление	$\rho_{\text{э}}$	Ом·м
Относительная диэлектрическая проницаемость		$\epsilon_r$	—	Коэффициент, показывающий, во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля при внесении в него породы
Относительная магнитная проницаемость		$\mu$	—	Коэффициент, показывающий, во сколько раз магнитная индукция поля изменяется при помещении в него образца по сравнению с полем в вакууме

0,2—12

(0,5—1,5) 10<sup>3</sup>2 · 10<sup>-6</sup> — 10<sup>-4</sup>10<sup>-3</sup>—10<sup>8</sup>

2—30

0,9998—6,5

## 2.2. ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ПОРОД НА ИХ СВОЙСТВА

Можно предположить, что содержание в породе какого-либо минерала, обладающего, например, повышенными значениями изучаемой характеристики, в общем случае будет предопределять величину этой характеристики для горной породы в целом.

В действительности такая простая закономерность имеет место для структурно-нечувствительных скалярных параметров, где физический параметр породы  $X$  может быть представлен как арифметическое средневзвешенное показателей  $X_i$  минералов и всех других фаз породы (газов, жидкостей, примесей).

$$X = \sum_{i=1}^n X_i V_i, \quad (2.1)$$

где  $V_i$  — относительное объемное содержание минералов, слагающих породу, а также пор, жидкостей, примесей и т. д.

По формуле (2.1) с достаточной достоверностью можно рассчитать, например, плотность и удельную теплоемкость пород.

Если порода сложена из минералов, параметры которых мало различаются, то разное их содержание практически не влияет на изменение ее свойств. Наоборот, если параметры одного из минералов существенно отличаются от параметров прочих минералов, то его содержание в породе будет заметно влиять на свойства породы в целом. Это позволяет сгруппировать минералы по близким параметрам и рассматривать зависимость свойств не от каждого из этих минералов, а от совокупности близких по свойствам минералов.

В конечном счете можно привести минеральный состав полиминеральной породы к некоему условному минеральному составу, например, представить практически любую породу как двухкомпонентную.

Величина тензорных физико-технических параметров пород однозначно минеральным составом не определяется. В этом случае существенное значение имеют показатели строения пород — размеры, форма, взаимная ориентация минеральных зерен и пор.

Зависимость свойств пород от размеров зерен обусловлена тем, что с изменением размеров меняется площадь контактов между зернами на единицу объема породы. В то же время свойства контактов отличаются от свойств внутризеренного вещества.

Форма и взаимная ориентация минеральных зерен, как указывалось, приводит к анизотропии горных пород и, следовательно, зависимости свойств пород от направления приложения поля.

На тензорные параметры пород наиболее существенное влияние оказывают основной минерал (либо преобладающий

количественно, либо слагающий каркас — матрицу породы) и минерал, имеющий свойства, резко отличающиеся от основного, и выступающий в качестве включения в матрицу породы. Как и в случае скалярных параметров, матрицей или включением может считаться не один, а группа однотипных минералов.

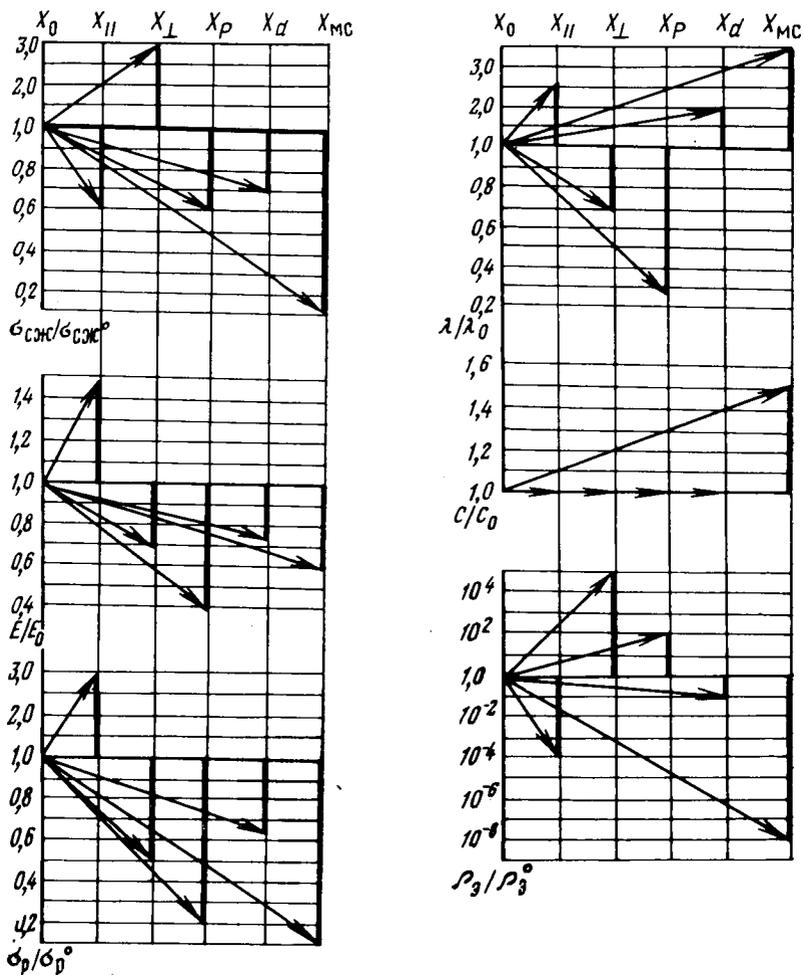


Рис. 2.1. Степень и направление изменения физических параметров породы параллельно  $X_{II}$  и перпендикулярно  $X_{\perp}$  к слоистости, с увеличением пористости  $X_p$ , размера зерен  $X_d$  и при переходе к массиву  $X_{мс}$  относительно изотропного эталонного образца  $X_0$ .

Если горная порода сложена из слоев с различными физическими характеристиками  $X_i$ , относительное объемное содержание которых  $V_i$ , то вдоль слоистости тензорный параметр породы  $X_{II}$  теоретически рассчитывают по той же формуле

арифметического средневзвешенного (2.1), как и скалярные параметры.

Перпендикулярно к слоистости тензорную характеристику породы вычисляют по уравнению гармонического средневзвешенного

$$X_{\perp}^{-1} = \sum_{i=1}^n V_i X_i^{-1}. \quad (2.2)$$

Для статистической смеси минералов наибольшее приближение к экспериментальным данным имеет формула логарифмического средневзвешенного

$$\lg X = \sum_{i=1}^n V_i \lg X_i. \quad (2.3)$$

По формулам (2.1)—(2.3) с большой достоверностью могут быть рассчитаны параметры упругости, характеристики теплопроводности, электропроводности и др.

Сухая пористая порода состоит из минерального скелета и газов, заполняющих поры. Газы являются очень плохими проводниками механических напряжений, тепла и электричества, в связи с чем в породах энергия передается лишь через минеральный скелет. В то же время с увеличением пористости, особенно крупной и открытой, увеличивается число каналов, по которым может перемещаться вещество, например жидкости и газы.

Поэтому величина большинства тензорных параметров породы, за исключением гидравлических и газодинамических, с увеличением пористости уменьшается.

Простейшая связь между таким тензорным параметром  $X$  и пористостью  $P$  (здесь и далее, если это не оговорено, в долях единицы) может быть выражена квадратичной зависимостью

$$X = X_0(1 - P)^2, \quad (2.4)$$

где  $X_0$  — параметр породы при  $P=0$ .

Представление о том, насколько существенно меняются физические параметры пород от внутренних факторов (состава и строения пород), дают приведенные на рис. 2.1 номограммы. На этих номограммах физическая характеристика породы  $X_0$ , определенная для эталонного строения (равномерная статистическая смесь минералов), принята за единицу. В зависимости от строения и состава характеристики по сравнению с эталонной либо уменьшаются (стрелки направлены вниз), либо возрастают (стрелки направлены вверх).

Изучение и аналитическое представление закономерностей изменения физических параметров пород от их состава и строения дают возможность предрасчитать основные свойства различных пород без их экспериментального определения.

### 2.3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Как видно из 2.1, наряду с минеральным составом и строением физико-технические свойства пород определяются внешними условиями, в которых находится порода,—внешними полями.

Каждое поле оценивается рядом величин — напряженностью, интенсивностью и т. д.

Так, механическое поле характеризуется величиной нагрузок и напряжений, создаваемых в породе, длительностью их действия, характером изменения во времени, направлением (растягивающие, сжимающие, сдвигающие нагрузки), распределением в горной породе — сосредоточенное, линейное, плоское, объемное.

Как особый случай механического поля выделяют акустическое поле — распространение в породах упругих волн, по существу, тех же механических нагрузок, быстро меняющихся по направлению, во времени и характеризующихся интенсивностью, амплитудой и частотой колебаний.

Тепловое поле описывается температурой, градиентом температуры, тепловым потоком, направлением теплового потока, изменением его во времени, распределением температур и теплового потока в объеме породы.

Электрическое и магнитное поля оцениваются по напряжению и напряженности, по величине магнитной и электрической индукции и плотности потока.

Электромагнитное поле — распространение в породах электромагнитных волн характеризуется теми же параметрами, что электрическое и магнитное поля, и дополнительно частотой колебаний.

Радиационное поле описывается интенсивностью, типом микрочастиц, обуславливающих поле, частотой колебаний (в случае волновой природы поля), энергией квантов.

Вещественное поле, чаще всего представленное водой или природными газами, оценивается по давлению, создаваемому полем (напору, в случае воды), градиенту давления, вязкости, химическому составу.

Л Физические поля в породах могут быть естественными (природными) и искусственными.

Естественные поля — это исходное горное давление, тепловое поле, водонасыщенность пород, радиационное поле.

Искусственные внешние поля либо возникают при ведении горных работ (блуждающие электрические токи, повышенные температуры в забое скважины при бурении, динамические нагрузки на ближайшие массивы при взрывании и т. д.), либо их создают преднамеренно с целью воздействовать на состояние породы и ее свойства.

Физические процессы в горных породах — это явления взаимодействия физического поля с горной породой, в результате

которого в породе возникают и протекают различные изменения ее состава, строения и состояния.

Физические свойства и параметры пород, характеризующие эти процессы, можно подразделить на три большие группы.

В первую группу входят параметры, оценивающие обратимые изменения количества энергии или ве-

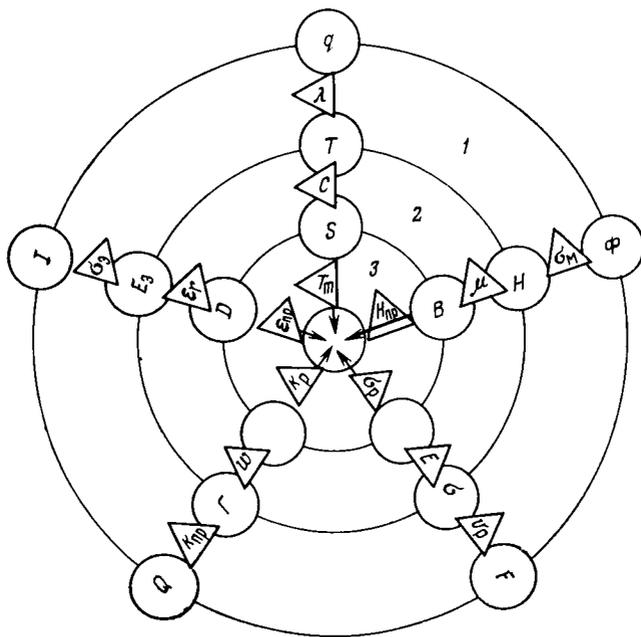


Рис. 2.2. Обобщенная схема природы и взаимосвязей физических свойств горных пород:

1 — область проницаемости; 2 — область поглощения; 3 — область необратимых изменений и разрушения

щества внутри породы (ее повышение или понижение под воздействием внешних полей). К ним относятся, например: модуль объемного сжатия  $K$ , характеризующий накопление потенциальной упругой энергии в породе при всестороннем ее сжатии; диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$ , определяющая емкость пород; удельная теплоемкость  $c$ , оценивающая способность породы накапливать тепло; влагоемкость  $\omega$ , характеризующая способность породы накапливать воду, и т. д.

Большинство этих параметров имеют статический, накопительный характер и поэтому являются скалярными.

К параметрам второй группы, оценивающим необратимые превращения данного вида энергии в породах в дру-

гой вид, относятся коэффициент пластичности  $k_{п.л.}$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$ , удельная теплота плавления  $Q_{п.л.}$ , коэффициенты поглощения упругих и электромагнитных волн  $\theta$ , пределы прочности  $\sigma_{сж.}$ ,  $\sigma_p$ , коэффициенты теплового расширения  $\alpha$ ,  $\gamma_t$ , электрическая  $E_{пр}$  и магнитная  $H_{пр}$  прочность и др.

К параметрам третьей группы, описывающим процессы передачи энергии, а также перемещения жидкости и газов в породах, относятся коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , удельная электропроводность  $\sigma_э$ , магнитная проводимость  $\sigma_m$ , коэффициенты преломления  $n$  и отражения  $k_{отр}$  волн, коэффициенты проницаемости  $k_{пр}$  и фильтрации  $k_f$  и т. д. Все эти параметры зависят от направления измерения и приложения поля, т. е. являются четко выраженными тензорными величинами.

Взаимосвязь между процессами перемещения, поглощения энергии или вещества, изменения состояния пород и их свойствами может быть представлена в виде соответствующей диаграммы (рис. 2.2).

Физические процессы в породах могут быть первого рода — когда они вызваны наличием в породе минералов, обладающих соответствующими эффектами, обусловленными их химическим составом и строением кристаллической решетки, и второго рода — возникающие в породе в результате особого состояния и сочетания минералов, которые сами по себе не имеют рассматриваемых эффектов.

К первому роду относится, например, эффект возрастания модуля упругости кварцсодержащей породы при температуре свыше  $573^\circ\text{C}$  (за счет полиморфного перехода кварца), ко второму — внутренние межзеренные термонапряжения при равномерном нагреве породы, обусловленные различными упругими и тепловыми свойствами минералов, слагающих породу.

#### **2.4. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИХ ПОЛЕЙ НА СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД**

Все разнообразие причин изменения свойств пород под воздействием внешних факторов может быть сведено в следующие три группы:

1. Изменение состава породы: заполнение пор жидкостями и газами, переход воды в лед в порах при понижении температуры, окисление, восстановление, дегидратация и диссоциация ряда минералов при повышении температуры, полиморфные превращения.

2. Изменение степени уплотнения породы: обжатие за счет смятия пор, закрытия трещин при сжимающих механических нагрузках, особенно всесторонних, или за счет внутренних термических напряжений при нагреве или охлаждении пород; разрыхление, раскрытие трещин за счет растягивающих механических напряжений.

ческих нагрузок или соответствующих суммарных термических напряжений при нагреве или охлаждении пород; появление дополнительной пористости, пустотности за счет эффекта растворения минералов или их выгорания.

3. Изменение сил связей между отдельными частицами породы: понижение их при нагреве за счет приближения состояния минералов к точке плавления; при насыщении связных пород водой за счет проникновения жидкости между частицами породы; повышение их при нагреве за счет спекания частиц, при охлаждении за счет смерзания и т. д.

Преобладание тех или иных причин изменения свойств обусловлено исходным минеральным составом, строением пород и их физическими свойствами. Существенную роль играют также параметры внешнего воздействующего поля — его интенсивность, характер изменения во времени, длительность, направление действия.

## 2.5. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Любой технологический процесс горного производства, в котором участвует горная порода, в той или иной степени зависит от комплекса физических свойств породы.

Поэтому проектирование таких процессов, выбор технологической схемы, конструирование и выбор соответствующего оборудования, наконец, эффективная эксплуатация этого оборудования, повышение производительности труда, снижение себестоимости и энергоемкости горных работ связаны со знанием физических свойств горных пород и физических процессов, происходящих в них.

Процессы, в которых при ведении горных работ вступают во взаимодействие с горной породой инструмент, механизм или агрегат, изучаются физикой горных пород и носят обобщенное название физических процессов горного производства, которые по технологическим признакам подразделяют на:

подготовку массива пород к выемке (осушение, оттаивание);

разрушение, дробление, измельчение горных пород;

упрочнение горных пород и поддержание горных выработок;

борьбу с неблагоприятными и опасными явлениями в массивах горных пород;

перемещение и складирование горной массы;

переработку и обогащение полезных ископаемых;

контроль за свойствами, качеством, составом пород и полезных ископаемых, строением, состоянием и поведением массивов пород, технологическими процессами;

комплексное использование минеральных ресурсов.

Исследование технологических процессов позволяет установить количественные соотношения между параметрами про-

цесса и физическими свойствами пород. Это, в свою очередь, дает возможность решить следующие вопросы:

в области проектирования — выбор оптимальных систем и способов разработки месторождений; выбор оптимальных средств и механизмов для ведения горных работ;

в области конструирования горных машин и оборудования — совершенствование параметров известных механизмов с учетом конкретных горных пород; создание принципиально новых механизмов воздействия, основанных на изученном физическом эффекте;

в области горного производства — оптимальное использование механизмов, планирование и прогноз их производительности; нормирование труда рабочих; оперативный контроль за процессами в породах.

Так, при проектировании вскрытия месторождения, системы разработки, места расположения подземных выработок, порядка отработки необходимо знать прочностные, упругие, реологические свойства пород и их распределение в массиве, строение разрабатываемого массива, степень его увлажненности и фильтрационные характеристики.

Выбор механических способов разрушения пород обусловлен их механическими характеристиками, а немеханических способов — еще и тепловыми, и электрическими параметрами пород. Конструктивные параметры, например оптимальное количество штырей на шарошках бурового станка, расстояние между штырями, скорость вращения, осевые усилия, также связаны с прочностными и упругими свойствами пород.

## 2.6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОРОД

При измерении физико-технических параметров пород полученные данные должны обладать достаточной точностью, сопоставимостью и представительностью.

В настоящее время разработано большое количество различных методов определения физико-технических параметров пород. Они делятся на лабораторные и натурные.

Лабораторными методами определяют физико-технические параметры пород на образцах.

Лабораторный образец — это полностью подготовленный в соответствии с требованиями методики к испытаниям изолированный кусок породы (или минерала) с минимальным нарушением естественного состояния. В зависимости от размера выделяют образцы малые (объемом до  $1 \text{ см}^3$ ), средние (до  $200 \text{ см}^3$ ) и большие (свыше  $200 \text{ см}^3$ ). В зависимости от степени обработанности образцы бывают правильной, полуправильной и неправильной формы.

Натурные методы определения параметров пород применяют непосредственно в природных условиях, как правило,

без полного отделения изучаемого объема породы от окружающего массива. Изучению может подвергаться либо отдельная горная порода в массиве, либо массив, состоящий из разных пород. Изучаемые объемы могут быть как небольшими (измеряемыми см<sup>3</sup>), так и превышающими десятки кубических метров.

Сравнение лабораторных методов с натурными показывает, что изучение свойств пород в образцах гарантирует большую стабильность измеренных величин, дает более достоверные данные для сравнения и классификации пород, позволяет более четко выявить зависимости свойств от различных факторов. Определение свойств на образцах, как правило, менее трудоемко и позволяет неоднократно производить измерения и уточнять результаты их.

Наряду с этим образец горной породы по объему часто соответствует объемам пород, подвергаемых физическому воздействию при различных производственных процессах (например, при дроблении), что позволяет свойства образца использовать непосредственно в технологических расчетах.

Для процессов, происходящих в большом объеме массива, можно использовать методы пересчета свойств образца горной породы на свойства породы в массиве с учетом факторов, обуславливающих отличие этих свойств.

Именно поэтому в настоящее время широкое распространение имеют лабораторные методы определения физико-технических параметров образцов пород, многие из которых стандартизованы.

Для того чтобы получить точные, сопоставимые и представительные данные о породе при изучении образцов, необходимо использовать математическую статистику и теорию вероятностей, в соответствии с которыми, в первую очередь, необходимо проведение измерений на достаточно большом количестве образцов. Для этого по определенной методике отбирают пробы таким образом, чтобы они представляли все возможные в данном массиве колебания минерального состава и строения изучаемой породы.

Затем, рассчитав необходимое количество образцов, из этой так называемой генеральной совокупности проб производят их случайную выборку. Например, из 200 проб, представляющих генеральную совокупность, отбирают методом случайного выбора 7—13 проб. Из каждой пробы изготовляют не менее 3—5 образцов максимально допустимых по данной методике размеров.

Породы часто, а кристаллы минералов всегда анизотропны, вследствие чего определение тензорных параметров производят на образцах в двух или трех взаимно перпендикулярных направлениях и вычисляют коэффициенты анизотропии:

$$k_{ан} = X_{\parallel} / X_{\perp}, \quad (2.5)$$

где  $X_{\parallel}$  и  $X_{\perp}$  — значения параметров соответственно вдоль и перпендикулярно напластованию, слоистости или преимущественной ориентации минералов, пор и трещин в породе.

Результаты каждой группы измерений по всей случайной выборке проб подвергают статистической обработке с целью выявления, в первую очередь, среднего значения параметра, а затем его доверительного интервала.

Если какой-то параметр для одного типа породы или минерала определен на  $n$  образцах, то в случае нормального распределения результатов измерения наиболее близкое к истинному значению параметра будет среднее арифметическое  $\bar{X}$  всех измерений  $X_i$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (2.6)$$

Далее вычисляют: среднее квадратическое отклонение (ошибку) единичного результата

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-1}}; \quad (2.7)$$

коэффициент вариации (%), т. е. среднее относительное отклонение полученных результатов измерений от среднего арифметического,

$$K_{\text{вар}} = (s_n/\bar{X}) 100; \quad (2.8)$$

доверительный интервал

$$\Delta X = t_{n\alpha} s_n / \sqrt{n}. \quad (2.9)$$

Коэффициент  $t_{n\alpha}$  (коэффициент Стьюдента) учитывает отличие случайной выборки от генеральной совокупности и зависит от числа образцов  $n$  и требуемой доверительной вероятности  $\alpha$  (чаще всего  $\alpha = 0,85 \div 0,95$ ).

Окончательный результат измерений записывается, например, так

$$\lambda = (3,2 \pm 0,2) \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)} \text{ при } \alpha = 0,95.$$

Запись показывает, что среднее значение параметра  $\lambda$  равно 3,2 ( $\bar{X}$ ), а отклонение его от среднего арифметического в 95 % случаев не превышает 0,2 ( $\Delta X$ ).

Из формулы (2.9) легко определить необходимое число испытаний для обеспечения ошибки измерений не более  $\xi = \Delta X/X$  при известном  $K_{\text{вар}}$  изучаемого параметра

$$n = (t_{n\alpha} K_{\text{вар}} / \xi)^2. \quad (2.10)$$

Так, если  $K_{\text{вар}} = 20\%$ , ошибка измерения  $15\%$ , то  $n = 7$  образцам (при  $\alpha = 0,95$ ,  $t_{n\alpha} = 1,96$ ).

Если при испытании породы получены параметры с учетом всех вышеизложенных требований по стандартной методике с указанием состава и строения породы, то они наиболее стабильны, воспроизводимы и представительны и считаются стандартными справочными данными породы (ССД) (табл. 2.3 и 2.4).

**Таблица 2.3. Минеральный состав и строение породы (известково-серная руда)**

Компоненты породы	Минеральный состав и пористость		Характеристики строения			
	Объемное содержание, %	Размер зерен и пор $d_{ср}$ , мм	$k_{н.р}$	$k_{фр}$	$k_{н.ф}$	$k_o$
Кальцит	62	0,2	0,2	1,6	2,2	1,1 (I)
Сера	26	0,1	2,1	2,0	1,8	1,2 (II)
Глинистые минералы	4	0,01	1,6	2,0	1,6	1,8 (I)
Поры, трещины	8	0,02	3,8	6,0	4,2	1,0 (II)
Среднее значение	—	0,15	2,89	2,07	2,21	—

**Таблица 2.4. Физические свойства породы**

Обозначение	Размерность	Численное среднее значение	Коэффициент вариации $k_{вар}$ , %	Доверительный интервал	Метод определения
$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	2200	5,4	$\pm 120$	Пикнометрический Ультразвуковой (ГОСТ 21153.7—75)
$E$	МПа	$2 \cdot 10^4$	25	$\pm 0,5 \cdot 10^4$	
$\nu$	—	0,28	10	$\pm 0,03$	Ультразвуковой (ГОСТ 21153.7—75)
$\sigma_{сж}$	МПа	42	26	$\pm 12$	ГОСТ 21153.2—75
$\sigma_p$	МПа	3	42	$\pm 1,4$	ГОСТ 21153.3—75
$\lambda$	Вт/(м·К)	1,6	12,5	$\pm 0,23$	ГОСТ 25499—82
$c$	кДж/(кг·К)	1,5	4	$\pm 0,17$	ГОСТ 25493—82
$\alpha$	1/К	$1,3 \cdot 10^{-5}$	43	$\pm 0,6 \cdot 10^{-5}$	Метод дилатометра
$\epsilon_r$	—	7,2	15	$\pm 1,2$	ГОСТ 25495—82
$tg \delta$	—	0,16	30	$\pm 0,05$	ГОСТ 25495—82
$\rho_{э}$	Ом·м	$4 \cdot 10^7$	—	—	ГОСТ 25494—82
$\mu$	—	1	—	—	Индуктивный

Для более наглядного представления изменчивости параметров пород пользуются вариационными кривыми (кривыми распределения, гистограммами). По оси абсцисс откладывают числовые значения изучаемого параметра, а по оси ординат — число образцов (в % от всего их числа или абсолют-

ное), имеющих физический параметр, меньший или равный данному (рис. 2.3).

Как известно, ни одну физическую характеристику нельзя определить, не подвергнув породу внешнему воздействию. Однако степень этого воздействия может быть различна.

Внешнее поле, предельно ограниченное по величине и по

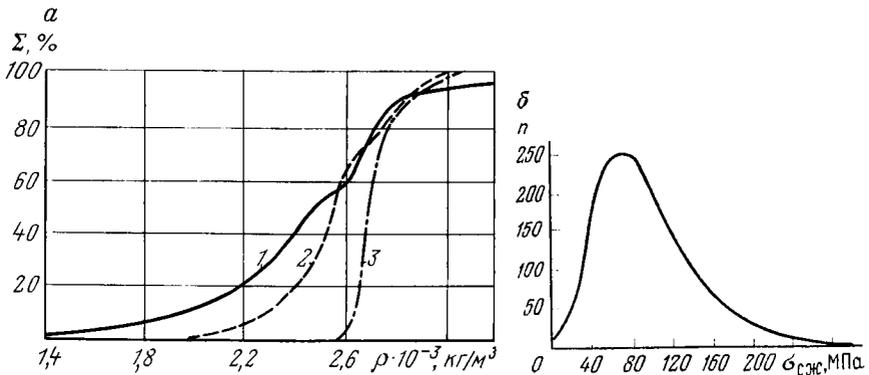


Рис. 2.3. Вариационные кривые распределения физических свойств горных пород:

*a* — интегральная: 1 — распределение объемной массы известняка; 2 — то же, доломита; 3 — то же, гранита; *б* — дифференциальная: распределение предела прочности при сжатии пород рудных месторождений Алтая (по К. П. Катину)

времени воздействия на породу и практически не вызывающее каких-либо дополнительных изменений в ней, называется измерительным. Поле, параметры которого значительно изменяются в процессе эксперимента, называют воздействием. В результате приложения измерительного поля получают одно какое-либо значение физического параметра. Переменные воздействующие поля применяют с целью установления зависимости свойств пород от различных внешних факторов (например, прочности пород от степени их увлажнения).

Результаты нескольких измерений параметра в каждой фиксированной точке воздействующего поля обрабатывают вышеописанными методами математической статистики. На основе полученных данных в соответствующих координатах строят точечный график зависимости между исследуемыми параметрами.

Поскольку при изучении свойств пород практически невозможно учесть все многообразие факторов, которые оказывают влияние на эти свойства, на графике можно проследить только некоторую общую закономерность изменения одного параметра с изменением другого. Такой график также обрабатывают методами математической статистики и получают аналитическое выражение зависимости физико-технического параметра породы от изучаемого фактора. Для этой цели используют принцип

Лежандра, согласно которому наилучшее приближение к искомой зависимости дает форма кривой, при которой сумма квадратов отклонений отдельных измерений является минимальной. Полученная таким образом зависимость называется корреляционной, в которой в отличие от функциональной одному значению аргумента соответствует несколько значений функции (рис. 2.4).

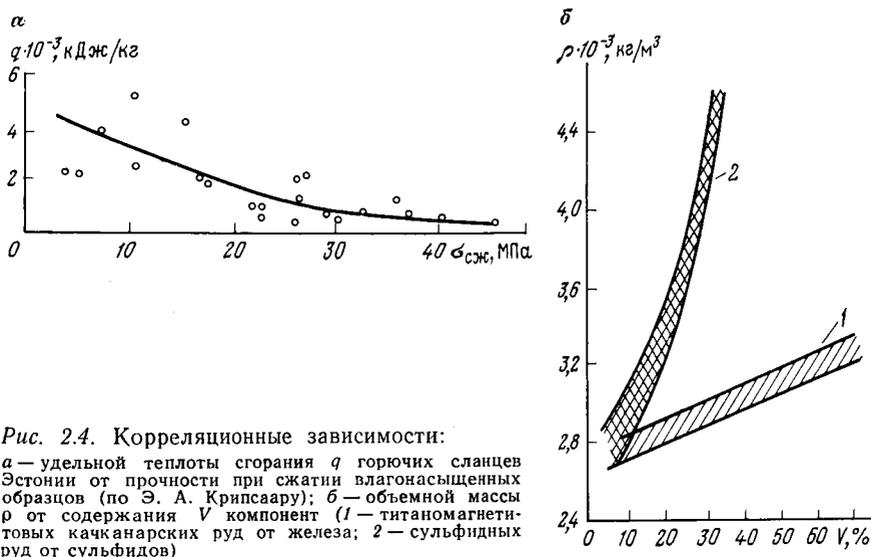


Рис. 2.4. Корреляционные зависимости:  
 а — удельной теплоты сгорания  $q$  горючих сланцев Эстонии от прочности при сжатии влагонасыщенных образцов (по Э. А. Крипсаару); б — объемной массы  $\rho$  от содержания  $V$  компонент (1 — титаномагнетитовых качканарских руд от железа; 2 — сульфидных руд от сульфидов)

Корреляционные зависимости не отличаются большой точностью, но позволяют с достаточной для нужд горного дела вероятностью определять по одному показателю другой и поэтому широко применяются на практике.

## 2.7. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОРОД ПО ФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

Известны различные классификации пород по одному или двум физико-техническим параметрам. Горные породы в них разделяются на группы по величине параметров. Это так называемые частные классификации, пригодные только при рассмотрении конкретных свойств и конкретных, заранее внесенных в классификацию пород. К ним относятся, например, классификации пород по пористости, плотности, крепости, буримости, взрываемости и т. д. В них не выделены исходные факторы, определяющие свойства пород.

Существующие общие петрографические и генетические классификации магматических, осадочных и метаморфических пород основаны на разделении породы по минеральному составу и структурно-текстурным особенностям. Та-

кие классификации предназначены для диагностики горных пород, выявления и систематизации их петрографических особенностей. Они позволяют установить по известным признакам (строению и составу) неизвестное — название породы. Хотя по названию породы и можно в какой-то мере судить о ее физических свойствах, однако для систематизации горных пород по

**Таблица 2.5. Основные минералы, обуславливающие физические свойства горных пород**

Минералы	Код	Минералы	Код
Кварц	01	Гипс	11
Полевые шпаты	02	Галоиды	12
Оливин	03	Глинистые	13
Пироксены	04	Слюда	14
Доломит	05	Сера	15
Роговая обманка	06	Хлорит, тальк	16
Апатит	07	Углеродистые	17
Серпентин	08	Магнетит	18
Кальцит	09	Другие железорудные	19
Нефелин	10	Другие рудные	20

физическим свойствам петрографические классификации непригодны из-за неоднозначности оценки свойств по ним.

Обобщенная классификация горных пород по всему комплексу физико-технических параметров должна базироваться на таких классификационных признаках, которые оказывают определяющее влияние на свойства пород.

Если все горные породы объединить в группы по основным внутренним факторам, то этим будут предопределены и численные значения физических параметров каждой такой группы пород, т. е. будет достигнута задача классификации горных пород по физическим свойствам.

Для этих целей выделены основные признаки состава и строения, по которым целесообразно группирование горных пород.

Так, по минеральному составу выделены 20 минералов, оказывающих основное влияние на свойства горных пород (табл. 2.5).

По строению горные породы подразделены на группы в соответствии с табл. 2.6.

Статистический тип строения пород количественно оценивают по размерам и неоднородности в размерах зерен и пор. Эти породы изотропны.

Породы матричного строения, у которых включения или пустоты изометричны, также практически изотропны.

Породы матричного строения, у которых включения, пустоты или зоны ослабления имеют вытянутую (линейную или плоско-

стную) форму, анизотропны. Строение их оценивается по размерам зерен и неоднородностей в их размерах, а также по размерам прожилков, каналов, слоев и по их числу, приходящемуся на единицу объема породы.

Если построить классификационное поле, на котором по горизонтали проставить перечисленные типы строения, а по верти-

**Таблица 2.6. Группирование пород по признакам строения**

Тип пород по связям между частицами	Степень пористости	Степень изотропности	Взаимное расположение частиц (тип строения)	Подгруппа строения	Группа строения
Скальные	Непористые	Изотропные Анизотропные	Статистическое Матричное Слоистое Прожилковатое	1.1 1.2 1.3 1.4	1
	Пористые	Изотропные Анизотропные	Статистическое Матричное Слоистое Прожилковатое	2.1 2.2 2.3 2.4	2
Связные и рыхлые	Пористые	Изотропные Анизотропные	Статистическое Матричное Слоистое Прожилковатое	3.1 3.2 3.3 3.4	3

кали — возможные сочетания двух основных минералов, то любой участок этого поля станет вполне конкретизированным по минералам и типу строения и, следовательно, по физическим свойствам (табл. 2.7).

При переходе от одной группы пород по признакам строения к другой происходит резкое изменение их состояния. Так, если непористые скальные породы однофазные, то пористые, по крайней мере, двухфазные, пористые связные и рыхлые — двухфазные с сильно ослабленными связями между частицами.

Каждая группа пород в данной классификации имеет свои формулы расчета физических параметров, позволяющие прогнозировать свойства пород.

К тому же каждый участок классификационного поля может быть записан в виде соответствующего набора цифр (кода), если каждому минералу и каждому типу строения присвоить свой номер.

Приняв определенный порядок записи — вначале код основного минерала, далее код дополнительного минерала и код строения породы, — получают численную характеристику породы,

определяющую ее свойства. Так, например, участок, занимаемый в классификации гранитом, записывают следующим образом: 02—01—1.1, аркозовым песком, имеющим тот же состав, 02—01—3.1. В результате такой записи наглядно выявляются общие и отличительные признаки. Приведенные породы, например, отличаются только степенью связи частиц. Наоборот, за-

**Таблица 2.7. Фрагмент классификации горных пород**

Группа состава (коды минералов)		Подгруппа строения				
		1.1	1.3	2.3	3.1	3.2
02	01	Гранит	Гнейс	—	Аркозовый песок	—
13	02	—	—	—	Аргиллит	—
	15	—	—	—	—	Слюдистый, глинистый сланец
	17	—	—	Углистый сланец	—	—

писи каменного угля (17—13—2.3) и углистого сланца (13—17—2.3) показывают, что они отличаются, в первую очередь, преобладающим минералом.

### **3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

#### **3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Механические свойства, характеризующие поведение пород при воздействии механических нагрузок, подразделяются на упругие, пластические, прочностные и реологические.

Упругие свойства определяют поведение пород только в пределах упругой зоны, т. е. при нагрузках, после снятия которых порода возвращается в исходное состояние. Упругие смещения, возникшие в породах под воздействием кратковременных импульсов, способны распространяться по объему пород. Волновой процесс распространения таких смещений (упругих колебаний) описывается акустическими свойствами пород.

Пластические свойства пород проявляются при нагрузках, превышающих предел упругости породы, после снятия которых порода уже не полностью восстанавливает исходную форму и размеры.

Прочностные свойства определяют величины разрушающих нагрузок в породах.

Реологические свойства оценивают изменения деформаций, напряжений и перечисленных выше механических параметров пород во времени — при длительных воздействиях нагрузок.

#### **3.2. ПЛОТНОСТЬ ПОРОД**

Масса единицы объема твердой фазы (минерального скелета) минерала или породы называется ее плотностью  $\rho_0$ .

Минералы делятся на тяжелые ( $\rho_0 > 4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), средние ( $\rho_0 = (4 \div 2,5) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и легкие ( $\rho_0 < 2,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>); 13 % всех минералов относятся к легким, 33,8 % — к тяжелым, 53,2 % — к средним.

Плотность горных пород определяется плотностью слагающих пород минералов  $\rho_{0i}$ . Она может быть рассчитана по формуле

$$\rho_0 = \sum_{i=1}^n \rho_{0i} V_i, \quad (3.1)$$

где  $n$  — число минералов, слагающих породу;  $V_i$  — доля объема, занимаемого каждым минералом.

Масса единицы объема породы в ее естественном состоянии отличается от  $\rho_0$ ; такое отличие обусловлено, в первую очередь, пористостью.

Поэтому наряду с плотностью используют понятие объемной массы  $\rho$ . Объемной массой называется масса единицы

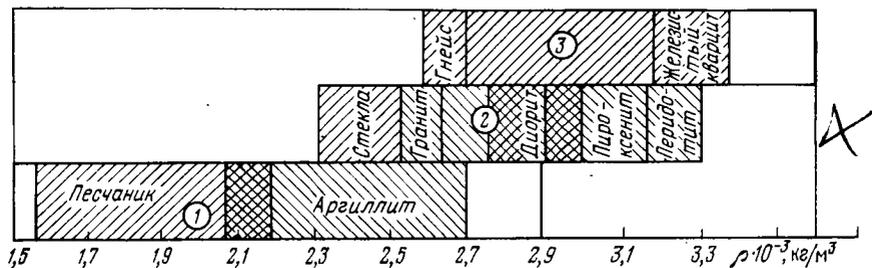


Рис. 3.1. Пределы изменений объемной массы осадочных (1), изверженных (2), метаморфических (3) пород

объема сухой породы при данной пористости в ее естественном состоянии. Плотность пород всегда больше их объемной массы.

Связь между объемной массой и плотностью выражается через пористость:

$$\rho = \rho_0(1 - P) \quad (3.2)$$

или

$$\rho_0 = \rho(1 + k_p), \quad (3.3)$$

где  $P$  — общая пористость, доли единицы.

Если порода сложена из минералов примерно одинаковой плотности, ее объемная масса в основном зависит от пористости. Например, объемная масса известняков может меняться от  $1,5 \cdot 10^3$  до  $2,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, в то время как плотность слагающего известняк кальцита равна  $2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Объемная масса малопористых пород зависит в основном от их минерального состава. Так, у магматических пород наблюдается увеличение объемной массы с уменьшением содержания кварца, поскольку кварц обладает меньшей плотностью ( $2,65 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), чем железисто-магнезиальные минералы (оливин, пироксены, роговая обманка, биотит и т. д.), слагающие магматические породы.

Объемная масса большинства пород колеблется от  $1,5 \cdot 10^3$  до  $3,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (рис. 3.1). Большой объемной массой обладают руды, так как в их состав входят тяжелые рудные минералы — гематит, магнетит, сидерит, киноварь. Плотность кристалличе-

ских пород на  $4 \div 10\%$  больше плотности аналогичных им по составу аморфных пород (стекол).

Низкую объемную массу имеют гидрокимические осадки — гипс ( $2,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и каменная соль ( $2,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). Весьма низкими значениями объемной массы ( $0,72-2$ )  $\cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> обладают каменные угли и торф. Объемная масса углей определяется их пористостью, содержанием углерода и наличием минеральных примесей. Так как углерод имеет плотность  $2,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, увеличение степени углефикации приводит к росту объемной массы углей. Этому способствует также то, что при переходе к более метаморфизованным углям (бурые угли — газовые угли — антрацит) наблюдается снижение пористости.

Вес единицы объема твердой фазы породы называется удельным весом  $\gamma_0$  породы, а вес единицы объема сухой породы в естественном пористом состоянии — объемным весом  $\gamma$ . Удельный вес породы и ее плотность связаны соотношением

$$\gamma_0 = \rho_0 g, \quad (3.4)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;

Удельные и объемные веса породы — параметры силовые, поэтому они должны применяться только в тех случаях, когда рассматриваются силы, вызванные действием гравитационного поля, например горное давление. В случаях, когда оценивают количество вещества, используют плотность и объемную массу.

Отношение объемной массы породы к ее плотности, характеризующее степень заполнения объема горной породы минеральным веществом, иногда называют коэффициентом плотности.

### 3.3. НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ В ПОРОДАХ

Как известно из физики твердого тела, между ионами в кристаллической решетке любого вещества существуют силы взаимного притяжения и силы взаимного отталкивания. Именно благодаря этому при воздействии на породу внешних сил, стремящихся сдвинуть с нейтрального положения ионы в решетке вещества в одну или другую сторону, в породе возникают внутренние силы, противодействующие внешним.

Поверхностная плотность внутренних сил называется напряжением  $\sigma$ ; оно, как и сила, — величина векторная:

$$\sigma = dF/dS, \quad (3.5)$$

где  $dF$  — сила, действующая на элемент площадки  $dS$ .

Напряжение в системе СИ выражается в паскалях (Па).  
 $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ кг/м} \cdot \text{с}^2$ .

Если внешние силы действуют на породу только в направлении одной оси, то они вызывают в ней одноосное напряженное состояние, а действующие в направлении двух осей — плоское напряженное состояние. Действие сил по трем осям приводит к объемному напряженному состоянию породы,

которое в случае равенства всех сил называется гидростатическим.

Напряжения, направленные перпендикулярно к рассматриваемой площадке  $S$ , — нормальные ( $\sigma$ ); напряжения, возникающие вдоль площадки  $S$ , — касательные ( $\tau$ ). Напряженное состояние твердого тела в любой плоскости можно охарактеризовать действующими в ней нормальными и касательными напряжениями. Если из тела, находящегося в напряженном состоянии, выделить элементарный кубик, то в общем случае на каждой его грани можно выявить по три вектора напряжений — два взаимно перпендикулярных касательных и один нормальный (рис. 3.2).

В итоге внутреннее напряженное состояние рассматриваемого объема породы будет описываться девятью компонентами (векторами) напряжений. Все вместе они представляют собой тензор напряжений  $s_{ij}$  второго ранга, записываемый в следующем виде:

$$s_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} = \rho_{ik} n_i, \quad (3.6)$$

где  $\rho_{ik}$  — совокупность девяти напряжений, нормальных (при  $i=k$ ) и касательных (при  $i \neq k$ ) относительно трех взаимно перпендикулярных площадок в одной точке;  $n_i$  — единичный вектор, нормальный к соответствующей рассматриваемой площадке;  $i, k$  — индексы обозначения осей координат  $x, y, z$ .

В этом тензоре любые два касательных напряжения  $\tau$ , лежащие в одной плоскости и направленные противоположно, должны быть равны, поскольку тело находится в равновесии и, следовательно, полный момент сил относительно центра элементарного кубика должен быть равен нулю. Поэтому

$$\tau_{yx} = \tau_{xy}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}. \quad (3.7)$$

Такой тензор называется симметричным.

Напряжения в породах могут создаваться не только действием внешних нагрузок, но и другими физическими полями. Например, термические напряжения вызываются неоднородным нагревом пород. После снятия воздействующего поля в породе могут быть обнаружены остаточные напряжения. Последние возникают, например, при неравномерном распределении напряжений из-за местной текучести материала.

Под воздействием внешних сил горная порода подвергается деформациям — изменению линейных размеров, объема и формы.

Деформации, соответствующие нормальным напряжениям, выражаются через относительное изменение  $\varepsilon$  линейных размеров образца и называются относительными линейными (рис. 3.3).

$$\varepsilon = (l' - l)/l = \Delta l/l, \quad (3.8)$$

где  $l'$  — длина ребра  $l$  после деформирования;  $\Delta l$  — изменение длины ребра.

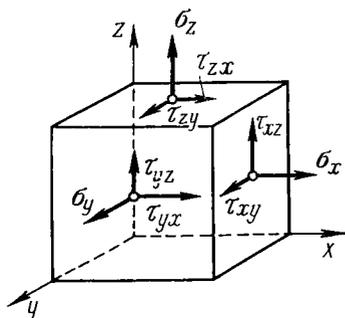


Рис. 3.2. Компоненты напряжений в элементарном кубике породы, находящейся в сложонапряженном состоянии

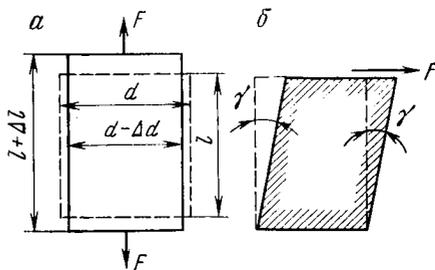


Рис. 3.3. Деформация образца породы под действием нормальных (а) и касательных (б) сил  $F$ :

$d$  — исходный поперечный размер образца;  $\Delta d$  — уменьшение поперечного размера образца

Линейные деформации, происходящие по направлению действующей силы, называются продольными, перпендикулярно ей — поперечными.

Деформации, соответствующие касательным напряжениям, выражаются через угол сдвига  $\gamma$  граней образца (см. рис. 3.3). Величина деформации сдвига определяется по величине  $\text{tg } \gamma$ . Вследствие малости углов  $\text{tg } \gamma \approx \gamma$ .

Линейные и сдвиговые деформации можно разложить на составляющие векторы по осям координат и написать тензор деформаций, определяющий характер деформации любой точки тела:

$$e_{kl} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{zx} & \frac{1}{2} \gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix} = \frac{1}{2} (\partial u_l / \partial x_k + \partial u_k / \partial x_l),$$

(3.9)

где  $u$  — общее обозначение любой деформации;  $k$  и  $l$  — индексы, обозначающие соответствующие оси координат (они могут принимать значения осей  $x, y, z$ ).

Тензор деформаций симметричный, так как противоположные сдвиговые деформации (например,  $\gamma_{xy}$  и  $\gamma_{yx}$ ) равны между собой.

Характер и величина деформации зависят от типа и величины приложенных напряжений. Увеличение нагрузок приводит к возрастанию деформаций и в пределе возникает разрушение — порода теряет свою сплошность, разделяется на части. Деформации, не приводящие к разрушению, бывают упругие и пластические. В первом случае часто наблюдается прямая пропорциональность между величинами напряжений и соответствующих им упругих деформаций. При этом в породе накапливается потенциальная энергия, которая после прекращения действия внешних сил возвращает деформированный объем в исходное состояние.

Пластические деформации находятся в значительно более сложной зависимости от напряжений. Характерной чертой пластических деформаций является их необратимость после снятия нагрузки — форма и размеры тела полностью не восстанавливаются.

При увеличении напряжений можно постепенно наблюдать все три вида деформаций породы — упругую  $\epsilon_E$ , пластическую  $\epsilon_{пл}$  и разрушающую  $\epsilon_r$  (рис. 3.4).

В зависимости от соотношения величин этих деформаций горные породы могут быть подразделены на упруго хрупкие (пластическая зона практически не наблюдается вплоть до разрушения), упруго пластичные (разрушающей деформации предшествует зона пластической деформации) и пластические (упругая деформация практически отсутствует).

#### 3.4. УПРУГИЕ СВОЙСТВА ПОРОД

Упругие свойства проявляются в способности пород восстанавливать исходную форму и размеры после снятия нагрузки. Полное восстановление размеров и формы возможно только в пре-

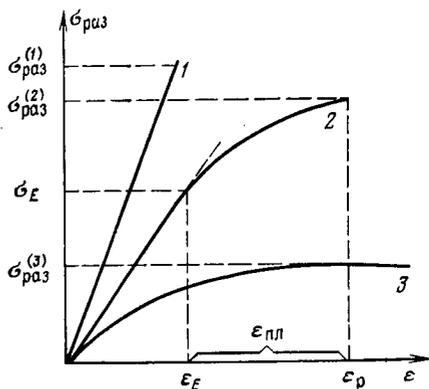


Рис. 3.4. Типичные графики деформации пород:

1 — упруго хрупких (кварциты); 2 — упруго пластичных (роговики); 3 — пластических (мраморы);  $\sigma_{раз}^{(1)}$ ,  $\sigma_{раз}^{(2)}$ ,  $\sigma_{раз}^{(3)}$  — пределы прочности пород соответственно 1, 2 и 3-го типа

делах упругих деформаций. Напряжения, при которых начинаются пластические деформации, называются пределом упругости  $\sigma_E$ , являющимся одним из параметров упругости пород. Остальные параметры, численно оценивающие упругие свойства пород, — коэффициенты пропорциональности между напряжениями и соответствующими им упругими деформациями.

Если порода находится в объемном напряженном состоянии, то, очевидно, необходимо учитывать все действующие напряжения и возникающие деформации. Такое состояние пород наиболее полно может быть записано в виде тензора упругости. Так как каждая из девяти компонент деформаций связана с каждой из девяти компонент напряжений, всего для описания упругих свойств материала требуется 81 коэффициент. Если материал однороден, то все эти коэффициенты будут постоянны.

Обозначив их  $C_{ijkl}$ , можно записать тензор упругости, который является тензором 4-го ранга,

$$s_{ij} = \sum_{k,l} C_{ijkl} e_{kl}. \quad (3.10)$$

Здесь каждый индекс  $i, j, k, l$  принимает значения осей  $x, y, z$ .

Поскольку  $s_{ij}$  и  $e_{kl}$  — симметричные тензоры (см. разд. 3.3), каждый из них включает в себя только шесть различных элементов и число коэффициентов снижается до 36. Из них независим только 21. С повышением симметрии кристалла число независимых коэффициентов снижается. Так, кристаллы ромбической сингонии имеют только 9 коэффициентов, тетрагональной и тригональной — по 6, а кубической — только 3.

Для случая полностью изотропного тела связь между напряжениями и деформациями может быть выражена системой шести уравнений (обобщенный закон Гука), куда входят три параметра упругости:  $E$ ,  $G$  и  $\nu$ , из которых независимы только два.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)]; & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy}; \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)]; & \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz}; \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_y + \sigma_x)]; & \gamma_{zx} &= \frac{1}{G} \tau_{zx}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

где  $E$  — модуль продольной упругости (модуль Юнга) породы:

$$E = \sigma/\epsilon; \quad (3.12)$$

$G$  — модуль сдвига, коэффициент пропорциональности

между касательным напряжением  $\tau$  и соответствующей упругой деформацией сдвига  $\gamma$ :

$$\tau = G\gamma; \quad (3.13)$$

$\nu$  — коэффициент Пуассона;

$$\nu = \Delta dl / (\Delta l d). \quad (3.14)$$

Модуль продольной упругости  $E$  и модуль сдвига  $G$  соответствуют основным видам напряжений и деформаций и поэтому считаются основными характеристиками упругости породы. Они связаны с коэффициентом Пуассона следующей зависимостью:

$$G = E / [2(1 + \nu)]. \quad (3.15)$$

В случае равномерного трехосного сжатия породы в пределах зоны упругости наблюдается прямая пропорциональная зависимость между давлением  $p_\sigma$  и относительным изменением объема породы  $\Delta V/V$ , где  $V$  — исходный объем образца;  $\Delta V$  — изменение объема породы под нагрузкой.

$$p_\sigma = K \Delta V / V. \quad (3.16)$$

Соответствующий коэффициент пропорциональности  $K$  называется модулем объемного (всестороннего) сжатия.

Он также связан с  $E$  и  $\nu$  пород:

$$K = E / [3(1 - 2\nu)]. \quad (3.17)$$

Модули  $E$ ,  $G$  и  $K$ , как и напряжение, выражаются в паскалях. Наиболее вероятные значения модуля Юнга в породах  $10^3 \div 3 \cdot 10^5$  МПа. Коэффициент Пуассона  $\nu$  — величина безразмерная, числовые значения его в соответствии с теорией упругости находятся в пределах  $0 \leq \nu \leq 0,5$ , для горных пород  $\nu = 0,2 \div 0,4$ .

В связи с этим модуль сдвига  $G$  всегда меньше модуля Юнга, а  $K$  может быть как меньше, так и больше  $E$  (рис. 3.5).

Модули упругости характеризуют способность пород сопротивляться деформированию, т. е. определяют жесткость пород. Величина, обратная модулям, оценивает податливость пород и носит название коэффициента соответствующей деформируемости (например,  $1/K$  — коэффициент объемного сжатия).

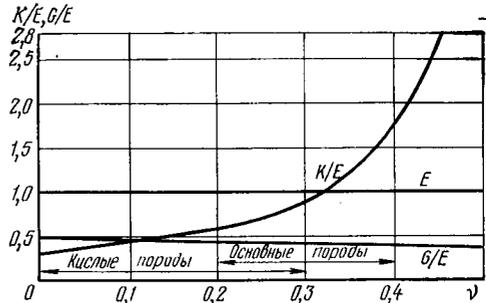


Рис. 3.5. Отношение числовых значений параметров упругости пород при разных значениях коэффициента Пуассона  $\nu$

### 3.5. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ПОРОД НА ИХ УПРУГИЕ СВОЙСТВА

Наличие в породе минералов, обладающих повышенными значениями параметров упругости, в общем случае увеличивает их значения и для породы в целом.

Действительно, объем породы, сложенной в основном из жестких зерен минералов, деформируется под действием всестороннего давления в меньшей степени, чем породы, в которой этих зерен немного. Так как модуль объемного сжатия  $K$  обратно пропорционален  $\Delta V/V$ , следовательно, в первом случае  $K$  будет больше, чем во втором.

В первом приближении зависимость  $K$  от минерального состава пород может быть представлена как арифметическое средневзвешенное  $K_i$  минералов, слагающих породу.

Известно, что темноцветные минералы обычно имеют увеличенные модули упругости. Так, если  $E$  ортоклаза равен  $6,3 \cdot 10^4$  МПа, а плагиоклазов —  $2,8 \cdot 10^4$ — $9 \cdot 10^4$  МПа, то пироксенов —  $14,4 \cdot 10^4$ — $16 \cdot 10^4$  МПа, а оливина —  $21 \cdot 10^4$  МПа. Модуль Юнга кварца примерно равен  $10^5$  МПа. Поэтому при переходе от кислых пород к основным и ультраосновным наблюдается возрастание  $K$  и  $E$ . В такой же последовательности происходит рост плотности пород. Это, в свою очередь, приводит к часто наблюдаемому возрастанию модулей упругости пород с увеличением их плотности.

Наиболее четко влияние минерального состава сказывается только на упругие свойства изотропных и малопористых пород (подгруппа строения 1.1).

В слоистых породах наблюдаются различные значения модулей упругости параллельно слоям и перпендикулярно к ним.

Так, при сдавливании образца силой  $F$  перпендикулярно к слоям общая его деформация  $\Delta l$  складывается из полных деформаций всех слоев  $\Delta l_1$ ,  $\Delta l_2$  и т. д. (рис. 3.6). При этом, так как напряжения во всех слоях одинаковы, общий модуль Юнга породы перпендикулярно к слоям  $E_{\perp}$  будет равен

$$1/E_{\perp} = \sum_{i=1}^n (l_i/E_i), \quad (3.18)$$

или, переходя к относительному объему слоев  $V_i$ ,

$$E_{\perp}^{-1} = \sum_{i=1}^n V_i E_i^{-1}. \quad (3.19)$$

При сдавливании образца вдоль слоев деформации всех слоев  $\Delta l$  одинаковы, а напряжения суммируются по всей площади.

Следовательно, переходя к относительным объемам слоев,

$$E_{\parallel} = \sum_{i=1}^n E_i V_i. \quad (3.20)$$

Таким образом, величина модуля Юнга ненарушенных слоистых пород вдоль слоев больше, чем перпендикулярно к ним. Коэффициент анизотропии  $k_{ан}$  по модулю Юнга при этом для большинства горных пород находится в пределах 1,2—2 (табл. 3.1).

В подгруппе 1.1 пород по строению (квазиизотропная статистическая смесь) относительные деформации зерен и напряжения внутри них различны. При этом средние значения модуля упругости  $E_{ср}$  находятся в области, ограниченной предельными значениями  $E_{\parallel}$  и  $E_{\perp}$ .

Для решения практических задач в этом случае используют логарифмическое усреднение [см. уравнение (2.3)].

Аномальное значение коэффициента Пуассона  $\nu$  имеет кварц (0,07). Вследствие этого у 85 % пород, содержащих кварц,  $\nu \leq 0,25$ .

Для маритовых руд Кривого Рога В. Г. Борисенко установлена зависимость коэффициента Пуассона от содержания железа

$$\nu = 1,126V_{Fe} - 0,515. \quad (3.21)$$

В пористых породах (группы строения 2.1—2.4; 3.1—3.4) существенно влияние пористости и вещества, заполняющего поры. Параметры упругости составляющих породу фаз представлены в табл. 3.2.

Очевидно, что модуль Юнга  $E_0$  минерального скелета одной и той же породы одинаков при любой ее пористости

$$E_0 = F/(S_0 \epsilon). \quad (3.22)$$

Средний модуль Юнга пористой породы

$$E = F/[(S_0 + S_n) \epsilon], \quad (3.23)$$

где  $F$  — сила, действующая на образец;  $S_0$  и  $S_n$  — соответственно площади минеральной фазы и порового пространства в изучаемой плоскости.

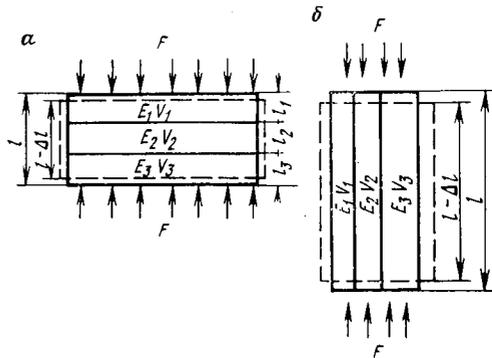


Рис. 3.6. Схемы к расчету модулей упругости слоистой породы перпендикулярно (а) и параллельно (б) слоям:

$E_1, E_2, E_3, V_1, V_2, V_3$  и  $l_1, l_2, l_3$  — соответственно модули Юнга, объемы и толщины слоев, слагающих породу;  $l$  — общая толщина образца

Если суммарные размеры минеральной фазы и пор перпендикулярно к площади  $S$  принять равными соответственно  $l_0$  и  $l_{\pi}$ , то их объемы будут  $V_0 = S_0 l_0$ ;  $V_{\pi} = S_{\pi} l_{\pi}$  и

$$E/E_0 = (V_0/l_0)/(V_0/l_0 + V_{\pi}/l_{\pi}). \quad (3.24)$$

Таблица 3.1. Коэффициенты анизотропии параметров упругости горных пород

Порода	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-10}$ , Па		$k_{ан}$	Коэффициент Пуассона		$k_{ан}$
	$E_{\parallel}$	$E_{\perp}$		$\nu_{\parallel}$	$\nu_{\perp}$	
Алевролит	2,67	1,72	1,55	0,25	0,29	0,86
Известняк	8,36	7,25	1,15	0,28	0,3	0,93

Таблица 3.2. Параметры упругости фаз, слагающих горную породу

Фаза	$E$ , МПа	$\nu$	$K$ , МПа
Минералы	$10^3 - 3 \cdot 10^5$	0,07—0,47	$4 \cdot 10^2 - 6 \cdot 10^5$
Вода	—	—	$2,2 \cdot 10^3$
Воздух	—	—	0,16
Лед	$1,3 \cdot 10^4$	0,3—0,4	$1,4 \cdot 10^4$

Отсюда, переходя к пористости,

$$E/E_0 = (1 - P)/(1 - P + l_0 P/l_{\pi}). \quad (3.25)$$

Показатель  $l_0/l_{\pi}$  характеризует форму порового пространства. Так, если  $l_0/l_{\pi} = 1$ , то поры могут быть представлены в виде каналов, вытянутых вдоль направления действия нагрузки, и формула приобретает вид арифметического среднего

$$E = E_0(1 - P). \quad (3.26)$$

Если  $l_0/l_{\pi} > 1$ , влияние пористости на значение модуля Юнга пород увеличивается. Так, при  $l_0/l_{\pi} = 4$

$$E/E_0 = (1 - P)/(1 + 3P). \quad (3.27)$$

Поры в этом случае плоские широкие, ориентированные перпендикулярно к направлению действия нагрузки.

Однако в уравнении (3.25) не учтено влияние концентрации напряжений, вызванной порами. Поэтому экспериментам больше соответствует квадратичная зависимость типа (2.4) (рис. 3.7)

$$E/E_0 = (1 - aP)^2, \quad (3.28)$$

где  $a$  — показатель, характеризующий форму порового пространства ( $a = 1,5 \div 4$ ). Например, для маритовых руд Кривбасса

обнаружена следующая зависимость модуля Юнга перпендикулярно слоистости от пористости:

$$E_{\perp} = 14,5 \cdot 10^{10} (1 - 2,67P)^2. \quad (3.29)$$

Для карбонатов

$$E = 8,1 \cdot 10^{10} (1 - 3,2P)^2. \quad (3.30)$$

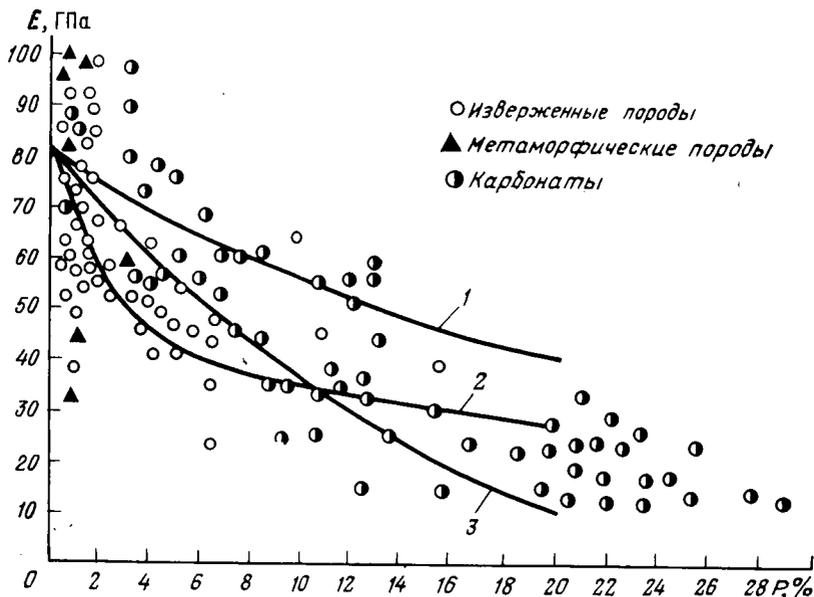


Рис. 3.7. Зависимость модуля Юнга  $E$  горных пород от пористости  $P$ : 1 —  $E = 8,1 \cdot 10^{10} \frac{(1-P)}{(1+3P)}$ ; 2 —  $E = 8,1 \times 10^{10} (1 - P^{0,25})$ ; 3 —  $E = 8,1 \cdot 10^{10} (1 - 3,2P)^2$

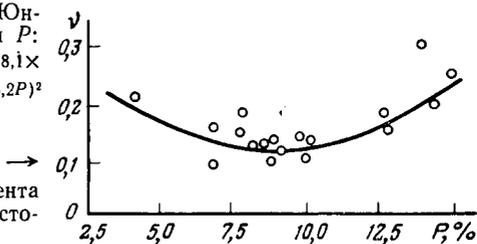


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента Пуассона  $\nu$  известняков от пористости  $P$  (по Э. А. Крипсаару)

Предложено много других уравнений для расчета модулей Юнга пористых пород. Большие различия в поровом пространстве пород, их трещиноватости и структурной неоднородности позволяют вывести достаточно точные зависимости только для конкретных пород конкретных месторождений.

Установлено, что коэффициент Пуассона с увеличением пористости может либо увеличиваться, либо уменьшаться. Так, у маритовых руд наблюдается увеличение коэффициента Пуассона с повышением пористости, а у известняков в области 10 %-ной пористости выявлен минимум  $\nu$  (рис. 3.8).

Различные изменения, происходящие в породах (выветривание, цементация и т. д.), также приводят к изменению их упругих параметров.

### 3.6. ПЛАСТИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД

Приложение к породам нагрузок, превышающих их пределы упругости, приводит к возникновению необратимых пластических деформаций, в области которых исчезает пропорциональность между величиной деформации породы и нагрузкой. При этом наблюдается увеличение скорости роста деформаций с повышением нагрузки и даже при постоянных или уменьшающихся нагрузках.

Пластическая деформация в породах обусловлена внутризеренным и межзеренным скольжением (постепенное соскальзывание атомов в кристаллической решетке с одного на другой, сдвиг зерен по определенным плоскостям и направлениям под действием нагрузок). Значительную роль во внутризеренном скольжении играют дислокации — сдвиги одной части кристалла относительно другой или линии искажения, проходящие вдоль края лишней атомной плоскости. Однако дислокация, вышедшая на поверхность или границу зерна, в дальнейшем уже не принимает участия в пластической деформации. Плотность дислокаций внутри зерна уменьшается, и пластическая деформация затухает. Именно поэтому для поддержания деформирования в породе необходимо увеличивать напряжения.

Пластическая деформация происходит без нарушения сплошности тела. Однако довольно часто пластичность, рассматриваемая в породах, не совпадает с понятием идеальной пластичности, так как, строго говоря, ряд явлений, вызывающих в породах остаточные деформации (обжатие, смятие, взаимное перемещение блоков), следует отнести к разрушающим (квази-пластичность).

Если связь между напряжением  $\sigma$  и относительной деформацией  $\epsilon$  в области пластической деформации выразить через некоторый коэффициент  $E' = f(\epsilon) \neq \text{const}$ , то  $E'$ , называемый секущим модулем деформации, будет находиться в пределах

$$E \geq E' \geq 0.$$

Предельный секущий модуль деформации — отношение прироста напряжений в пластической зоне (до момента разрушения породы) к полной пластической деформации

$$E_{\text{пл}} = (\sigma_{\text{сж}} - \sigma_E) / (\epsilon_p - \epsilon_E) = \text{tg } \alpha'' \quad (3.31)$$

называется модулем пластичности (рис. 3.9).

Для идеального пластического тела  $E_{\text{пл}} = 0$ .

Если на рис. 3.9 соединить прямой линией конечную точку графика (момент разрушения образца) с началом координат,

то тангенс образовавшегося угла  $\alpha'$  будет называться модулем полной деформации  $E_{\text{деф}}$ . Он равен отношению максимальных (разрушающих) напряжений  $\sigma_{\text{сж}}$  к полной относительной деформации образца  $\epsilon_p$

$$E_{\text{деф}} = \sigma_{\text{сж}} / \epsilon_p. \quad (3.32)$$

Рис. 3.9. К расчету параметров пластичности пород:  
 $\text{tg} \alpha$ ,  $\text{tg} \alpha'$ ,  $\text{tg} \alpha''$  — соответственно модули Юнга, полной деформации и пластичности

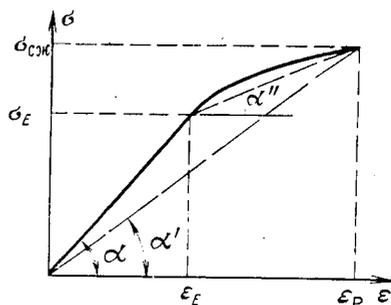
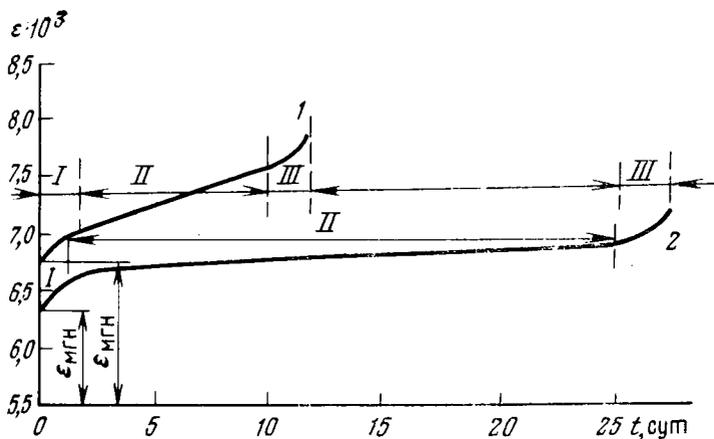


Рис. 3.10. График ползучести горных пород на примере образцов песчанистого сланца при напряжении, равном  $0,8 \sigma_{\text{сж}}$  (1) и  $0,7 \sigma_{\text{сж}}$  (2), где  $\sigma_{\text{сж}} = 56$  МПа ( $\epsilon_{\text{мгн}}$  — мгновенная деформация)



Пластичность горных пород зависит от их минерального состава.

Наличие жестких кварцевых зерен и полевого шпата в породе уменьшает ее пластичность.

В углях наблюдается зависимость пластичности от содержания в них углерода. При переходе от слабометаморфизованных углей к антрацитам их пластичность уменьшается в 30 раз.

Характерно, что повышение пластичности в породах сопровождается, как правило, снижением их модуля упругости. В то же время коэффициент Пуассона с увеличением пластичности пород растет.

Длительное действие нагрузок на породы приводит к изменению их напряженно-деформированного состояния. Если при этом возможно свободное перемещение частиц породы, наблюдается непрерывное деформирование ее. При ограниченной ве-

личине деформации породы в ней происходит снижение напряжений, несмотря на постоянные внешние нагрузки. Явления изменения деформаций и напряжений в горных породах под действием нагрузки во времени описываются реологическими свойствами.

Постепенный рост деформаций во времени называется ползучестью пород (крипом).

Явление ползучести — это то же пластическое деформирование горной породы, только происходящее во времени. Ползучесть может проявляться даже при напряжениях, не превышающих предела упругости.

Кривая ползучести состоит из трех отрезков, соответствующих трем основным стадиям деформации (рис. 3.10): *I* — неустановившейся ползучести породы; *II* — установившемуся состоянию пластического течения при постоянной нагрузке; *III* — возрастанию скорости деформации и наступлению момента разрушения породы.

Скорость деформации породы является суммой скоростей упругой  $\epsilon_E$  и пластической  $\epsilon_n$  деформаций

$$d\epsilon/dt = d\epsilon_E/dt + d\epsilon_n/dt. \quad (3.33)$$

Так как  $\epsilon_E = \sigma/E$ , а скорость пластического течения  $d\epsilon_n/dt$  прямо пропорциональна величине приложенных напряжений

$$\sigma = \eta d\epsilon_n/dt, \quad (3.34)$$

где  $\eta$  — коэффициент вязкости  $\eta = Et_0$ ;  $t_0$  — постоянная, выраженная в единицах времени,

$$d\epsilon/dt = d\sigma/(Edt) + \sigma/\eta. \quad (3.35)$$

Уравнение (3.35) называется уравнением ползучести. Если  $d\sigma/dt = 0$ , т. е. не происходит изменения напряжений во времени, то

$$d\epsilon/dt = \sigma/\eta. \quad (3.36)$$

Следовательно, в этих условиях происходит непрерывное деформирование породы с определенной скоростью, зависящей от  $\sigma$ .

Деформация ползучести горных пород в любой момент времени  $t$  зависит от предыстории нагружения. Это свойство называется наследственностью. Согласно теории наследственности, если в момент времени  $\tau$  приложено напряжение  $\sigma(\tau)$ , действующее в течение времени  $d\tau$ , то деформация  $d\epsilon_n$  к моменту времени  $t$  будет зависеть от  $\sigma(\tau)$  и разности  $(t - \tau)$ .

Исходя из этого второй член в уравнении (3.35) может быть записан следующим образом:

$$\sigma(\tau) L(t - \tau). \quad (3.37)$$

Функция  $L(t - \tau)$  называется ядром ползучести, вид ее зависит от типа породы.

Предложен степенной вид ядра ползучести

$$L(t-\tau) = \delta(t-\tau)^{-\alpha}, \quad (3.38)$$

где  $\delta > 0$  и  $\alpha > 0$  — параметры ползучести. Для пород  $\alpha \approx 0,7$ ,  $\delta \approx (2 \div 5) \cdot 10^{-3}$ .

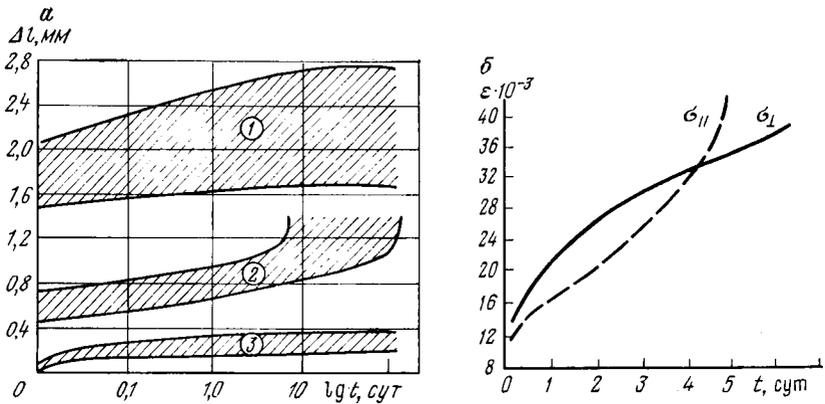


Рис. 3.11. Характерные области кривых ползучести:

*a* — осадочных горных пород при нагрузках 0,7 и 0,9 от разрушающих; 1 — позднеледниковые глины; 2 — послеледниковые глины; 3 — аркозовые песчаники Кривого Рога; *б* — сидерита перпендикулярно  $\sigma_{\perp}$  и вдоль  $\sigma_{\parallel}$  слоистости

Возможен экспоненциальный вид ядра ползучести

$$L(t-\tau) = ae^{-b(t-\tau)}, \quad (3.39)$$

где *a* и *b* — некоторые параметры ползучести.

Значительная ползучесть присуща глинам, аргиллитам, глинистым сланцам. Криворожские породы (кварцсерпичитовый сланец, гидроматитовый роговик, аркозовый песчаник) обладают ползучестью, составляющей в среднем 20—35 % первоначальной мгновенной упругой деформации, причем наиболее значительные деформации происходят в течение первых 1,5—2 сут нагружения (рис. 3.11).

Ползучесть зависит от направления приложения нагрузки. Так, наибольшие деформации ползучести  $\epsilon_{п\perp}$  наблюдаются при нагрузках, приложенных перпендикулярно к слоистости, причем отношение  $\epsilon_{п\perp}/\epsilon_{п\parallel}$  достигает 1,5 (см. рис. 3.11, б). Как известно, упругие деформации также больше в этом направлении.

Если в уравнении (3.35) принять  $de/dt = 0$ , что означает зафиксированные в образце и не изменяющиеся во времени деформации, то решение уравнения дает следующее выражение

$$d\sigma/dt = -\sigma/t_0, \quad (3.40)$$

т. е. должно наблюдаться постепенное снижение напряжений во времени.

Такое явление, обратное ползучести,—постепенное снижение напряжений в породе при постоянной ее деформации называется релаксацией напряжений. Релаксация представляет собой ползучесть нарастающей пластической деформации.

Таким образом, ползучесть и релаксация — два проявления одного и того же реологического процесса.

При релаксации возникшие в первый момент упругие деформации постепенно переходят в пластические.

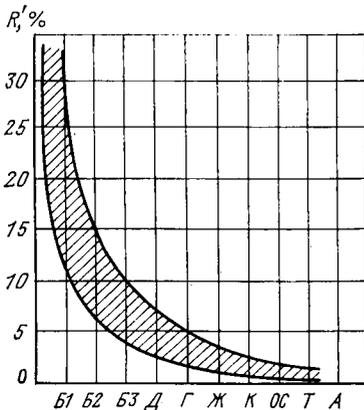
В результате после снятия нагрузки образец не восстанавливает своей первоначальной формы даже тогда, когда исходные напряжения не превышают предел упругости породы.

Установлено, что во многих случаях связь между  $\sigma$  и  $t$  носит экспоненциальный характер

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau_0}, \quad (3.41)$$

где  $\sigma_0$  — первоначальные напряжения в образце;  $\tau_0$  — период релаксации, время, в течение ко-

Рис. 3.12. Значения относительного показателя падения напряжений  $R'$  за 16 ч для углей различных марок



торого напряжения в породе убывают в  $e$  раз. Период релаксации большинства горных пород очень велик. Так, у скальных грунтов он составляет 100—1000 лет, у стекла — 100 лет, в то время как у воды  $\tau_0 \approx 10^{-11}$  с. Поэтому на практике для характеристики реологических свойств пород при меньшей длительности нагружения часто используют относительный показатель падения напряжений в породе  $R'$  (%) за определенный период  $t$  (неделю, месяц и т. д.) (рис. 3.12).

$$R' = [(\sigma_0 - \sigma_t) / \sigma_t] 100. \quad (3.42)$$

### 3.7. ПРОЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Прочность породы определяется величиной критических напряжений, при которых происходит ее разрушение. Эти напряжения различны для разных пород и для разных видов приложенных нагрузок. Они носят названия пределов прочности. Различают пределы прочности пород при сжатии  $\sigma_{сж}$ , растяжении  $\sigma_r$ , сдвиге  $\tau_{сдв}$ , изгибе  $\sigma_{изг}$  и т. д.

Разрушение — это разрыв связей между атомами и ионами в кристаллической решетке. Величины сил, необходимых для разрыва, зависят от типа межатомных связей и строения кристаллической решетки вещества.

Расчеты показывают, что разрыв межатомных связей в какой-либо плоскости кристалла произойдет, если значения касательных и нормальных напряжений в этой плоскости будут иметь порядок соответственно  $G/2\pi$  и  $0,1 E$ . Исходя из этого для пород  $\sigma_p$  должен быть примерно равен  $10^4$  МПа.

Однако реальные значения предела прочности при растяжении в сотни и тысячи раз меньше теоретических (для пород  $\sigma_p$  составляет порядка 10 МПа).

Причина таких расхождений кроется в том, что реальные тела обладают множеством различных дефектов. В кристалле — это точечные (вакансии) и линейные (дислокации) искажения кристаллической решетки. В породе — это границы зерен — плоскостные и поры — объемные искажения и нарушения строения породы.

В зависимости от масштаба разрушения породы преобладающее значение имеют те или другие виды дефектов.

Существует несколько масштабов (уровней) разрушения пород. Мегаскопический уровень разрушения характерен для взрывания массивов пород, сдвижений и обвалов их. В этом случае наиболее сильно на разрушаемости сказываются крупные трещины (см. разд. III).

Более мелкие трещины, поры, контакты между агрегатами зерен предопределяют разрушение макроскопическое — выемочными агрегатами (экскаваторами, комбайнами), буровым инструментом.

Микроскопический уровень разрушения характерен для измельчения полезных ископаемых в мельницах и, частично, при бурении скважин. На этой стадии происходит разрыв связей в кристаллах и зернах. При этом существенную роль играют дислокации и вакансии.

Плотность дислокаций в кристаллах высока и может составлять до  $10^{12}$  на  $1 \text{ см}^2$ . Как правило, увеличение плотности дислокаций ослабляет минералы, вызывает в них пластические деформации. Вместе с тем перенасыщенность дислокациями может привести и к упрочнению кристаллов (рис. 3.13) за счет запутывания и закрепления концов дислокаций и исчезновения свободных плоскостей скольжения.

Разрушение горных пород имеет либо хрупкий, либо пластичный характер. При хрупком разрушении происходит одновременный отрыв атомов друг от друга по всей плоскости разрыва, на что требуются большие внешние усилия, чем при пластическом.

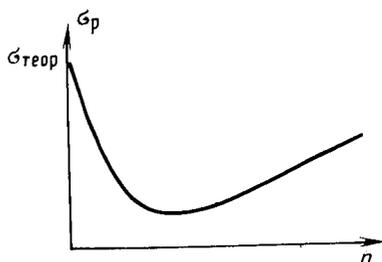


Рис. 3.13. Зависимость предела прочности кристалла при растяжении  $\sigma_p$  от числа дислокаций  $n$  ( $\sigma_{\text{теор}}$  — теоретическая прочность)

Мелкие трещины, поры, неоднородности, плоскости ослабления предопределяют преобладающий хрупкий характер разрушения горных пород, поэтому механизм их разрушения может быть описан посредством теории хрупкого разрушения, разработанной А. Гриффитсом, согласно которой решаю-

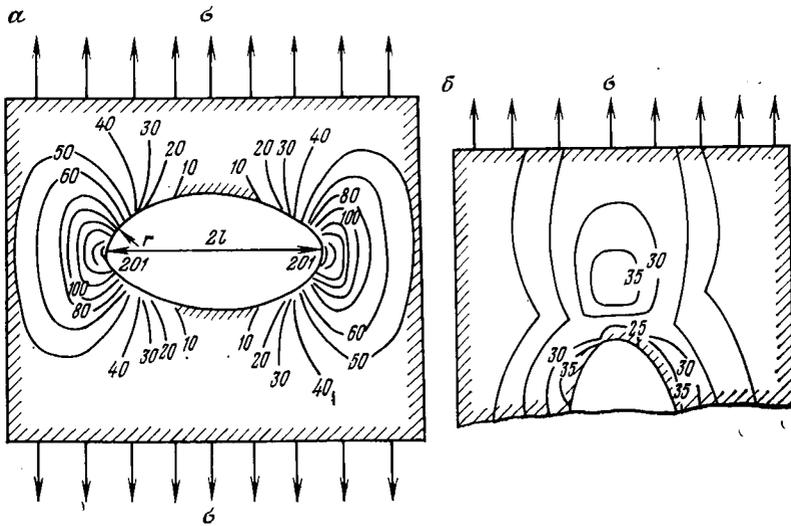


Рис. 3.14. Концентрация напряжений на краях трещины длиной  $2l$  и с радиусом закругления  $r$  (числа указывают кратность превышения напряжений  $\sigma'$  над  $\sigma$ ):

*a* — при нагружении перпендикулярно трещине; *б* — при нагружении параллельно ей

щее значение для начала разрушения имеют критические трещины в объеме твердого тела.

На краях трещины обычно возникает концентрация напряжений, значительно превышающая среднее напряжение  $\sigma$ . Так, при длине трещины  $2l$  и радиусе ее закругления на конце  $r$  (рис. 3.14) напряжения на краю трещины

$$\sigma' = 2\sigma \sqrt{l/r}. \quad (3.43)$$

Как только  $\sigma'$  станет больше предела прочности породы при растяжении в данной точке, трещина начнет развиваться, преодолевая при этом молекулярные силы сцепления (производя работу  $A_s$ , пропорциональную удельной поверхностной энергии  $e_s$  данного тела):

$$A_s = 4le_s, \quad (3.44)$$

где  $4l$  — относительная площадь двух поверхностей трещины, приходящаяся на единицу поперечного размера породы.

Упругая энергия, запасенная в породе в результате действия внешней нагрузки и необходимая для образования трещины,

$$A_E = \sigma^2 \pi l^2 / E. \quad (3.45)$$

Трещина будет расти, если

$$\partial A_E / \partial l \geq \partial A_s / \partial l. \quad (3.46)$$

Таблица 3.3. Соотношение пределов прочности при сжатии и растяжении (по А. М. Викторову)

Порода	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$s_{лр}^{\sigma_p}$ , МПа	$K_{вар}^{\sigma_p}$ , %	$\sigma_{сж} / \sigma_p$
Гранит	141	11,0	1,9	18	13
Гранито-гнейс	192	9,0	2,3	26	21
Порфирит	224	17,5	4,4	26	13
Песчаник кварцевый	164	6,6	2,9	44	26
Известняк брекчиевидный	28	3,0	0,6	18	9

Отсюда

$$\sigma_p = \sqrt{2Ee_s / \pi l}. \quad (3.47)$$

При действии сжимающей нагрузки трещины смыкаются и на их поверхности появляются силы трения. В результате  $\sigma_{сж} > \sigma_p$  и их отношение подчиняется уравнению

$$\sigma_{сж} / \sigma_p = 4 [(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2} - \operatorname{tg} \varphi]^{-1}, \quad (3.48)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi$  — коэффициент внутреннего трения ( $\operatorname{tg} \varphi = 0,2 \div 2$ ).

Таким образом, на основании теории хрупкого разрушения получаем  $\sigma_{сж} / \sigma_p = 5 \div 17$ , что в ряде случаев близко к значениям, определяемым экспериментально (табл. 3.3).

Уравнение Гриффитса можно распространить на тела, разрушающиеся в зоне пластической деформации,

$$\sigma_p = \sqrt{2E(e_{sy} - e_{сп}) / (\pi l)}, \quad (3.49)$$

где  $e_{sy}$  и  $e_{сп}$  — удельная поверхностная энергия соответственно упругого и пластического разрушения.

Кинетическая (термофлуктуационная) теория разрушения твердых тел, разработанная акад. С. Н. Журковым, построена на том, что разрушение не является каким-то критическим состоянием тела. В соответствии с этой теорией в твердых телах непрерывно идет процесс накопления повреждений (старение), которое приводит к полному разрушению тел. Приложенные извне нагрузки и соответствующие напряжения  $\sigma$  лишь уменьшают длительность  $t$  существования тела в неразу-

шенном состоянии согласно следующему экспоненциальному уравнению:

$$t = t_0 \exp [(u_0 - \sigma V) / kT], \quad (3.50)$$

где  $t_0$  — константа, совпадающая по порядку с периодом колебаний атомов и не зависящая от химического состава и структуры тела ( $t_0 \approx 10^{-12}$  с);  $u_0$  — энергия активации процесса разрушения, структурно-нечувствительная величина (для гранитов  $u_0 \approx 2,9 \cdot 10^{-19}$  Дж; для кварцитов  $u_0 = 5,8 \cdot 10^{-19}$  Дж);  $V$  — активационный объем, зависящий от структуры тела и составляющий  $10^3 \div 10^4$  атомных объемов (для гранитов  $V = 1,5 \cdot 10^{-27}$  м<sup>3</sup>, для кварцитов  $V = 1,9 \cdot 10^{-27}$  м<sup>3</sup>;  $kT$  — мера энергии тепловых флуктуаций;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура тела.

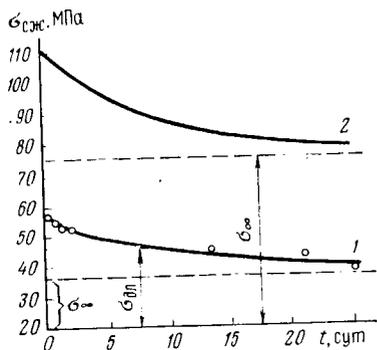


Рис. 3.15. Кривые длительной прочности песчанистого сланца Донбасса (1) и известняка (2)

Отсюда

$$\sigma_p = (u_0 - kT \ln t/t_0) / V, \quad (3.51)$$

т. е. предел прочности зависит от параметров  $u_0$  и  $V$ , температуры тела и длительности действия на него нагрузки.

Эксперименты, проведенные на породах, подтверждают снижение прочности с увеличением длительности действия нагрузки (рис. 3.15).

Прочность пород, соответствующая той или иной длительности воздействия нагрузки, называется их длительной (текущей) прочностью  $\sigma_{дл}$ . С увеличением времени действия нагрузки величина  $\sigma_{дл}$  падает по кривой, асимптотически приближаясь к некоторому предельному значению, называемому пределом длительной прочностью  $\sigma_{\infty}$  (см. рис. 3.15). Для ряда глин и мергелей Курской магнитной аномалии  $\sigma_{\infty} = 0,5 \sigma_{сж}$ . Для других пород предел длительной прочностью  $\sigma_{\infty} = (0,7 \div 0,8) \sigma_{сж}$  (табл. 3.4).

Между длительной прочностью глин и временем приложения нагрузки  $t$  установлена следующая эмпирическая зависимость:

$$\sigma_{дл} = \sigma_{сж} \ln B/t, \quad (3.52)$$

где  $B$  — константа, характеризующая стойкость породы.

Отношение мгновенного предела прочности при сжатии к некоторому значению длительной прочности называется коэффициентом расслабления (табл. 3.5).

Так как разрушение пород сопровождается развитием трещин, смещением отдельных частей относительно друг друга,

т. е. их разуплотнением, в процессе нагружения породы наблюдают возрастание объема деформируемого образца ее.

Вызванный деформированием прирост объема породы по отношению к его упругому изменению называется дилатансией (рис. 3.16).

Дилатансия, предшествующая хрупкому разрушению породы, начинается при напряжениях  $\sigma \geq 0,4\sigma_{сж}$  и соизмерима с упругими изменениями объема (с обратным знаком).

Таблица 3.4. Значения длительной прочности горных пород

Порода	$\sigma_{\infty}$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_{\infty}/\sigma_{сж}$
Известняк	28	38	0,74
Песчаник	49	76	0,64
Каменная соль	14—22	20—35	0,60—0,75
Глинистый сланец	15—18	30—40	0,5—0,65
Мергель глинистый КМА	2,1	3,1	0,68—0,86
Глины разные	1,0	1,3	0,37—0,81
Мел	—	—	0,62—0,70
Мелоподобные породы КМА	—	—	0,36—0,52

Таблица 3.5. Коэффициенты расслабления некоторых пород

Порода	Мгновенный предел прочности, МПа	Время действия нагрузки	Длительная прочность, МПа	Коэффициент расслабления
Глина	—	1 мес	—	1,5
Песчаник	15,5	48 ч	> 8,6	1,8
Бетон	—	48 ч	—	1,67

Дилатансия при пластическом деформировании начинает проявляться за пределом текучести и достигает значений, существенно превышающих величины упругих деформаций.

Величина дилатансии зависит также от длительности действия нагрузок. С увеличением времени приложения нагрузки наблюдается более резкое увеличение объема породы, предшествующее разрушению (см. рис. 3.16, б).

Для оценки прочности горных пород в случае сложнапряженного состояния кроме пределов прочности при одноосном нагружении используют дополнительные критерии, которые устанавливаются в зависимости от принятой теории прочности твердых тел.

Так, при расчете процессов с преобладанием хрупкого разрушения пород можно использовать известную теорию максимальных деформаций Сен-Венана, согласно которой разрушение материала наступит тогда, когда наибольшие относитель-

ные деформации станут равными их предельному значению при простом сжатии.

Для оценки разрушения пластичных пород можно применить теорию максимальных касательных напряжений (теорию Кулона), в соответствии с которой разрушение наступит при достижении  $\tau$  критического значения  $\tau_0$ .

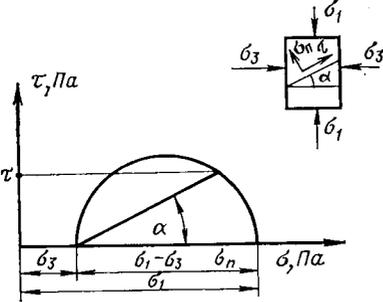
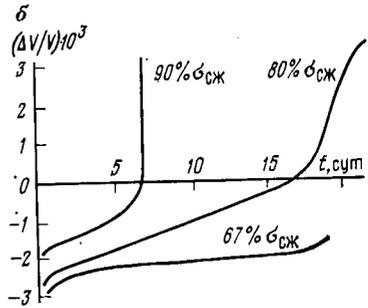
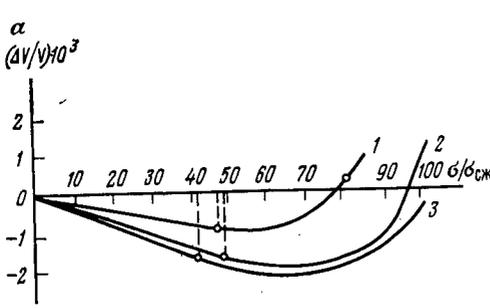


Рис. 3.16. Дилатансия в породах: а — гнейсе (1), базальте (2) и габбро (3) с нагружением; б — песчанистом сланце во времени при различных значениях нагрузок ( $\sigma_{сж} = 55$  МПа)

Рис. 3.17. Взаимосвязь между нормальными и касательными напряжениями в породе

Применительно к горным породам наибольшее распространение получила теория прочности Мора, основанная на зависимости между касательными и нормальными напряжениями в каждой точке тела, находящегося в сложном напряженном состоянии.

Согласно теории Мора разрушение наступает тогда, когда либо касательные напряжения  $\tau$  превысят определенное предельное значение  $\tau_{кр}$ , величина которого тем больше, чем больше нормальные напряжения, действующие на образец, либо при  $\tau=0$  нормальные растягивающие напряжения превысят определенный предел, равный  $\sigma_r$ .

Графически эта зависимость между предельными нормальными и касательными напряжениями изображается в виде параболы. Она может быть построена для каждого типа породы по результатам определения ряда прочностных параметров ее.

Известно, что в любой плоскости тела (см. разд. 3.3) при нагружении породы возникают касательные и нормальные напряжения, которые взаимосвязаны и могут быть рассчитаны.

Так, если образец находится в плоском напряженном состоянии (большее  $\sigma_1$  и меньшее  $\sigma_3$  напряжения), то в плоскости под углом  $\alpha$  (рис. 3.17) будут действовать напряжения:

нормальные

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha; \quad (3.53)$$

касательные

$$\tau = 0,5 (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha. \quad (3.54)$$

Связь между  $\sigma_n$  и  $\tau$  может быть представлена графически с помощью так называемых кругов напряжений, которые строятся следующим образом. По оси абсцисс откладываются максимальное и минимальное значения нормальных напряжений, действующих на образец; на разности отрезков, как на диаметре, строят круг.

Значения касательного и нормального напряжений в любой точке образца могут быть найдены, если задан угол плоскости, в которой определяются напряжения. Под этим углом из точки пересечения окружности с абсциссой проводят прямую до ее пересечения с окружностью. Ордината точки пересечения окружности с прямой численно равна значению отыскиваемых касательных напряжений, абсцисса — значению нормальных напряжений.

Каждому частному значению напряженного состояния соответствует свой круг напряжений.

Если горная порода подвергается одноосному ( $\sigma_3=0$ ) сжатию вплоть до момента разрушения, то для данного случая также можно построить круг напряжений, отложив на оси абсцисс значения  $\sigma_1 = \sigma_{сж}$ .

Поскольку этот круг для данного напряженного состояния является максимальным, его называют предельным. На этом графике можно таким же образом построить предельные круги напряжений для  $\sigma_p$  и  $\tau_{сдв}$ , а также для пределов прочности  $\sigma_{сж}'$  и  $\sigma_{сж}''$ , определенных в сложноподвижном состоянии (при  $\sigma_3 > 0$ ). В результате получают семейство кругов напряжений. Очевидно, что любое напряженное состояние породы, характеризуемое точкой на графике, лежащей вне этого семейства, является разрушающим для данной породы и наоборот. Поэтому, проведя огибающую этих кругов напряжений, получают кривую, характеризующую предельное напряженное состояние тела в момент его разрушения (рис. 3.18).

Огибающую предельных кругов напряжений называют паспортом прочности горных пород. Теория Мора наиболее полно согласуется с экспериментальными данными о прочности образцов горных пород.

Паспорт прочности может быть представлен аналитически в виде параболы

$$\tau = \sqrt{(\sigma_p + \sigma) [2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{сж})} + \sigma_{сж}]} \quad (3.55)$$

или (на некотором участке вблизи оси ординат) в виде прямой линии

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.56)$$

где  $C$  — предел прочности породы при срезе в условиях отсутствия нормальных напряжений, называемый сцеплением

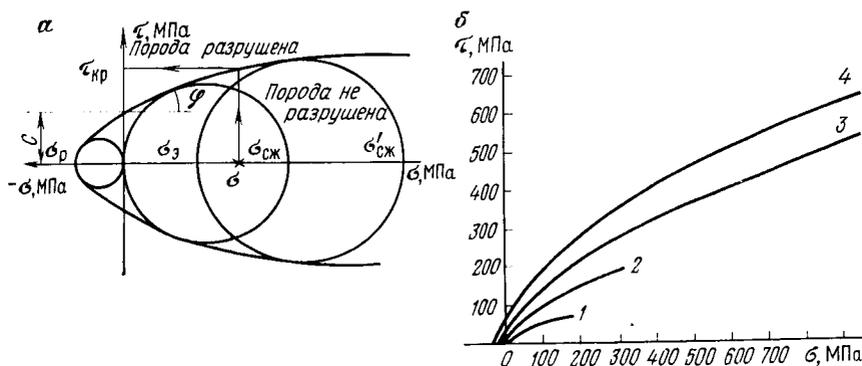


Рис. 3.18. Построение паспорта прочности (а) и примеры паспортов прочности различных пород (б):  
1 — уголь (Кизеловский бассейн); 2 — алевролит (Донбасс); 3 — песчаник (Донбасс); 4 — диорит

породы (см. рис. 3.18);  $\varphi$  — угол внутреннего трения;  $\operatorname{tg} \varphi$  — коэффициент внутреннего трения, коэффициент пропорциональности между приращениями нормальных и касательных разрушающих напряжений.

Зная пределы прочности пород  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_p$ , можно вычислить  $\varphi$  и  $C$ .

Так, приняв за основу параболическое описание огибающей кругов Мора, для плотных пород можно вывести следующие уравнения:

$$C = B \sigma_p; \quad (3.57)$$

$$\varphi = 2 [\arctg(B + 2)/2 - 45^\circ],$$

где

$$B = \sqrt{\sigma_{сж}/\sigma_p + 1} - 1. \quad (3.58)$$

Рис. 3.19. Взаимная связь между относительным сцеплением  $C/\sigma_p$  (1), углом внутреннего трения  $\varphi$  (2) и отношением  $\sigma_{сж}/\sigma_p$

Обычно с увеличением отношения  $\sigma_{сж}/\sigma_p$  возрастают  $C$  и угол  $\varphi$  (рис. 3.19).

### 3.8. ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ПОРОД НА ИХ ПРОЧНОСТЬ

Из породообразующих минералов наибольшей прочностью обладает кварц. По данным исследователей, предел прочности при сжатии кварца превышает 500 МПа, полевых шпатов, пироксенов, авгита, роговой обманки, оливина и других железисто-магнезиальных минералов — 200—500 МПа. Кальцит имеет  $\sigma_{сж}$  около 20 МПа. Поэтому большей прочностью обладают кварцсодержащие породы, что подтверждается графиком (рис. 3.20, а), на котором область максимума  $\sigma_{сж}$  пород соответствует плотности кварца ( $2,65 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). Наоборот, если в состав горной породы входят малопрочные минералы (кальцит, слюда), то ее предел прочности значительно снижается.  $\sigma_{сж}$  известняков также уменьшается при переходе от кремнистых к глинистым (рис. 3.20, б).

Прочностные характеристики пород очень чувствительны к их структуре. Прочность сцементированных пород в первую очередь определяется прочностью и качеством цемента (матрицы), а не заполнителя.

Наличие более прочных несжимаемых зерен в менее прочной матрице иногда не только не упрочняет ее, а наоборот, способствует более легкому разрушению породы. На границе включения и матрицы под действием внешних нагрузок, вызвавших средние напряжения  $\sigma$ , возникают касательные напряжения  $\tau_{\max}$ , зависящие от соотношения модулей объемного сжатия включения  $K_v$  и матрицы  $K_m$ .

$$\tau_{\max} \approx 0,5\sigma (1 - K_v/K_m). \quad (3.59)$$

Так, если в ортоклазе имеются зерна кварца, то  $K_v/K_m = 2,63$  и соответственно  $\tau_{\max} = -0,815\sigma$ .

Наибольшие значения предела прочности при сжатии имеют плотные мелкозернистые кварциты и нефриты: 500—600 МПа. Значительной прочностью (более 350 МПа) обладают плотные мелкозернистые граниты, несколько меньшей — габбро, диабазы и крупнозернистые граниты. Прочность углей при сжатии изменяется в зависимости от степени их метаморфизма от 1 МПа (коксовые угли) до 35 МПа (антрациты).

Пределы прочности при растяжении для большинства пород не превышают 20 МПа и составляют примерно (0,1—0,02)  $\sigma_{сж}$  (табл. 3.6). Наибольшая прочность при растяжении характерна для кварцитов и малопористых перекристаллизованных мелкозернистых мраморов.

Пределы прочности пород при сдвиге, изгибе и других видах деформаций всегда меньше  $\sigma_{сж}$  и больше  $\sigma_r$ , но более близки к последнему (см. табл. 3.6). Так,  $\tau_{сдв}$  гранитов доходит до 38 МПа, базальтов — до 30—50 МПа. Сцепление горных пород находится в пределах 1—100 МПа (табл. 3.7). В углях  $C = (10^{-2}—1)$  МПа.

Угол внутреннего трения в породах наиболее часто находится в пределах 20—60°, в углях 30—40° (см. табл. 3.7). Угол внутреннего трения уменьшается с увеличением содержания в породе мелких фракций, количества глинистых частиц (особенно монтмориллонита), так как это способствует взаимному скольжению одной части породы относительно другой.

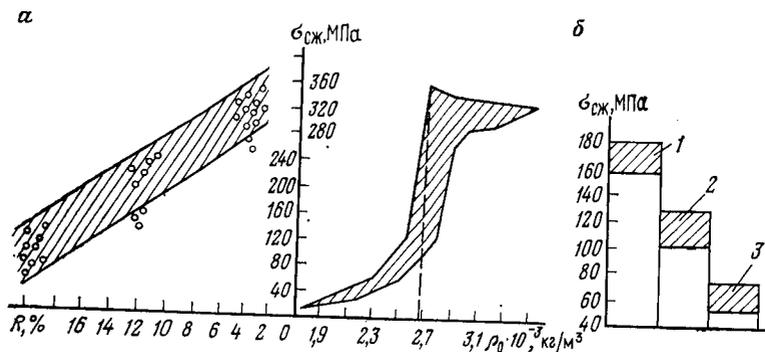


Рис. 3.20. Зависимость предела прочности пород при сжатии  $\sigma_{сж}$  от плотности магматических пород  $\rho_0$ , содержания слюдяного цемента  $R$  в кварцитах и кварцито-песчаниках (а) и состава мелкозернистых известняков (б): 1 — кремнистые известняки; 2 — кремнисто-глинистые; 3 — глинистые

Основное влияние на прочность пород оказывают их пористость и трещиноватость. В результате породы даже совершенно различного состава могут иметь одну и ту же прочность, и наоборот. Так,  $\sigma_{сж}$  микроклиновых гранитов при увеличении пористости и трещиноватости с 0,6 до 1 % снижается с 240 до 180 МПа, при увеличении  $R$  до 3 %  $\sigma_{сж}$  снижается до 110 МПа. Соответственно уменьшаются  $\varphi$  с 62 до 41°,  $C$  — с 1,3 до 0,1 МПа.

Экспериментальные данные показывают, что при значениях пористости до 20 % пределы прочности пород при сжатии подчиняются следующей квадратичной зависимости от пористости (рис. 3.21, а):

$$\sigma_{сж} = \sigma_{сж 0} (1 - a'P)^2, \quad (3.60)$$

где  $a' = 1,5 \div 4$  — параметр формы порового пространства;  $\sigma_{сж 0}$  — предел прочности минеральной фазы.

В частности, для известняков Коробчеевского месторождения

$$\sigma_{сж} = 1,22 \cdot 10^8 (1 - 2,7P)^2. \quad (3.61)$$

Существенное влияние на прочность пород оказывает также слоистость.

При растяжении поперек слоев порода будет разрушаться по слабому прослойку. При растяжении вдоль слоев прочные

слои воспринимают на себя часть нагрузки и увеличивают общую сопротивляемость породы (табл. 3.8).

Следовательно,

$$k_{ан}^{\sigma_p} = \sigma_{p\parallel} / \sigma_{p\perp} \geq 1. \quad (3.62)$$

Таблица 3.6. Относительные значения прочностных параметров пород

Порода	$\sigma_p / \sigma_{сж}$	$\sigma_{изг} / \sigma_{сж}$	$\tau_{сдв} / \sigma_{сж}$
Гранит	0,02—0,04	0,08	0,09
Песчаник	0,02—0,2	0,06—0,2	0,1—0,12
Известняк	0,04—0,1	0,08—0,1	0,15

Таблица 3.7. Величины сцепления и угла внутреннего трения ряда пород

Порода	C, МПа	$\phi$ , градус
Уголь Кузбасса	4,6—10	35—37
Аргиллит Кузбасса	18—23	33—34
Алевролит Кузбасса	23—26	27—32
Бурые угли ирша-бородинские	4—6	35—37
Диорит СС ГОКа	68	33
Роговик СС ГОКа	85	35
Сиенит порфиновый СС ГОКа	45	31,5
Базальт пикритовый	27	34

Таблица 3.8. Анизотропия пределов прочности при растяжении горных пород Западного Донбасса (по Г. Т. Киричанскому)

Порода	$\sigma_p^{\parallel}$ , МПа	$\sigma_p^{\perp}$ , МПа
Аргиллит	2,9 (от 1,2 до 4,7)	0,9 (от 0,3 до 1,5)
Алевролит	2,9 (от 1 до 5,1)	1,1 (от 0,3 до 2)
Песчаник	3,5 (от 1,3 до 6,7)	1,8 (от 0,3 до 4,0)

Пределы прочности пород при сжатии поперек слоистости в подавляющем большинстве случаев больше, чем вдоль слоистости (рис. 3.22). Если сжимающие усилия направлены перпендикулярно к слоям, то слабые тонкие прослойки удерживаются от раскалывания более прочными слоями и в целом  $\sigma_{сж}$  образца превышает  $\sigma_{сж}$  наиболее слабого прослойка.

При сдавливании образца вдоль слоистости прочность породы определяется главным образом прочностью наиболее сла-

бых прослоек, по которым и происходит раскол породы. Поэтому коэффициент анизотропии в этом случае

$$k_{ан}^{\sigma_{сж}} = \sigma_{сж \parallel} / \sigma_{сж \perp} \leq 1. \quad (3.63)$$

Отличие  $\sigma_{сж \parallel}$  от  $\sigma_{сж \perp}$  достигает 50—70 %.

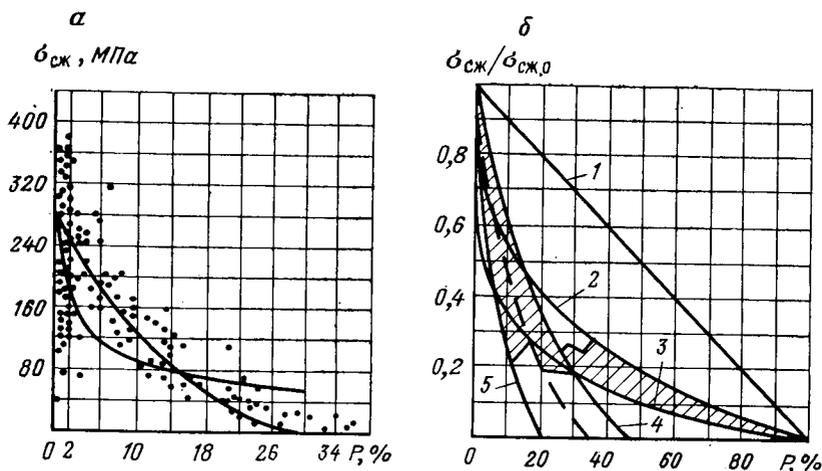


Рис. 3.21. Зависимости предела прочности при сжатии  $\sigma_{сж}$  от пористости  $P$ : а — экспериментальная корреляционная зависимость для группы пород:  $\sigma_{сж} = 2.77 \times 10^3 (1 - 3.4P)^2$ ; б — сравнение различных эмпирических зависимостей: 1 —  $\sigma_{сж} = \sigma_{сж,0}(1 - P)$ ; 2 —  $\sigma_{сж} = \sigma_{сж,0}(1 - P^{1/2})$ ; 3 —  $\sigma_{сж} = \sigma_{сж,0}(1 - P^{1/6})$ ; 4 —  $\sigma_{сж} = \sigma_{сж,0}(1 - 2P)^2$ ; 5 —  $\sigma_{сж} = \sigma_{сж,0}(1 - 5P)^2$ . Заштрихована область наибольшего количества экспериментальных данных

Порфириовидная структура повышает прочность пород в случае, если включения малы, а основная масса тонкокристаллическая и сплошная. Мостовая структура (взаимное прорастание зерен) также увеличивает, а стекловидные массы уменьшают прочность пород.

С увеличением размеров зерен прочность равномерно-зернистых горных пород (при прочих равных условиях) падает (рис. 3.23). Акад. П. А. Ребиндером установлено, что чем меньше частицы, слагающие твердое вещество, тем меньше микротрещиноватость и другие нарушения, которые, как известно, являются основной причиной разрушения твердого тела.

Эмпирическое уравнение, описывающее эту зависимость, может быть представлено в следующем виде:

$$\sigma_{сж} = \sigma_{сж,0} + kd^{-b}, \quad (3.64)$$

где  $\sigma_{сж,0}$  — предел прочности монокристалла, условный минимальный предел прочности породы при  $d = \infty$ ;  $d$  — средний размер зерен, мкм;  $b$  — показатель, находящийся в пределах 0,2 ÷

0,9 (в среднем  $b=0,5$ );  $k$  — некоторая константа, имеющая порядок 10 МПа.

Изменение размеров зерен от 1 до 100 мкм снижает прочность пород почти в 2 раза. При дальнейшем же росте размеров зерен изменение прочности крайне незначительно.

Порода	$\sigma_{сж}^{\text{одн} \parallel}$ МПа	$\sigma_{сж}^{\text{одн} \perp}$ МПа	$\sigma_{сж}^{\text{двух} \perp}$ МПа	$\sigma_{сж}^{\text{одн} \parallel \text{ дл}}$ МПа	$\sigma_{сж}^{\text{одн} \perp \text{ дл}}$ МПа
Сильвинит красный	30	36	69	8	10
Сильвинит пестрый	20	27	52	6	8
Карналлит	14	16	31	5	6
Каменная соль	30	36	78	8	11

Рис. 3.22. Сравнение пределов прочности при сжатии соляных горных пород Верхнекамского калийного месторождения (по данным В. Г. Зильбершмидта):

$\sigma_{сж}^{\text{одн} \parallel}$ ,  $\sigma_{сж}^{\text{одн} \perp}$  — пределы прочности при одноосном нагружении вдоль и поперек слоистости;  $\sigma_{сж}^{\text{одн} \parallel \text{ дл}}$ ,  $\sigma_{сж}^{\text{одн} \perp \text{ дл}}$  — длительные пределы прочности при одноосном нагружении вдоль и поперек слоистости;  $\sigma_{сж}^{\text{двух} \perp}$  — предел прочности при двuosном нагружении поперек слоистости

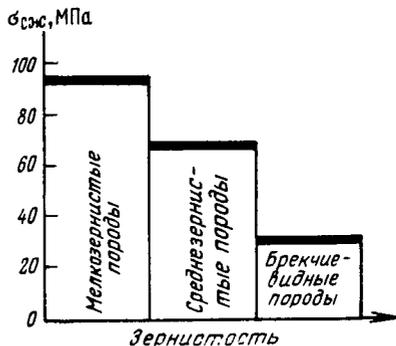


Рис. 3.23. Зависимость  $\sigma_{сж}$  кристаллических известняков от их строения

### 3.9. АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Акустические свойства характеризуют закономерности распространения в породах знакопеременных упругих деформаций (упругих колебаний).

Процесс распространения упругих колебаний описывается волновым уравнением

$$v^2 \nabla^2 u = \partial^2 u / \partial t^2, \quad (3.65)$$

где  $\nabla^2$  — оператор Лапласа ( $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ );  $v$  — скорость распространения упругих колебаний;  $u$  — амплитуда упругого смещения частиц породы;  $t$  — время.

Упругие волны по частоте колебаний подразделяются на инфразвуковые — частотой до 20 Гц, звуковые — ча-

стотой 20—20 000 Гц, ультразвуковые — частотой более 20 кГц, гиперзвуковые — частотой более 1000 МГц.

В зависимости от вида упругих деформаций выделяют волны: продольные — распространение деформаций попеременного объемного сжатия и растяжения в веществе; поперечные — распространение упругих деформаций сдвига. Продольные волны распространяются в любой среде — газах, жидкостях и твердых телах, так как все вещества обладают упругим сопротивлением объемному сжатию. Поперечные волны присущи только твердым телам, ибо в жидкостях и газах сопротивление сдвигу практически отсутствует.

Эти два вида волн распространяются по всему объему породы и поэтому называются объемными.

Частицы на поверхности горной породы находятся в особом состоянии, так как встречают меньшее сопротивление своим перемещениям в сторону свободной поверхности. В результате на ней возникают плоские поверхностные волны, которые характеризуются движением частиц по эллипсоидальной траектории. Поверхностные волны присущи только твердым телам.

Основные акустические параметры пород — это скорости распространения упругих волн, коэффициент поглощения и волновое сопротивление. На контактах разных пород возникают явления отражения и преломления упругих волн, характеризующиеся соответствующими коэффициентами.

Обычно под скоростью волны понимают скорость распространения ее фронта. Фронт волны — это геометрическое место точек среды, в которых в рассматриваемый момент времени фаза волны имеет одно и то же значение.

Скорости распространения упругих волн в неограниченной абсолютно упругой изотропной среде можно определить по формулам, выведенным из волновых уравнений.

Так, скорость распространения продольной волны

$$v_P = \sqrt{E(1-\nu)/[\rho(1+\nu)(1-2\nu)]}. \quad (3.66)$$

Если  $\nu = 0,25$ ,  $v_P \approx 1,1\sqrt{E/\rho}$ .

Скорость распространения поперечной упругой волны

$$v_S = \sqrt{G/\rho} = \sqrt{E/[2\rho(1+\nu)]}. \quad (3.67)$$

Если  $\nu = 0,25$ , то  $v_L = 0,92$   $\nu = 0,25$ , то  $v_S \approx 0,63 \sqrt{E/\rho}$ .

Скорость распространения поверхностной волны

$$v_L = (0,87 + 1,12\nu) \sqrt{G/\rho} / (1 + \nu). \quad (3.68)$$

Если  $\nu = 0,25$ , то  $v_L = 0,92$   $v_S \approx 0,58 \sqrt{E/\rho}$ .

При этом всегда наблюдается следующее соотношение скоростей:  $v_P > v_S > v_L$ .

Скорость распространения продольной упругой волны в тонкой пластине породы

$$v_{пл} = \sqrt{E/[\rho(1-\nu)^2]}. \quad (3.69)$$

Если  $\nu = 0,25$ , то  $v_{пл} \approx 1,33 \sqrt{E/\rho}$ .

Наконец, скорость распространения упругой волны в тонком стержне породы

$$v_{ст} = \sqrt{E/\rho}. \quad (3.70)$$

Таким образом, скорость распространения упругих волн в горных породах определяется их упругими свойствами и плотностью. Она практически не зависит от частоты, что позволяет использовать для исследований любые частоты колебаний.

Отношение скоростей продольных и поперечных волн является только функцией коэффициента Пуассона

$$v_P/v_S = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}. \quad (3.71)$$

При изменении  $\nu$  от 0,1 до 0,45  $v_P/v_S$  возрастает от 1,5 до 3,3. Поэтому  $v_P/v_S$  в кристаллических изверженных и метаморфических породах в большинстве случаев находится в пределах от 1,7 до 1,9. Более значительные колебания  $v_P/v_S$  наблюдаются в осадочных породах — от 1,5 до 14. Это объясняется низкими сопротивлениями сдвигу, присущими малопрочным и пористым породам ( $\nu \rightarrow 0,5$ ). Очень велико  $v_P/v_S$  для глинистых пород.

Скорость распространения продольных волн возрастает с увеличением модуля Юнга пород и коэффициента Пуассона. Так, с изменением коэффициента Пуассона от 0,1 до 0,4 величина  $v_P$  возрастает примерно на 45%. Скорость распространения поперечных волн также возрастает с увеличением  $E$  и уменьшается с ростом  $\nu$  (примерно в 1,2 раза при изменении  $\nu$  от минимальных до максимальных значений). Поэтому максимальные скорости распространения упругих волн наблюдаются у малопористых пород, сложенных из темноцветных минералов, имеющих большой модуль Юнга. Так, например, скорость распространения продольных волн в габбро, перидотитах, базальтах, скарнах достигает 6000 — 7000 м/с.

Акустические свойства многофазных пород обусловлены акустическими параметрами фаз (табл. 3.9).

Поскольку пористость значительно снижает модуль Юнга пород, в пористых породах уменьшается и скорость распространения упругих волн  $v_P$  (рис. 3.24). Так, для доломитов установлена следующая корреляционная зависимость  $v_P$  (м/с) от пористости  $P$  (%):

$$v_P = 5430 - 107P. \quad (3.72)$$

В слоистых породах наблюдается различная скорость распространения упругих волн вдоль и поперек напластования, причем всегда  $v_{\parallel} > v_{\perp}$ .

Если порода состоит из слоев различных типов, то скорость распространения упругих волн перпендикулярно напластованию в простейшем случае (при равных удельных волновых сопротивлениях слоев) может быть вычислена по суммарному времени прохождения волн через все слои, что в итоге дает уравнение гармонического средневзвешенного (2.2).

Таблица 3.9. Акустические параметры слагающих горную породу фаз

Фаза	Плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость продольной волны $v_p$ , м/с	Коэффициент поглощения $\theta$ , м <sup>-1</sup>	
			при $f=10^2$ КГц	при $f=10^4$ КГц
Вода	1000	1485	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-1}$
Воздух	1,29	331	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^3$
Лед	918	3200—3300	—	—

Скорость распространения упругих волн вдоль слоев (при тех же условиях) вычисляется по уравнению (2.1).

Коэффициент анизотропии скоростей распространения упругих волн в осадочных породах составляет 1,1—1,3.

На скорость распространения волн оказывают влияние также размеры зерен, слагающих породу. Как правило, скорость распространения упругих колебаний в тонкозернистых породах больше.

Зависимость скорости распространения упругих волн от параметров строения пород показана на рис. 3.25, где представлены изолинии скоростей распространения продольных волн в керне пиррофиллита диаметром 50 мм. Как видно из рисунка, скорость в пределах сечения керна меняется в 1,4 раза (от 2,92 до 4,06 км/с).

Распространение упругих волн в горных породах так же, как и в любом веществе, сопровождается постепенным уменьшением их интенсивности (амплитуды) по мере удаления от источника излучения.

Интенсивность колебаний в большинстве случаев уменьшается по следующим причинам:

поглощение части энергии упругих колебаний породой и превращение ее в тепловую, обусловленную взаимным трением (неупругостью) частиц породы, совершающих колебательные движения;

рассеивание акустической энергии на неоднородностях породы (порах, трещинах, включениях и т. д.).

Амплитуда упругих колебаний  $u$ , характеризующая интенсивность колебаний, связана с пройденным волной расстоянием  $x$  экспоненциальной зависимостью

$$u = u_0 e^{-\theta x}, \quad (3.73)$$

где  $\theta$  — коэффициент поглощения, м<sup>-1</sup>.

Коэффициент поглощения упругих колебаний зависит как от свойств породы (упругих, тепловых и коэффициента внутреннего трения), так и от частоты колебаний.

Зависимость  $\theta$  от частоты колебаний  $f$  для большинства пород линейная. Линейность между  $\theta$  и  $f$  наблюдалась у каменного угля, каменной соли, сухого песка, гранитов и т. д. Следо-

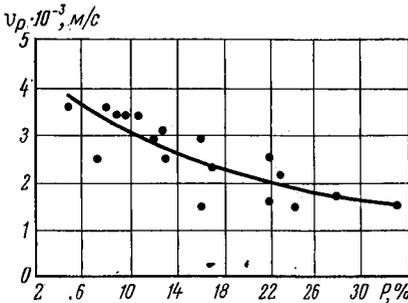


Рис. 3.24. Зависимость скорости распространения продольной дуговой волны  $v_p$  в известняках от пористости  $P$

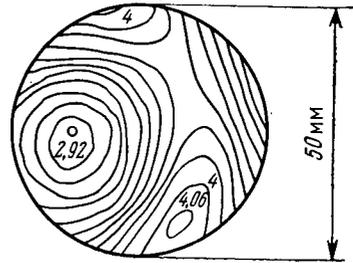


Рис. 3.25. Изолинии скоростей продольных упругих волн в пиррофиллите

вательно, поглощение в таких породах обусловлено не столько их вязкостью, сколько диффузионным рассеиванием.

В глинистых и суглинистых породах коэффициент  $\theta$  пропорционален  $\lg f$ .

Величина коэффициента поглощения всегда больше в тех породах, в которых скорость упругих колебаний меньше. С увеличением пористости пород  $\theta$  значительно возрастает (рис. 3.26).

В некоторых случаях поглощение упругих колебаний оценивают безразмерным показателем, так называемым логарифмическим декрементом затухания  $D$ :

$$D = \theta v / f. \quad (3.74)$$

Декремент затухания более стабилен по отношению к изменению частоты колебаний, чем коэффициент поглощения. Отношение  $D/\pi$  называется коэффициентом механических потерь, а обратная ему величина — добротностью.

В расчетах часто используют произведение плотности

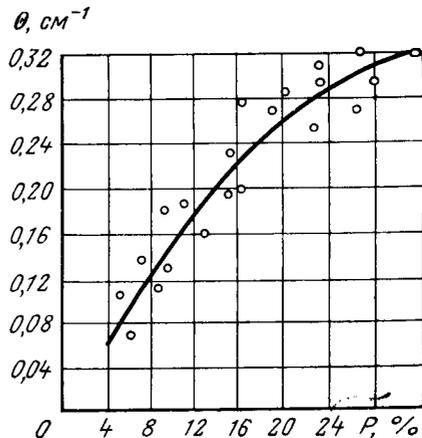


Рис. 3.26. Зависимость коэффициента поглощения  $\theta$  в известняках от пористости  $P$

породы на скорость распространения упругой волны в ней. Этот показатель  $z$  носит название удельного волнового сопротивления (удельный акустический импеданс) и в сущности является отношением давления волны  $p$  к мгновенной скорости колеблющихся частиц  $v'$ :

$$z = p/v' = \rho v. \quad (3.75)$$

Удельное волновое сопротивление пород определяет их способность отражать и преломлять упругие волны.

## 4. ОБОБЩЕННЫЕ ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРОД

### 4.1. КРЕПОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Крепость горных пород — характеристика сопротивляемости пород их добытию — технологическому разрушению. Это понятие крепости введено проф. М. М. Протодьяконовым (старшим), который для количественной ее оценки предложил коэффициент крепости  $f$ , в первом приближении пропорциональный пределу прочности породы при сжатии. Им была разработана шкала горных пород по крепости, в соответствии с которой все горные породы подразделены на 10 категорий.

К первой категории относятся породы, имеющие наивысшую степень крепости ( $f=20$ ), к десятой — наиболее слабые плавучие породы ( $f=0,3$ ). Пределы изменения коэффициента крепости от 0,3 до 20.

Так как  $f$  связан с прочностью пород, его можно рассчитать по  $\sigma_{сж}$  в простейшем случае по формуле

$$f = \sigma_{сж} \cdot 10^{-7}. \quad (4.1)$$

Более точно связь между  $\sigma_{сж}$  и  $f$  в области больших значений  $\sigma_{сж}$  может быть выражена эмпирической формулой

$$f = 0,33 \cdot 10^{-7} \sigma_{сж} + 0,58 \cdot 10^{-3} \sqrt{\sigma_{сж}}. \quad (4.2)$$

Существуют и другие формулы взаимосвязи коэффициента крепости пород с их прочностными параметрами.

Коэффициент крепости можно определить также экспериментально, например, методом толчения по М. М. Протодьяконову (младшему) ГОСТ 21153—75.

Сущность метода толчения заключается в следующем. Берут пять кусков породы массой приблизительно по 40—60 г. Каждый кусок дробят в стакане гирей массой 2,4 кг, сбрасываемой с высоты 0,6 м. После 5—15-кратного сбрасывания гири полу-

чающуюся мелочь просеивают через сито с отверстиями 0,5 мм. Фракцию размером менее 0,5 мм собирают с пяти образцов и насыпают в стакан объеммера диаметром 23 мм. Определяют высоту столбика пыли  $l$  (мм) в объеммере. Коэффициент крепости, который часто называют динамическим  $f_d$ , вычисляют по формуле

$$f_d = 20n/l, \quad (4.3)$$

где  $n$  — число сбрасываний гири при испытании одного образца.

Этот метод основан на предположении, что работа разрушения породы пропорциональна объему получившихся в результате разрушения мельчайших частиц.

Так как коэффициент крепости в наибольшей степени отражает только разрушение породы от сжимающих нагрузок, а в реальных условиях часто используются растягивающие и скалывающие усилия, возникает необходимость введения иных показателей трудности технологического разрушения пород. Такой показатель предложен акад. В. В. Ржевским.

## 4.2. ХРУПКОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ ПОРОД

Так как пластические и обратные им — хрупкие свойства пород существенно сказываются на процессах их разрушения (в частности, пластичность увеличивает энергоемкость дробления и измельчения пород), в практике горного производства используют различные горно-технологические показатели пластичности и хрупкости.

Так, в качестве технологического показателя пластичности принимают параметр, определяющий, во сколько раз удельная работа разрушения образца реальной породы  $A_p$  при одноосном сжатии выше удельной работы разрушения идеально упругой породы  $A_y$  с тем же пределом прочности при сжатии.

Удельную работу разрушения рассчитывают по площади диаграммы напряжение — деформация (рис. 4.1). Коэффициент пластичности определяют по формуле

$$k_{пл} = \text{пл. } OCD / \text{пл. } OAB = 2E/E_{\text{деф}} - 1. \quad (4.4)$$

Для оценки хрупких свойств пород в ИГД им А. А. Скочинского Л. И. Бароном предложен коэффициент хрупкости  $k_{хр}$ , представляющий собой отношение работы  $A_y$ , затраченной на деформирование образца в чисто упругой области, к полной работе  $A_n$ , затраченной на разрушение образца (см. рис. 4.1).

$$k_{хр} = A_y/A_n = \text{пл. } OFG / \text{пл. } OCD \leq 1. \quad (4.5)$$

Определенный по данной методике коэффициент хрупкости

мрамора составляет 0,13, известняка — 0,23, железистого кварцита КМА — 0,38, джеспилита — 0,5.

С ростом предела прочности при одноосном сжатии коэффициент хрупкости возрастает.

Предложено множество других показателей, оценивающих пластичность и хрупкость горных пород. Так, коэффициенты

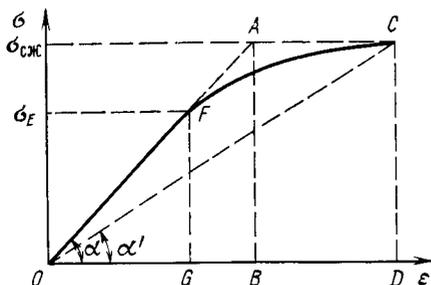


Рис. 4.1. К расчету коэффициентов пластичности и хрупкости пород ( $\text{tg}\alpha$ ,  $\text{tg}\alpha'$  — соответственно модули Юнга и полной деформации)

хрупкости рассчитывают по отношению пределов прочности породы при сжатии и растяжении

$$k'_{\text{хр}} = \sigma_{\text{сж}}/\sigma_{\text{р}} \quad (4.6)$$

или по отношению значений предела упругости  $\sigma_E$  и предела прочности при сжатии  $\sigma_{\text{сж}}$

$$k''_{\text{хр}} = \sigma_E/\sigma_{\text{сж}}. \quad (4.7)$$

#### 4/3. ТВЕРДОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Твердость горных пород определяет сопротивляемость пород внедрению в них острого инструмента, т. е. разрушению при точечном (контактном) нагружении. Твердость минералов принято оценивать по известной шкале Мооса. Так как породы состоят из многих минералов и их твердость является агрегатной, для ее определения используют методы, основанные на вдавливании особых штампов в породу.

В зависимости от того, вдавливается ли инструмент в породу при постепенно увеличивающейся нагрузке или ударе, различают статическую  $H_{\text{ст}}$  и динамическую  $H_{\text{д}}$  твердость, причем  $H_{\text{ст}} \neq H_{\text{д}}$ .

Для большинства горных пород применяется метод определения статической твердости  $\rho_{\text{ш}}$ , основанный на хрупком выколе лунки в шлифованной поверхности породы под действием приложенной к специальному штампу нагрузки. Метод этот разработан Л. А. Шрейнером.

Если во время опыта фиксируется деформация, то попутно может быть определен модуль упругости породы.

Так называемый метод контактной прочности, разработанный Л. И. Бароном и Л. Б. Глатманом в ИГД им.

А. А. Скочинского, является более простым вариантом метода Л. А. Шрейнера. По этому методу производится вдавливание цилиндрического штампа с плоским основанием и диаметром 2—3 мм в нешлифованную поверхность образца. Контактная прочность  $p_k$  (твердость) образца определяется по величине нагрузки в момент хрупкого разрушения (выкола лунки под штампом), отнесенной к площади штампа.

Связь между  $p_k$  и  $p_{ш}$  приблизительно равна следующему соотношению:

$$p_{ш} \approx (2,5 - 3,0) p_k. \quad (4.8)$$

С увеличением пластичности пород твердость их уменьшается (рис. 4.2).

Твердость пород всегда выше предела прочности при одноосном сжатии, так как она соответствует прочности породы при сложном всестороннем сжатии, причем характер объемного сжатия в значительной степени зависит от упругих и пластических свойств породы. В общем виде можно написать

$$p_{ш} = k \sigma_{сж}. \quad (4.9)$$

Отмечено, что с ростом пластичности породы величина коэффициента  $k$  уменьшается с 20 до 5, т. е. численные значения твердости приближаются к значениям  $\sigma_{сж}$ . Так, установлено, что для изверженных пород Армении  $k \approx 8,8 \div 10$ , для глин и глинистых сланцев  $k \approx 3 \div 18$ , для песчаников  $k \approx 2 \div 20$ , для карбонатных пород  $k \approx 5 \div 12$ . Поэтому для вывода показателя  $p'_k$ , близкого по своей сущности к  $p_k$ , в уравнении (4.9) можно принять  $k$  обратно пропорциональным коэффициенту пластичности  $k_{пл}$ .

Тогда  $p'_k$  можно вычислять по формуле

$$p'_k = 30 E_{деф} \sigma_{сж} / E \quad (4.10)$$

Динамическая твердость может быть определена методом Шора. Его сущность заключается в том, что на поверхность испытуемой породы с определенной высоты сбрасывается боёк со сферическим алмазным наконечником. За показатель твердости принимается высота отскока бойка.

Твердость пород указывает на их сопротивляемость разрушению при воздействии бурового инструмента и поэтому определяет производительность буровых установок.

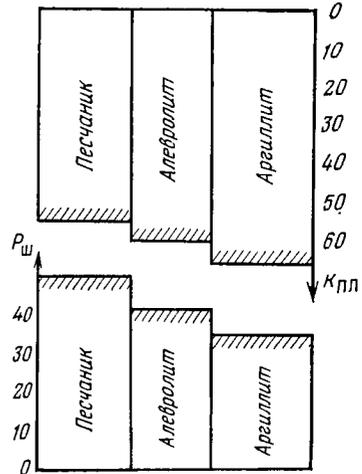


Рис. 4.2. Сравнение твердости пород  $p_{ш}$  с их коэффициентом пластичности  $k_{пл}$

#### 4.4. ВЯЗКОСТЬ, ДРОБИМОСТЬ И АБРАЗИВНОСТЬ ПОРОД

Наиболее трудно поддаются разрушению породы, имеющие высокую прочность и большую зону пластической деформации. Такие породы являются вязкими.

Технологический показатель вязкости горных пород при разрушении пропорционален сопротивлению породы силам, стремящимся разъединить ее частицы. Он определяется пластическими свойствами породы, отношением пределов прочности при растяжении и сжатии, а также значением предела прочности породы при сдвиге. Общеизвестного метода определения вязкости не существует. Так как вязкость прямо пропорциональна произведению пластичности породы на ее прочность, эту величину можно принять в качестве физического аналога вязкости  $B$  пород:

$$B = E\sigma_{сж}/E_{деф}. \quad (4.11)$$

Вязкость горных пород при разрушении не равноценна вязкости деформирования — коэффициенту внутреннего трения  $\eta$ , который в соответствии с законом Ньютона является коэффициентом пропорциональности между приложенными касательными напряжениями  $\tau$  и скоростью деформирования  $de/dt$ :

$$\tau = \eta de/dt. \quad (4.12)$$

Эта величина для горных пород очень велика и составляет  $10^{11} \div 10^{13}$  Па·с (для сравнения: вязкость глицерина составляет 0,85 Па·с).

В ряде случаев к горным породам применяют понятие ударной вязкости, используемое в металловедении. Ударная вязкость — это работа разрушения надрезанного образца при ударном изгибе на копре. Она выражается в Дж/м<sup>2</sup>.

Дробимость выражает энергоемкость процесса дробления породы приложением к ней динамической нагрузки и, как показывают исследования, лучше коррелирует с динамическими методами разрушения пород, чем предел прочности при одноосном нагружении под прессом  $\sigma_{сж}$ .

Современные лабораторные методы определения дробимости пород обычно основываются на оценке удельного расхода энергии на дробление единицы объема породы. Так, по одному из методов, предложенному Л. И. Бароном, дробимость пород определяется одиночным сбрасыванием на образец груза массой 16 кг с высоты 0,5 м. Дробимость устанавливается по объему  $V_{max}$  образованных в результате удара частиц диаметром менее 7 мм. Так, легко дробимая маритовая руда имеет  $V_{max}$  равный 13,4 см<sup>3</sup>, а трудно дробимый джеспилит — всего 2 см<sup>3</sup>.

Дробимость  $D$  — параметр, обратный вязкости, поэтому для

его оценки по механическим свойствам можно воспользоваться уравнением

$$D = E_{\text{деф}} / (E\sigma_{\text{сж}}). \quad (4.13)$$

**Абразивность** характеризует способность пород изнашивать при трении инструмент. Абразивность оценивают по износу материала, контактирующего с горной породой. Исследование абразивности по методу Л. А. Шрейнера производится следующим образом. К испытываемому образцу породы прижимают вращающееся кольцо из материала, по отношению к которому определяется абразивность породы. Кольцо взвешивают до начала опыта и после определенного количества оборотов. Вычисляют износ  $\Delta V_c$  (в  $\text{см}^3/\text{м}$ ) материала кольца, приходящийся на 1 м пути его движения по породе. Коэффициент абразивности  $k_{\text{аб}}$  в  $\text{см}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$  определяют по формуле

$$k_{\text{аб}} = \Delta V_c / F l \quad (4.14)$$

где  $F$  — сила, с которой кольцо прижимается к породе.

В ИГД им. А. А. Скочинского разработана упрощенная методика определения относительной абразивности горных пород. Сущность ее заключается в истирании о поверхность образца горной породы в течение 10 мин торца вращающегося стержня из незакаленной стали и последующих определений износа массы стержня.

За критерий абразивности принимают суммарную потерю массы стержня (в мг) при истирании поочередно обоих его концов, которое производится при осевой нагрузке 150 Н и частоте вращения 400  $\text{мин}^{-1}$ .

Наиболее абразивными горными породами являются порфиры, диориты, граниты и корундсодержащие породы. Так,  $k_{\text{аб}}$  гранитов, корундов и сенинтов достигает 90 мг, песчаников — 18—30 мг, в то время как у известняка и мрамора  $k_{\text{аб}} = 2—5$  мг.

Абразивность по методике Л. А. Шрейнера (относительно стали У8) составляет у известняка и доломита  $(20—22) \times 10^{-7} \text{ см}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ , у полевошпатовых пород —  $(35—40) \times 10^{-7} \text{ см}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ , а у кварцевых пород —  $(50—90) \times 10^{-7} \text{ см}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ .

Как и в предыдущих случаях, коэффициенту абразивности  $k_{\text{аб}}$  можно подобрать соответствующий аналог  $k_{\text{аб}}'$ , основанный на комплексе механических свойств пород. Действительно, степень истирания инструмента породой зависит от формы минеральных частиц в породе (например, острые или округлые) и твердости этих частиц  $H_{\text{м.в}}$ . Так как форма частиц — это структурный показатель, физическими параметрами, обуславливающими абразивность пород, таким образом, становятся пределы прочности при сжатии минеральных частиц

$\sigma_{сж. м.}$ , а также их модули деформации  $E_{деф. м}$  и упругости  $E_{м.}$ , т. е.

$$k'_{аб} \approx H_{м. з} = E_{деф. м} \sigma_{сж. м} / E_{м.} \quad (4.15)$$

Анализ показывает, что между  $k'_{аб}$  и  $k_{аб}$  существует достаточно хорошая связь.

Абразивность пород можно определить также другими способами, в частности, радиоактивным методом, при котором определяется потеря массы радиоактивного эталона при его трении о породу.

## 5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

### 5.1. СОДЕРЖАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ В ПОРОДАХ

Наличие пор и трещин в породах предопределяет возможность их заполнения различными жидкостями и газами.

Наиболее часто горные породы бывают насыщены водой, которая может содержаться в породах в разном виде. Различают химически связанную, физически связанную и свободную воду.

Химически связанная вода наряду с другими молекулами и ионами входит в состав кристаллической решетки минералов, например гипса  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  или каолинита  $Al_2(OH)_4 \cdot Si_2O_5$ . Удаление такой воды приводит к разрушению минерала, превращению его в другое — безводное соединение.

Наличие в породе химически связанной воды проявляется только при ее нагревании. Она обуславливает изменение свойств породы при высоких температурах. Из-за нарушения кристаллической решетки минералов при выделении из них химически связанной воды происходят ослабление и разрушение пород, а в ряде случаев их упрочнение (например, глин).

Физически связанная вода тесно соединена молекулярными силами притяжения с твердыми частицами породы, обволакивая их в виде пленки. Ее количество зависит от смачиваемости пород.

Смачиваемость — это способность горной породы покрываться пленкой жидкости. Величина смачивания твердой поверхности жидкостью характеризуется краевым углом  $\theta$  между плоскостью твердого тела и касательной к поверхности капли, проведенной из точки касания капли с телом.

Смачиваемость пород обусловлена адсорбционной способностью, т. е. способностью концентрировать на своей поверхности молекулы жидкости за счет электростатического притяжения. Большинство пород относится к хорошо смачиваемым водой (гидрофильным). Частично или полностью

именно в них имеется большой процент физически связанной воды. Способность породы отдавать воду при механическом воздействии характеризуется водоотдачей  $\xi$ :

$$\xi = \omega_{\text{п}} - \omega_{\text{м}}. \quad (5.5)$$

Величина водоотдачи зависит от размеров частиц, образующих породу, величины и взаимного расположения пор. Слабая водоотдача пород обычно снижает производительность механической и гидравлической разработки пород, затрудняет осушение месторождения, транспортирование и дробление полезного ископаемого.

В породах кроме воды встречаются также нефть и газы.

Характер распределения в порах воды, нефти и газа предопределяет многие физические свойства этих пород, в частности очень сильно сказывается на их электросопротивлении.

В общем случае сумма объемов нефти  $V_{\text{н}}$ , газа  $V_{\text{г}}$  и воды  $V_{\text{в}}$  в нефтегазоводонасыщенных породах равна объему порового пространства пород  $V_{\text{п}}$  и, следовательно,

$$V_{\text{н}}/V_{\text{п}} + V_{\text{г}}/V_{\text{п}} + V_{\text{в}}/V_{\text{п}} = 1. \quad (5.6)$$

Отношения  $V_{\text{н}}/V_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{г}}/V_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{в}}/V_{\text{п}}$  называются относительными коэффициентами соответственно нефтенасыщенности  $k_{\text{н}}$ , газонасыщенности  $k_{\text{г}}$  и водонасыщенности  $k_{\text{вн}}$ .

## 5.2. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ В ПОРОДАХ

Жидкости и газы способны перемещаться по поровым каналам и трещинам породы. Свойство породы пропускать сквозь себя флюиды называется ее проницаемостью.

Проницаемость бывает физическая (абсолютная) и фазовая (эффeктивная).

Физическая проницаемость — это проницаемость в случае фильтрации через породу однородной жидкости или газа. Фазовая проницаемость — это способность пород, насыщенных неоднородной жидкостью, пропускать отдельные ее фазы.

Численно величина проницаемости описывается коэффициентом проницаемости  $k_{\text{пр}}$ , выводимым из уравнения Дарси, согласно которому количество жидкости  $Q$  ( $\text{м}^3$ ), прошедшей расстояние  $\Delta l$  в образце породы, выражается следующим образом:

$$Q = k_{\text{пр}} \Delta P_{\sigma} S t / (\Delta l \eta), \quad (5.7)$$

где  $\Delta P_{\sigma}$  — перепад давлений на пути фильтрации, Па;  $S$  — площадь поперечного сечения образца,  $\text{м}^2$ ;  $t$  — время фильтрации, с;  $\eta$  — вязкость жидкости, Па · с.

Из формулы (5.7) имеем

$$k_{\text{пр}} = Q \Delta l \eta / (S \Delta P_{\sigma} t). \quad (5.8)$$

Коэффициент проницаемости выражается в  $\text{м}^2$ .

Практической единицей измерения проницаемости является дарси ( $D$ ) — величина проницаемости, присущая образцу породы площадью  $1 \text{ см}^2$  длиной  $1 \text{ см}$ , через который при давлении  $9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$  в  $1 \text{ с}$  проходит  $1 \text{ см}^3$  жидкости вязкостью  $10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . При этом  $1D = 1,02 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ .

В практике горного производства широкое распространение получил другой параметр — коэффициент фильтрации  $k_{\phi}$ . Практически он представляет собой скорость фильтрации газа или жидкости через породы:

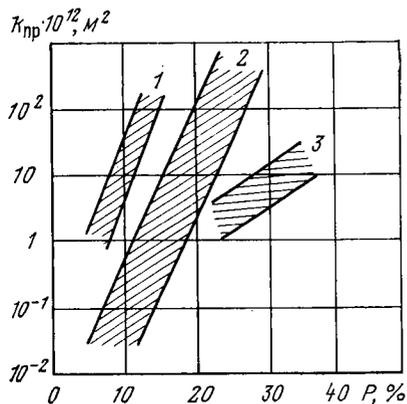
$$k_{\phi} = Q/(tS). \quad (5.9)$$

Коэффициент фильтрации  $k_{\phi}$  не учитывает влияния напора воды. Сравнение  $k_{\phi}$  и  $k_{\text{пр}}$  показывает, что между ними в случае фильтрации воды существует следующее примерное соотношение:  $1D = 1 \text{ см/с} = 864 \text{ м/сут}$ .

В зависимости от значения коэффициента фильтрации породы подразделяют на водоупорные ( $k_{\phi} < 0,1 \text{ м/сут}$ ), слабопроницаемые ( $0,1 \text{ м/сут} \leq k_{\phi} \leq 10 \text{ м/сут}$ ), среднепроницаемые ( $10 \text{ м/сут} < k_{\phi} \leq 500 \text{ м/сут}$ ) и легкопроницаемые ( $k_{\phi} > 1000 \text{ м/сут}$ ).

Рис. 5.1. Зависимость коэффициента проницаемости  $k_{\text{пр}}$  пород от их пористости  $P$ :

1 — песчаник; 2 — карбонатные отложения; 3 — девонский меловидный известняк



Водопроницаемость в основном зависит от размера пор, их общего объема в породах (рис. 5.1) и конфигурации; поры определяют объем фильтрующейся жидкости, траектории струй и силы трения, препятствующие движению. В общем случае проницаемость возрастает с увеличением пористости пород, особенно открытой, однако бывают и отклонения от этой зависимости. Существенное влияние на величину  $k_{\text{пр}}$  имеет средний диаметр пор  $d$ , как это видно из уравнения, выведенного на основании закона Пуазеля:

$$k_{\text{пр}} = d^2 P / (32 T_{\text{и}}^2), \quad (5.10)$$

где  $P$  — пористость, доли единицы;  $T_{\text{и}}$  — извилистость поровых каналов ( $T_{\text{и}} = l/l_0$ );  $l$  и  $l_0$  — соответственно длина порового канала и длина образца.

Сверхкапиллярные поры (см. разд. 1.1) пропускают жидкости под действием силы тяжести или давления по обычным законам гидродинамики.

В капиллярных порах движение жидкости происходит вследствие сил капиллярного притяжения. Под действием дав-

ления жидкость в капиллярах будет двигаться лишь тогда, когда оно превысит молекулярные силы притяжения.

Субкапиллярные поры жидкости практически не пропускают. Именно потому глины относятся к водоупорным, несмотря на высокую их пористость (50 % и более). Почти вся вода в них находится в связанном состоянии и препятствует перемещению гравитационной воды. И наоборот, скальные породы могут иметь малую пористость, но обладать большой проницаемостью. У этих пород различают проницаемость межгранулярную и трещинную, из которых последняя значительно больше. Так, трещинная проницаемость сланцев, известняков, доломитов и т. д. находится в пределах  $(1,5-4,0) \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup> (до 40 мД), межгранулярная достигает  $10^{-16}$  м<sup>2</sup> (0,1 мД).

Коэффициент трещинной проницаемости  $k_{пр. т}$  может быть рассчитан по формуле

$$k_{пр. т} = 8,45 \cdot 10^{-4} b^2 P_{т}, \quad (5.11)$$

где  $b$  — величина раскрытия трещин, м;  $P_{т}$  — трещинная пористость. Так как раскрытие трещин обычно составляет  $(14-15) \cdot 10^{-6}$  м,

$$k_{пр. т} \approx 1,66 \cdot 10^{-13} P_{т}. \quad (5.12)$$

Слоистым породам присуща анизотропия водопроницаемости: проницаемость вдоль напластования больше, чем перпендикулярно к нему.

На водопроницаемость рыхлых пород влияет также их минеральный состав. Минералы с хорошо выраженной спайностью пропускают воду довольно слабо, так как в них при прочих равных условиях образуются поры меньших размеров, чем в минералах, не обладающих спайностью и хорошо окатанных. Вода лучше проходит через породы, сложенные минералами, обладающими хорошей смачиваемостью.

В случае циркуляции газов в породах пользуются понятием газопроницаемости пород: физическая сущность газопроницаемости подобна водопроницаемости.

## 6. ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

### 6.1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ ТЕПЛА

Поглощение породами тепла всегда сопровождается повышением кинетической энергии молекул и атомов и фиксируется изменением температуры породы. Амплитуда колебаний молекул и ионов с ростом температуры увеличивается. При этом наблюдается прямо пропорциональная зависимость между коли-

чеством теплоты  $dQ$ , переходящей во внутреннюю энергию тела, и приростом температуры  $dT$ :

$$dQ = CdT, \quad (6.1)$$

где  $C$  — коэффициент пропорциональности — показатель, называемый теплоемкостью тела и характеризующий изменение его тепловой энергии при изменении температуры на один градус.

Величина  $C$ , отнесенная к единице массы  $m$  нагреваемого объема, называется удельной теплоемкостью породы  $c$ :

$$c = C/m \quad \text{или} \quad c = dQ/(mdT). \quad (6.2)$$

$c$  выражается в Дж/(кг · К).

Как известно, передача тепла (теплопроводность) в однородных твердых телах происходит либо путем обмена кинетической энергии при столкновении электронов (диффузия средней кинетической энергии), либо путем постепенной передачи колебаний кристаллической решетки от одной частицы к другой, поскольку между ними имеются значительные силы связей.

Первый тип теплопроводности носит название электронной. Он характерен в основном для токопроводящих сред — металлов и полупроводников.

Второй тип теплопроводности можно отождествить с особым видом упругих колебаний частиц кристаллической решетки. Согласно квантовой теории эти колебания могут быть описаны посредством квазичастиц — фононов (по аналогии с фотонами электромагнитного поля). Фононы — это кванты поля колебаний кристаллической решетки. Число фононов в породе постоянно — их тем больше, чем интенсивнее тепловое движение атомов, т. е. чем выше температура. При температуре около 300 °С в 1 см<sup>3</sup> породы находится примерно 10<sup>20</sup> фононов. Представление о фононах позволяет описывать процесс передачи тепла как перетекание «газа» фононов из области большей его плотности в область меньшей плотности.

Поэтому второй тип теплопроводности часто называется фоновым. Каждый фонон, подобно фотону, обладает энергией, равной  $\hbar f$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка ( $\hbar = 1,0546 \cdot 10^{-34}$  Дж · с),  $f$  — частота тепловых колебаний. Следовательно, энергия фонона примерно равна  $6,6 \cdot 10^{-21}$  Дж.

Количество теплоты  $dQ$ , переходящей от одной плоскости образца с температурой  $T_1$  к другой с температурой  $T_2$  через площадку  $\Delta S$  за время  $dt$  в случае стационарного потока ( $dT/dt = 0$ ),

$$dQ = \lambda (\Delta T / \Delta x) \Delta S dt, \quad (6.3)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности данного вещества, Вт/(м · К);  $\Delta T / \Delta x$  — градиент температуры вдоль оси  $x$ .

Параметр  $dQ/(\Delta S dt)$ , выражающий количество теплоты, про-

текающей в единицу времени через площадку  $\Delta S$ , называется удельным тепловым потоком  $q$ .

Таким образом,

$$\lambda = q/\text{grad } T. \quad (6.4)$$

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией газов применительно к «газу» фононов можно записать величину коэффициента теплопроводности горных пород:

$$\lambda_{\text{ф}} = \frac{1}{3} c v \rho l_{\text{ф}}, \quad (6.5)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме;  $v$  — скорость фононов, равная скорости распространения упругих колебаний в породе;  $\rho$  — плотность породы;  $l_{\text{ф}}$  — средняя длина свободного пробега фононов, обусловленная либо рассеянием фонона на неоднородностях и границах образца, либо столкновением друг с другом (для кристалла NaCl  $l_{\text{ф}} = 23 \cdot 10^{-10}$  м, для кварца  $l_{\text{ф}} \approx 15 \cdot 10^{-10}$  м).

Уравнение распространения тепла и распределения температур в породе для случая нестационарного теплового потока ( $dT/dt \neq 0$ ) наиболее просто выводится для одномерного теплового потока (рис. 6.1).

Если  $T$  — температура в центре параллелепипеда породы с размерами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , то температуру в любом его сечении можно выразить через градиент температуры  $\partial T/\partial x$ .

Так, для граней 1 и 2 соответственно температура

$$T_1 = T + \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x; \quad (6.6)$$

$$T_2 = T - \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x. \quad (6.7)$$

Потоки тепла, проходящие через грани 1 и 2, соответственно

$$Q' = \lambda \Delta y \Delta z \frac{\partial}{\partial x} \left( T + \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x \right) dt; \quad (6.8)$$

$$Q'' = \lambda \Delta y \Delta z \frac{\partial}{\partial x} \left( T - \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x \right) dt. \quad (6.9)$$

Если все прочие грани рассматриваемого параллелепипеда не участвуют в теплообмене с внешней средой (надежно изолированы), то разность  $Q' - Q''$  будет представлять собой количество теплоты, поглощенной породой. Оно может быть выражено через теплоемкость:

$$\Delta Q = Q' - Q'' = c \rho \Delta x \Delta y \Delta z \partial T. \quad (6.10)$$

Отсюда выводится дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерного теплового потока

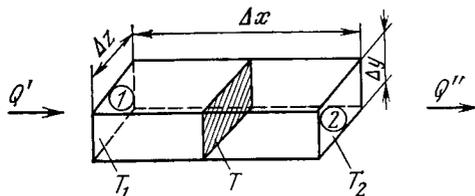
$$[\lambda/(c\rho)] \partial^2 T/\partial x^2 = \partial T/\partial t. \quad (6.11)$$

Для объемного теплового потока это уравнение приобретает следующий вид:

$$\partial T / \partial t = a \nabla^2 T, \quad (6.12)$$

где  $a$  — температуропроводность породы,  $\text{м}^2/\text{с}$  [ $a = \lambda / (c\rho)$ ];  $\nabla^2$  — оператор Лапласа.

Температуропроводность характеризует скорость распространения изотермической поверхности в породе.



Если в породе имеются внутренние источники тепла удельной мощностью  $q_v$ , то

$$\partial T / \partial t = a \nabla^2 T + q_v / (c\rho). \quad (6.13)$$

Рис. 6.1. Элементарный параллелепипед в среде, через которую проходит тепловой поток

Если тепловой поток стационарен, то в исследуемом объеме породы отсутствует поглощение тепла и уравнение теплопроводности (6.12) примет вид

$$\nabla^2 T = 0. \quad (6.14)$$

Это уравнение Лапласа.

Частный случай теплообмена через какую-то граничную поверхность от одной породы к другой, имеющей отличные от первой тепловые свойства, называется теплопередачей. Количество теплоты, перешедшей из одной породы в другую, определяется по формуле

$$\Delta Q = k_r \Delta T \Delta S t, \quad (6.15)$$

где  $k_r$  — коэффициент теплопередачи, зависящий от свойств соприкасающихся тел,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Теплопередача происходит при распространении теплового потока перпендикулярно к слоистости и трещиноватости пород, на контактах вмещающих пород с полезным ископаемым и т. д. Она происходит также между породой и флюидами (газами, жидкостями), омывающими породу. В этом случае теплопередача называется теплоотдачей (табл. 6.1). Она осуществляется посредством конвективного теплообмена и описывается уравнением (6.15), где  $k_r = \alpha_r$  — коэффициент теплоотдачи.

Теплоотдачу важно знать, например, при расчетах проветривания и теплового режима глубоких шахт, в процессах термобурения и т. д.

Коэффициент теплоотдачи является не только функцией свойств контактирующих веществ, но и их состояния (например, шероховатости поверхности породы), скорости относительного перемещения флюидов и т. д.

Тепло, поглощенное горной породой, расходуется кроме ее нагрева еще и на внешнюю работу, связанную в основном с тепловым расширением. Тепловое расширение твердых тел вызвано зависимостью сил связей атомов в решетке от направления их смещения. Так как атомы легче смещаются в сто-

**Таблица 6.1. Коэффициенты теплоотдачи некоторых горных пород при температуре их поверхности 100 °С**

Порода	$\alpha_T$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Порода	$\alpha_T$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
Габбро	0,71	Кварцит	4,0
Гранит	2,21	Каменная соль	3,39
Мрамор	1,62	Известняк	1,68
Песчаник	2,50	Аргиллит	3,31

рону удаления друг от друга, чем сближения, при нагреве происходит смещение центра равновесия колеблющихся атомов, что выражается в расширении тел.

Связь между повышением температуры  $dT$  и удлинением породы  $dL$  можно выразить уравнением

$$dL = \alpha L dT, \quad (6.16)$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного теплового расширения;  $L$  — первоначальная длина образца.

Аналогичная формула описывает объемное расширение пород

$$dV = \gamma_T V dT, \quad (6.17)$$

где  $\gamma_T$  — коэффициент объемного теплового расширения.

## 6.2. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПОРОД

Удельная теплоемкость минералов и пород изменяется от 0,4 до 2 кДж/(кг·К). Обычно она выше удельной теплоемкости металлов.

У минералов с уменьшением их плотности наблюдается повышение удельной теплоемкости (рис. 6.2). При этом их объемная теплоемкость  $c_{\text{ср}}$  изменяется от 1,5 до 3 МДж/(м<sup>3</sup>·К).

Удельная теплоемкость плотной породы зависит только от ее минерального состава и может быть рассчитана по формуле арифметического средневзвешенного

$$c_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n c_i m_i, \quad (6.18)$$

где  $m_i$  — относительное массовое содержание минерала с удельной теплоемкостью  $c_i$ .



Рудные минералы, как правило, имеют низкую теплоемкость, поэтому в рудосодержащих породах теплоемкость ниже, чем в безрудных породах.

Теплоемкость не зависит от того, в каком состоянии находится порода — в аморфном или в кристаллическом. Например, теплоемкости кристаллического и плавленого кварца одинаковы и составляют 0,85 кДж/(кг·К). Теплоемкость не зависит также и от всех прочих параметров строения породы — зернистости, слоистости и т. д.

Зависимость теплоемкости от пористости обусловлена значениями величин  $c$  воздуха и минералов.

Объемная теплоемкость пористой породы  $c_p$  определяется также как арифметическое средневзвешенное.

Так как объемная теплоемкость воздуха равна только 1,29 кДж/(м<sup>3</sup>·К),

$$(c_p)_{cp} \approx c_0 \rho_0 (1 - P), \quad (6.19)$$

где  $c_0$  и  $\rho_0$  — соответственно удельные теплоемкость и плотность минеральной фазы породы.

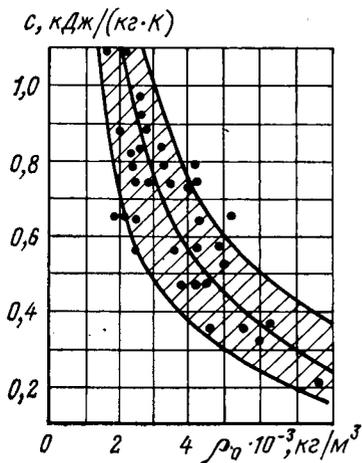


Рис. 6.2. Корреляционная связь между удельной теплоемкостью  $c$  и плотностью  $\rho_0$  минералов. Заштрихованная область — наиболее вероятные значения  $c$  и  $\rho_0$  минералов

### 6.3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ПОРОД

Минералы и горные породы, как правило, являются плохими проводниками тепла, они занимают в ряду твердых тел сравнительно узкую полосу с малыми значениями теплопроводности — 0,1—7 Вт/(м·К).

Большей теплопроводностью — до 30—40 Вт/(м·К) обладают лишь некоторые рудные минералы, например, сфалерит (рис. 6.3).

Исключительно большое значение  $\lambda$  наблюдается у алмаза — до 200 Вт/(м·К) вследствие небольшого количества дефектов в кристаллической решетке, высокой энергии решетки и, следовательно, большой длины свободного пробега фононов.

Из породообразующих минералов большим значением теплопроводности [ $\lambda = 7 \div 12$  Вт/(м·К)] обладает кварц. Поэтому у плотных малопористых безрудных пород (группа 1n) наблюдается вышение  $\lambda$  с увеличением содержания в них кварца.

Повышенную по сравнению с другими нерудными минералами теплопроводность имеют также гидрoхимические осадки — каменная соль, сильвин, ангидрит, а пониженную — каменный уголь, асбест и другие породы.

Теплопроводность пород определяется способностью минералов, слагающих породу, проводить тепло, и для пород, представляющих собой статистические смеси минералов с хорошими контактными условиями, пригодна для расчета их теплопроводности формула логарифмического средневзвешенного  $\lambda$  (2.3).

В слоистых средах наблюдается большая теплопроводность вдоль слоистости  $\lambda_{\parallel}$ , чем перпендикулярно слоистости  $\lambda_{\perp}$ . Для расчета  $\lambda_{\parallel}$  и  $\lambda_{\perp}$  можно использовать уравнения (2.1) и (2.2) соответственно.

Коэффициент анизотропии теплопроводности слоистых горных пород в среднем составляет 1,1—1,5 (табл. 6.2).

Анизотропией теплопроводности обладают не только породы, сложенные различными слоями, но и сланцеватые породы, и минералы с хорошей спайностью. Так, у слюды вдоль спайности теплопроводность в 6 раз выше, чем поперек спайности; для графита это отношение составляет 2 и более. Физическая сущность такого явления заключается в том, что частицы, входящие в кристаллическую решетку минерала, вдоль плоскости слоистости взаимодействуют интенсивнее, и наоборот, молекулярное движение перпендикулярно к плоскости спайности передается значительно хуже. Теплопроводность пористых пород является сложной функцией всех их составляющих фаз — жидкой, газообразной и твердой (табл. 6.3).

Передача тепловой энергии в пористых породах может происходить как путем теплопроводности, так и путем конвекции заполнителя порового пространства (теплоотдачи).

Однако если размеры пор по сравнению с исследуемым объемом малы, то явление конвекции можно не учитывать. Так, доля конвективного теплового потока в порах с радиусом 3 мм составляет 0,13 % от общего теплового потока. Можно не учитывать также явление передачи тепла излучением, если температура нагрева породы не превышает 1000 К.

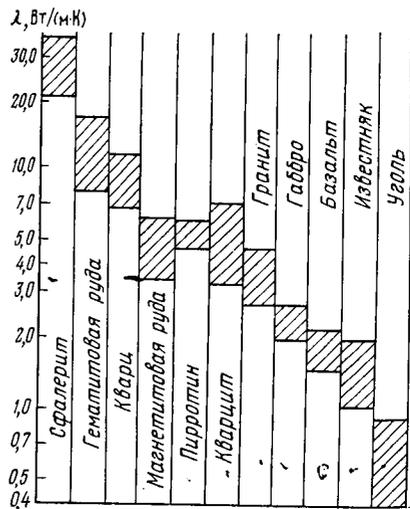


Рис. 6.3. Сравнение коэффициентов теплопроводности различных пород и минералов

Как известно, теплопроводность воздуха  $\lambda_v$  очень низка [0,023 Вт/(м·К)]. Поэтому  $\lambda$  сухих пористых пород всегда ниже теплопроводности непористых пород. Так, например, теплопроводность песка в 6—7 раз меньше, чем теплопроводность плотного песчаника.

Исключительно большую роль играет форма пор в породе.

Таблица 6.2. Анизотропия теплопроводности пород

Порода	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)		Коэффициент анизотропии $k_{ан}$
	вдоль слоистости	перпендикулярно к слоистости	
Кварцевый песчаник	5,7	5,5	1,06
Гнейс	3,1	2,2	1,44
Мрамор	3,1	3,0	1,02
Известняк	3,4	2,6	1,35

Таблица 6.3. Тепловые свойства фаз, входящих в состав породы

Фаза	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость $c$ , кДж/(кг·К)
Лед	2,33	2,09
Вода	0,58	4,18
Воздух	0,023	1,00

Если поры в породе удлиненные (типа трещин), то теплопроводность значительно уменьшается при расположении пор перпендикулярно тепловому потоку.

В этом случае для расчета пригодна формула гармонического средневзвешенного

$$\lambda_{ср}^{\perp} = \lambda_0 / (1 - P + 43,5P\lambda_0), \quad (6.20)$$

где  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности минеральной фазы породы.

Если тепловой поток направлен вдоль трещин, то, поскольку  $\lambda_v \ll \lambda_0$ , будем иметь

$$\lambda_{ср}^{\parallel} \approx \lambda_0 (1 - P). \quad (6.21)$$

Очень близкие к реальным значениям величины  $\lambda$  дает формула

$$\lambda = \lambda_0 (1 - P)^2. \quad (6.22)$$

По уравнениям (6.20) и (6.21) можно определить предельные значения теплопроводности пород в зависимости от формы пор и трещин. В конкретных случаях могут быть использованы различные обобщенные зависимости, приведенные на рис. 6.4 (кривые 3, 4, 5 и 6).

Существен также состав газов, заполняющих поры. Так, водород обладает теплопроводностью в 7 раз большей, чем воздух, поэтому и теплопроводность пород, содержащих водород, больше при той же пористости.

Как правило, происходит уменьшение теплопроводности пород с уменьшением размеров зерен (рис. 6.5). Однако это

два соприкасающихся кристалла имеют модули Юнга, равные  $E_1$  и  $E_2$ , а коэффициенты линейного расширения соответственно  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , то в этих кристаллах возникают термонапряжения  $\sigma_T^{BH}$ , которые приблизительно можно подсчитать по формуле

$$\sigma_T^{BH} = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T E_1 E_2 / (E_1 + E_2). \quad (6.31)$$

Так, если железистый кварцит, состоящий из зерен магнетита и кварца, нагреть до температуры  $100^\circ\text{C}$ , то, учитывая, что  $\alpha_{кв} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_{маг} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $E_{кв} = 9,6 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ,  $E_{маг} = 10,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ , получаем  $\sigma_T^{BH} = 14 \text{ МПа}$ .

Если учесть объемное напряженное состояние и возможную разницу в температурах включения  $T_1$  и матрицы  $T_2$ , то радикальные термические напряжения во включениях можно более точно рассчитать по формуле

$$\sigma_T^{BH} = \frac{3E_1 E_2 [\alpha_1 (T_1 - T_2) + T_1 (\alpha_1 - \alpha_2)]}{3E_2 (1 + \nu_1) + 2E_1 (1 - 2\nu_2)}, \quad (6.32)$$

где индекс 1 относится к свойствам включения; индекс 2—к свойствам матрицы.

## 7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

### 7.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

В любой горной породе имеются свободные (электроны) и связанные (например, ионы) заряды.

При наложении на породу электрического поля в ней происходит смещение внутренних связанных зарядов. В результате на ее поверхности появляются неуравновешенные заряды. Это явление носит название электрической поляризации (рис. 7.1). Вектор поляризации  $P_\Sigma$  — суммарный электрический момент единицы объема породы. В зависимости от механизма поляризации и типа частиц, участвующих в ней, выделяют четыре основные ее вида: электронную, ионную, дипольную и мигранционную.

Электронная поляризация  $P_{эл}$  возникает в атомах в результате смещения электронных орбит относительно положительно заряженных ядер. Так как с увеличением напряженности поля смещение электронных орбит увеличивается, величина  $P_{эл}$  прямо пропорциональна напряженности электрического поля  $E_\Sigma$  (упругая поляризация):

$$\overline{P}_{эл} = \alpha_\omega \overline{E}_\Sigma n, \quad (7.1)$$

где  $\alpha_\omega$  — поляризуемость атома (коэффициент, характеризующий способность электронного облака данного атома деформироваться под воздействием внешнего электрического поля),  $\text{Ф} \cdot \text{м}^2$ ;  $n$  — число поляризующихся в единице объема атомов,  $1/\text{м}^3$ .

Электронная поляризация присуща всем атомам и молекулам и является наиболее быстрым видом поляризации (возникает за  $10^{-15}$  с).

Ионная (атомная) поляризация  $P_n$  образуется за счет смещения в электрическом поле ионов или частей кристаллических решеток с ковалентной связью. При этом под воздействием

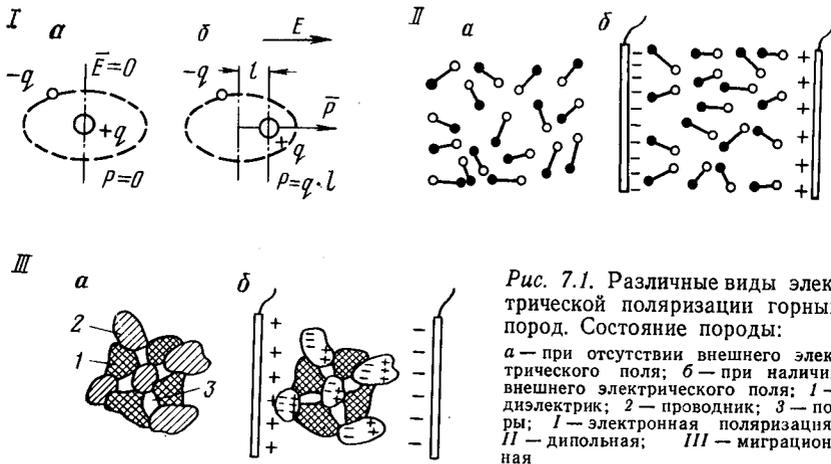


Рис. 7.1. Различные виды электрической поляризации горных пород. Состояние породы: а — при отсутствии внешнего электрического поля; б — при наличии внешнего электрического поля; 1 — диэлектрик; 2 — проводник; 3 — поры; I — электронная поляризация; II — дипольная; III — миграционная

электрического поля положительные и отрицательные ионы сдвигаются. Величина ионной поляризации также прямо пропорциональна  $E_3$  внешнего поля:

$$\bar{P}_n = \alpha_n E_3 n, \tag{7.2}$$

где  $\alpha_n$  — поляризуемость иона.

Время установления ионной поляризации несколько меньше, чем электронной; оно составляет  $10^{-14}$ — $10^{-12}$  с.

Дипольная поляризация  $P_d$  наблюдается при наличии в породах ионов с полярными связями. В этом случае каждая молекула уже имеет некоторый дипольный момент при отсутствии внешнего электрического поля. Тем не менее в объеме породы, состоящем из таких молекул, из-за их хаотического расположения суммарный дипольный момент при отсутствии внешнего поля равен нулю.

При его наличии диполи будут ориентироваться согласно внешнему полю, т. е. возникает электрическая поляризация объема породы.

Дипольная поляризация завершается в течение  $10^{-10}$ — $10^{-7}$  с.

Миграционная (объемная)  $P_m$  поляризация возникает в многофазной породе, состоящей из частиц, обладающих различными электрическими свойствами, а также при наличии пор, заполненных электролитом.

При внесении породы в электрическое поле свободные электроны и ионы, содержащиеся в проводящих и полупроводящих включениях, начинают перемещаться в пределах каждого включения. В результате каждое включение приобретает дипольный момент и ведет себя подобно большому диполю.

Время завершения миграционной поляризации составляет  $10^{-6}$ — $10^{-3}$  с.

Время установления дипольной и миграционной поляризации пород сравнимо с частотой применяемых на практике электромагнитных полей, поэтому указанные виды поляризации называются релаксационными или медленными в отличие от «мгновенного» смещения электронов и ионов.

Суммарная поляризация породы, представляющая собой средний дипольный момент единицы ее объема, равна сумме всех видов поляризации:

$$\overline{P}_s = \alpha_0 \overline{E}_{s0} n, \quad (7.3)$$

где  $\alpha_0$  — условная средняя поляризуемость.

Поляризации пород сопутствует явление, называемое электрострикцией. Оно заключается в деформировании (подобно всестороннему сжатию) диэлектриков под действием электрического поля и присуще всем породам. Причинами электрострикции являются, с одной стороны, давление на породу заряженных частиц, создающих электрическое поле и притягивающихся друг к другу, с другой — смещение ионов и электронов в породе, вызываемое внешним полем.

## 7.2. ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ПОЛЯРИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВ И ПОРОД

Как известно, существуют 32 кристаллографических класса минералов. Из них 11 классов имеют центр симметрии. Эти минералы не обладают никакими особыми электрическими свойствами и подчиняются рассмотренным закономерностям поляризации под воздействием электрического поля. Им, как и всем твердым телам, присуща электрострикция.

Минералы остальных кристаллографических классов ацентричны, и для них характерна поляризация приложением механических нагрузок (пьезоэлектрический эффект).

Так, нагрузив монокристалл кварца, получают разноименные заряды на его противоположных гранях. Этот эффект обратим: приложение к кварцу электрического поля вызывает деформацию кристалла, которая значительно больше, чем электрострикция. Пьезоэффект в отличие от электрострикции зависит от направления поля. Поэтому, приложив к граням кристалла переменные электрические поля, можно вызвать вибрацию кристалла.

Пьезоэффект изучен более чем в 400 минералах, в том числе в кварце, турмалине, цинковой обманке, бораците, сфалерите и нефелине.

М. П. Воларович и Э. И. Пархоменко (ИФЗ АН СССР) в 1954 г. открыли явление пьезоэффекта также в горных породах, содержащих минералы-пьезоэлектрики, — в гранитах, гнейсах, кварцитах, жильном кварце, нефелиновых породах и т. д.

Величина поляризации  $P_n$  пьезоэлектрика прямо пропорциональна механическим напряжениям  $\sigma$ :

$$P_n = \zeta \sigma, \quad (7.4)$$

где  $\zeta$  — коэффициент, характеризующий пьезоэлектрический эффект породы (пьезоэлектрический модуль).

Для характеристики пьезоэффекта пород пользуются отношением пьезомодуля породы к величине  $\zeta$  монокристалла кварца. Так, наиболее сильным пьезоэффектом обладает жильный кварц (10 % от  $\zeta$  модуля монокристалла): у кварцитов пьезомодуль составляет 1 %, у гнейсов и гранитов 0,2—0,5 %.

Десять кристаллографических классов из числа пьезоэлектриков имеют особенные оси, в положительном и отрицательном направлениях которых свойства кристаллов различны. Эти кристаллы спонтанно (самопроизвольно) поляризованы. Величина их поляризации зависит от температуры. Они называются пирозлектриками. При нагреве кристалла пирозлектрика один его конец заряжается положительно, другой — отрицательно. Охлаждение кристалла ведет к изменению знака заряда. Появление зарядов на поверхности пирозлектрика связано с дополнительным смещением диполей вдоль электрической оси под воздействием температуры. Пирозэффект обратим: в электрических полях, направленных по электрической оси кристалла, происходит его нагрев, в противоположных полях — охлаждение. К пирозлектрикам относятся турмалин, вермикулит, нефелин, канкринит, пирротин и др.

У некоторых пирозлектриков направление самопроизвольной поляризации можно изменить, воздействуя на них внешним электрическим полем. Эта группа минералов носит название сегнетоэлектриков. Сегнетоэлектрические свойства могут проявлять минералы кубической, тетрагональной, ромбической и моноклиной сингоний, например, пирохлор, колеманит, борацит, пиролюзит и др.

Так как сегнетоэлектрики спонтанно поляризованы, даже при ничтожно малой напряженности поля поляризация их значительна. Поэтому они обладают исключительно большой диэлектрической проницаемостью (20 000 и более), которая сильно зависит от температуры и имеет аномальные значения в определенных температурных интервалах. Существует температура (точка Кюри), выше которой сегнетоэлектрики теряют свою поляризацию — деполяризуются. Каждый минерал имеет свою точку Кюри (в пределах 10—840 К).

Практически все минералы-диэлектрики и слабые полупроводники способны поляризоваться при трении. Возникающие при этом заряды называются трибоэлектричеством.

Существует общая закономерность, согласно которой при трении двух диэлектриков друг о друга положительно заряженным становится диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью.

### 7.3. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

В результате электрической поляризации пород возникает внутреннее электрическое поле, направленное противоположно внешнему. Поэтому в любом веществе суммарная напряженность электрического поля  $E_3$  оказывается меньше, чем в вакууме  $E_{30}$ . Отношение  $E_{30}/E_3$ , показывающее, во сколько раз напряженность поля в веществе меньше по сравнению с вакуумом, называется относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ , являющейся мерой поляризации вещества.

Влияние вещества (среды) на величину электрических сил учитывается, например, в законе Кулона, согласно которому сила взаимодействия двух зарядов  $q_1$  и  $q_2$  на расстоянии  $r$  между ними равна

$$\vec{F} = q_1 q_2 / (4\pi \epsilon_a r^2), \quad (7.5)$$

где  $\epsilon_a$  — некоторый коэффициент, учитывающий влияние внешней среды на силу взаимодействия и называемый абсолютной диэлектрической проницаемостью, Ф/м.

Отношение  $\epsilon_a/\epsilon_r = \epsilon_0$  называется электрической постоянной ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м).

Вектор поляризации  $P_3$  можно представить как разность электрических индукций в веществе и, условно, в вакууме:

$$\vec{P}_3 = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}_{30} - \epsilon_0 \vec{E}_{30}. \quad (7.6)$$

Отсюда

$$\epsilon_r = \vec{P}_3 / (\epsilon_0 \vec{E}_{30}) + 1. \quad (7.7)$$

Понятие диэлектрической проницаемости имеет смысл только для плохо проводящих сред. Действительно, если среда, в которой располагаются заряды, способна проводить ток (т. е. имеет много свободных зарядов), то вместо взаимодействия будет происходить перенос зарядов из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом до момента их выравнивания.

Поэтому в случае электростатического поля в проводниках  $E_3 = 0$  и, следовательно, диэлектрическая проницаемость близка к бесконечности.

Решая совместно уравнения (7.3) и (7.7), можно получить

$$\epsilon_r = \alpha_0 n / \epsilon_0 + 1. \quad (7.8)$$

С учетом дополнительного взаимодействия частиц внутри поляризованного объема формула (7.8) приобретает следующий вид:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{n\alpha_0}{3\epsilon_0}, \quad (7.9)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

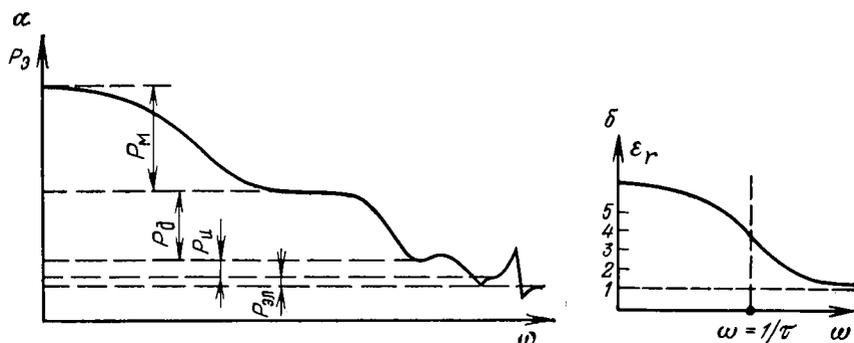


Рис. 7.2. Зависимость электрической поляризации  $P_3$  (а) и диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  (б) пород от частоты  $\omega$  электрического поля

В то же время число поляризующихся частиц  $n$  и, следовательно, поляризация зависят от частоты  $\omega$  электрического поля (рис. 7.2).

В силу того, что ионная поляризация возникает лишь тогда, когда частота электрического поля снижается до  $10^{12}$  Гц, а дипольная — лишь при частоте поля не более  $10^7$ — $10^{10}$  Гц, с возрастанием круговой частоты  $\omega$  электрического поля от 0 до  $\infty$  диэлектрическая проницаемость постепенно уменьшается (см. рис. 7.2) и стремится к единице:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + (\epsilon_{r0} - \epsilon_\infty) / (1 + \omega^2 \tau^2), \quad (7.10)$$

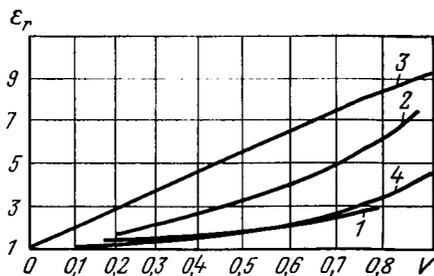
где  $\epsilon_{r0}$  — диэлектрическая проницаемость при частоте  $\omega = 0$ ;  $\epsilon_\infty$  — диэлектрическая проницаемость при  $\omega \rightarrow \infty$ , приближающаяся к единице;  $\tau$  — время релаксации процесса поляризации.

Следовательно, оценка величины  $\epsilon_r$  при частоте  $f \approx 0$  учитывает влияние всех видов поляризации, а при  $f \approx 10^{14}$  Гц — только электронной поляризации.

Диэлектрическая проницаемость минералов при небольших частотах находится обычно в пределах от 3 до 25. Наименьшее значение величины  $\epsilon_r$  (около 3—4) имеют минералы, обладающие в основном электронной поляризацией (например, кварц, ортоклаз, гипс, сера). Минералы, у которых к электронной добавляется еще ионная поляризация, обычно обладают большей диэлектрической проницаемостью. Так, у галита и сильвина  $\epsilon_r = 4,7 \div 6,4$ .

минералов с дипольной поляризацией диэлектрическая проницаемость еще больше. Именно этим объясняется высокая диэлектрическая проницаемость воды (81), льда (73), рутила и др. Большая диэлектрическая проницаемость характерна для рудных минералов из-за миграционной поляризации. Диэлектрическая проницаемость пород является функцией

Кривые изменения диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  от относительного объема хорошо проводящих минералов, построенные по формулам Максвелла (1), логарифмически-средневзвешенного (2) и в другой форме включений соответственно параллельно и перпендикулярно к слоям (3 и 4)



от содержания минералов, слагающих породу, их концентрации и взаимного расположения.

Наибольшие значения диэлектрической проницаемости пород, в состав которых входят рудные минералы, достигаются при следующем

расположении минеральных включений: (2.1) — вдоль слоев, (2.2) — перпендикулярно к слоям, (2.3) — для однородной смеси минералов (2.3).

Для расчета  $\epsilon_{r\text{ср}}$  при наличии сферических включений минерала с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{r2}$  в матрицу с  $\epsilon_{r1}$ , если их относительный объем  $V_2 \ll 1$ , используется известная формула Максвелла

$$\epsilon_r = \epsilon_{r1} \left[ 1 + \frac{3V_2(\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1})}{\epsilon_{r2} + 2\epsilon_{r1} - V_2(\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1})} \right]. \quad (7.11)$$

При использовании этих формул правомерно лишь при наличии миграционной поляризации.

Диэлектрическая проницаемость на низких частотах всегда увеличивается при переходе от монокристалла к поликристаллу и от чистого поликристалла к более разнородному материалу (2.1).

Следует из формул (2.1), (2.2), диэлектрическая проницаемость слоистых пород вдоль слоистости  $\epsilon_{\parallel}$  всегда больше, чем поперек  $\epsilon_{\perp}$ . Так, у железистого кварцита экспериментально найденный коэффициент анизотропии составляет от 1,18

В сухих пористых породах величина  $\epsilon_r$  значительно больше, чем в плотных. Это связано с тем, что диэлектрическая проницаемость воздуха (и других газов) близка к 1 (табл. 7.2).

Таблица 7.1. Сравнение  $\epsilon_r$  монокристаллов и поликристаллов

Монокристалл	$\epsilon_r$	Поли-кристалл однородный	$\epsilon_r$	Поли-кристалл разнородный	
Кварц	4,69—5,06	Кварцит	6,6—7,0	Чистый песчаник	9
Кальцит	7,5—7,7	Мрамор	8,3	Известняк	8

Таблица 7.2. Электрические свойства составляющих горную породу

Фаза	Удельное электрическое сопротивление $\rho_z$ , Ом·м	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$	Фаза	Удельное электрическое сопротивление $\rho_z$ , Ом·м	
Воздух	$\infty$	1,00058	Лед	$6,7 \cdot 10^5$	
Вода	$10—10^5$	80	Нефть	$10^{10}$	

Для вычисления средних значений  $\epsilon_r$  пористой породы можно применить формулу логарифмического среднего, т. е.

$$\epsilon_r \text{ ср} = \epsilon_m^{1-P}$$

#### 7.4. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

В горных породах возникает также медленная электрическая поляризация, причиной которой являются процессы, возникающие при прохождении тока через многие породы.

К таким процессам относятся: окислительно-восстановительные реакции; появление в местах выхода и входа токов электролиза, газов; электроосмос; перераспределение концентрации растворов. Эти процессы бывают как обратимыми и необратимыми. Обратимый процесс приводит к возникновению ЭДС поляризации, т. е. явлению разрядки породы при ее поверхности на короткое (рис. 7.4).

Электрохимическая поляризация происходит значительно медленнее, чем другие виды поляризации. Например, в породах эта поляризация достигает наибольшего значения

через несколько десятков минут после приложения внешнего электрического поля.

Для количественной оценки электрохимической поляризации используются отношения ЭДС поляризации  $\Delta U_{в.п.}$ , измеренной

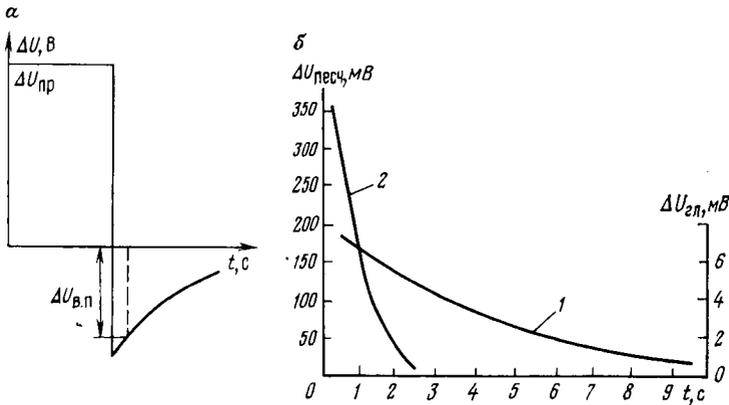


Рис. 7.4. ЭДС поляризации:

а — к расчету коэффициента поляризуемости  $\eta$ ; б — сравнение ЭДС поляризации глины  $\Delta U$  (1) и песчаника  $\Delta U_{песч}$  (2)

через десятые доли секунды после снятия приложенного напряжения, к разности потенциалов внешнего поля  $\Delta U_{пр}$  (см. рис. 7.4). Это отношение называется коэффициентом поляризуемости:

$$\eta = \Delta U_{в.п.} / \Delta U_{пр}. \quad (7.13)$$

Величина  $\eta$  зависит от минерального состава, структуры пород и свойств насыщающих породу жидкостей. В песчано-глинистых породах, например, максимальные значения  $\eta$  характерны при содержании глин в количестве 3—10%. Увеличение влажности вначале повышает  $\eta$ , а затем уменьшает его.

Среди минералов наибольшей поляризуемостью обладают пирит, пирротин, халькопирит и графит. Активны также магнетит, гематит и другие окислы, имеющие электронную проводимость.

Так,  $\eta$ , измеренные через 0,5 с после выключения тока, для гранитоидов с пиритовой вкрапленностью составляют 6%, поли-

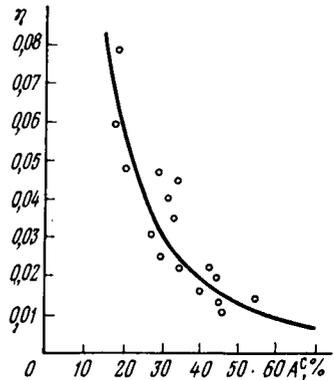


Рис. 7.5. Зависимость поляризуемости  $\eta$  каменных углей от зольности  $A_c$

металлических руд — 7,5 %, антрацита — 95 %, кварцита с сульфидной вкрапленностью — 22 %, графитового сланца — 78 %. В каменных углях электрохимическая поляризация связана с их зольностью, увеличение последней приводит к снижению электрохимической активности углей (рис. 7.5).

## 7.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Перенос зарядов из одной точки проводника в другую, осуществляемый электронами и ионами, носит название электрической проводимости. Векторный показатель, характеризующий количество элементарных зарядов, проходящих через единицу сечения проводника в единицу времени, называют плотностью электрического тока  $\vec{j}$ :

$$\vec{j} = nq\vec{v}, \quad (7.14)$$

где  $n$  — число заряженных частиц в единице объема;  $q$  — заряд частицы;  $\vec{v}$  — средняя скорость направленного движения зарядов.

Так как  $\vec{v} = u\vec{E}$ , где  $u$  — подвижность частиц,

$$\vec{j} = \sigma_3 \vec{E}_3. \quad (7.15)$$

Это уравнение представляет собой закон Ома в дифференциальной форме, причем коэффициент  $\sigma_3 = nqu$ , зависящий от вида и состояния проводящей породы, называется ее удельной электрической проводимостью. Она измеряется в сименсах, деленных на метр (См/м). Величина, обратная  $\sigma_3$ , называется удельным электрическим сопротивлением, измеряемым в омах на метр (Ом·м).

Подобно тому, как диэлектрическая проницаемость характеризует электрические свойства диэлектриков, удельная электрическая проводимость является электрическим параметром проводников. Горные породы в основном входят в группу полупроводников, характеризующихся свойствами как диэлектриков ( $\epsilon_r \ll \infty$ ), так и проводников (породам присущи некоторые значения удельной электрической проводимости  $\sigma_3 > 0$ ).

Прохождение тока через горные породы может осуществляться с переносом вещества (ионная, ионно-электронная проводимость) и без переноса его (электронная и дырочная проводимость).

Ионный характер проводимости имеют все аморфные минералы, галогенные соединения, нитраты, сульфаты и т. д. Электронная проводимость характерна для окислов и сульфидов большинства тяжелых металлов.

По величине электрической проводимости все вещества делится на проводники, полупроводники и диэлектрики. Разная электрическая проводимость веществ с позиций квантовой теории объясняется различиями в энергетической схеме их кристаллов.

Свободным носителем тока может быть лишь электрон, удаленный от ядра атома на достаточно большое расстояние и находящийся в зоне проводимости. Для того чтобы электрон мог попасть в зону проводимости, необходимо некоторое энергетическое воздействие на него. Величина такого воздействия зависит от ширины так называемой запрещенной зоны, отделяющей валентную зону обращения электронов от зоны проводимости.

У проводников (металлов) запрещенная зона отсутствует. Приобретая под влиянием внешних факторов дополнительную кинетическую энергию, электроны легко переходят в зону проводимости и становятся способными переносить заряды.

У полупроводников запрещенная зона  $Q_3$  имеет определенную ширину. Она выражается количеством энергии, которую необходимо затратить электрону для того, чтобы перейти в зону проводимости. Для горных пород-полупроводников величина  $Q_3$  чаще всего составляет  $0,16 \cdot 10^{-19} - 3 \cdot 10^{-19}$  Дж ( $0,1 - 2$  эВ). В этом случае электроны могут перейти в зону проводимости лишь под воздействием, превышающим величину  $Q_3$ . Так, у гранитов  $Q_3$  находится в пределах  $(0,9 - 1,4) \cdot 10^{-19}$ , у гнейсов —  $0,96 \cdot 10^{-19}$ , у габбро —  $(1,8 - 2,7) \cdot 10^{-19}$  Дж.

В диэлектриках запрещенная зона имеет ширину, превышающую работу, требуемую для отрыва электрона от кристаллической решетки (до  $13 \cdot 10^{-19}$  Дж и более). Поэтому проводимость металлов и полупроводников — электронная, а проводимость диэлектриков — ионная, так как работа отрыва иона меньше  $Q_3$ .

Есть два основных отличия полупроводников от проводников. Первое из них состоит в том, что электрическая проводимость проводников значительно выше, чем полупроводников, причем граничной считают электрическую проводимость порядка  $10$  См/м. Второе отличие — возрастание электрической проводимости полупроводников с повышением температуры (температурный коэффициент положителен), в то время как электрическая проводимость проводников при этом уменьшается (электрическое сопротивление растет — температурный коэффициент отрицателен).

Кроме того, наличие примесей в проводниках всегда снижает их электрическую проводимость, а в полупроводниках — повышает ее. По этим признакам почти все минералы и горные породы относятся к классу полупроводников и диэлектриков с разной электрической проводимостью.

Главнейшие породообразующие минералы (слюда, галит, сильвин, кальцит, полевые шпаты, кварц) обладают низкой электрической проводимостью ( $\sigma_3 = 10^{-12} - 10^{-20}$  См/м).

Фактически почти весь ток проводимости в этих минералах обусловлен примесными ионами и атомами и лишь незначительная его часть — небольшим числом свободных электронов самого минерала. Примесная проводимость существенна также и для других минералов, так как ионы и электроны примесей

оказываются наименее связанными в кристаллической решетке. Поэтому удельная электрическая проводимость минералов не является строго постоянной величиной и изменяется в больших пределах.

Удельная электрическая проводимость плотных малопори-

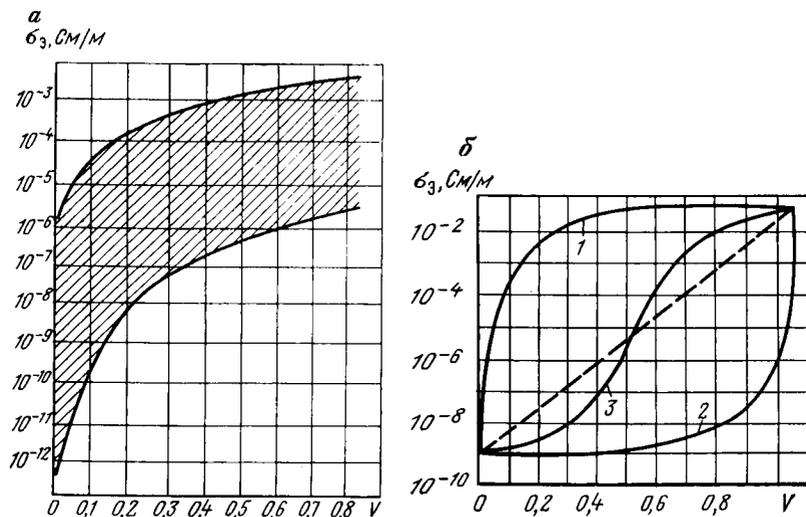


Рис. 7.6. Зависимость удельной электрической проводимости  $\sigma_3$  породы от объемного содержания  $V$  хорошо проводящих минералов:

$a$  — магнетита;  $b$  — халькозина; 1 — параллельно слоям; 2 — перпендикулярно слоям; 3 — в статистической смеси

стых пород зависит от проводимости слагающих их минералов. Так, при прочих равных условиях удельная электрическая проводимость породы находится в прямой зависимости от объемного содержания хорошо проводящих минералов (рис. 7.6).

Для породы, состоящей из двух минералов, один из которых представлен сферами с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_{31}$ , а другой заполняет пространство между сферами и имеет  $\rho_{32}$ , удельное электрическое сопротивление

$$\rho_3 = \frac{(1 - V_1) + \frac{\rho_1}{\rho_2} (2 + V_1)}{(1 + 2V_1) + 2 \frac{\rho_1}{\rho_2} (1 - V_1)} \rho_2, \quad (7.16)$$

где  $V_1$  — относительное объемное содержание сферических включений.

Если в породе имеются рудные минералы, расположенные в виде прожилков, то присутствие даже незначительного количества этих минералов резко повышает величину  $\sigma_3$  пород. Это характерно для пород, содержащих халькопирит, пирротин, ко-

торые имеют полосчатое расположение в отличие, например, от галенита, располагающегося изолированными включениями.

Пределы изменения величины  $\sigma_z$  при изменении формы хорошо проводящих включений могут быть описаны уравнениями (2.1) (для удельной электрической проводимости слоистой породы вдоль слоистости  $\sigma_{z\parallel}$ ) и (2.2) (перпендикулярно слоистости  $\sigma_{z\perp}$ ).

Слоистость пород вызывает анизотропию электрической проводимости, причем  $\sigma_{z\parallel}/\sigma_{z\perp} > 1$ .

В сцементированных осадочных породах электрическая проводимость понижается, так как обычно цементирующими веществами бывают слабопроводящие минералы — кварц, гипс, кальцит и др.

Метаморфизация углей повышает их удельную электрическую проводимость. Особенно резко она увеличивается при содержании углерода более 87%. С увеличением зольности электрическая проводимость углей понижается.

Выветривание пород, повышение пористости, развитая система трещин, не сопровождающиеся увлажнением, также уменьшают электрическую проводимость породы (рис. 7.7).

Мелкозернистые породы, особенно если они содержат коллоидные частицы, имеют при прочих равных условиях большую электрическую проводимость, чем крупнозернистые. Например, из осадочных пород, не имеющих рудных минералов, наибольшей электрической проводимостью обладает глина.

## 7.6. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Горная порода, имеющая высокое электрическое сопротивление в переменном электрическом поле, характеризуется еще одним параметром — углом диэлектрических потерь  $\delta$ . Угол  $\delta$  можно представить как дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз между полным переменным током, проходящим через конденсатор с диэлектриком, и напряжением между обкладками конденсатора.

Полный ток  $I_{\Sigma}$  в реальном диэлектрике является векторной суммой (рис. 7.8) емкостного тока  $I_C$  (тока смещения), тока проводимости  $I_a$  и тока, обусловленного релаксационными

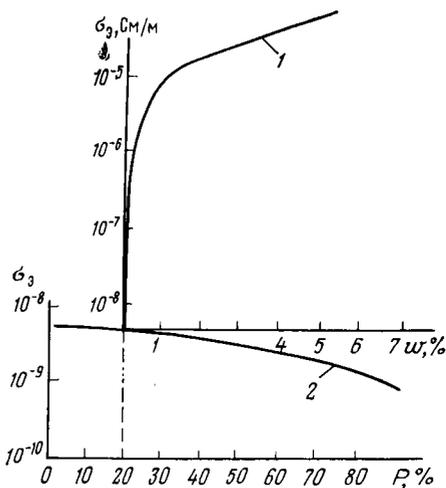


Рис. 7.7. Зависимость удельной электрической проводимости  $\sigma_z$  известняка от увлажнения  $w$  при постоянной пористости  $P=20\%$  (1) и от пористости в сухом состоянии (2)

видами поляризации  $I_r$ , который, в свою очередь, также состоит из емкостного  $I'_C$  и активного  $I'_a$  токов. Поэтому  $\operatorname{tg} \delta$  может быть записан как отношение суммы активных составляющих тока к сумме его реактивных составляющих:

$$\operatorname{tg} \delta = (I_a + I'_a) / (I_C + I'_C). \quad (7.17)$$

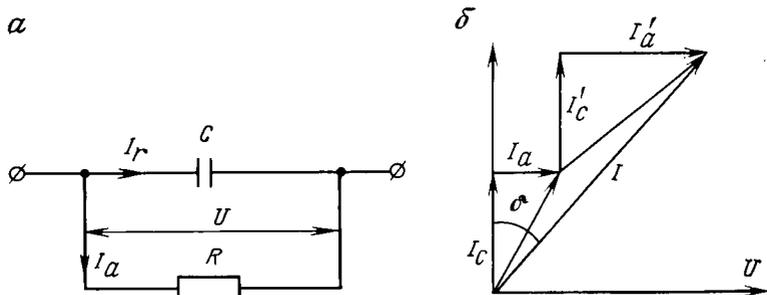


Рис. 7.8. Параллельная эквивалентная схема замещения конденсатора с диэлектрическими потерями (а) и векторная диаграмма токов и напряжений (б):  $U$  — напряжение;  $R$  — сопротивление

При параллельной схеме замещения образца и частоте электрического поля  $f$  эту формулу можно представить так:

$$\operatorname{tg} \delta = (2\pi f C R_a)^{-1}, \quad (7.18)$$

где  $C$  — емкость образца;  $R_a$  — активное сопротивление.

Так как количество теплоты  $Q$ , выделившейся при прохождении тока через породу, равно

$$Q = UI = U^2 / R_a, \quad (7.19)$$

то, подставив в формулу (7.19) значение  $R_a$  из формулы (7.18), получим

$$Q = 2\pi f C \operatorname{tg} \delta U^2. \quad (7.20)$$

Следовательно, поглощение энергии породой с увеличением частоты электрического поля  $f$  возрастает, а параметр  $\operatorname{tg} \delta$  определяет количество электрической энергии, переходящей в породу в теплоту.

Так как  $C = \epsilon_0 \epsilon S / d$ , а  $U = E_s d$ , удельное количество теплоты (в Дж/м<sup>3</sup>), выделившейся в породе,

$$q = 55,5 \epsilon_r f \operatorname{tg} \delta E_s^2 10^{-12}, \quad (7.21)$$

где  $E_s$  — напряженность электрического поля, В/м;  $S$  — площадь образца породы, м;  $d$  — толщина его, м.

Тангенс угла диэлектрических потерь большинства скальных пород при частоте поля около 1 МГц находится в пределах  $2 \cdot 10^{-3} - 10^{-1}$ . Величина  $\operatorname{tg} \delta$  минералов зависит от структуры

кристаллической решетки и плотности упаковки ионов в решетке. Более плотная упаковка ионов и высокая симметрия кристаллов обуславливают малые значения  $\text{tg}\delta$  минералов. Низкие значения  $\text{tg}\delta$  присущи, например, периклазу и шпинели. Любые искажения кристаллической структуры и примеси увеличивают

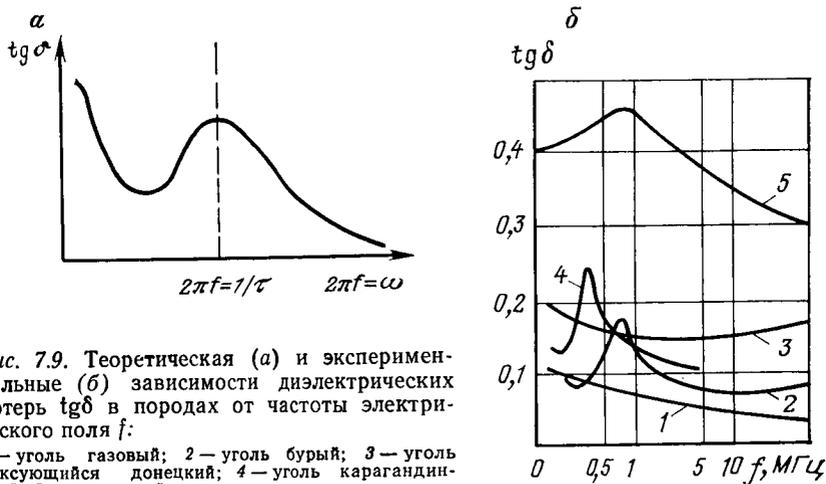


Рис. 7.9. Теоретическая (а) и экспериментальные (б) зависимости диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  в породах от частоты электрического поля  $f$ :

1 — уголь газовый; 2 — уголь бурый; 3 — уголь коксующийся донецкий; 4 — уголь карагандинский; 5 — глинистый сланец

диэлектрические потери. Поэтому  $\text{tg}\delta$  монокристаллов всегда ниже, чем поликристаллов и пород.

Наличие в минералах кристаллизационной воды также увеличивает их  $\text{tg}\delta$ .

Большие значения  $\text{tg}\delta$  присущи также рудным минералам.

В каменных углях  $\text{tg}\delta$  возрастает с увеличением их зольности.

У слоистых пород  $\text{tg}\delta$  параллельно слоистости выше  $\text{tg}\delta$  перпендикулярно к слоистости.

Если диэлектрические проницаемости слоев равны, то для слоистой породы вдоль и поперек слоистости  $\text{tg}\delta$  рассчитывают по формулам (2.1) и (2.2).

Увеличение пористости приводит к уменьшению  $\text{tg}\delta$  сухой горной породы.

Зависимость  $\text{tg}\delta$  от частоты электрического поля  $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ) для случая дипольной поляризации описывается следующей формулой Дебая (рис. 7.9):

$$\text{tg}\delta = \frac{(\epsilon_r - \epsilon_\infty)\omega\tau}{\epsilon_r + \epsilon_\infty\omega^2\tau^2} + \frac{4\pi\sigma_s}{\omega(\epsilon_r + \epsilon_\infty\omega^2\tau^2)}, \quad (7.22)$$

в которой второй член представляет собой потери за счет сквозной проводимости;  $\epsilon_\infty$  — диэлектрическая проницаемость при  $\omega \rightarrow \infty$ .

Из-за снижения  $\operatorname{tg}\delta$  пород с ростом частоты поля уже при частотах свыше 50 МГц значения  $\operatorname{tg}\delta$  большинства пород сближаются.

### 7.7. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

Согласно закону Кулона сила взаимодействия между двумя магнитными массами  $m_{m1}$  и  $m_{m2}$  на расстоянии  $r$  друг от друга

$$F_M = \pm m_{m1}m_{m2}/(\mu_a r^2), \quad (7.23)$$

где  $\mu_a$  — некоторая характеристика среды (вещества, породы), называемая абсолютной магнитной проницаемостью (Гн/м).

Между магнитной индукцией  $B$  и напряженностью  $H$  магнитного поля в веществе существует прямо пропорциональная зависимость

$$B = \mu_a H. \quad (7.24)$$

В вакууме  $\mu_a = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м. Эта константа называется магнитной постоянной.

Отношение  $\mu_a/\mu_0$  называется относительной магнитной проницаемостью  $\mu$ .

Изменение индукции магнитного поля при внесении в него породы связано с ее намагничиванием — появлением в породе под воздействием внешнего поля нескомпенсированного магнитного момента  $M$ , который, в свою очередь, обусловлен наличием в породе элементарных магнитных моментов  $m_i$ .

Поэтому намагниченность  $I$  породы вычисляется как предел отношения суммы магнитных моментов в некотором объеме породы к этому объему:

$$I = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left( \sum_{i=1}^n m_i / \Delta V \right). \quad (7.25)$$

Намагниченность может быть определена так же, как приращение магнитной индукции поля в веществе по сравнению с вакуумом:

$$I = \mu_a H - \mu_0 H = \mu_0 H (\mu - 1). \quad (7.26)$$

Коэффициент  $(\mu - 1) = \kappa$  называется объемной магнитной восприимчивостью, а отношение восприимчивости к плотности породы  $\kappa/\rho$  — удельной магнитной восприимчивостью  $\chi$ .

Намагниченность породы обусловлена суммой магнитных моментов ее электронов, атомов и доменов.

Движение каждого электрона по орбите можно рассматривать как элементарный кольцевой ток, поэтому плоскость вращения электрона можно представить как плоский магнитный диполь с различными полярностями на обеих поверхностях.

Произведение элементарного тока  $i$  на площадь магнитного диполя  $\Delta S$  называется магнитным моментом электрона. Он постоянен и равен  $9,28 \cdot 10^{-24}$  Дж/Т.

Если магнитные моменты всех электронов атома компенсируют друг друга, то при  $H=0$  атом не намагничен. Такие породы называются диамагнитными. В диамагнетиках элект-

Таблица 7.3. Пределы изменения относительной магнитной проницаемости  $\mu$  и объемной магнитной восприимчивости  $\chi$  минералов

Тип магнетика	$\mu$	$\chi \cdot 10^6$	Пример минерала
Диамагнетик	0,999836—1,0	—200—0	Апатит, плагиоклаз, вода, уголь, галит, кальцит, кварц
Парамагнетик	1,0—1,0064	0— $10^4$	Воздух, доломит, пироксен, хромит
Ферромагнетик	1,0064—5	$10^4$ — $4 \cdot 10^6$	$\gamma$ -гематит, лимонит, магнетит, пирротин, яacobит

тронные оболочки атомов симметричны и замкнуты. При внесении такого атома в магнитное поле его электронные оболочки получают дополнительную скорость и каждый атом породы приобретает магнитный момент, имеющий направление, противоположное направлению поля. Поэтому магнитная проницаемость диамагнетиков меньше единицы. Величина диамагнетизма определяется радиусами атомных орбит.

Горные породы, атомы которых обладают магнитным моментом при отсутствии внешнего поля, называются парамагнитными. Однако в целом образец парамагнетика при отсутствии поля не намагничен. Лишь при внесении парамагнетика в магнитное поле его диполи ориентируются сообразно с направлением поля и образец намагничивается. Магнитная проницаемость парамагнетиков несколько больше единицы.

Горные породы, у которых целые объемы (домены) обладают магнитными моментами при отсутствии внешнего поля, называются ферромагнитными. Благодаря доменам магнитная проницаемость ферромагнитных пород значительно больше, чем у парамагнитных. Намагниченность ферромагнетиков достигается воздействием не только внешнего поля, но и намагничивающим действием дополнительного внутреннего молекулярного поля (табл. 7.3).

Намагниченность ферромагнитных пород зависит от напряженности  $H$  магнитного поля, причем при определенном ее значении эта зависимость исчезает — наступает насыщение. При снижении напряженности магнитного поля до нуля породы полностью не размагничиваются, появляется остаточная на-

магнитность  $I_{ост}$ . Для того чтобы породу размагнитить, необходимо воздействие на нее некоторого обратного направленного магнитного поля. Напряженность поля, при которой происходит полное размагничивание, характеризует породу и называется коэрцитивной силой  $H_c$ . В итоге у ферромагнитных пород при изменении  $H$  наблюдается петля гистерезиса.

Наибольшие значения  $\mu$  имеют ферромагнитные минералы, в основном магнетит, у которого магнитная восприимчивость достигает 3—4. Это обуславливает четкую связь между объемным содержанием магнетита в рудах и их магнитной восприимчивостью  $\mu$  (рис. 7.10).

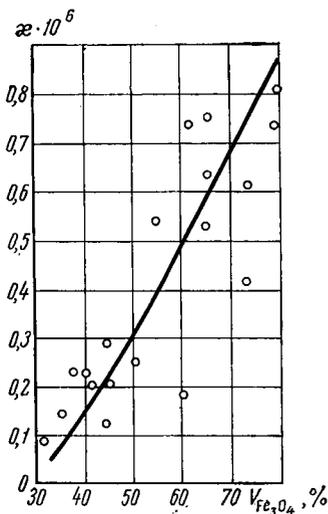


Рис. 7.10. Зависимость магнитной восприимчивости  $\mu$  магнетитовых руд Южного Урала от объемного содержания магнетита  $V$

Средняя магнитная проницаемость  $\mu_{ср}$  горной породы, состоящей из основной массы с проницаемостью  $\mu_1$  и сферических включений с проницаемостью  $\mu_2$ , может быть приблизительно рассчитана по той же формуле Максвелла (7.11), что и диэлектрическая проницаемость.

Если принять для магнетита  $\mu_2 = 3$ , а для вмещающей породы  $\mu_1 = 1$ , то формула (7.11) примет более простой вид:

$$\mu_{ср} = (5 + 4V_2)/(5 - 2V_2). \quad (7.27)$$

Для статистической смеси минералов наиболее удобна формула логарифмического средневзвешенного (2.3).

На магнитные свойства пород оказывают также влияние форма, размеры и взаимное расположение ферромагнитных зерен. Например, магнитная восприимчивость крупнозернистых ферромагнетиков больше, чем мелкозернистых. Это объясняется ростом числа доменов в зернах при увеличении их размеров.

В переменных магнитных полях возникают потери магнитной энергии — переход ее в тепловую. Для их оценки используют коэффициент магнитных потерь. Потери в переменном поле складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи.

Некоторые ферромагнетики обладают ярко выраженными магнитоупругими свойствами. При намагничивании таких пород происходит их относительное удлинение (например, магнетит, железо) или укорачивание (например, никель).

## 7.8. РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

К радиационным свойствам горных пород относят их естественную радиоактивность, а также параметры, определяющие рассеяние и поглощение горными породами внешнего излучения:  $\gamma$ -лучей, нейтронов и других частиц.

Естественная радиоактивность пород обусловлена наличием в их составе либо минералов, содержащих радиоактивные элементы (уран U, торий Th, радий Ra), либо радиоактивных изотопов калия ( $K^{40}$ ), кальция, рубидия, циркония, олова, теллура, вольфрама, кобальта, рения и висмута (табл. 7.4).

Кроме того, ряд минералов обладает способностью адсорбировать из окружающей среды радиоактивные элементы и изотопы, вследствие чего наличие таких минералов в породах также повышает их радиоактивность. Так, повышенной радиоактивностью среди осадочных пород в результате сорбции элементов обладают глина и глинистые сланцы. Поэтому присутствие глин в осадочных породах (например, в мергелях) увеличивает их радиоактивность (рис. 7.11).

Как известно, при радиоактивном распаде, связанном с перестройкой ядер элементов, происходит излучение  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -лучей.  $\gamma$ -лучи — это очень короткие электромагнитные волны с длиной менее 1 Å ( $10^{-10}$  м), они характеризуются массой и энергией кванта.

Энергия  $\gamma$ -квантов может колебаться от  $0,08 \cdot 10^{-13}$  до  $4,8 \cdot 10^{-13}$  Дж в зависимости от длины волны. Так, энергия  $\gamma$ -квантов радиоактивного изотопа кобальта  $Co^{60}$  составляет  $1,8 \cdot 10^{-13}$ — $2,1 \cdot 10^{-13}$  Дж.

Проникающая способность  $\gamma$ -лучей наибольшая. Пучок  $\gamma$ -квантов радиоактивного кобальта ослабляется в 2 раза лишь слоем свинца толщиной 1,6 см или алюминия толщиной 12 см. Скорость их распространения мало отличается от скорости света (не более  $10^{-2}$  %).

Величина радиоактивности горных пород оценивается параметром удельной радиоактивности  $R$  — количеством распадающихся в 1 с атомов в 1 кг вещества. Так, удельная радиоактивность радия составляет  $3,7 \cdot 10^{13}$  с $^{-1}$ ·кг $^{-1}$ .

Рассеяние и поглощение радиоактивного излучения и потока нейтронов в горных породах оцениваются коэффициентами поглощения и сечениями рассеяния и захвата.

Проходя через вещество,  $\gamma$ -лучи теряют энергию вследствие поглощения и рассеяния.

Поглощение  $\gamma$ -кванта происходит в результате того, что  $\gamma$ -квант вырывает электрон из электронной оболочки атома, передавая ему всю свою энергию (фотоэлектрический эффект).

Рассеяние — это передача  $\gamma$ -квантом электрону атома только части своей энергии (Комптон-эффект). В результате уменьшается энергия кванта, меняется направление его движения.

В горных породах преобладает рассеяние — доля энергии, идущей на рассеяние, составляет около 90 % общих потерь.

Полный коэффициент поглощения  $\gamma$ -лучей равен сумме коэффициентов собственно поглощения и рассеяния. Чем больше плотность породы, тем сильнее поглощение  $\gamma$ -лучей.

$$I_x = I_0 \exp(-ax\rho), \quad (7.28)$$

Таблица 7.4. Содержание радиоактивных элементов (%) в породах

Порода	U	Th	K <sup>40</sup>	Порода
Базальт	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	0,75	Известняк
Диабаз	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	1,0	Глина
Гранит	до $5 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-4}$	4,4	Песчаник
Кварцит	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	0,6	Гипс
Мрамор	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	0,2	Каменный уголь

где  $I_0$  и  $I_x$  — интенсивность  $\gamma$ -лучей соответственно при выходе из источника и на расстоянии  $x$  от него;  $a$  — параметр, зависящий от энергии излучения.

Произведение  $a\rho$  представляет собой коэффициент поглощения  $\gamma$ -лучей породой.

Способность пород поглощать и рассеивать нейтроны оценивается эффективными макроскопическими сечениями (в  $\text{см}^{-1}$ ) поглощения (захвата)  $\Sigma_z$  и рассеяния  $\Sigma_p$  породы. Эффективные сечения рассеяния представляют собой общую вероятность того, что нейтрон столкнется с ядром атома какого-либо элемента.

$$\Sigma_p = n\sigma_p = \rho_0 N \sigma_p / A, \quad (7.29)$$

где  $n$  — число ядер данного элемента в  $1 \text{ см}^3$  вещества;  $\sigma_p$  — площадь микроскопического сечения рассеяния ядра данного элемента для нейтрона,  $\text{см}^2$ ;  $\rho_0$  — плотность вещества,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $N$  — число Авогадро ( $6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>);  $A$  — атомная масса данного элемента.

Точно так же рассчитывают эффективное сечение поглощения (захвата) пород  $\Sigma_z$  (через площадь микроскопического сечения  $\sigma_z$ ).

Значения  $\sigma_p$  и  $\sigma_z$  лежат в пределах  $10^{-22}$ — $10^{-26}$   $\text{см}^2$  на ядро. Для их измерения принят барн, равный  $10^{-24}$   $\text{см}^2$  (табл. 7.5).

Так как сами по себе макроскопические сечения рассеяния не характеризуют способность пород замедлять нейтроны, для этих целей используют дополнительные параметры. Одним из

них является длина замедления  $L_3$ , прямо пропорциональная среднему расстоянию  $r_3$ , которое нейтрон способен преодолеть до того момента, когда его энергия станет равной тепловой:

$$L_3 = 0,4r_3. \quad (7.30)$$

Длина диффузии  $L_d$ , подобно длине замедления, прямо

U	Th	K <sup>40</sup>
$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,3
$4 \cdot 10^{-4}$	$11,5 \cdot 10^{-4}$	2,7
$2,9 \cdot 10^{-4}$	$10,4 \cdot 10^{-4}$	1,7
$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,02
$2,4 \cdot 10^{-4}$	$10,5 \cdot 10^{-4}$	0,1

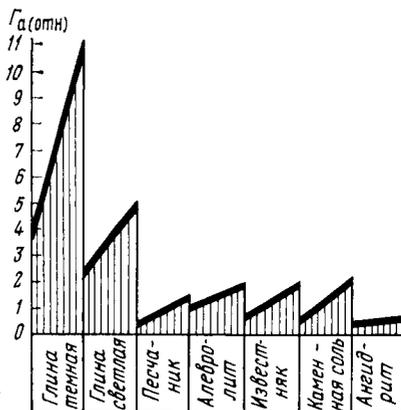


Рис. 7.11. Сравнение относительной радиоактивности осадочных пород

пропорциональна  $r_d$  пути, пройденному нейтроном в породе до его полного поглощения (табл. 7.6):

$$L_d = 0,4r_d. \quad (7.31)$$

Таблица 7.5. Значения площадей микроскопических сечений рассеяния  $\sigma_p$  и поглощения  $\sigma_3$  нейтронов элементами

Элемент	$\sigma_p$ , барн	$\sigma_3$ , барн
Водород	38	0,332
Кремний	1,7	0,13
Алюминий	1,4	0,23
Хлор	16	31,6
Кислород	4,2	0,002

Таблица 7.6. Характеристики поглощения и рассеяния в минералах и породах

Минерал. порода	$\Sigma_3$ , см <sup>-1</sup>	$\Sigma_p$ , см <sup>-1</sup>	$L_3$ , см	$L_d$ , см
Кальцит	0,0071	0,432	35	10,4
Кварц	0,0034	0,268	37	19,1
Гипс	0,018	1,51	11	3,6
Вода	0,022	2,68	7,7	2,4
Антрацит	—	—	—	4,9
Магнетит	0,0948	0,648	19,6	2,3

## 8. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИХ ПОЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД

### 8.1. ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ (ВЕЩЕСТВЕННОГО ПОЛЯ)

Вещественное поле в породах играет роль либо только составной части породы, либо физико-химически активной среды, воздействующей на минеральный скелет. В первом случае свойства породы определяются как интегральный показатель свойств минерального скелета, жидкостей и газов, насыщающих породу. Они могут быть рассчитаны по свойствам компонент породы с помощью ранее приведенных формул (см. разд. 2.1). Например, объемная масса влажных пород определяется по плотности воды и минеральной фазы как арифметическое средневзвешенное. Во втором случае свойства породы, кроме того, становятся функцией степени взаимодействия между вещественным полем и породой. В связи с этим при насыщении могут наблюдаться изменения свойств пород в различных направлениях.

Воздействие жидкости на горную породу может быть динамическим и статическим. Динамическое воздействие, как правило, приводит к механическому разрушению и перемещению горных пород; статическое — к их набуханию, размоканию и растворению. Степень воздействия жидкостей наибольшая в связанных и некоторых слабосцементированных скальных породах.

Активной растворимостью обладает лишь незначительное число пород и минералов (галогениды, более слабо ангидрит и гипс) (табл. 8.1). Доломиты и известняки относятся к слабо-растворимым породам, причем с увеличением содержания глинистых минералов (свыше 10—15 %) их растворимость уменьшается. Остальные породы практически нерастворимы. Так, например, растворимость альбита при давлении 40 МПа и температуре 500 °С характеризуется массовым содержанием в воде, равным 0,0062 %.

Растворимость минералов увеличивается с уменьшением энергии связей в кристаллической решетке (см. табл. 8.1). Растворимость значительно возрастает в результате циркуляции в породах водных растворов различных кислот. Так, с увеличением содержания в воде углекислоты растворимость карбонатов повышается.

Вода проникает в мельчайшие поры и трещины породы, под воздействием внешнего давления стремится распространиться по всему объему, нарушает связи между частицами, расширяет трещины, препятствует их смыканию.

Явления снижения связей между частицами породы при ее насыщении обуславливают соответствующие изменения механических свойств пород.

С увлажнением уменьшается статический модуль

Юнга горных пород и возрастает коэффициент Пуассона, как это видно на примере углей Кизеловского бассейна (рис. 8.1).

Если влажность приводит к размоканию пород, то наблюдается также снижение скоростей распространения упругих колебаний.

Однако, если порода скальная и не размокает при насыщении водой, то скорости распространения упругих колебаний

**Таблица 8.1. Зависимость растворимости минералов от энергии их кристаллической решетки**

Минерал	Энергия кристаллической решетки, кДж/моль	Растворимость минералов, моль/л	Минерал	Энергия кристаллической решетки, кДж/моль	Растворимость минералов, моль/л
Доломит	3114	$3,5 \cdot 10^{-5}$	Ангидрит	2684	$1,3 \cdot 10^{-2}$
Кальцит	2926	$1,2 \cdot 10^{-4}$	Галит	765	6,1
Гипс	2717	$8 \cdot 10^{-3}$			

в такой увлажненной породе будут выше, чем в сухой, так как скорость распространения волны в воде почти в 5 раз больше, чем в воздухе (рис. 8.2). Скорость распространения поперечных волн при этом увеличивается незначительно. Так, если  $v_p$  насыщенного водой гранита возрастает на 40 %, то  $v_s$  — только на 13 %.

Скорость распространения упругих волн  $v$  в пористых породах группы 2 с учетом скоростей распространения волн в минеральной фазе и заполняющих поры веществах  $v_i$ , их плотностей  $\rho_i$  и коэффициентов Пуассона  $\nu_i$  вычисляется по следующей формуле:

$$(1 + q)/v^2 \rho = \sum_{i=1}^n V_i (1 + q_i)/(v_i^2 \rho_i), \quad (8.1)$$

где  $q_i = 2(1 - 2\nu_i)/(1 + \nu_i)$ ;  $V_i$  — объемное относительное содержание компонент.

Уравнение (8.1) подтверждает, что чем больше скорость распространения упругих волн в заполнителе порового пространства и чем больше этого заполнителя, тем больше суммарная скорость их в породе.

Увеличение влажности горных пород приводит к снижению всех их прочностных параметров (табл. 8.2) и увеличению пластичности и деформируемости пород. Так, деформируемость мрамора после увлажнения возрастает в 2 раза, глинистого песчаника — в 3 раза, песчаника — в 3,5 раза.

Уменьшение прочности пород при водонасыщении характеризуется коэффициентом водопрочности (размокания)  $\eta_p$ .

$$\eta_p = \sigma_{сж.н} / \sigma_{сж.о} \leq 1, \quad (8.2)$$

где  $\sigma_{сж.н}$  и  $\sigma_{сж.о}$  — пределы прочности породы при сжатии соответственно после насыщения ее водой и до насыщения.

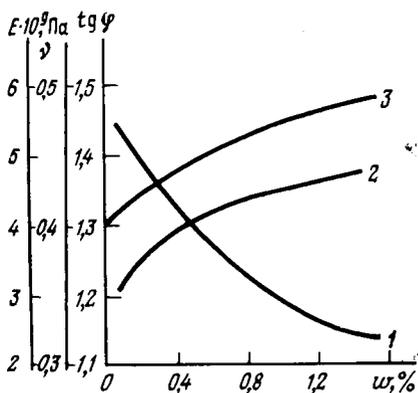
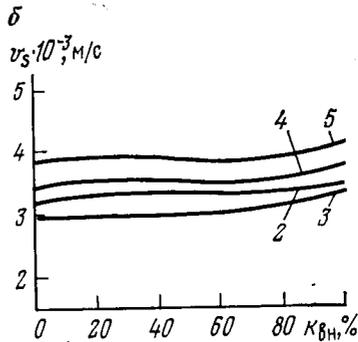
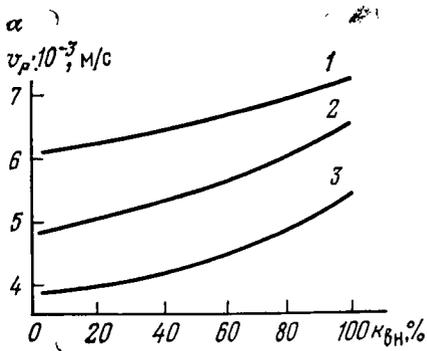


Рис. 8.1. Изменение упругих свойств  $E$  и  $\nu$  (1 и 2) и тангенса угла внутреннего трения  $\text{tg } \varphi$  (3) от степени увлажнения  $w$  углей Кизеловского бассейна

Рис. 8.2. Зависимость скорости продольных  $v_p$  и поперечных  $v_s$  упругих волн в горных породах от степени их увлажнения:

1 — перидотит; 2 — диорит гиперстенный; 3 — гранит биотитовый; 4 — габбронорит; 5 — гипербазит



Породы, имеющие коэффициент водопрочности ниже 0,75, считаются слабоустойчивыми.

Коэффициент водопрочности глинистых песчаников составляет 0,45, известняков — 0,35—0,5. Размоканию подвержены также угли. Процесс размокания углей и пород протекает более интенсивно в движущихся потоках жидкости, так как при этом происходит вымывание и вынос мелких частиц породы. Очень слабо или почти не размокают скальные горные породы. Величина размокаемости возрастает с увеличением степени водонасыщенности пород (рис. 8.3).

Установлены эмпирические зависимости прочностных параметров пород от степени их увлажнения. Например, зависи-

мость между сцеплением некоторых глинистых грунтов и их объемной влажностью  $w_{об}$  имеет вид

$$\lg C = 5 \cdot 10^{-4} \rho / (1 + w_{об}) + 4. \quad (8.3)$$

Чем больше подвижность насыщающей породу жидкости и чем выше гидрофильность и адсорбционная способность породы, тем сильнее разъединяющее частицы породы действие

Таблица 8.2. Влияние влажности на прочность пород (по М. Ф. Кунтышу)

Порода	$\sigma_{сж. о.}$ , МПа	$\sigma_{сж. н.}$ , МПа	$\eta_p$	$\sigma_{р. о.}$ , МПа	$\sigma_{р. н.}$ , МПа
Аргиллит	80	44	0,55	10	5
Алевролит	64	21	0,33	6,4	3,2
Песчаник	143	99	0,69	15	9,4
Известняк	20	14	0,7	3	1,6
Сланец плотный	247	196	0,9	16,5	12,0

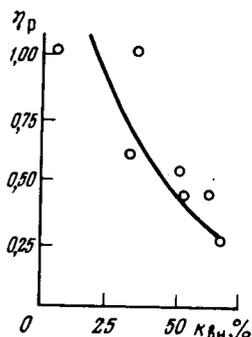


Рис. 8.3. Изменение коэффициента водопрочности  $\eta_p$  пористого базальта в зависимости от водонасыщения  $k_{вн}$

жидкости. Обладающие большим эффектом разупрочнения жидкости называются поверхностно-активными веществами (ПАВ). ПАВ снижают величину поверхностной энергии тела. В связи с этим уменьшаются напряжения, необходимые для разрыва связей между атомами в вершине трещины. Этот эффект был впервые описан акад. П. А. Ребиндером в 1946 г. и носит его имя.

Увлажнение приводит также к уменьшению горно-технологических параметров пород — крепости, твердости, абразивности, хрупкости. Например, твердость известняков снижается в пределах 10—30%, гранитов — 5—10%, а алевролитов — до 50%. Одновременно коэффициент пластичности увеличивается (у гранитов, доломитов и песчаников до 20%).

Между крепостью  $f$  и приращением влажности  $\Delta w$  в углях существует следующая связь:

$$f = f_0 - 0,07 \Delta w, \quad (8.4)$$

где  $f_0$  — крепость сухого угля.

Ослабление глинистых пород при насыщении их водой объясняется способностью мельчайших частиц обволакиваться мощной гидратной оболочкой, в результате чего связи между ними тоже нарушаются.

Зависимость пластичности глинистых пород от влажности характеризуется их пределами пластичности. Пределы пластичности — это значения влажности породы (в %), при которых происходит переход породы из хрупкого состояния в пластическое и из пластического в текучее. В первом случае — это нижний предел пластичности  $\omega_n$ , во втором — верхний предел пластичности (предел текучести)  $\omega_v$ .

Таблица 8.3. Характеристика некоторых глинистых пород

Порода	Объемная масса $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	Естественная влажность, %	Предел пластичности, %		Число пластичности $\Phi$
			нижний $\omega_n$	верхний $\omega_v$	
Глина выветрелая	2,67	28,2	23,8	83,3	59,5
Глина известковая валунная	2,63	16,8	13,5	42,0	28,5
Мел сенонский	2,72	—	18,8	22,7	3,9

Нижний предел пластичности глин соответствует такому состоянию, когда вся вода находится в физически связанном виде, а верхний — когда содержание свободной воды становится настолько значительным, что нарушаются связи между минеральными частицами — глина течет.

Число пластичности  $\Phi$ , равное разности верхнего и нижнего пределов пластичности, характеризует диапазон влажности, в пределах которого порода находится в пластическом состоянии (табл. 8.3).

С увеличением числа пластичности глин возрастает их сжимаемость и уменьшается проницаемость.

Значительно увеличивается ползучесть влажных горных пород. Так, ползучесть аргиллита при его увлажнении с 0,98 до 2,3 % возросла в 2 с лишним раза, причем на 25-е сутки порода перешла в стадию разрушения. При этом снижаются период релаксации и длительная прочность пород.

Влажность в связных горных породах способна приводить также к другим физическим явлениям, в значительной степени оказывающим влияние на ведение горных работ. К ним относятся набухание пород, липкость, усадка и тиксотропия.

## 8.2. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Основной причиной изменения свойств пород под влиянием давления является нарушение первоначального строения пород. В зависимости от характера давления это либо уплотнение породы, смятие пор и увеличение площади контакта зерен, либо образование системы трещин, уменьшение связей между отдельными ее участками и т. д.

Наибольшее уплотняющее действие на породы оказывает гидростатическое давление, в результате которого в горной породе возникают остаточные деформации, приводящие к снижению пористости. Так, глинистые породы при давлении  $P_{\sigma} = 100$  МПа снижают свою пористость с 50 до 7%. С уплотнением увеличиваются площади сечения, по которым передаются давление и энергия, и поэтому возрастают все тензорные пара-

Рис. 8.4. Изменение модуля упругости  $E$  габбро (1), базальта (2) и песчаника (3) с повышением давления

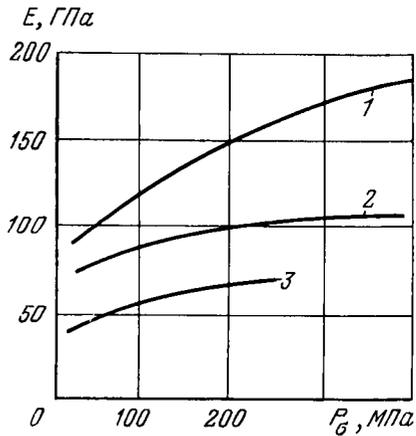
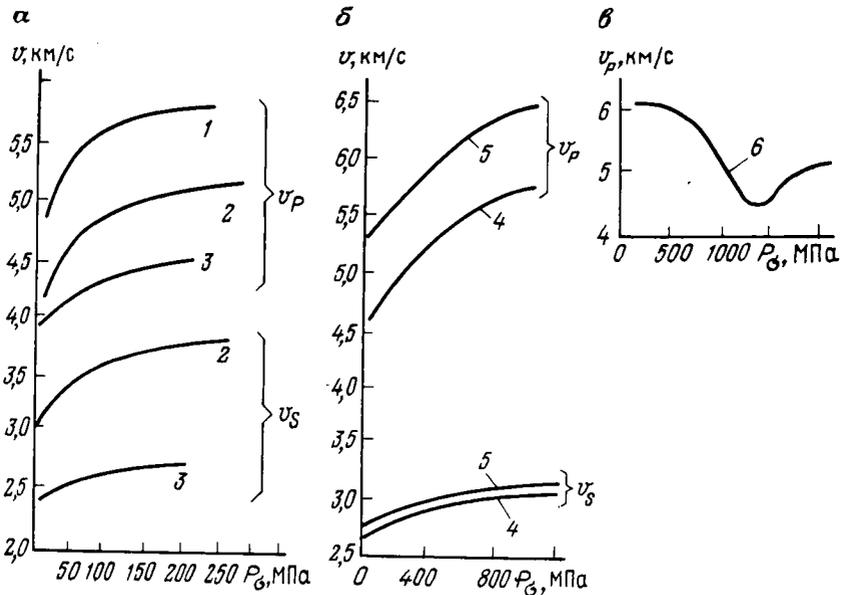


Рис. 8.5. Влияние на скорость продольных  $v_p$  и поперечных  $v_s$  упругих волн всестороннего давления  $P_{\sigma}$  (а), давления и влажности (б), давления и полиморфных переходов (в): 1 — известняк; 2 — песчаник; 3 — сланец глинистый; 4 — сухой биотитовый гранит; 5 — влажный биотитовый гранит (по М. П. Воляровичу); 6 — кальцит



метры — прочность, упругие свойства, теплопроводность и т. д. Одновременно уменьшаются площади сечения каналов (пор, трещин и т. п.), и поэтому такие параметры, как влагоемкость и проницаемость, уменьшаются.

Под воздействием разупрочняющих механических напряжений происходит, наоборот, уменьшение внутренних связей между частицами горных пород. При этом изменения свойств, как правило, более существенны. Значительно уменьшается прочность пород, снижаются параметры упругости, крепость, твердость, увеличивается дробимость пород.

Так, модуль упругости  $E_{сж}$ , определяемый при сжатии, обычно в 1,5—4 раза выше модуля упругости  $E_p$ , определяемого при растяжении.

Ввиду того, что закрытие пор и сопутствующее этому увеличение числа и площади контактов зерен при сжатии в основном завершаются при давлении 50—100 МПа, наиболее существенное возрастание (до трех раз) модуля упругости большинства пород группы 3 наблюдается до этих давлений (рис. 8.4). При дальнейшем повышении давления вплоть до 1000 МПа рост модуля упругости замедляется.

Так как с увеличением давления возрастают параметры упругости, одновременно наблюдается и увеличение скоростей распространения упругих волн (рис. 8.5), особенно в пористых и рыхлых породах.

Например, у песчанистого мергеля с начальной пористостью 25 % скорость распространения продольных волн  $v_p$  при всестороннем давлении до 100 МПа увеличивается на 50—60 %, в то время как у менее пористых пород она возрастает не более чем на 20 % (с повышением давления до 400 МПа  $v_p$  для габбро увеличивается на 5—7 %, для гранита — на 10—20 %).

Увеличение скорости распространения поперечных волн с повышением давления происходит медленнее.

В ряде случаев из-за возникновения полиморфных переходов в породах в области высокого давления возможны иные закономерности изменения  $v_p$  с давлением. Например,  $v_p$  кальцита с нагрузкой уменьшается до значений давления 1500 МПа, а затем из-за полиморфного перехода возрастает.

Увеличение всестороннего давления на породу снижает ее анизотропность, и поэтому отношение  $v_{II}/v_{\perp}$  с ростом давления уменьшается.

Сравнение изменения скорости распространения упругих волн с нагрузкой в насыщенных водой образцах и в сухих показывает качественное повторение изменения  $v_p$  и практически полное совпадение кривых  $v_s$  для сухих и влажных пород.

Коэффициент поглощения упругих волн с повышением давления уменьшается (у пористых пород на 15—35 %) (рис. 8.6), а удельное волновое сопротивление возрастает. Однако если имеются фазовые превращения, то возможна иная зависимость  $\theta$  от давления, как это, например, установлено для известняка (см. рис. 8.6).

Прочность пород значительно увеличивается при переходе от одноосного сжатия к двух- и трехосному (рис. 8.7).

При всесторонних сжимающих нагрузках прочность пород

с повышением давления продолжает расти, а отношение  $\sigma_{сж}/\sigma_p$  уменьшается. Например, предел прочности при сжатии мелкозернистого известняка, составляющий в случае нормального атмосферного давления 260 МПа, при давлении 1000 МПа достигает 1300 МПа. Сильно возрастают также пределы прочности пород при сдвиге. Прочность при изгибе у большинства пород при давлении 300 МПа повышается в 10—15 раз.

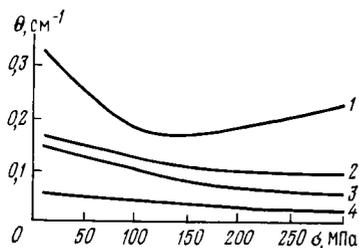


Рис. 8.6. Изменение коэффициента поглощения  $\theta$  продольных упругих волн от давления  $\sigma$ :

1 — известняк; 2 — гранит; 3 — гнейс; 4 — габбро

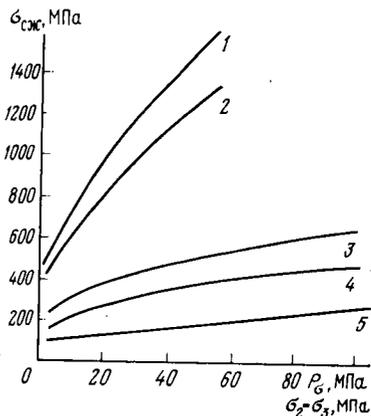


Рис. 8.7. Изменение предела прочности при сжатии с увеличением гидростатического давления  $P\sigma$  (1 — диабаз; 2 — базальт) и при двухосных сжимающих нагрузках  $\sigma_2 = \sigma_3$  (3 — габбро; 4 — доломит; 5 — известняк мраморизованный)

При повышенных давлениях значительно увеличиваются также пластические и реологические параметры пород.

Способность к пластическим деформациям у известняков и алевролитов проявляется уже при всестороннем давлении около 50 МПа, у ангидритов — около 10 МПа. Пластические деформации песчаника возможны при давлении выше 400 МПа.

Пластические деформации при больших значениях всестороннего давления объясняются тем, что в этих условиях более легко могут проявляться внутри- и межзеренные движения и смещения, не приводящие к нарушению сплошности.

Существенное влияние на механические свойства пород оказывает характер приложения механических нагрузок к породам — статический или динамический.

При динамических нагрузках наблюдаются более высокие значения параметров упругости, прочности, крепости, твердости, вязкости пород, пониженные значения пластичности (рис. 8.8).

Модуль продольной упругости, например, определенный при статических нагрузках  $E_{ст}$ , обычно меньше модуля  $E_d$ , измеренного при динамическом воздействии на породу. Разница между статическим и динамическим модулями упругости достигает 35 % и более, причём максимальные различия приходятся на пористые породы.

Установлена, например, следующая корреляционная зависимость между значениями  $E_{ст}$  и  $E_{д}$  для пород, у которых  $E_{ст} < 5 \cdot 10^{10}$  МПа:

$$E_{д} = 0,83E_{ст} + 0,97 \cdot 10^{10}. \quad (8.5)$$

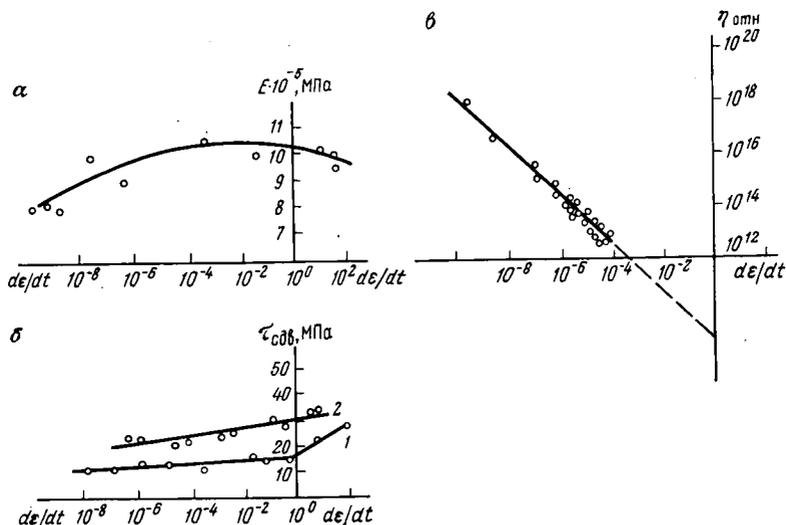


Рис. 8.8. Зависимость механических свойств горных пород от скоростей нагружения и деформирования: модуля Юнга (а), предела прочности при сдвиге (б) диабазы [1 —  $\sigma_2=0$ ; 2 —  $\sigma_2=50$  МПа (по А. Н. Ставрогину)] и относительной вязкости  $\eta_{отн}$  (в);  $\sigma_2$  — боковое давление

Для окварцованных пород Кривбасса предложена зависимость типа

$$E_{д} = 0,91E_{ст,изг} + 2,46 \cdot 10^{10}. \quad (8.6)$$

Основные причины различия между величинами  $E_{ст}$  и  $E_{д}$  — это упругое последствие и релаксационные явления, сопутствующие статическим нагрузкам, а также особенности макростроения (пористость, слоистость, трещиноватость), которые способствуют увеличению деформации пород при больших статических нагрузках. Поэтому для пород подгруппы строения 1.1 наблюдается практическое совпадение модулей  $E_{ст}$  и  $E_{д}$  (при давлениях около 30 % от разрушающих). Характерно, что при динамических измерениях коэффициент анизотропии модуля Юнга в слоистых породах больше, чем при статических нагружениях.

При повышении всестороннего давления до 100 МПа  $E_{д}$  возрастает менее значительно, чем  $E_{ст}$ , лишь на 50—60 %.

Экспериментальные данные показывают увеличение динамического предела прочности при сжатии  $\sigma_{сж.д}$  по сравнению с величиной  $\sigma_{сж.ст}$  от 10—15 до 200 %. Так, при изменении

скорости нарастания напряжений от 1,9 до 4 МПа величина  $\sigma_{сж}$  гранитов возрастает со 150 до 170 МПа. При этом для ряда пород одновременно наблюдается снижение энергоемкости разрушения. Это объясняется хрупким характером разрушения пород при быстрых нагружениях.

Как известно, процесс разрушения требует определенного времени для своего завершения. При малом времени приложения нагрузки, недостаточном для полного развития процесса разрушения, приходится его интенсифицировать путем увеличения нагрузки.

При статических нагрузках создаются более благоприятные условия для развития пластических деформаций в породе. Поэтому необходимые для разрушения усилия в этом случае меньше, чем при динамическом воздействии, однако удельная работа разрушения может быть больше. Например, при скорости  $u$  удара долота о породу, равной 3 м/с, удельная работа разрушения базальта составляет  $a=1600$  МДж/м<sup>3</sup>, в то время как при  $v=22$  м/с  $a=400$  МДж/м<sup>3</sup>.

Так как хрупкое разрушение пород связано с образованием трещин, для оценки разрушаемости пород необходимо знать скорость трещинообразования пород  $v_{тр}$ . Эта величина значительно больше скорости развития пластических деформаций, она определяется параметрами упругости пород.

Установлено, что при коэффициенте Пуассона  $\nu \approx 0,25$   $v_{тр} \approx (0,3 - 0,4) \sqrt{E/\rho}$  (т. е. в 2,5—3 раза меньше скорости распространения упругих волн). Так, в апатитовых рудах, например,  $v_{тр}=400—1500$  м/с, в граните  $v_{тр}=1400—1800$  м/с, в мраморе  $v_{тр}=1200—1600$  м/с, в известняке  $v_{тр}=800—1200$  м/с. Если скорость приложения нагрузок  $v > v_{тр}$ , разрушение породы вообще может не наступить. На этой основе выведены критерии разрушаемости пород по скорости их нагружения.

### 8.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ НА ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

Упругие колебания низкой частоты достаточной мощности чаще всего приводят к тем же последствиям, что и механические напряжения. При этом происходит усталостное разрушение пород. Возможен эффект уплотнения и сортировки рыхлых горных пород.

Особые явления наблюдаются при распространении в горных породах и жидкостях высокочастотных упругих колебаний (ультразвука). При прохождении ультразвука через жидкость возникает кавитация. Когда в некоторых участках жидкости, оказавшихся в фазе деформации растяжения, внутреннее давление  $p$  становится ниже статического ее давления  $p_0$ , происходит разрыв жидкости. Жидкость испаряется, и образуются кавитационные пузырьки, которые захлопываются сразу же, как только  $p$  станет больше  $p_0$ , что происходит в фазе сжатия.

Появлению кавитации способствует наличие в жидкости инородных тел или пузырьков, являющихся как бы центрами ее возникновения. Вблизи этих центров силы притяжения между молекулами воды значительно ослаблены. При частоте более 5 МГц кавитация не наблюдается, так как процесс возникновения и исчезновения пузырьков не успевает завершиться.

Кавитация является причиной возникновения некоторых эффектов, важнейшим из которых следует считать диспергацию (разрушение) твердых тел, расположенных в области распространения упругих колебаний. При этом скорость разрушения пород под воздействием ультразвука определяется прежде всего их хрупкостью. Чем больше хрупкость, тем, при прочих равных условиях, выше скорость разрушения, поэтому ультразвуком легко диспергируются такие минералы, как гипс, слюда, графит, сера. Эффект диспергирования усиливается при добавке к воде поверхностно-активных веществ в количестве менее 0,2 %.

Кавитация вызывает также дегазацию жидкостей и расплавов. Дегазация обусловлена понижением давления жидкости в фазе растяжения и выделением вследствие этого газа.

Ультразвук, проходя через жидкость, в которой взвешены частицы породы, заставляет их совершать колебания, частота и амплитуда которых зависят от массы частиц. Это приводит к увеличению частоты соударений частиц, их слипанию, укрупнению и осаждению. Это явление называется коагуляцией.

Упругие колебания звуковой и инфразвуковой частоты способны вызвать тиксотропию (разжижение) влажных глинистых пород.

#### 8.4. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОвого ПОЛЯ

Выделяют два вида воздействия теплового поля. Первый вид связан с возникающими в породах термическими напряжениями из-за неравномерного теплового расширения минералов. Второй вид обусловлен различными физическими и термохимическими превращениями минералов породы при нагреве.

Термохимические и физические превращения в горных породах могут быть следующими:

высушивание породы;

переход породы из одного агрегатного состояния в другое — плавление, отвердевание; испарение или сжижение; возгонка;

переход минералов из одной кристаллической формы в другую без изменения их химического состава — полиморфные превращения;

дегидратация — удаление химически связанной воды из минералов и горных пород;

диссоциация — разрушение минерала с выделением газобразной фазы (например, декарбонатизация известняков);

окислительно-восстановительные процессы.

Температуры, при которых происходят те или иные физические и термохимические эффекты, а также соответствующее удельное количество теплоты, необходимой для их осуществления, также являются физическими характеристиками пород и минералов.

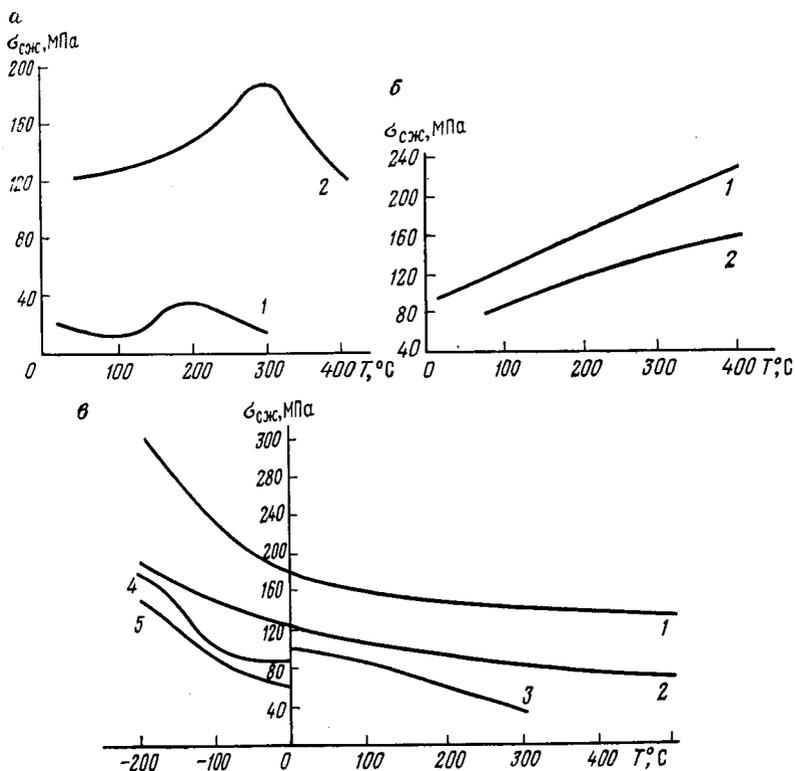


Рис. 8.9. Температурные зависимости прочностных свойств горных пород: а — максимумы на кривых  $\sigma_{сж} = f(T)$ : 1 — уголь; 2 — мелкозернистый гранит; б — повышение  $\sigma_{сж}$  с нагревом: 1 — халькозиновая руда; 2 — уртит; в — понижение  $\sigma_{сж}$  с нагревом: 1 — железистый кварцит (Лебединский ГОК); 2 — гранит (месторождение Ровное); 3 — плавленый кварц; 4 — габбро (Ждановский ГОК); 5 — лабрадорит

К ним относятся:

- температура  $T_{пл}$  и теплота  $Q_{пл}$  плавления пород (например, у галита  $T_{пл} = 1800$  К,  $Q_{пл} = 530$  кДж/кг);
- температура и теплота возгонки минералов;
- температура фазовых превращений (переход  $\alpha$ -халькозина в  $\beta$ -халькозин при  $T = 380$  К);
- температура дегидратации (например, у серпентина она составляет 420 К, у боксита — 570 К и т. д.);
- температура диссоциации (у доломита  $T_d = 1170$  К);

температура и теплота сгорания (у антрацита  $Q = 35$  МДж/кг).

Если в породе в каком-то диапазоне температур ее нагрева отсутствуют термохимические явления, то в этом случае основную роль в изменении механических свойств пород играют термонапряжения.

Экспериментальные данные показывают, что внутренние термические напряжения могут превысить 100 МПа, т. е. достичь пределов прочности породы при сжатии или сдвиге (в зависимости от расположения включений). Наличие в породе различных минеральных зерен с разным сочетанием  $\alpha_i$  приводит к появлению максимумов на кривых зависимости предела прочности при сжатии некоторых пород от степени их нагрева (рис. 8.9, а).

Опыты показывают, что упрочнение в основном характерно для плотных мелкозернистых пород. Повышение прочности до температур 800 °С обнаружено у мелкозернистого песчаника (размер зерен  $d = 0,02—0,3$  мм), серпентинита ( $d = 0,1—0,6$  мм), халькозиновой руды, уртита (рис. 8.9, б).

У многих крупнозернистых пород, например гранитов, наблюдается снижение прочности с самого начала нагрева (рис. 8.9, в).

При температурах выше 800 °С почти во всех породах начинает преобладать разупрочняющий эффект термонапряжений.

Модуль Юнга большинства кристаллических пород с нагревом плавно уменьшается, в основном до температур 800—900 К (рис. 8.10). Коэффициент Пуассона с повышением температуры увеличивается и приближается к 0,5.

Физические и термохимические эффекты при нагреве горных пород чаще всего приводят к их разупрочнению. Однако некоторые фазовые переходы могут вызвать скачкообразное увеличение механических параметров породы.

Так, для кварцсодержащих пород (например, кварцитов, песчаников) существует точка минимума модуля упругости  $E$  около температуры 573 °С, выше которой происходит резкое его возрастание. Это объясняется полиморфным превращением кварца — переходом низкотемпературной тригональной модификации кварца ( $\beta$ -кварц) в высокотемпературную гексагональную ( $\alpha$ -кварц) (см. рис. 8.10, а).

Для аморфных (например, плавленный кварц) и некоторых мелкозернистых горных пород (например, тремолит-волластонитовый скарн) характерно устойчивое возрастание модуля Юнга (до 55 %) с повышением температуры (см. рис. 8.10, в).

Глинистые породы, имеющие водно-коллоидный характер связи между частицами (группа строения 3), с повышением температуры спекаются, упрочняются, и поэтому их параметры прочности и упругости возрастают в несколько раз.

Во всех случаях, когда высокие температуры приводят к выгоранию породы (уголь, углистые аргиллиты, сланцы), на-

блюдается уменьшение прочности и модулей упругости с увеличением температуры.

Модуль сдвига  $G$  пород с ростом температуры постепенно уменьшается и при температурах плавления становится равным нулю.

Если нагрев породы не приводит к необратимым изменениям в ее составе или структуре, то при ее охлаждении восстанавли-

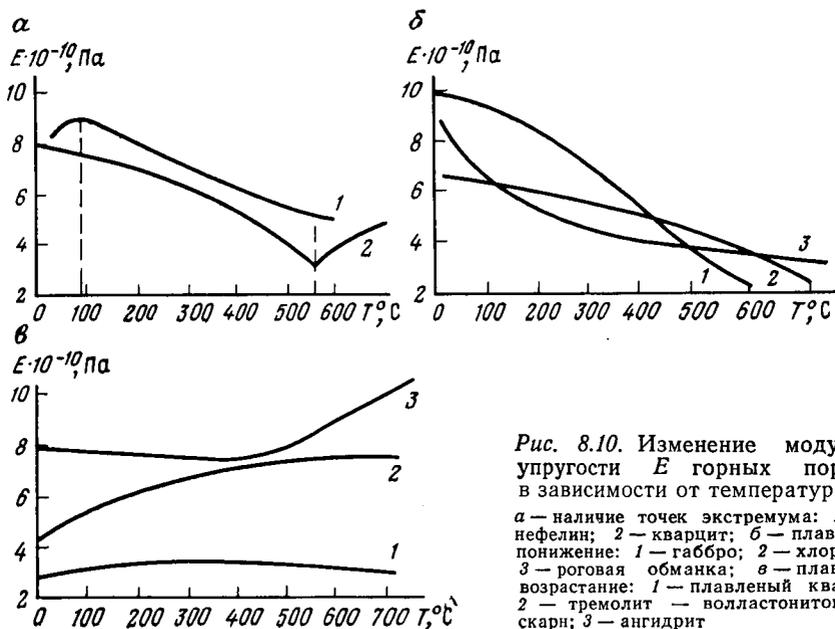


Рис. 8.10. Изменение модуля упругости  $E$  горных пород в зависимости от температуры:

$a$  — наличие точек экстремума: 1 — нефелин; 2 — кварцит;  $б$  — плавное понижение: 1 — габбро; 2 — хлорит; 3 — роговая обманка;  $в$  — плавное возрастание: 1 — плавленый кварц; 2 — тремолит — волластонитовый скан; 3 — ангидрит

ваются параметры упругости. То же наблюдается и в кварцсодержащих породах, так как переход  $\beta$ -кварца в  $\alpha$ -кварц — явление обратимое.

Все параметры пород, характеризующие их пластичность, ползучесть, релаксацию напряжений, с повышением температуры увеличиваются. Вязкость пород с нагревом снижается.

Повышение температуры изменяет скорость распространения упругих волн, подобно изменению модуля упругости  $E$ . В большинстве случаев наблюдается понижение  $v_p$  с повышением температуры и возрастание коэффициента поглощения  $\theta$  (рис. 8.11). Дополнительное увеличение внешнего давления приводит к снижению влияния температуры на акустические свойства пород.

Влияние отрицательных температур на механические свойства пород чаще всего имеет противоположный нагреву характер. Понижение температуры вызывает в большинстве случаев повышение прочности пород (см. рис. 8.9, в),

модулей упругости, твердости, крепости, понижение пластических и реологических характеристик.

Основной причиной этих процессов в скальных породах являются суммарные сжимающие термонапряжения.

Во влажных связных и рыхлых породах основную роль играет замерзание воды в порах и пустотах пород, приводящее к образованию криогенной текстуры. Характерной особенностью

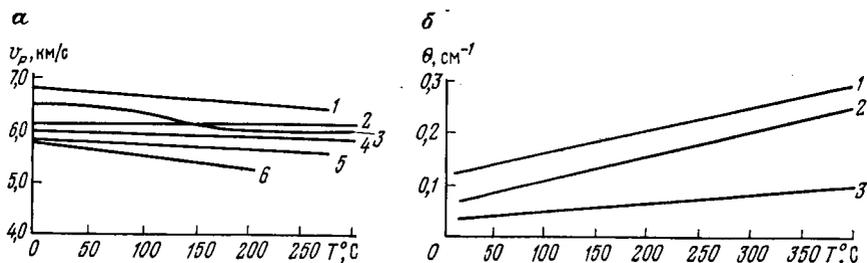


Рис. 8.11. Изменение акустических параметров пород с нагревом:

а — скорости продольных упругих волн  $v_p$ : 1 — диабаз; 2 — плавленый кварц; 3 — андезит; 4 — кристаллический кварц; 5 — гранит; 6 — серпентинит; б — коэффициента поглощения  $\theta$  при  $P_{\sigma} = 1000$  МПа: 1 — гранит; 2 — андезит; 3 — диабаз

криогенных текстур являются их разрушение при 0 °C и скачкообразное изменение всех свойств породы в этой области температур. В связи с целым рядом особенностей эти породы выделяют в специальный класс мерзлых пород и рассматривают отдельно (см. разд. 14.5).

Изменение температуры породы приводит к изменению не только ее прочности, но и механизма разрушения. Повышение температуры способствует проявлению пластичного характера разрушения пород, понижение — хрупкого.

Поэтому динамическое нагружение охлажденных скальных пород вызывает более эффективное их разрушение. Так, удельная работа разрушения габбро-диабазы и различных песчаников при температурах ниже —150 °C в 4—6 раз меньше работы разрушения при нормальной температуре, несмотря на то, что предел прочности этих пород при низких температурах  $\sigma_{сж}$  увеличивается в 1,1—1,7 раза.

Упрочняющие и разупрочняющие эффекты, возникающие при нагреве или охлаждении горных пород, приводят к остаточным изменениям их свойств. Так, прочность фосфоритовых руд Каратау, равномерно нагретых до температур 500 °C и затем охлажденных, снижается на 30—40 %; энергоёмкость разрушения неокисленных железистых кварцитов меняется в зависимости от температуры предварительного нагрева. Породы, склонные к значительным проявлениям пластических деформаций при

нагреве (например, габбро), обнаруживают повышение энергоемкости разрушения после нагрева.

Эффект разупрочнения пород после нагрева или глубокого охлаждения усиливается при быстром — динамическом воздействии теплового поля. Это связано с большей неоднородностью теплового поля в породе, приводящей к повышению в ней термонапряжений.

Объем трещин  $V_{тр}$ , возникающих от термонапряжений и приводящих к разупрочнению породы, может быть приблизительно подсчитан по формуле

$$V_{тр} \approx C \Delta \alpha \Delta T, \quad (8.7)$$

где  $C$  — концентрация включений в породе (минеральных зерен), коэффициент линейного теплового расширения которых  $\alpha_1$ ;  $\Delta \alpha = \alpha_1 -$

$\alpha_2$ ;  $\alpha_2$  — коэффициент линейного теплового расширения матрицы породы.

Так, для пары минералов плагиоклаз — кварц (что возможно для гранита)  $\Delta \alpha$  составляет  $3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , и при нагреве до  $600^\circ \text{C}$  в них возникают внутренние термонапряжения, которые приводят при концентрации кварца в породе около 20% к образованию трещин общим объемом 0,36%, что, учитывая их форму, весьма существенно сказывается на прочности породы.

С повышением температуры изменяются также гидравлические свойства и эффекты воздействия жидкостей на горные породы. Например, растворимость минералов  $\chi$  с повышением температуры может как увеличиваться (у галогенов), так и уменьшаться (у магнезита) (рис. 8.12).

## 8.5. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ

Электрические и магнитные поля могут воздействовать на горные породы непосредственно за счет смещения, электрического и магнитного ориентирования (поляризация и намагничивание), возбуждения электронов и ионов и т. д. или косвенно — через тепловое поле, в которое трансформируется электрическая энергия в породах.

В связи с этим выделяют три группы явлений: нагрев пород, непосредственное изменение свойств пород под воздействием поля и пробой пород.

**Нагрев пород.** Как известно, превращение электрической энергии в тепловую описывается законом Джоуля—Ленца:

$$q_T = \sigma_3 E_3^2, \quad (8.8)$$

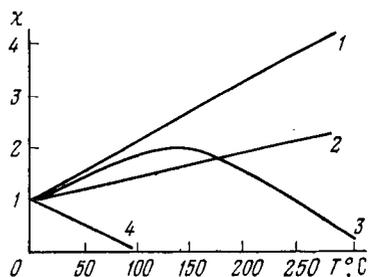


Рис. 8.12. Изменение относительной растворимости  $\chi$  минералов с повышением температуры  $T$ :

1 — сильвинит; 2 — галит; 3 — сульфиды и карбонаты; 4 — магнезит

где  $q_T$  — удельное количество тепла, выделившегося в единицу времени в породе;  $\sigma_3$  — удельная электрическая проводимость породы;  $E_3$  — напряженность электрического поля.

Таким образом, при довольно низком электрическом сопротивлении пород или большом напряжении электрического поля порода может быть нагрета до весьма высоких температур.

При распространении в породе тока высокой частоты происходит значительно более интенсивный ее нагрев, так как удельная электрическая проводимость пород с повышением частоты возрастает согласно уравнению

$$\sigma_3 = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \operatorname{tg} \delta. \quad (8.9)$$

Поэтому количество выделяющейся в этом случае теплоты рассчитывают по формуле

$$q_T = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \operatorname{tg} \delta E_3^2. \quad (8.10)$$

Магнитное поле оказывает заметное воздействие лишь на ферромагнитные горные породы.

Мощность  $N_\Phi$ , выделяющаяся в виде тепла за счет индукционных вихревых токов, прямо пропорциональна квадрату частоты поля  $f$  и зависит от магнитной проницаемости  $\mu$  и электрической проводимости  $\sigma_3$  породы:

$$N_\Phi = k H^2 f^2 \mu^2 \sigma_3, \quad (8.11)$$

где  $k$  — некоторый размерный коэффициент;  $H$  — напряженность магнитного поля.

Мощность  $N_r$ , выделяющаяся в результате процесса перемагничивания (потери на гистерезис), пропорциональна частоте поля  $f$ :

$$N_r = k_1 H^2 f \mu^2, \quad (8.12)$$

где  $k_1$  — некоторый размерный коэффициент.

Для ферромагнитных горных пород наиболее существенны магнитные потери. Отношение  $N_r/N_\Phi$  пород составляет 15—30. Вихревые токи имеют достаточно большие значения лишь при высоких температурах, когда электрическое сопротивление пород снижается, а потери на гистерезис выше точки Кюри практически исчезают.

**Изменение прочности пород.** Электромагнитное поле не только является источником тепла в горной породе, но и непосредственно воздействует на кристаллическую решетку минералов, существенно изменяя их механические свойства. Это связано с тем, что дислокации, имеющиеся в породе, как правило, обладают некоторым электрическим зарядом. Поэтому внешнее электромагнитное поле способно воздействовать на дислокацию, переориентировать ее или сдвинуть в определенном направлении. Это способствует пластической деформации пород.

В результате воздействия электромагнитного поля на некоторые породы даже при отсутствии нагрева последних происхо-

дит довольно существенное уменьшение модуля Юнга (до 2—3 раз), предела прочности при сжатии и возрастание величины пластической деформации.

Так, при одних и тех же механических напряжениях величина деформации облученных электромагнитным полем образцов пород в 1,2—1,5 раза, а сфалерита даже в 2,6—3 раза больше, чем необлученных (рис. 8.13).

Электрическое поле способно непосредственно изменять состояние пород также за счет электрострикции.

Механические напряжения  $\sigma$ , возникающие в результате электрострикции, прямо пропорциональны квадрату напряженности электрического поля:

$$\sigma = 0,5\epsilon_0\epsilon_r E_z^2 \quad (8.13)$$

Электрострикция значительна только при весьма больших напряженностях поля. Большие механические напряжения в породах способен вызвать пьезоэффект.

**Пробой пород.** При больших напряжениях электрического поля нарушается закон Ома и ток начинает непропорционально быстро расти — сопротивление диэлектрика убывает. Напряжение, при котором  $\rho_{\text{об}} \rightarrow 0$ , т. е. происходит разряд через диэлектрик, называют пробивным напряжением  $U_{\text{п}}$ , а соответствующую этому напряжению напряженность электрического поля — пробивной напряженностью  $E_{\text{п}}$  (электрической прочностью) породы.

Нарушение диэлектрических свойств породы может быть обусловлено различными факторами, в зависимости от которых выделяют различные виды пробоя: электротепловой, электрической и электрохимической.

**Электротепловой пробой.** Как известно, ток, проходящий через породу, нагревает ее. Поскольку сопротивление горных пород в большинстве случаев очень велико, при небольших напряжениях количество выделившейся теплоты мало.

Если повысить напряжение, произойдет более сильный разогрев породы, который уже не может быть скомпенсирован ее охлаждением окружающей средой. В результате произойдет повышение температуры породы, что вызовет уменьшение ее сопротивления, увеличение тока, проходящего через породу, дальнейший разогрев породы, новое нарастание тока и т. д. В результате ток может возрасти до большой величины и произойдет пробой. Такая форма пробоя носит название электро-

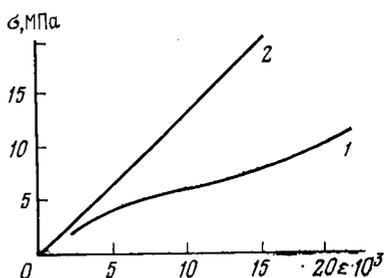


Рис. 8.13. Деформация образца сфалерита при воздействии на него электромагнитного поля ( $f = 23$  МГц) без нагрева (1) и в отсутствие электромагнитного поля (2)

теплого. Отличительные черты электротеплого пробы: нагрев горных пород, относительная длительность процесса и зависимость пробивного напряжения от температуры (рис. 8.14).

С ростом температуры породы происходит уменьшение пробивного напряжения. Например, для каменной соли

$$\lg U_{\text{п}} = 5,64 - 5,3 \cdot 10^{-3} T \quad (8.14)$$

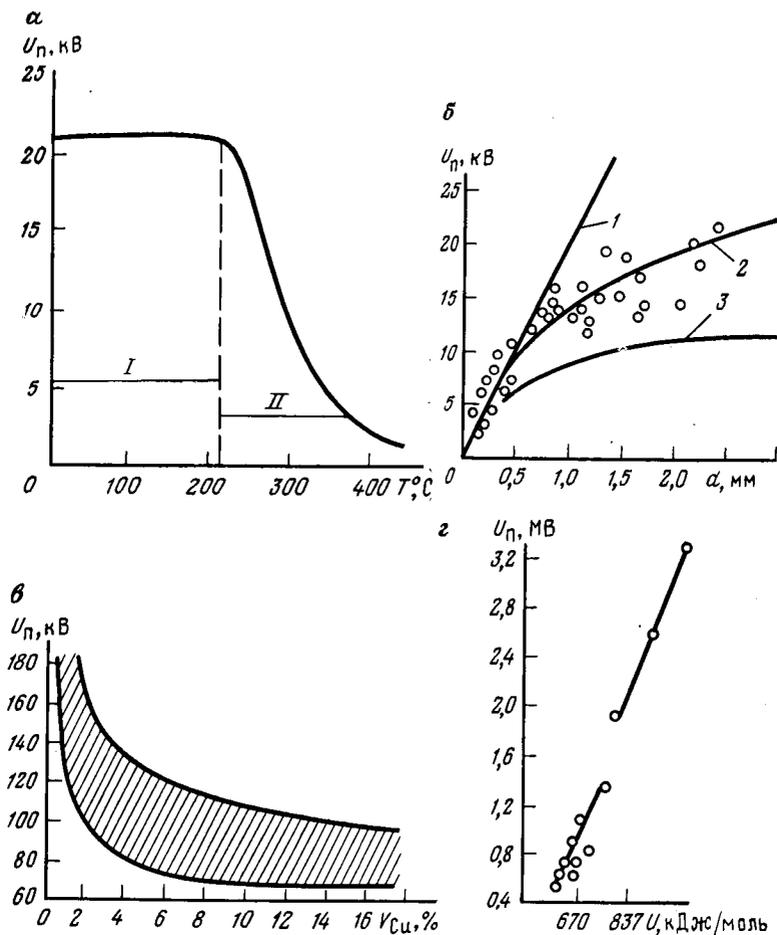


Рис. 8.14. Зависимость пробивного напряжения  $U_{\text{п}}$  от различных факторов: а — температуры (NaCl): I — область электрического пробы; II — область теплового пробы; б — толщины образца серы (электрический пробой): 1 — при однородном поле; 2 — при неоднородном поле; 3 — минимальная расчетная кривая; в — процентного содержания меди в песчанниках (по М. П. Тонконогову); г — энергии кристаллической решетки щелочно-галогенных кристаллов

Обычно для конкретной породы существует определенная температура, выше которой всегда наблюдается тепловой пробой. У большинства хорошо проводящих электричество рудных мине-

ралов (пирит, галенит, магнетит и т. д.) тепловой пробой происходит уже при комнатных температурах. При этом пробивные напряжения незначительны.

С повышением частоты электрического поля пробивное напряжение уменьшается примерно обратно пропорционально  $\sqrt{f}$ . Пробой породы вдоль слоистости осуществляется легче, чем поперек слоистости, так как вдоль слоистости электрическая проводимость горных пород выше.

Электрический пробой происходит тогда, когда в горной породе образуются и накапливаются под непосредственным воздействием электрического поля свободные носители тока — ионы, электроны. В момент, когда лавинообразное нарастание носителей тока достигает предела, происходит нарушение свойств диэлектрика, сопротивление породы резко падает — наступает пробой. Электрический пробой происходит в основном за счет ударной ионизации молекул и разрыва кристаллической решетки вещества электрическим полем. Электрический пробой в отличие от теплового совершается практически мгновенно. При электрическом пробое главным фактором, обуславливающим пробой, является напряженность электрического поля (электрическая прочность пород).

Величина пробивного напряжения при электрическом пробое весьма чувствительна к неоднородности поля. В случае любой неоднородности величина  $U_{\text{п}}$  резко снижается (см. рис. 8.14, б). Для характеристики материала обычно пользуются параметром предельной электрической прочности, который определяется в условиях однородного поля, и параметром минимальной электрической прочности, определяемым в резко неоднородном электрическом поле.

В однородном поле электрическая прочность  $E_{\text{п}}$  не зависит от толщины пробивного слоя и является физической константой породы. А. А. Воробьевым установлено, что электрическая прочность кристаллов щелочно-галогенного ряда зависит от энергии кристаллической решетки (см. рис. 8.14, в). Электрическая прочность пород зависит от содержания в них проводящих включений (см. рис. 8.14, в).

В неоднородном поле наблюдается уменьшение  $E_{\text{п}}$  при увеличении толщины образца  $d$ , так как при этом порода становится более неоднородной. С повышением толщины пробивное напряжение стремится к некоторой предельной величине. Таким образом, характеристикой породы в однородном поле может служить  $E_{\text{п max}}$ , а в неоднородном  $U_{\text{п}\infty}$

$$U_{\text{п}\infty} = \lim_{d \rightarrow \infty} U_{\text{п}}. \quad (8.15)$$

Для осуществления электрического пробоя требуются напряженности, в сотни раз большие (до 100 МВ/м), чем для теплового пробоя.

Электрическая прочность зависит от слоистости породы.

Если напряженность поля в одном из слоев достигает величины предельной пробивной напряженности  $E_{\text{п}}$  для данного слоя, наступает его пробой и одновременно с этим все напряжение перераспределяется на второй слой, а в месте пробоа возникает резкая неоднородность поля, приводящая к быстрому пробою второго слоя.

При увлажнении, повышении пористости пород, наличии в них включений и неоднородностей их электрическая прочность снижается.

С увеличением всестороннего давления на минералы и породы, а также длительности воздействия напряжения их электрическая прочность понижается.

Во всех случаях теплового и электрического пробоа породы происходит нарушение ее сплошности — образуются выплавленные, разрушенные каналы, а в соответствующих условиях происходит полное разрушение породы. Поэтому в результате пробоа существенно снижаются прочность пород и их параметры упругости.

## 8.6. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ

Как уже отмечалось, энергия  $\gamma$ -квантов значительно превышает энергию квантов электромагнитных волн большой длины. Поэтому процессы взаимодействия  $\gamma$ -квантов и частиц породы приводят к их существенным физико-химическим изменениям. Электрическая прочность каменной соли, например, при облучении  $\gamma$ -лучами изменяется в зависимости от продолжительности воздействия — вначале она растет, а затем плавно уменьшается.

После облучения  $\gamma$ -лучами микротвердость сегнетовой соли уменьшается на 35 %, теплоемкость также снижается. Теплопроводность горных пород после облучения уменьшается, а электрическая проводимость растет. Температура плавления облученного  $\gamma$ -лучами графита снижается.

В последнее время расширяются исследования по изучению горных пород под воздействием не только  $\gamma$ -лучей, но и потоков различных микрочастиц, особенно нейтронов.

Продолжительное облучение нейтронами может привести к изменениям свойств минералов и горных пород. В некоторых кристаллах облучение нейтронами при плотности потока  $10^{16}$  част./( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) приводит к выделению около 8 Дж теплоты. Кроме того, после облучения нейтронами в кристаллах появляются структурные дефекты решетки, и в результате их плотность уменьшается. Плотность кварца, например, снижается на 15 %, плотность алмаза — на 4 %. Кристаллы кварца после облучения потоком нейтронов теряют кристаллическую структуру, снижают теплопроводность, меняют свои магнитные свойства — переходят из диамагнитного состояния в парамагнитное. Некоторые кристаллы под воздействием нейтронов разрушаются, а другие, например NaCl, KCl, NaBr, приобретают большую

твердость, причем с увеличением времени облучения толщина слоя повышенной твердости увеличивается. Предел прочности кристаллов каменной соли при сжатии после облучения потоком нейтронов интенсивностью  $1,8 \cdot 10^{23}$  част./( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) возрастает в 3,5 раза (с 2 до 7 МПа).

## 9. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ПОЛЕЙ НА ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД

### 9.1. ВЛИЯНИЕ УВЛАЖНЕНИЯ

Так как вода имеет по сравнению с воздухом более высокие значения удельной теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности, удельной электрической проводимости, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, все эти физические параметры с увлажнением пород возрастают.

Степень их возрастания зависит от количества влаги, которую способна поглотить порода, и от степени отличия величины физического параметра минеральной фазы от его значения у насыщающей породу жидкости.

Например, коэффициент теплопроводности глины и глинистых пород, насыщенных водой, в 6—8 раз больше, чем сухих, так как  $\lambda$  воды в 25 раз больше теплопроводности воздуха. Коэффициент теплопроводности сухого известняка составляет около 1 Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), максимально увлажненного — 2,8 Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ).

В. Н. Дахновым предложена следующая экспоненциальная зависимость  $\lambda$  влажной породы от степени увлажнения  $w$ :

$$\lambda = \lambda_0 e^{0,08w}. \quad (9.1)$$

Удельная теплоемкость воды  $c$  значительно превышает теплоемкость не только воздуха, но и любого минерала. Поэтому теплоемкость пористых и насыщенных влагой пород имеет наибольшие абсолютные значения по сравнению с другими породами и может быть вычислена по формуле арифметического средневзвешенного.

Температуропроводность  $a$  пород при небольшом их увлажнении увеличивается (преобладает влияние повышения теплопроводности пород с увеличением влажности), а при дальнейшем увеличении влажности понижается (рис. 9.1) из-за влияния возрастающей теплоемкости влажной породы. Коэффициенты теплового расширения пористых пород  $\alpha$  и  $\gamma_T$  с повышением влажности несколько увеличиваются. На величину  $\gamma_T$  влияет лишь та часть влаги, которая находится в закрытом пространстве и не может свободно передвигаться под давлением.

Увеличение удельной электрической проводимости  $\sigma_3$  пород при насыщении водой зависит в первую очередь от их пористости и достигает нескольких порядков, так как  $\sigma_3$  воды значительно выше, чем у большинства минералов. Характерно, что

у хорошо проводящих в сухом состоянии пород электрическая проводимость с изменением водонасыщения колеблется в незначительных пределах, в то время как у плохо проводящих, например базальта,—очень сильно (рис. 9.2).

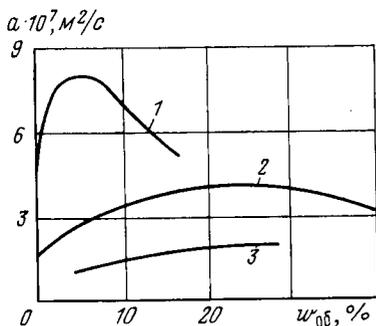


Рис. 9.1. Зависимость температуропроводности  $a$  пород от влажности  $\omega_{об}$ :  
1 — мелкозернистый кварцевый песок; 2 — глинистая почва; 3 — уголь

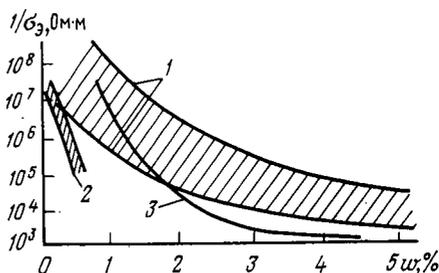


Рис. 9.2. Изменение  $1/\sigma_{э}$  с увлажнением пород:  
1 — угли Кузбасса; 2 — базальт; 3 — осадочные кристаллические породы

На величину удельного электрического сопротивления влияет не только общее содержание воды в породе, но и степень ее минерализации. Песчаники, насыщенные пресной водой и имеющие удельное электрическое сопротивление 100—300 Ом·м и более, после насыщения минерализованной водой снижают  $\rho_{э}$  до 10—20 Ом·м.

Повышение электрической проводимости  $\sigma_{э}$  пород с насыщением их водой происходит в основном в самом начале увлажнения. При увлажнении абсолютно сухого песчаника даже на доли процента (0,3—0,5 %) его электрическая проводимость увеличивается на несколько порядков, так как в этом основную роль играют токопроводящие каналы, возникающие с самого начала насыщения породы водой.

Действительно, если для сухой породы удельная электрическая проводимость может быть рассчитана по формуле

$$\sigma_{э} = 2\sigma_{э.м}(1 - P)/(2 + P), \quad (9.2)$$

то для влажной породы даже при малых значениях влажности

$$\sigma_{э}^{вл} \approx \sigma_{э.м}(1 - P) + \sigma_{э.в}\omega_{э}, \quad (9.3)$$

где  $\sigma_{э.в}$  — удельная электрическая проводимость воды;

$$\sigma_{э.в} = (10^3 \div 10^6) \sigma_{э.м}.$$

Так как нефть обладает значительно меньшей (на 5—10 порядков) электрической проводимостью, чем вода, насыщение пород нефтью обычно приводит к уменьшению величины  $\sigma_{э}$ . При этом в большинстве случаев определяющим становится электрическая проводимость минерального скелета породы.

Увлажнение обычно приводит к росту поляризации, диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  (рис. 9.3) и  $\text{tg } \delta$  пород.

Если исследования проводятся на высоких частотах, где миграционная поляризация не играет роли, то для расчета диэлектрической проницаемости влажной породы можно пользоваться

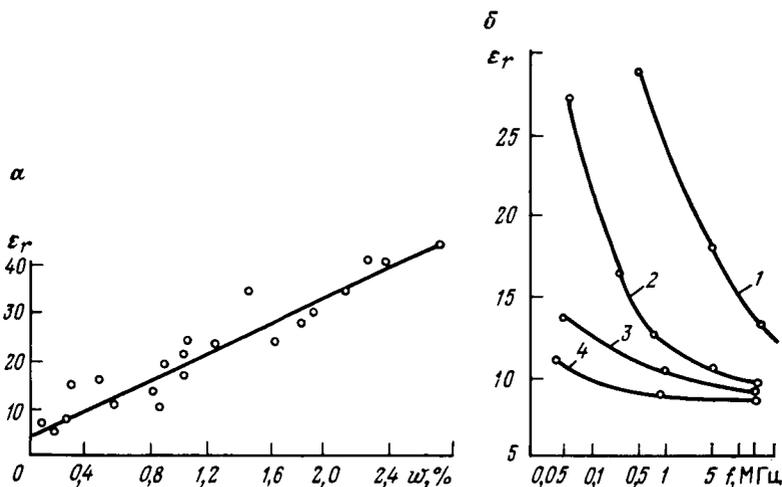


Рис. 9.3. Изменение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  в зависимости от увлажнения  $\omega$  углей Кузбасса (а) (по Б. Г. Тарасову) и частоты электрического поля  $f$  (б) при различной влажности гранит-порфира:

1 — увлажненный; 2 — воздушно-сухой; 3 — высушенный; 4 — прокаленный

выведенными ранее формулами смеси (см. разд. 7). Например, в случае открытой пористости

$$\epsilon_r = 80\omega_{об} + \epsilon_{rм}(1 - P) + P, \quad (9.4)$$

где  $P$  — пористость, доли единицы;  $\epsilon_{rм}$  — диэлектрическая проницаемость минеральной фазы породы;  $\omega_{об}$  — объемная влажность пород, доли единицы.

При низких частотах  $\epsilon_r$  увеличивается еще больше из-за миграционной поляризации (см. рис. 9.3).

Возрастание  $\text{tg } \delta$  с повышением влажности в области высоких частот описывается следующей формулой:

$$\text{tg } \delta = \frac{\epsilon_{rв}\omega_{об}\text{tg } \delta_{в} + \epsilon_{rм}(1 - P)\text{tg } \delta_{м}}{\epsilon_{rв}\omega_{об} + \epsilon_{rм}(1 - P) + P - \omega_{об}}, \quad (9.5)$$

где  $\epsilon_{rв}$  и  $\text{tg } \delta_{в}$  — электрические параметры воды.

С повышением влажности изменяются также и радиационные свойства пород. Наиболее сильно меняются величины сечений рассеяния и захвата нейтронов. В связи с тем, что водород имеет массу, близкую массе нейтрона, соударение с водородом

всегда приводит к замедлению, а затем к поглощению нейтронов.

Находящийся, как правило, в минерализованной воде в огромном количестве хлор, имеющий исключительно большие значения сечения захвата (вероятность захвата нейтрона атомами хлора в 100 раз выше, чем атомами водорода), еще в большей степени усиливает поглощение нейтронов влажной породой, в связи с чем длина диффузии нейтронов с увлажнением существенно падает.

Естественная радиоактивность чаще всего с насыщением пород водой остается без изменений, если насыщающие породу воды не имеют растворенных радиоактивных изотопов.

Так как вода диамагнитна,  $\mu$  пород с увлажнением меняется незначительно.

## 9.2. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ

При нагреве породы тепловая энергия расходуется как на повышение внутренней энергии породы, так и на совершение внешней работы, поэтому теплоемкость  $c_p$ , определенная при постоянном давлении, обычно несколько выше теплоемкости  $c_v$ , определенной при постоянном объеме, так как происходят затраты энергии на преодоление давления.

Различие между  $c_p$  и  $c_v$  для горных пород небольшое (5—15 % при невысоких температурах).

Температуропроводность пород с увеличением давления повышается тоже незначительно.

Всестороннее давление, как правило, увеличивает теплопроводность пористых пород и уменьшает их коэффициенты теплового расширения. Это связано с тем, что происходит уплотнение пород, улучшаются условия передачи тепла в породе, а возможности расширения породы снижаются.

Зависимость коэффициента теплопроводности пород от давления можно описать формулой

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta \sigma), \quad (9.6)$$

где  $\beta$  — коэффициент, для осадочных пород равный  $2,78 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ , для изверженных кристаллических пород —  $1,16 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ ;  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности породы при отсутствии давления.

Влияние давления на электрическое сопротивление горных пород неодинаково и зависит от содержания жидкостей и газов в породе. Чаще всего с увеличением нагрузки наблюдается уменьшение сопротивления сухой или слабо насыщенной влагой породы (рис. 9.4), что объясняется снижением ее пористости и улучшением контактов между частицами. Кроме того, при небольшом содержании влаги в породе обычно не все поры заполняются водой. Под давлением заполненные водой поры смыка-

ются и образуют непрерывные токопроводящие каналы, что также приводит к уменьшению электрического сопротивления.

У большинства горных пород наиболее интенсивные изменения сопротивления (в 1,2—2 раза) наблюдаются при увеличении механических односторонних напряжений от 10 до 60 МПа.

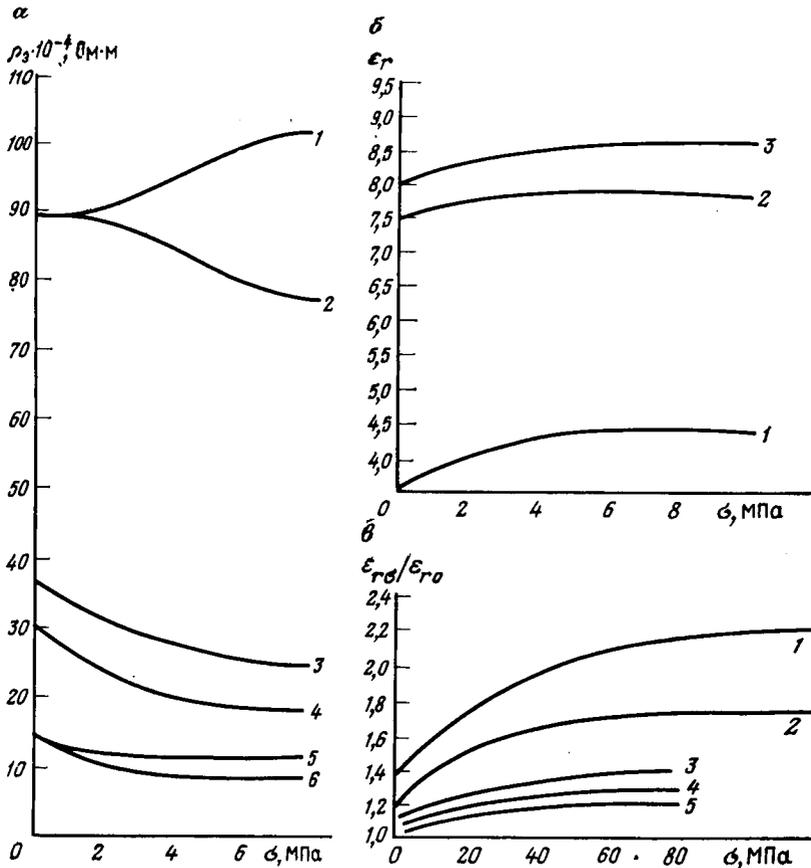


Рис. 9.4. Влияние давления на электрические свойства горных пород:

а — изменение  $\rho_3$  углей Кузбасса: 1 — угли высокой влажности ( $w=13,2\%$ ) при одномом напряженном состоянии; 2 — то же, при  $\sigma_{\text{бок}}=7$  МПа; 3 — слабонасыщенные угли пласта Владимирского; 4 — уголь пласта Мощного; 5 — уголь при  $\sigma_{\text{бок}}=0$ ; 6 — уголь при  $\sigma_{\text{бок}}=7$  МПа; б — изменение  $\epsilon_r$  углей Кузбасса: 1 —  $w=0,1\%$ ; 2 —  $w=0,25\%$ ; 3 —  $w=0,32\%$ ; в — приращение  $\epsilon_{r\sigma}/\epsilon_{r0}$  в песчанике (1), сиените (2), гранитах (3, 4, 5)

Возможен и другой характер зависимости  $\rho_3=f(\sigma)$ . Так, удельное электрическое сопротивление некоторых глин при повышении давления до 10 МПа возрастает из-за выжимания влаги из пор и уменьшения сечения поровых каналов, заполненных водой. Сильно влажные угли с повышением давления

также увеличивают свое электрическое сопротивление (см. рис. 9.4).

Увеличение давления вызывает некоторый рост диэлектрической проницаемости сухих пористых пород за счет уплотнения минерального скелета: этот рост наиболее значителен до давле-

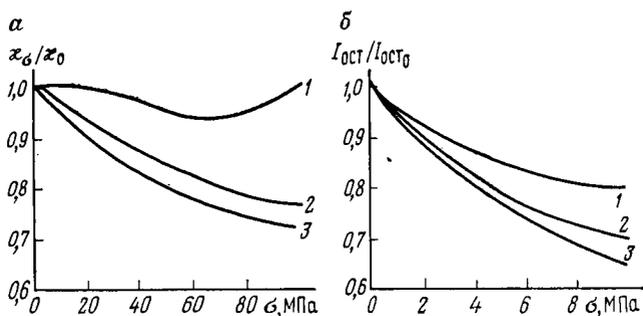


Рис. 9.5. Изменение магнитных свойств пород от давления: а — магнитной восприимчивости  $\chi_{\sigma}/\chi_0$ : 1 — монокристалл магнетита; 2, 3 — железистые кварциты параллельно слоистости; б — относительной остаточной намагниченности  $I_{ост}/I_{ост0}$ : 1 — туфобрекчия; 2 — магнетит; 3 — диабазовый порфирит

ний 100 МПа (см. рис. 9.4). Наличие влаги качественно эту зависимость не изменяет.

С увеличением одноосного давления магнитная восприимчивость пород в направлении, параллельном сжатию, обычно уменьшается (рис. 9.5). В направлении же, перпендикулярном к сжатию, величина  $\chi$  сначала быстро растет, а при дальнейшем сжатии не изменяется. При всестороннем давлении на магнетит обнаружено изменение характера влияния давления  $\chi$  при фазовом переходе в области 60 МПа. Остаточная намагниченность с увеличением давления уменьшается.

### 9.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ

Повышение температуры пород также приводит к изменению тепловых и электромагнитных свойств пород. Причиной их изменения являются все те же факторы, которые были отмечены выше (термонапряжения, термоэффекты). Однако даже при отсутствии перечисленных факторов повышение температуры сказывается на тепловых и электромагнитных свойствах пород из-за роста кинетической энергии колеблющихся частиц в породах.

**Тепловые свойства.** Повышение температуры приводит к более интенсивному и хаотичному колебанию ионов в кристал-

лической решетке и соответственно к их большему взаимодействию.

Это обстоятельство приводит к увеличению рассеяния одного фонона другим за счет их сдвигания, что, в свою очередь, снижает величину пути свободного пробега фононов. Поэтому при повышении температуры снижается теплопроводность многих кристаллических минералов и пород (рис. 9.6). При этом наблюдается соответствие известной из фоновой теории теплопроводности зависимости:

$$\lambda T = A, \quad (9.7)$$

где  $A$  — некоторая постоянная, равная для плотных изверженных и метаморфических пород (кварцитов, гранитов, пегматитов) 1100—1900 Вт/м.

Такая закономерность изменения  $\lambda$  с температурой наблюдается только в области до 400 °С. При более высоких температурах теплопроводность  $\lambda$  стремится к постоянному значению, а для некоторых пород отмечено даже возрастание  $\lambda$ .

Наиболее значительное снижение величины  $\lambda$  с повышением температуры характерно для пород, обладающих большими исходными его значениями.

Теплопроводность пород, имеющих высокую пористость (известняки и др.), с повышением температуры изменяется немного, что связано в основном с наличием радиационной составляющей теплопроводности в пористых породах. В практических расчетах можно принять теплопроводность этих пород независимой от температуры.

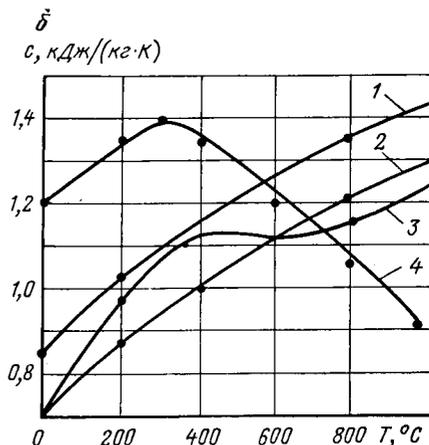
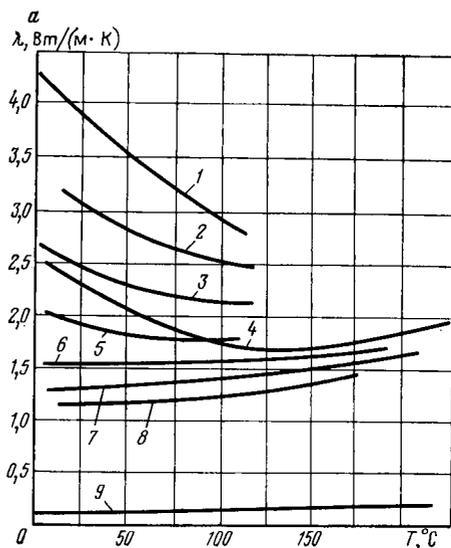


Рис. 9.6. Зависимость тепловых свойств горных пород от температуры:

$a$  — коэффициент теплопроводности  $\lambda$ : 1 — доломит; 2 — гранит; 3 — кварцевый моноцит; 4 — известняк;  $b$  — сенинг; 5 — анортосит; 6 — плавленый кварц; 7 — базальт; 8 — диабазовое стекло; 9 — уголь;  $c$  — удельной теплоемкости: 1 — базальт; 2 — диабаз; 3 — кварцит; 4 — каменный уголь

Теплопроводность аморфных и скрытокристаллических минералов и пород (обсидиан, аморфные разновидности  $\text{SiO}_2$  и др.) с повышением температуры возрастает. Некоторый рост теплопроводности с повышением температуры наблюдается также у анортозитов, глин и углей. Это связано с большой на-

Таблица 9.1. Температуры Дебая  $\theta_D$  некоторых минералов

Минерал	Химическая формула	$\theta_D$ , К
Диопсид	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	662
Волластонит	$\text{CaSiO}_3$	594
Микроклин	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	551
Серпентин	$\text{MgSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	540
Альбит	$[(\text{NaSi})_{0,88}(\text{CaAl})_{0,12}]\text{AlSi}_2\text{O}_8$	521
Кварц	$\text{SiO}_2$	1050
Корунд	$\text{Al}_2\text{O}_3$	1000

рушенностью кристаллической решетки пород при исходных температурах.

С повышением температуры  $\lambda$  кристаллических пород приближается к теплопроводности аморфных пород и при 1200—1400 К  $\lambda$  почти всех горных пород оказывается в довольно узком диапазоне — 1,1—2,3 Вт/(м·К).

Если при нагреве в породах происходят различные фазовые превращения, дегидратация и т. д., то на кривой зависимости  $\lambda=f(T)$  таких пород возникают области максимумов или минимумов. Например, известняки имеют область минимума  $\lambda$  при температурах 300—400 °С.

При повышении температуры влажных пород влага испаряется. Поэтому кривые теплопроводности таких пород при нагреве до 100—200 °С имеют область максимума: вначале, так как теплопроводность воды с повышением температуры увеличивается,  $\lambda$  всей породы возрастает, а затем при испарении влаги происходит уменьшение теплопроводности.

Увеличение энергии собственных колебаний частиц в минеральной фазе горной породы, обусловленное ростом частоты колебаний, приводит к увеличению удельной теплоемкости породы с повышением температуры. Максимальная частота  $\omega_{\max}$  и соответственно максимум энергии в твердых телах наблюдаются при определенной, так называемой характеристической

температуре (температура Дебая)  $\theta_D$  (табл. 9.1), т. е.

$$\hbar\omega_{\max} = k\theta_D, \quad (9.8)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $\hbar$  — постоянная Планка ( $\hbar = = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с). В связи с этим теплоемкость твердых тел возрастает только до температуры  $\theta_D$ .

Установлена эмпирическая связь между коэффициентом фоновой теплопроводности и температурой Дебая для минералов-силикатов

$$\lambda = 0,016\theta_D - 6,3. \quad (9.9)$$

Однако из-за наложения термохимических эффектов дебаевская закономерность изменения  $c$  с повышением температуры в горных породах сохраняется далеко не всегда.

Так, удельная теплоемкость каменного угля в области 200—400 °С имеет максимум, после чего происходит падение ее вплоть до температур порядка 1000 °С (см. рис. 9.6).

Аномалии зависимости теплоемкости от температуры характерны также для глин и других пород, имеющих термохимические эффекты, фазовые превращения и т. д. В остальных случаях теплоемкость пород с повышением температуры выше 150—200 °С возрастает почти прямолинейно.

Отношение теплоемкости при 600 °С к теплоемкости при 100 °С для скарнов составляет 1,4; для кварца, плавленого кварца, кварцитов — 1,36; для гранитов — 1,26.

Таким образом, температурную зависимость  $c_T$  многих пород можно выразить формулой

$$c_T = c_0(1 + bT), \quad (9.10)$$

где  $c_0$  — удельная теплоемкость пород при  $T = 0$  °С, причем температурный коэффициент  $b$  составляет  $(4 \div 8) \cdot 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>.

Температуропроводность  $a$  кристаллических пород с повышением температуры в большинстве случаев уменьшается, в то время как температуропроводность аморфных пород, углей и глин с повышением температуры увеличивается (рис. 9.7). Наибольшее снижение  $a$  с увеличением температуры наблюдается у гранитов, наименьшее — у базальтов. Так, если при 400 К температуропроводность базальтов в 2,5 раза ниже, чем гранитов, то при 1200 К температуропроводность обеих пород сравнивается (см. рис. 9.7).

Коэффициенты линейного теплового расширения  $\alpha$  большинства твердых тел, в том числе и горных пород, с повышением температуры увеличиваются. У многих минералов наблюдаются аномалии коэффициента  $\alpha$ , обусловленные термическими изменениями. Наиболее известен четкий максимум коэффициента линейного теплового расширения кварца и кварцсодержащих пород в области 573 °С (см. рис. 9.7), связанный с полиморфным превращением  $\beta$ -кварца в  $\alpha$ -кварц.

Плавные максимумы  $\alpha$  в области 400—600 °С характерны для ангидрита, сидерита, кальцита, а в области 200 °С — для пирита.

Температурные зависимости  $\alpha$  многих минералов, у которых не происходит фазовых изменений (см. рис. 9.7), представляют собой прямые линии типа.

$$\alpha = \alpha_0 (1 + b^1 T), \quad (9.11)$$

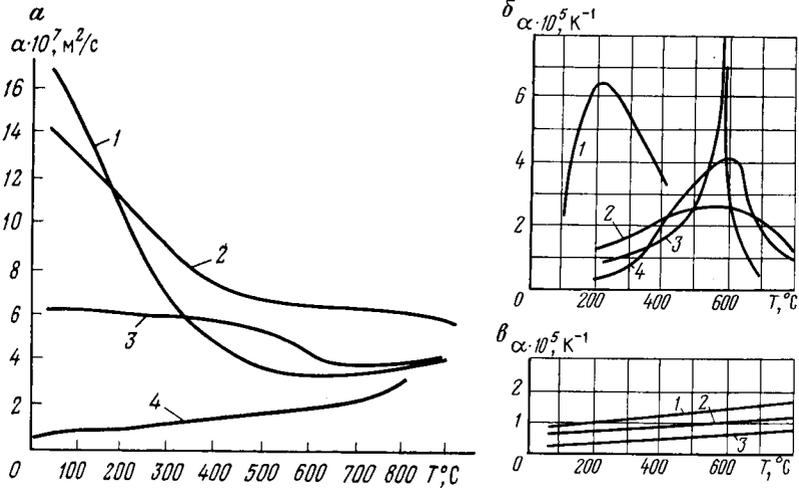


Рис. 9.7. Температурные зависимости тепловых свойств горных пород:

$\alpha$  — температуропроводности  $\alpha$  горных пород: 1 — гранит; 2 — пироксенит; 3 — базальт; 4 — уголь;  $b$  — коэффициентов  $\alpha$  теплового расширения минералов, имеющих область максимума: 1 — пирит; 2 — кальцит; 3 — кварц; 4 — серпентинит;  $b$  — коэффициентов  $\alpha$  теплового расширения пород, не имеющих области максимума: 1 — нефелиновый снейт; 2 — диорит; 3 — габбро

где  $\alpha_0$  — коэффициент линейного теплового расширения при  $T=0$  °С.

У большинства минералов температурный коэффициент  $b'$  составляет примерно  $1,25 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

Поэтому, несмотря на снижение модуля упругости с повышением температуры, параметр  $\alpha E$ , определяющий величину термических напряжений в породах, возрастает, поскольку  $\alpha$  значительно увеличивается с повышением температуры. Так, при изменении температуры от 60 до 600 °С величина  $\alpha E$  возрастает у гранодиорита в 3,3 раза, у кварцевого порфира — в 20,5 раза.

Коэффициент объемного теплового расширения пород и минералов с повышением температуры также возрастает (табл. 9.2).

При наличии в минералах фазовых переходов наблюдаются значительные изменения  $\gamma_T$  пород с повышением температуры.

Например, у кварца и магнетита после соответствующих переходов через критические точки  $\gamma_T$  сильно падает (у кварца происходит даже относительное уменьшение его объема).

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_T$  пород с повышением температуры возрастает, наиболее существенно — у кварцита (в 4 раза при нагреве со 100 до 600°C), а слабее всего — у габбро.

**Электрические и магнитные свойства.** Изменение удельного электрического сопротивления горных пород с повышением тем-

Таблица 9.2. Значения коэффициента объемного теплового расширения  $\gamma_T$  минералов при различных температурах

Минерал	$\gamma_T \cdot 10^6, K^{-1}$ , при температуре, °C			$\frac{\gamma_T 800}{\gamma_T 20}$
	20	400	800	
Плагиоклаз	18	27	33	1,82
Роговая обманка	23	28	33	1,43
Оливин	27	31	31	1,15
Диопсид	24	28	32	1,33
Кварц	34	69	-3	-0,09

пературы подчиняется законам зонной теории электрической проводимости.

Подвижность ионов в диэлектриках с повышением температуры увеличивается, растет их кинетическая энергия и облегчается их вырывание из решетки. Поэтому электрическая проводимость диэлектрика возрастает.

Зависимость электрической проводимости  $\sigma_0$  чистого диэлектрика от температуры выражается формулой

$$\sigma_0 = \sigma_{00} \exp[-Q_0/(kT)], \quad (9.12)$$

где  $\sigma_{00}$  — некоторая постоянная, См/м;  $Q_0$  — ширина запрещенной зоны, представляющая собой энергию активации, необходимую для вырывания и перемещения иона, Дж;  $k$  — постоянная Больцмана ( $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $T$  — абсолютная температура, К (табл. 9.3).

В полупроводниках повышение температуры приводит к увеличению концентрации электронов в зоне проводимости и соответственно к росту их электрической проводимости.

Зависимость электрической проводимости полупроводника от температуры выражается формулой

$$\sigma_0 = \sigma_{00} \exp[-Q_0/(2kT)]. \quad (9.13)$$

При повышении температуры до 600°C электрическое сопротивление пород уменьшается от 20 до  $10^9$  раз.

В породах и минералах при низких температурах, когда основные ионы решетки еще мало диссоциированы, значительное участие в переносе зарядов принимают примесные ионы.

Поэтому при низких температурах наблюдаются изменения сопротивления в широких пределах, при более высоких температурах — значительно меньшие изменения, а кривые зависимости  $\rho_a = f(1/T)$  имеют точки перегиба (рис. 9.8).

Наибольшее понижение сопротивления с повышением температуры присуще породам с большим начальным сопротивлением.

Таблица 9.3. Значения  $Q_3$  и  $\sigma_{30}$  для некоторых горных пород

Порода	$Q_3 \cdot 10^{10}$ , Дж	$\sigma_{30}$ , См/м	Порода	$Q_3 \cdot 10^{10}$ , Дж	$\tau_{30}$ , См/м
Гранит	0,89—1,47	$0,5—4 \cdot 10^{-4}$	Габбро	1,79—2,72	$10^{-2}—10^{-5}$
Гнейс	0,96	$10^{-2}—10^{-7}$	Дунит	1,12	$9 \cdot 10^{-2}$
Базальт	0,89—2,15	$0,4—6 \cdot 10^{-5}$			

Повышение температуры влажной пористой породы вызывает испарение влаги, в связи с чем зависимость электрического сопротивления такой породы от температуры начинает отличаться от экспоненциальной.

Так, чаще всего повышение температуры породы примерно до 200 °С приводит к некоторому увеличению сопротивления (за счет высушивания) и только в дальнейшем начинается его уменьшение. Например, данные по изучению каменных углей (бурых, жирных, газовых) и горючих сланцев показывают, что до температур 50—100 °С электрическое сопротивление испытуемого образца снижается, а при дальнейшем повышении температуры до 200 °С — возрастает.

Фазовые превращения, приводящие к изменению состава породы или минерала, четко отражаются на температурной зависимости электрического сопротивления пород. Так, у сидерита наблюдается минимум  $\rho_a$  в области 670 °С, что связано с его разложением ( $\text{FeCO}_3 \rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$ ).

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  большинства пород с повышением температуры также возрастает.

Установлено, что с повышением температуры происходит дифференциация пород и минералов по диэлектрической проницаемости. Так, если  $\epsilon_r$  породообразующих минералов при комнатных температурах не превышает 10, то в области 600 °С  $\epsilon_r$  разных минералов меняется от 6 до 33 (рис. 9.9).

Характерно, что в жидкостях, в которых отсутствуют жесткие связи между молекулами, диэлектрическая проницаемость с повышением температуры уменьшается. В ряде случаев такая закономерность возможна и в породах.

При фазовых переходах минералов наблюдаются анамалии в зависимости  $\epsilon_r = f(T)$ . Так, у серы при температуре 96 °С замечен скачок  $\epsilon_r$ , соответствующий переходу ромбической серы в моноклинную. Переход от арагонита к кальциту в температур-

ном интервале 360—470 °С также сопровождается изменением диэлектрической проницаемости.

Как установлено Ф. Эгерером (ВНР), температурные зависимости  $\epsilon_r$  и  $\operatorname{tg} \delta$  минералов, на которых выделяются максимумы, присущие только этим минералам, могут быть использованы для диагностики соответствующих минералов в породе, т. е. для осуществления диэлектрического термического ана-

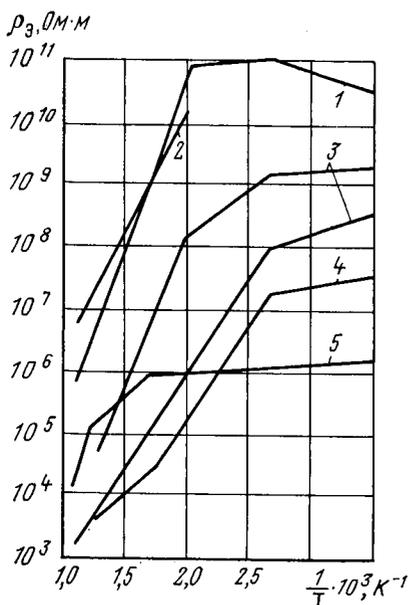


Рис. 9.8. Температурные зависимости удельного электрического сопротивления  $\rho_z$  пород:  
1 — мрамор; 2 — тальковый камень; 3 — апатито-нефелиновая руда; 4 — уртит-порфир; 5 — бурый железняк (Коршуновское месторождение)

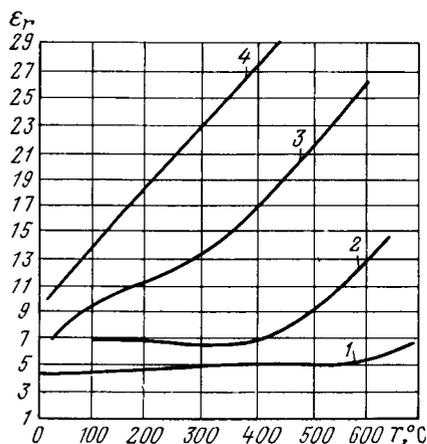


Рис. 9.9. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  минералов:  
1 — кварц; 2 — тальк; 3 — ангидрит; 4 — хромит

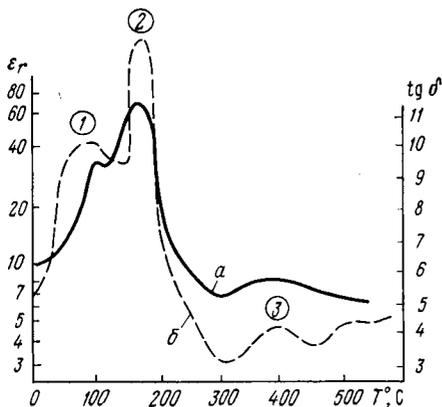
лиза (рис. 9.10). Влияние температуры на магнитные свойства пород наиболее выражено в группе ферромагнетиков.

С повышением температуры растет подвижность атомов, составляющих домены. При определенной температуре, называемой точкой Кюри, домены полностью лишаются магнитных моментов. Выше этой температуры ферромагнетик переходит в парамагнетик (рис. 9.11).

Температура Кюри пород зависит от их строения и минерального состава. Если порода содержит несколько ферромагнитных минералов, то она может иметь ряд точек Кюри, соответствующих каждому минералу.

Ферромагнитным породам присуще также снижение остаточной намагниченности и коэрцитивной силы с повышением температуры. Интересно, что отношение  $I_{\text{ост}}/H_c$  имеет максимум в области 500—600 °С (см. рис. 9.11).

У некоторых минералов-антиферромагнетиков в кристаллической решетке существуют антипараллельно ориентированные, друг друга взаимно компенсирующие магнитные диполи (подрешетки). Поэтому в определенном диапазоне температур их магнитные проницаемости малы и они ведут себя как парамагнитные. При температуре фазового перехода происходит опро-

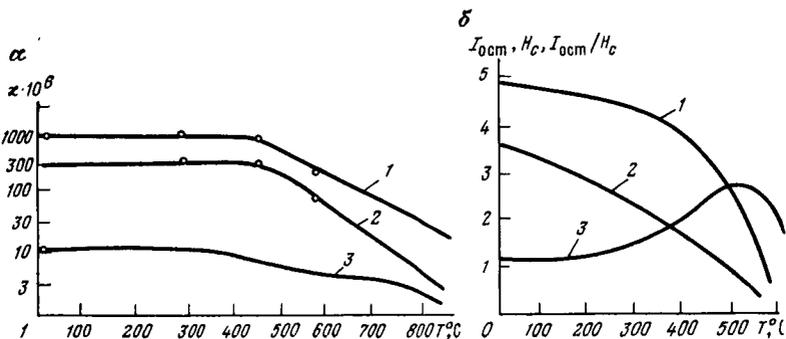


←  
Рис. 9.10. Температурная зависимость  $\epsilon_r$  (а) и  $\operatorname{tg} \delta$  (б) гипса при  $f=400$  Гц:

1, 2, 3 — максимумы, характерные для гипса

Рис. 9.11. Изменение магнитных свойств пород с нагревом:

а — магнитной восприимчивости: 1 — гранит биотитовый; 2 — пироксенит; 3 — диорит (по Н. В. Дортман); б — остаточной намагниченности  $I_{\text{ост}}$  (1), коэрцитивной силы  $H_c$  (2) и отношения  $I_{\text{ост}}/H_c$  (3) магнетита горы Благодать



кидывание подрешеток — они оказываются направленными в одну сторону и их магнитные моменты суммируются. Это сопровождается резким увеличением магнитной проницаемости породы. К антиферромагнетикам относятся пиролюзит, алабандин,  $\alpha$ -гематит, сидерит и другие минералы.

Направления и порядок изменения основных свойств пород под воздействием внешних полей и, в частности теплового, обобщенно представлены в виде номограмм (рис. 9.12).

Влияние низких температур на изменение электрических и тепловых свойств пород сказывается, в первую очередь, из-за замерзания влаги при переходе в область отрицательных температур. В связи с этим в области  $0^\circ\text{C}$  наблюдается характерный для фазовых переходов перелом кривой зависимости показателей свойств от температуры (см. разд. 14.5).

Плавный рост теплопроводности и электросопротивления скальных сухих пород при их охлаждении вплоть до глубоких температур обусловлен явлениями снижения кинетической энергии колеблющихся частиц породы. Теплопроводность растет из-за уменьшения вероятности столкновения фононов, т. е. из-за роста пути свободного пробега фононов.

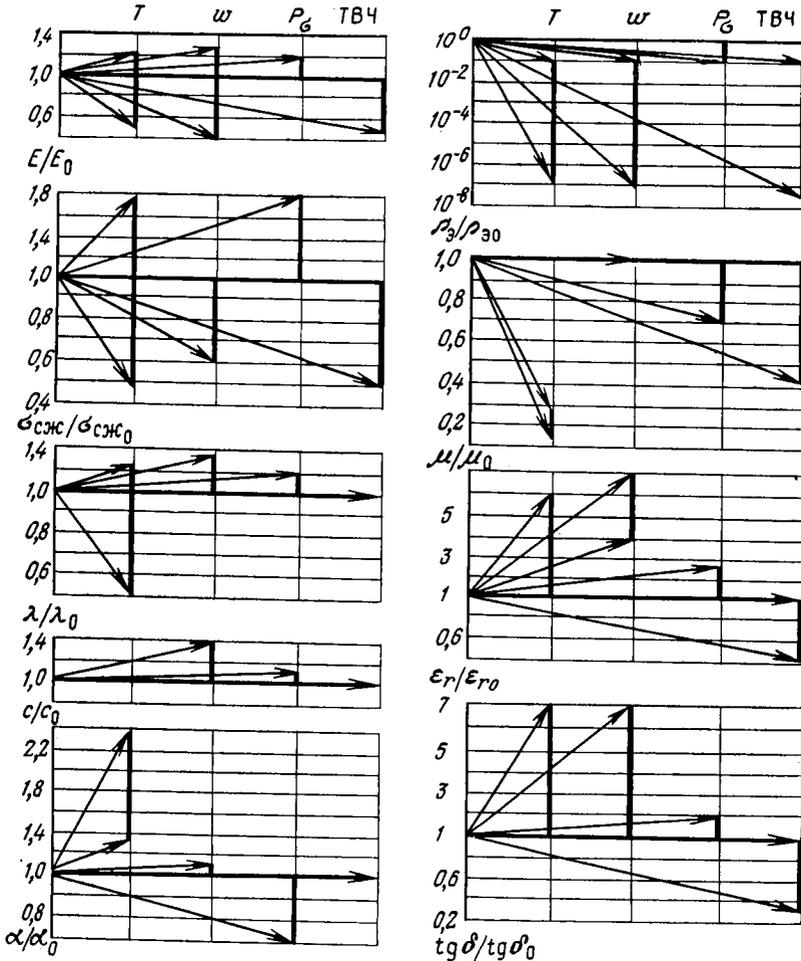


Рис. 9.12. Обобщенные номограммы оценки характера изменения физических параметров пород при изменении внешних факторов: температуры  $T$ , влажности  $\omega$ , давления  $P_\sigma$  и при воздействии токов высокой частоты (ТВЧ)

В области абсолютных температур 5–30 К наблюдается максимум  $\lambda$  твердых тел. Ниже этой температуры количество фононов сильно уменьшается, а их свободному пробегу начинают препятствовать границы зерен и кристаллов. Поэтому при стремлении  $T$  к нулю  $\lambda$  стремится также к нулю.

## 10. ВЗАИМНАЯ СВЯЗЬ СВОЙСТВ, ПАСПОРТИЗАЦИЯ ПОРОД. СВОЙСТВА ПОРОД ЛУНЫ

### 10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЗАИМОСВЯЗИ СВОЙСТВ

Технические решения в горном производстве обычно принимаются с учетом реальных колебаний состава и состояния пород и, следовательно, определенного диапазона изменений их физических свойств. По этим причинам однозначное определение показателей пород оправдано лишь в случае их изучения в лаборатории при сравнительных исследованиях или непосредственно в забое в процессе добычи с целью автоматического регулирования режима работы оборудования. В остальных случаях в практике инженерных расчетов вполне допустимо применение корреляционных зависимостей, позволяющих вычислить примерные значения физических параметров, особенно если их возможные отклонения от истинных находятся в пределах коэффициентов вариации свойств. Это дает возможность широко использовать особую группу корреляционных связей — уравнений взаимосвязей между свойствами пород.

Наличие корреляции еще не означает, что существует причинно-следственная зависимость одного параметра от другого. Корреляция появляется и в том случае, если оба параметра независимы друг от друга, но и тот и другой зависят от определенного третьего фактора. Таким фактором могут быть строение кристаллической решетки, химический состав, структура, текстура и минеральный состав породы, а также внешние физические поля.

В связи с этим выделяют три группы взаимосвязей свойств пород, обусловленные изменениями минерального состава, строения пород и внешних физических полей.

Если представить себе некоторые условные количественные показатели минерального состава  $M$  и строения  $S$  и предположить, что исследуемая группа пород находится в постоянных внешних полях, имеет примерно одинаковый минеральный состав  $M$ , но различное  $S$ , то, учитывая зависимость каких-то двух физических параметров  $X$  и  $Y$  от строения пород, можно написать

$$X = X_0 f_1(C); \quad (10.1)$$

$$Y = Y_0 f_2(C), \quad (10.2)$$

где  $X_0$  и  $Y_0$  — физические параметры породы при некотором значении  $C = C_0$  и данном минеральном составе.

Из формулы (10.1) следует, что

$$C = f_3(X)/X_0. \quad (10.3)$$

Поэтому, подставив (10.3) в (10.2), получим

$$Y = Y_0 f_4(X) / X_0. \quad (10.4)$$

Таким образом, уравнение (10.4) связывает две переменные величины — параметры  $X$  и  $Y$  при постоянном  $M$ . Эта взаимосвязь обусловлена переменным строением горных пород.

Если же предположить, что  $C$  данной группы пород постоянно и равно  $C_0$ , а  $M$  значительно изменяется, то в результате аналогичных действий можно получить

$$Y_0 = A \Phi_1(X_0), \quad (10.5)$$

где  $A$  — коэффициент, зависящий от величин  $X$  и  $Y$  при некотором исходном значении  $M = M_0$ .

Таким образом, уравнение (10.5) тоже показывает связь между двумя параметрами, но уже при постоянном  $C$ , т. е. взаимосвязь, обусловленную переменным составом.

Подставив уравнение (10.5) в уравнение (10.4), получим

$$Y = A_2 \Phi_2(M, C) \Phi_3(X). \quad (10.6)$$

Так как уравнение (10.6) включает в себя одновременно четыре переменные величины, оно имеет неопределенный характер. Это значит, что в общем случае для группы пород с произвольными колебаниями минерального состава и строения невозможно установить взаимосвязь между двумя параметрами.

Зная, однако, граничные значения  $C$ , можно рассчитать некоторую область изменения взаимосвязи при известных пределах изменения  $C$  (рис. 10.1).

Линейная же зависимость возможна при  $\Phi_2(M, C) \approx \text{const}$ .

Таким образом, при установлении взаимосвязи свойств необходимо выявить вид функции  $\Phi_2$  и ту область, где  $\Phi_2 \approx \text{const}$ .

Для этого, в свою очередь, нужно определить основные петрографические характеристики пород и зависимости свойств от этих характеристик.

Следовательно, взаимосвязи свойств являются производными зависимостей свойств пород от их строения и состава. Для каждой пары физических параметров может существовать в общем виде несколько взаимосвязей. Одна из них, например, может характеризовать связь свойств при переменном минеральном составе, другая — при переменном строении пород. При этом взаимосвязи будут, как правило, отличаться друг от друга и иметь различные границы применимости.

Обобщая вышеизложенное, можно вывести следующие ос-

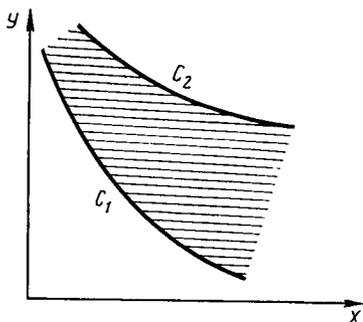


Рис. 10.1. Область изменения взаимосвязи двух различных параметров  $X$  и  $Y$  при изменении строения пород от  $C_1$  до  $C_2$

новные принципы существования взаимосвязей.

1. Достаточно тесную взаимосвязь между двумя физическими параметрами произвольно выбранной группы пород можно обнаружить лишь в случае одинаковой их зависимости как от строения, так и от минерального состава.

2. Если для двух параметров существуют разные их зависимости от строения и минерального состава, то можно обнаружить лишь область изменения одного параметра с изменением другого.

3. Наиболее вероятно установление связи между параметрами в случае, если исследуется группа пород со значительным изменением строения, но с примерно постоянным минеральным составом или наоборот.

4. В случае, если известны две или более взаимосвязи типа

$$\left. \begin{aligned} Y &= A\varphi_1(X)\varphi_2(M, C); \\ Y &= B\varphi_3(Z)\varphi_4(M, C); \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (10.7)$$

то возникает возможность путем решения системы уравнений получить взаимосвязь параметра  $Y$  от комплекса физических параметров  $X, Z$  и др. (т. е. установить множественную корреляцию).

Зная при этом область изменения  $X, Z, \dots$ , в пределах которой справедливо выведенное из (10.7) уравнение, для расчета  $Y$  уже не возникает необходимости в отличие от уравнения (10.6) оценивать петрографические характеристики породы.

Так как установление взаимосвязи физических свойств пород методом подстановки переменной величины из одного уравнения в другое приводит к исчезновению параметров в уравнении, на базе которых установлена взаимосвязь, иногда более целесообразно пользоваться не подстановкой, а отношением уравнений. Так, взяв исходные уравнения (10.1) и (10.2) можно написать

$$X/Y = X_0f_1(C)/Y_0f_2(C) \quad (10.8)$$

или

$$X_1/Y_1 = XY_0/X_0Y = f_1(C)/f_2(C) = \varphi(C). \quad (10.9)$$

В уравнении (10.9) взаимосвязь свойств выступает как соотношение приведенных значений двух параметров  $X_1$  и  $Y_1$  в области изменчивости  $C$ .

Пользуясь для расчета  $X$  уравнением (10.9), необходимо знать  $f_1(C)$  и  $f_2(C)$ ,  $C$  и значения параметра  $Y$  при любом значении  $C$ , т. е. нужно знать больше характеристик, чем при использовании уравнений (10.4) и (10.5). Однако по таким уравнениям можно решать обратную задачу — определять строение (или состав) пород по известным физическим параметрам.

## 10.2. ВЗАИМОСВЯЗИ СВОЙСТВ ПОРОД, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫМ МИНЕРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ

Взаимосвязи на основе строения кристаллической решетки минералов могут быть установлены в основном только для групп минералов. Таковы, например, многие эмпирические взаимосвязи на уровне кристаллов, используемые в физике твердого тела. Так, известны взаимосвязи между механической и электрической прочностью галогенидов, взаимосвязь между  $\text{tg } \delta$  и теплотой плавления щелочно-галогенидных кристаллов и др., обусловленные зависимостью соответствующих физических параметров кристаллов от энергии кристаллической решетки. Такова взаимосвязь между температурой Дебая и коэффициентом теплопроводности минералов-силикатов

$$\lambda T = B\theta_D^3, \quad (10.10)$$

между  $\sigma_p$  и теплотой плавления и т. д.

Дж. Симмонсом установлена взаимосвязь такого типа для минералов-силикатов между коэффициентом теплопроводности и скоростями упругих волн  $v_p$  и  $v_s$ :

$$\lambda = 2,47 \cdot 10^{-3} v_p - 14,6; \quad \lambda = 4,6 \cdot 10^{-3} v_s - 15,4. \quad (10.11)$$

Установление взаимосвязей между свойствами горных пород на базе строения их кристаллической решетки невозможно из-за большого разнообразия в их минеральном составе и макростроении. Последние факторы вызывают такой разброс данных, что взаимосвязи на базе микроструктурных факторов полностью теряются. В силу этого взаимосвязь между свойствами, экспериментально установленная для минералов, справедлива для горных пород лишь тогда, когда оба параметра породы могут быть аддитивно вычислены по параметрам слагающих породу минералов. Этому условию соответствуют скалярные параметры.

Взаимосвязь между скалярными и тензорными (вдоль слоистости) параметрами пород выражается в виде прямой линии

$$X = a \pm bY. \quad (10.12)$$

Очевидно, что наиболее устойчивая связь между обоими параметрами будет при  $b=1$ , т. е. когда

$$(X_1 - X_2)/(Y_1 - Y_2) = \Delta X/\Delta Y = 1, \quad (10.13)$$

что для случая двухкомпонентной породы означает равенство разности числовых значений физических параметров двух минералов, слагающих данную группу горных пород.

Для двухкомпонентной породы уравнение (10.12) может быть записано в виде

$$X = \frac{Y - Y_{M1}}{Y_{M2} - Y_{M1}} (X_{M2} - X_{M1}) + X_{M1}, \quad (10.14)$$

где  $Y_{M1}$ ,  $Y_{M2}$ ,  $X_{M1}$ ,  $X_{M2}$  — соответствующие физические параметры первого и второго минералов, слагающих породу.

В качестве примера такой возможной взаимосвязи может служить связь между модулем Юнга  $E$  (вдоль слоистости) и удельной теплоемкостью  $c$  железистых кварцитов.

Известно, что физические параметры слагающих эти породы двух основных минералов — магнетита ( $m$ ) и кварцита ( $кв$ ) (с учетом поликристалличности агрегатов) следующие:

$$c_m = 480 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); E_m = 16 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

$$c_{кв} = 610 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); E_{кв} = 7 \cdot 10^{10} \text{ Па}.$$

Следовательно, подставив числовые значения  $E$  и  $c$  кварцита и магнетита в уравнение (10.14), получим

$$c = 710 - 1,45 \cdot 10^{-9} E. \quad (10.15)$$

Уравнение показывает возрастание теплоемкости пород с уменьшением модуля Юнга. При других причинах, вызывающих возникновение взаимосвязи между  $E$  и  $c$ , возможна обратная закономерность. Иными словами, взаимосвязь (10.15) имеет вполне определенную и ограниченную область применения, обусловленную минеральным составом породы, для которого произведен расчет.

Взаимосвязь между тензорными параметрами для двухкомпонентных сред перпендикулярно к слоистости, когда эти параметры рассчитываются методом гармонического средневзвешенного, выражается в общем виде формулой

$$X_{\perp} = X_1 X_2 / [Y_1 (Y_2 - Y_{\perp}) (X_2 - X_1) / Y_{\perp} (Y_2 - Y_1) + X_1], \quad (10.16)$$

или

$$X_{\perp} = A Y_{\perp} / (B \pm C Y_{\perp}), \quad (10.17)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  — некоторые коэффициенты.

Взаимосвязь в данном случае изображается графически в виде гиперболы. В качестве примера можно привести связь между модулем Юнга  $E$  тех же железистых кварцитов и их коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  при условии проведения измерений перпендикулярно к слоистости

$$\lambda_{\perp} = 108 E_{\perp} / (15 \cdot 10^{11} - 3,3 E_{\perp}). \quad (10.18)$$

При рассмотрении взаимосвязи скалярного и тензорного параметров поперек слоистости (а также тензорного параметра вдоль слоистости с тензорным поперек слоистости) может быть выведена формула взаимосвязи следующего вида:

$$X_{\parallel} = A \pm B / (C Y_{\perp}). \quad (10.19)$$

Так, для углей Кузбасса получена следующая взаимосвязь между удельным электрическим сопротивлением  $\rho_s$ , измеренным в массиве, и динамической крепостью пород  $f_d$ :

$$\rho_s = 1,159 / f_d - 0,455. \quad (10.20)$$

При этом  $\rho_{\parallel}$  измерено вдоль слоистости (формула расчета  $\rho_{\parallel}$  такая же, как  $\sigma_{\perp}$ ), а  $f_d$  — показатель, в соответствии с методикой определяемый как скалярный (рис. 10.2).

Взаимосвязь между физическими параметрами горных пород на основе минерального состава с учетом формулы логарифмического

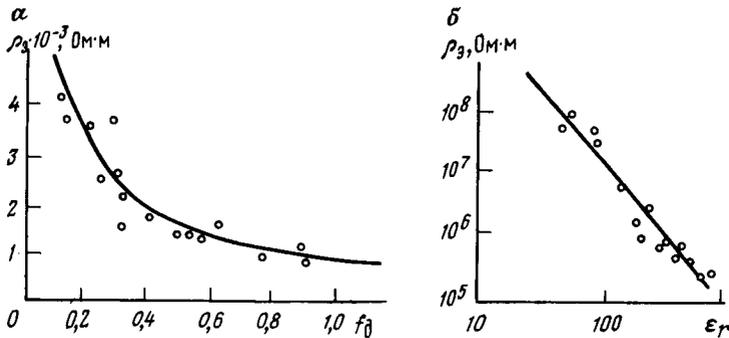


Рис. 10.2. Взаимосвязи удельного электрического сопротивления  $\rho_3$ : а — с динамической крепостью  $f_d$  углей Кузбасса (по Б. Г. Тарасову); б — с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$  вулканогенных пород (по Э. И. Пархоменко)

рифмического средневзвешенного имеет степенной вид:

$$X = AY^{\pm B} \quad (10.21)$$

или

$$\lg X = (\lg Y - \lg Y_2)(\lg X_1 - \lg X_2) / (\lg Y_1 - \lg Y_2) + \lg X_2. \quad (10.22)$$

Так как  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_1$  и  $Y_2$  — постоянные,  $\lg X = A \lg Y \pm B$ .

Так, Э. И. Пархоменко и Ф. В. Индугным установлена связь между  $\rho_3$  и  $\epsilon_r$  вулканогенных пород, которая также обусловлена переменным минеральным составом (см. рис. 10.2, б):

$$\lg \rho_3 = 11,24 - 2,04 \lg \epsilon_r. \quad (10.23)$$

Взаимосвязь тензорного параметра  $Y_{тз}$ , выраженного по формуле логарифмического средневзвешенного, со скалярным параметром  $X_{ск}$  может быть выражена уравнением типа

$$X_{ск} = \frac{\lg Y_{тз} - \lg Y_2}{\lg Y_1 - \lg Y_2} (X_1 - X_2) + X_2 \quad (10.24)$$

или

$$X_{ск} = A \lg Y_{тз} \pm B. \quad (10.25)$$

Взаимосвязи между двумя физическими параметрами пород на практике чаще всего устанавливают экспериментально путем многочисленных измерений обоих параметров для изучаемой группы пород. Затем строят точечные графики связи

Между параметрами и обрабатывают их методами математической статистики (см. разд. 2.6).

Рассмотренный выше расчетный метод позволяет прогнозировать взаимосвязи свойств без эксперимента и объяснять исходные факторы, обуславливающие взаимосвязь, что

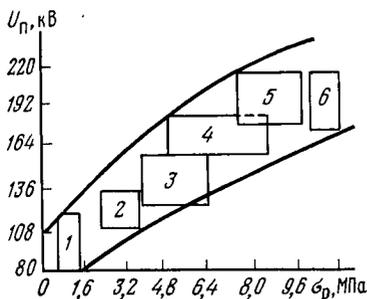


Рис. 10.3. Взаимосвязь между пределом прочности пород  $\sigma_r$  и пробивным напряжением  $U_p$  (по М. П. Тонконогову): 1 — уголь; 2 — аргиллит; 3 — алевролит; 4 — песчаник; 5 — парагнейс; 6 — роговик

весьма важно для установления правильных границ применимости корреляционных уравнений.

Например, параметры основных слагающих гематитовую руду минералов кварца (кв) и гематита (гем):

$$\lambda_{\text{гем}} = 11,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \rho_{\text{э. кв}} = 10^{17} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \rho_{\text{э. гем}} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Отсюда, используя уравнение (10.22), можно получить

$$\lg \lambda = 1,066 + 0,017 \lg \sigma_r. \quad (10.26)$$

М. П. Тонконоговым и В. А. Векслером установлены взаимосвязи между пробивным напряжением  $U_p$  и модулем Юнга, между  $U_p$  и пределом прочности для различных горных пород, обусловленные также, в первую очередь, переменным минеральным составом (рис. 10.3).

### 10.3. ВЗАИМОСВЯЗИ СВОЙСТВ ПОРОД, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫМ СТРОЕНИЕМ

Одним из основных параметров строения, наиболее существенно влияющих на физические свойства пород, является их пористость. Поэтому на базе пористости выявлено большое число взаимосвязей физических свойств горных пород. Расчет этих свойств можно производить, используя уравнения зависимости свойств пород от пористости, приведенные в предыдущих разделах.

Как известно, наиболее сильные зависимости от пористости наблюдаются для модуля Юнга  $E$ , прочностных параметров и коэффициента теплопроводности  $\lambda$ . Поэтому между этими параметрами возможны взаимосвязи на базе пористости.

Так, между величинами  $E$  и  $\sigma_{сж}$  наиболее вероятно прямая линейная связь, так как эти параметры примерно одинаково зависят от пористости.

Используя известные зависимости (3.28) и (3.60), можно записать

$$\sigma_{сж} = E\sigma_{сж0} (1 - a_1 P)^2 / [E_0 (1 - a_2 P)^2]. \quad (10.27)$$

Если  $a_1 \approx a_2$ , а  $\sigma_{сж0}/E_0 = \text{const} = \varepsilon$ ,

$$\sigma_{сж} = \varepsilon_0 E. \quad (10.28)$$

Действительно, в результате статистической обработки большого числа данных, полученных для различных пород, была выведена следующая зависимость:

$$\sigma_{сж} = 420_4 (E \cdot 10^{-10} - 1,06) 10^5, \quad (10.29)$$

что весьма близко к выражению (рис. 10.4).

$$\sigma_{сж} = 3,75 \cdot 10^{-3} E. \quad (10.30)$$

Экспериментально различными авторами установлены подобные же формулы, например,

$$\sigma_{сж \perp} = 200 E_{д \perp} \cdot 10^{-5}. \quad (10.31)$$

М. Л. Нисневичем и Г. С. Заржицким для карбонатов в пределах  $\sigma_{сж} \leq 70$  МПа и  $E \leq 5,5 \cdot 10^{10}$  Па выявлена связь

$$\sigma_{сж} = 1,27 \cdot 10^{-3} E \quad (10.32)$$

Установлено множество связей между различными физическими параметрами и объемной массой пород. Объясняется это тем, что исследуемые параметры и объемная масса зависят от одного и того же фактора строения — пористости.

Так как зависимость  $\sigma_{сж}$  и  $E$  от  $P$  выражается уравнениями (3.28) и (3.60), путем простейших преобразований можно получить:

$$\sigma_{сж} = \sigma_{сж0} (B + C\rho)^2; \quad (10.33)$$

$$E = E_0 (B_1 + C_1\rho)^2, \quad (10.34)$$

где  $B$ ,  $B_1$  и  $C$ ,  $C_1$  — некоторые постоянные.

Так, для известняков Коробчеевского месторождения характерно следующее соотношение между  $\sigma_{сж}$  и  $\rho$  (см. рис. 10.4):

$$\sigma_{сж} = 1,22 \cdot 10^8 (10^{-3}\rho - 1,7)^2, \quad (10.35)$$

а для доломитов

$$\sigma_{сж} = 1,1 (10^{-3}\rho - 1,7)^2 \cdot 10^7. \quad (10.36)$$

Связь между модулем упругости и объемной массой карбонатных пород примерно следующая:

$$E = 7,2 \cdot 10^{10} (10^{-3}\rho - 1,8)^2. \quad (10.37)$$

Если  $\nu$  с увеличением пористости возрастает, то связь между  $\nu$  и  $\sigma_{сж}$  может быть выявлена, как это, например, установлено М. Л. Нисневичем для карбонатных пород.

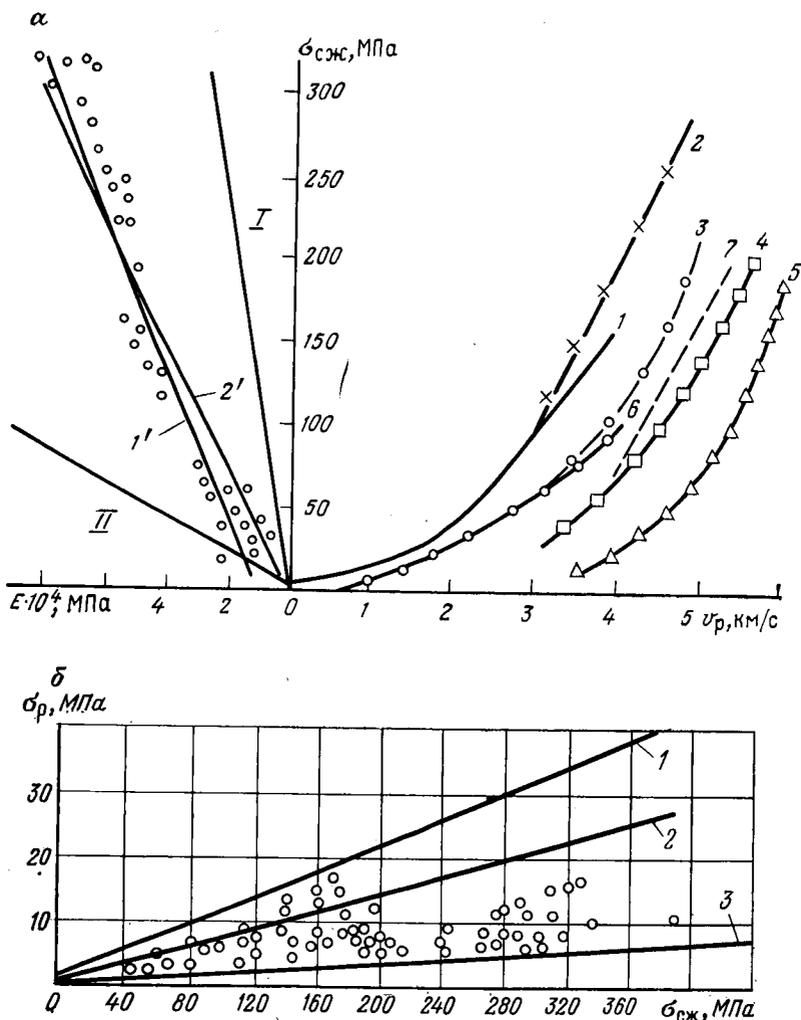
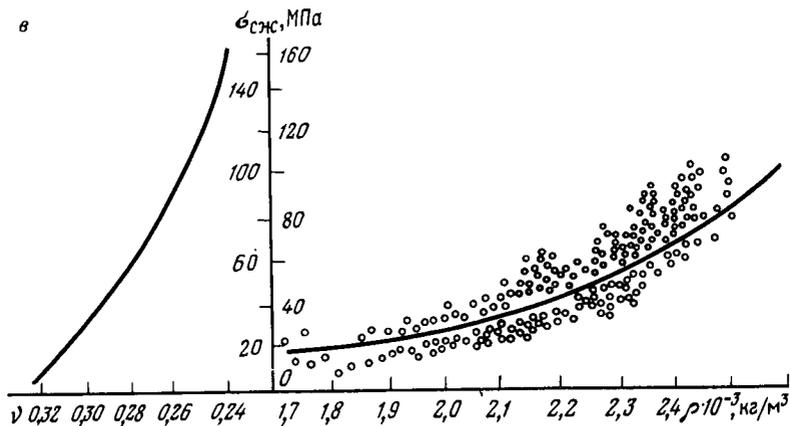


Рис. 10.4. Взаимосвязь предела прочности породы при сжатии  $\sigma_{сж}$ :

$a$  — с модулем упругости для осадочных горных пород ( $1'$  — непосредственная корреляция;  $2'$  — расчетная связь;  $I$  и  $II$  — предельные границы) и скоростью упругих волн  $\nu_p$  [ $1$  — расчетная кривая;  $2-7$  — экспериментальные кривые ( $2$  — песчаники;  $3$  — базальт;  $4$  — известняк;  $5$  — габбро-диабаз (по Л. В. Шаумяну);  $6$  — осадочные породы Кузбасса;  $7$  — породы Киргизии (по М. К. Терметчикову)];  $b$  — с пределом прочности при растяжении  $\sigma_p$ ;  $1$  и  $3$  — предельные границы;  $2$  — средняя линия;  $v$  — с объемной массой  $\rho$  известняка и коэффициентом Пуассона  $\nu$

Между  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_p$  также можно установить некоторые прямолинейные взаимосвязи (см. рис. 10.4).

Существует обобщенная взаимосвязь между скоростью распространения продольных упругих волн  $\nu_p$  и пределом прочности при сжатии.



Если принять

$$v \approx 0,25; \quad E = \sigma_{сж} / \epsilon_{пр}; \quad \epsilon_{пр} \approx 3,5 \cdot 10^{-3},$$

то, учитывая формулу (3.66),

$$\sigma_{сж} = 3 \cdot 10^{-3} v_p^2 \rho. \quad (10.38)$$

Эксперименты подтверждают соответствие уравнения (10.38) реально установленным взаимосвязям.

Для пород Кузбасса, например, выявлена взаимосвязь типа

$$\sigma_{сж} = [45 \cdot 10^5 / (6120 - v_p) - 800] 10^5, \quad (10.39)$$

качественно совпадающая с теоретически предсказанной.

Существуют подобные взаимосвязи и между пределом прочности пород при растяжении и скоростью распространения продольных упругих волн, например,

$$\sigma_p = (0,12v_p - 391) 10^5. \quad (10.40)$$

Скорость распространения упругих волн хорошо коррелирует на базе переменной пористости также с объемной массой пород. Такие взаимосвязи установлены для ряда пород Западного Донбасса; например, для аргиллитов, по Г. Т. Кирничанскому,

$$\rho = 0,21v_p + 1620. \quad (10.41)$$

Рассматривая тепловые свойства пород, также можно установить некоторые взаимосвязи между параметрами. Так, между теплопроводностью пород и их объемной массой выявлена следующая корреляционная взаимосвязь (рис. 10.5):

$$\lambda = 8,93 \cdot 10^{-11} \rho^{3,1}. \quad (10.42)$$

У пород примерно одинакового минерального состава наблюдается четкая зависимость объемной теплоемкости и коэф-

фициента теплопроводности от пористости — см. уравнения (6.19) и (6.22).

Решая совместно эти уравнения, можно получить

$$\lambda = BcV^3, \quad (10.43)$$

где  $B$  — некоторый постоянный размерный коэффициент,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

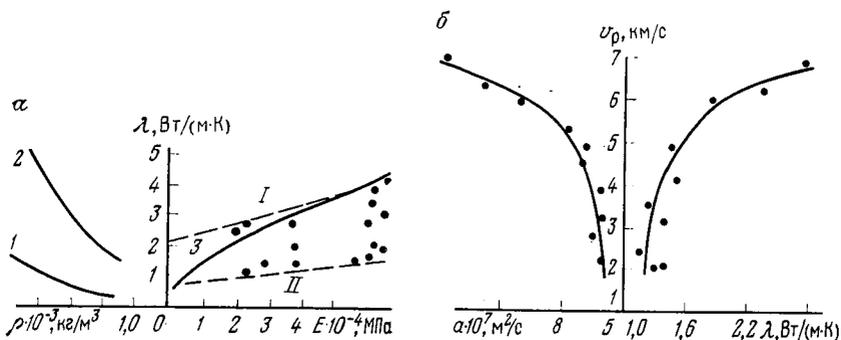


Рис. 10.5. Взаимосвязь тепловых свойств пород:

$a$  — коэффициента теплопроводности  $\lambda$  с объемной массой песчаных пород  $\rho$  (1 — сухие; 2 — максимально водонасыщенные) и модулем Юнга  $E$  (I и II — линии, ограничивающие разброс экспериментальных данных для разных пород; 3 — теоретическая кривая);  $b$  — коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $a$  со скоростью упругих волн  $v_p$  в породах СУБРА (по О. Г. Латышеву)

Для пород, имеющих примерно одинаковый минеральный состав, но различную пористость, можно рассчитывать возможные взаимосвязи между тепловыми и механическими свойствами.

Так, используя зависимости  $E$  и  $\lambda$  от пористости [уравнения (3.28) и (6.22)], можно установить взаимосвязь между этими параметрами на базе пористости пород:

$$\lambda = B(C + \sqrt{E})^3, \quad (10.44)$$

где  $B$  и  $C$  — некоторые постоянные коэффициенты.

Аналогично решая совместно уравнения (6.22) и (3.60), получим

$$\lambda = B_2(C_2 + \sqrt{\sigma_{сж}})^3. \quad (10.45)$$

Существует взаимосвязь между  $\lambda$  и  $v_p$ . Такая взаимосвязь наблюдается также между свойствами пород в массиве, поэтому становится возможным в ряде случаев вычислять коэффициент теплопроводности массива по величине  $v_p$  без прямых измерений  $\lambda$ .

В частности, О. Г. Латышевым экспериментально выявлены довольно тесные взаимосвязи между скоростью упругих волн в породах Североуральского бокситового месторождения и их коэффициентом теплопроводности и температуропроводностью (см. рис. 10.5).

На базе пористости пород можно установить примерно прямо пропорциональную связь между  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_a$  и между  $\lambda$  и  $\sigma_a$ , поскольку с увеличением пористости они уменьшаются.

Выявленная на базе пористости пород прямо пропорциональная взаимосвязь между  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_a$  пород одного минерального состава может иметь место и для группы пород различного минерального состава, если при этом связь между  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_a$ , обусловленная минеральным составом, имеет тот же вид (широкое колебание в составе более проводящих включений, обладающих в то же время большей прочностью, например, уравнение  $\sigma_{сж} = f(\sigma_a)$  для углей Кузбасса). И наоборот, эта взаимосвязь  $\sigma_{сж} = f(\sigma_a)$  полностью исчезает (или даже станет противоположной) для пород переменного состава, если более проводящее включение будет обладать меньшей прочностью (например, магнетит в железистых кварцитах).

Точно такого же типа взаимосвязи существуют и между горно-технологическими параметрами, например, связь между  $f_d$  и  $\sigma_{сж}$ , установленная М. К. Терметчиковым,

$$f_d = 6,3 \cdot 10^{-8} \sigma_{сж} + 4,5, \quad (10.46)$$

связь между  $\rho_{ш}$  и  $\sigma_{сж}$

$$\rho_{ш} = 30 \sigma_{сж} + 4,52 \cdot 10^8. \quad (10.47)$$

#### 10.4. ВЗАИМОСВЯЗИ СВОЙСТВ ПОРОД, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫМИ ВНЕШНИМИ ПОЛЯМИ

Как нами уже установлено, любые изменения параметров воздействующего поля приводят к изменению практически всех показателей физических свойств подвергаемой испытанию породы. Поэтому для данной породы можно установить определенные взаимосвязи между свойствами, обусловленные переменным внешним полем. При этом взаимосвязь возможна только для пород, у которых остальные факторы, изменяющие свойства, остаются постоянными, т. е.  $M$  и  $C$  постоянны или  $M$  и  $C$  существенно не сказываются на величине изучаемых физических параметров.

Естественно, что применение этих взаимосвязей возможно только при изучении поведения пород в данных переменных полях.

Так, например, с увлажнением горной породы возрастают ее диэлектрическая проницаемость и удельная электрическая проводимость. Это дает основание предполагать, что для однопородных горных пород можно установить взаимосвязь между  $\rho_a$  и  $\epsilon_r$ , вызванную увлажнением пород. Такие взаимосвязи действительно существуют и установлены эмпирически. Естественно, что использовать такую взаимосвязь, например, для расчета  $\epsilon_r$  по известному  $\rho_a$  можно только для данной изученной

группы пород и только в условиях меняющейся влажности (а не температуры или пористости).

Эти взаимосвязи, как и рассмотренные ранее, можно прогнозировать и рассчитывать теоретически, если известны соответствующие зависимости изучаемых свойств породы от внешнего воздействующего поля.

Так, известно, что удельная электрическая проводимость  $\sigma_3$  горных пород в области высоких температур (выше 300 °С) хорошо подчиняется закономерностям физики диэлектриков и полупроводников — уравнению (9.13).

Так как коэффициент теплопроводности  $\lambda$  при этом также меняется с повышением температуры, причем это изменение в ряде случаев описывается уравнением типа (9.7), путем совместного решения уравнений (9.13) и (9.7) устанавливается следующая взаимосвязь между  $\lambda$  и  $\sigma_3$ :

$$\sigma_3 = \sigma_{03} \exp [ - Q\lambda / (2kb) ] = A \exp ( - \lambda B ), \quad (10.48)$$

где  $b$  и  $B$  — некоторые постоянные.

Для льда, например, Б. И. Коленковым установлена на основе переменной температуры следующая зависимость между диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$  и удельной теплоемкостью  $c$ :

$$(\epsilon_r - \epsilon_r^0) / (c - c_0) = \text{const}, \quad (10.49)$$

где  $\epsilon_r^0$  и  $c_0$  — параметры льда при 0 °С.

### 10.5. МНОЖЕСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПОРОД

Взаимосвязи между двумя физическими параметрами породы иногда обладают большим разбросом данных, так как при этом все прочие параметры породы условно сводятся к одному среднему значению. Сузить величину разброса данных, существующую при парной корреляции, можно путем ввода в корреляционное уравнение дополнительно учитываемых переменных, в том числе и параметров других свойств. В результате осуществляется переход к множественной корреляции.

Так, взаимосвязь, выраженная формулой парной корреляции (10.14), которую можно представить в следующем виде:

$$X - X_2 = (X_1 - X_2) (Y - Y_2) / (Y_1 - Y_2), \quad (10.50)$$

наиболее достоверна только для двухкомпонентной породы.

В случае многокомпонентной породы нет возможности полностью избавиться от влияния на взаимосвязь третьих и четвертых переменных — объемного содержания соответствующих минеральных компонент. Если разброс данных, вызванный неуточненными факторами, велик, то с целью его сужения можно установить связь сразу между несколькими физическими параметрами.

Теоретический расчет множественной взаимосвязи возможен, если известны зависимости физических параметров от всех переменных факторов, т. е. если имеются множественные корреляционные зависимости свойств горных пород от различных их определяющих факторов — комплекса характеристик состава, строения, внешних полей.

Так, если имеются три зависимости физических параметров  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  от трех компонент породы с соответствующими параметрами  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$ , т. е.

$$\begin{aligned} X &= X_1V_1 + X_2V_2 + X_3V_3, \\ Y &= Y_1V_1 + Y_2V_2 + Y_3V_3, \\ Z &= Z_1V_1 + Z_2V_2 + Z_3V_3, \end{aligned} \quad (10.51)$$

где  $V_1 + V_2 + V_3 = 1$  — относительные объемные содержания соответственно первого, второго и третьего минералов, то после решения этой системы уравнений можно получить

$$\begin{aligned} X &= \frac{(Y - Y_3)(Z_2 - Z_3) - (Z - Z_3)(Y_2 - Y_3)}{(Y_1 - Y_3)(Z_2 - Z_3) - (Z_1 - Z_3)(Y_2 - Y_3)}(X_1 - X_3) + \\ &+ \frac{(Z - Z_3)(Y_1 - Y_3) - (Y - Y_3)(Z_1 - Z_3)}{(Y_1 - Y_3)(Z_2 - Z_3) - (Y_2 - Y_3)(Z_1 - Z_3)}(X_2 - X_3) + X_3. \end{aligned} \quad (10.52)$$

Выделив в уравнении (10.52) постоянные коэффициенты, получим

$$X = \pm AY \pm BZ \pm C. \quad (10.53)$$

Это уравнение — множественная взаимосвязь между физическими параметрами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , установленная на базе переменного содержания трех минералов в породе.

Для гранита, например, можно выявить взаимосвязь на базе минерального состава между параметрами  $c$ ,  $\lambda$ ,  $E$ .

Известно, что для полевого шпата

$$\begin{aligned} E_{\text{шп}} &= 7,12 \cdot 10^{10} \text{ Па}; & c_{\text{шп}} &= 750 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \\ \lambda_{\text{шп}} &= 2,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \end{aligned}$$

для слюды

$$\begin{aligned} E_{\text{сл}} &= 6,6 \cdot 10^{10} \text{ Па}; & c_{\text{сл}} &= 770 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \\ \lambda_{\text{сл}} &= 1,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

В результате расчетов получим уравнение

$$\lambda = 1,2 \cdot 10^{-10} E - 26,7 \cdot 10^{-3} c + 14. \quad (10.54)$$

Множественные корреляции возможны также и на базе параметров строения пород, например пористости.

Так, уравнение (10.38) выведено из предположения, что коэффициент Пуассона и объемная масса пород не зависят от их пористости. Это не соответствует действительности, и, следовательно, точность взаимосвязи (10.38) не высока.

Более точная взаимосвязь получится, если в это уравнение ввести дополнительные переменные.

Так, например, коэффициент поглощения упругих колебаний тоже существенно зависит от пористости пород. Введя его в уравнение (10.38), можно избавиться от влияния пористости пород на объемную массу  $\rho$ .

Если

$$\theta = \theta_0 P^2, \quad (10.55)$$

то, используя зависимость  $\rho = \rho_0(1 - P)$  и подставляя в уравнение (10.38) вместо  $\rho$  его выражение через  $\theta$ , можно вывести следующее уравнение множественной корреляции:

$$\sigma_{сж} = v_P^2 (A - B \sqrt{\theta}). \quad (10.56)$$

Существуют экспериментальные данные, подтверждающие бóльшую точность уравнения (10.56) по сравнению с уравнением (10.38). Согласно уравнению (10.56) с увеличением коэффициента поглощения  $\theta$  упругих колебаний величина  $\sigma_{сж}$  пород уменьшается даже при высоких скоростях распространения в них упругих колебаний.

Г. Т. Кирничанским установлена множественная корреляция пределов прочности пород Донбасса с двумя показателями — скоростями распространения продольных упругих волн вдоль  $v_{P \parallel}$  и перпендикулярно  $v_{P \perp}$  к слоистости. Например, для песчаника

$$\sigma_{сж} = (1,05v_{P \parallel} + 0,7v_{P \perp} - 1950) 10^4; \quad (10.57)$$

$$\sigma_P = 1,4(v_{P \parallel} + v_{P \perp} - 236) 10^3. \quad (10.58)$$

Экспериментальное изучение многих горных пород показало, что к ним применим второй закон Грюнайзена. Это значит, что на базе рассмотрения зависимости свойств однородных тел от температуры можно получить температурную взаимосвязь между четырьмя физическими параметрами пород:

$$\alpha E / [c_p (1 - 2\nu)] = \Gamma \approx 0,3 \div 0,4. \quad (10.59)$$

Вводя дополнительные физические параметры в корреляционное уравнение, можно еще больше сузить разброс данных и получить большую точность рассчитанных физических характеристик. Однако существуют пределы увеличения числа переменных факторов. Ведь если для расчета какого-то одного параметра необходимо определить четыре-пять других, то применение такой корреляционной взаимосвязи для практических расчетов слишком трудоемко.

Поэтому уравнения множественной корреляции целесооб-

разны лишь в случае, когда в результате их использования точность вычислений возрастает и расширяется область применения уравнений.

#### 10.6. О ЗНАЧЕНИИ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Знание взаимосвязей физических свойств горных пород позволяет определить по известным параметрам другие. Это, в свою очередь, позволяет решать многие научные и практические задачи горной науки и горного производства. К ним могут быть отнесены следующие:

установление комплекса физических свойств пород в массиве и их распределения по результатам измерения одного-двух параметров, наиболее легко определяемых в массиве: например, по измеренным значениям удельного электрического сопротивления — коэффициент теплопроводности, прочность, крепость пород и т. д.;

снижение объема определений свойств пород благодаря возможности их расчета по известным взаимосвязям: например, по определенному только  $\sigma_{сж}$  устанавливают по взаимосвязям еще и  $E$ ,  $\nu$  и т. д.;

установление физических свойств пород на образцах малых размеров по величине физических параметров, поддающихся измерению на таких образцах. Например, отсутствие достаточного количества по объему и размерам проб лунного грунта потребовало для их определения использования взаимосвязи между  $E$  и  $\lambda$  горных пород;

установление ряда свойств пород в условиях сложного воздействия температур, давления, вакуума, которые непосредственно в этих условиях не могут быть измерены. Например, в установке высокого давления на малом образце определяют только модуль Юнга  $E$ , а по взаимосвязи  $E—\lambda$  — коэффициент теплопроводности;

экспрессное установление требуемых для расчета процессов горного производства параметров по некоторым известным другим параметрам, например, по крепости — модуля Юнга и предела прочности при сжатии, нужных для расчета производительности бурового станка;

разработка методов контроля различных процессов в горных породах.

На практике очень широко применяют для изучения массивов горных пород закономерности распространения упругих колебаний в породах. Поэтому различные взаимосвязи между скоростями распространения упругих колебаний, коэффициентами их поглощения с другими физическими и горно-технологическими параметрами пород представляют особый интерес, так как позволяют разрабатывать экспрессные методы оценки комплекса различных свойств в массивах пород.

## 10.7. ПАСПОРТИЗАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Цель паспортизации пород состоит в том, чтобы компактно записывать основные физические параметры пород с практически достаточной для расчетов степенью точности. Паспорта горных пород позволяют систематизировать, классифициро-

Таблица 10.1. Расшифровка характеристик строения горных пород и их свойств,

I	II				III	IV
Название породы или цифровой код	Группа размера зерен	Группа формы зерен	Группа коэффициента ориентации зерен	Группа трещиноватости	Группа объемной массы	Группа пористости
	Группа коэффициента неоднородности по размерам	Группа коэффициента неоднородности по форме				

вать, обрабатывать данные методами вычислительной техники. Информация, получаемая из паспортов горных пород, вполне достаточна для выполнения большинства практических расчетов. Базовые свойства пород позволяют по известным формулам вычислить производные показатели, в том числе и технологические.

В паспорт горных пород (табл. 10.1) входят их название (I), характеристики строения (II) и комплекс основных параметров (III, IV, V и VI), достаточных для оценки породы как объекта горных работ и записанных в виде соответствующего номера группы.

Все показатели строения и свойств горных пород по числовым значениям разбиты на десять групп (табл. 10.2, 10.3, 10.4, 10.5), причем пределы изменения их в каждой группе выбраны с учетом максимальных значений параметров для пород и коэффициента вариации, в результате чего интервал разбивки параметров неравномерный. Большшему значению параметра соответствует и большее цифровое обозначение группы.

Название породы записывается в графу I табл. 10.1 словами или цифровым кодом (см. разд. 2.7). В графе II табл. 10.1 ставится дробь, в числителе которой первая цифра обозначает группу среднего размера  $d_{cp}$  зерен минералов, слагающих по-

роду, приведенную в табл. 10.2, вторая цифра — группу формы зерен  $k_{фр}$ , представленную в табл. 10.3. В знаменателе проставляются цифры, обозначающие группы, соответствующие коэффициентам неоднородности зерен по размерам  $k_{н.р}$  и форме  $k_{н.ф}$ . Две последние цифры стросния указывают соответственно на группы коэффициента ориентации  $k_o$  и трещиноватости  $k_{тр}$  (см. табл. 10.3).

входящих в паспорт

V				VI			
Группа механических свойств (числитель)				Группа электромагнитных свойств			
Предел прочности при сжатии	Предел прочности при растяжении	Модуль упругости	Коэффициент Пуассона	Удельное электрическое сопротивление	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Магнитная проницаемость
Группа тепловых свойств (знаменатель)							
Коэффициент теплопроводности	Удельная теплоемкость	Коэффициент линейного теплового расширения					

Коэффициент трещиноватости оценивается по удельному количеству трещин, приходящихся на 1 см<sup>2</sup> площади поверхности горной породы.

В графах III и IV табл. 10.1 записываются группы объемной массы и пористости, соответствующие физическим параметрам породы, приведенным в табл. 10.4.

В графе V табл. 10.1 проставляется дробь, цифры числителя которой обозначают группы механических параметров, приведенных в табл. 10.4: предела прочности при сжатии, модуля упругости и коэффициента Пуассона. В знаменателе соответственно записываются группы тепловых параметров — коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости, коэффициента линейного теплового расширения, — определяемых по табл. 10.5. В графе VI табл. 10.1 записываются четыре цифры, соответствующие группам электромагнитных параметров породы: удельного электрического сопротивления, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и магнитной проницаемости (см. табл. 10.5).

Число отдельных показателей (механических, тепловых, электромагнитных), так же как и природно-структурных показателей, учитываемых в паспорте, можно при необходимости увеличить, так как форма паспорта легко позволяет это сделать.

Таким образом, результаты изучения параметров пород могут быть записаны в следующем виде:

для гранита мелкозернистого

$$\frac{51}{12} 02 - 40 \frac{7341}{654} 5431;$$

Таблица 10.2. Группирование размеров зерен в горных породах

Тип структуры породы	Размер зерен, мм	Группа размера зерен
Аморфная	0	0
Скрытокристаллическая:	0—5·10 <sup>-4</sup>	1
	5·10 <sup>-4</sup> —10 <sup>-3</sup>	2
	10 <sup>-3</sup> —5·10 <sup>-2</sup>	3
Кристаллическая:	5·10 <sup>-2</sup> —10 <sup>-1</sup>	4
	10 <sup>-1</sup> —2,5·10 <sup>-1</sup>	5
	2,5·10 <sup>-1</sup> —5·10 <sup>-1</sup>	6
среднезернистая		
крупнозернистая	5·10 <sup>-1</sup> —1	7
грубозернистая	1—5	8
гигантозернистая	>5	9

для каменного угля (с записью названия угля по коду классификации)

$$17-13-2.3 \frac{00}{00} 0.4-0.4 \frac{1113}{342} 2840;$$

для аркозового песка

$$02-01-3.1 \frac{72}{53} 09-27 \frac{1015}{241} 4421.$$

Таблица 10.3. Группирование параметров строения горных пород

Коэффициент формы $k_{фр}$	Группа форм зерен $k_{фр}$	Коэффициент неоднородности размеров $k_{н.р}$	Группа $k_{н.р}$	Коэффициент неоднородности формы $k_{н.ф}$	Группа $k_{н.ф}$
1—1,5	0	1—1,5	0	1—1,5	0
1,5—2,5	1	1,5—2,5	1	1,5—2,5	1
2,5—5,5	2	2,5—5,5	2	2,5—5,5	2
5,5—10,5	3	5,5—10,5	3	5,5—10,5	3
10,5—20	4	10,5—30	4	10,5—20	4
20—30	5	30—50	5	20—30	5
30—50	6	50—100	6	30—50	6
50—70	7	100—150	7	50—70	7
70—100	8	150—200	8	70—100	8
> 100	9	> 200	9	> 100	9

Паспорт свойств пород весьма наглядно выявляет общие и отличительные черты горных пород и хорошо согласуется, в частности, с принятой их классификацией по крепости.

### 10.8. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД ЛУНЫ

В настоящее время перед мировой наукой и практикой возник ряд актуальных задач, связанных с исследованием и последующим освоением космического пространства, планет Солнечной системы и, в первую очередь, Луны. Повышение эффективности научных изысканий, опытно-конструкторских работ, обработки технологических процессов и устройств, работающих на поверхности Луны, требует знания физических свойств лунных пород и грунтов.

Благодаря современным достижениям космонавтики стало возможным приступить к непосредственному изучению образцов пород, отобранных с поверхности Луны. Породы Луны были впервые доставлены на Землю автоматической станцией «Луна-16» в 1970 г. и астронавтами космического корабля «Аполлон-11» в 1969 г., затем доставлялись в течение 1969—1972 гг. этими же космическими комплексами с различных мест Луны (в общей сложности с восемью мест).

Поверхность Луны покрыта слоем рыхлых разнозернистых пород, различных по составу и свойствам. Такой лунный грунт принято называть реголитом. Он образовался на поверхности Луны в результате длительных процессов, вызванных специфическими лунными условиями (высоким вакуумом, резкими перепадами температур, ударами метеоритов, космическим излучением и т. д.). Он состоит из непреобразованных обломков магматических пород типа базальтов и сплавленных слипшихся сферических частиц. В результате петрографического анализа установлено, что в реголите содержатся габбро, базальт, анортит, брекчии, различные стекловатые частицы и шлаки.

Коэффициент ориентации зерен $k_o$	Группа	Коэффициент трещиноватости $k_{тр}$	Блочность	Группа трещиноватости
1—1,5	0	$0—10^{-4}$	Крупная	0
1,5—2,5	1	$10^{-4}—2 \cdot 10^{-4}$	»	1
2,5—5,5	2	$2 \cdot 10^{-4}—5 \cdot 10^{-4}$	Средняя	2
5,5—10,5	3	$5 \cdot 10^{-4}—10^{-3}$	»	3
10,5—20	4	$10^{-3}—2 \cdot 10^{-3}$	Мелкая	4
20—30	5	$2 \cdot 10^{-3}—5 \cdot 10^{-3}$	»	5
30—50	6	$5 \cdot 10^{-3}—10^{-2}$	»	6
50—70	7	$10^{-2}—10^{-1}$	»	7
70—100	8	$10^{-1}—1$	Тонкая	8
> 100	9	> 1	»	9

По химическому составу габбро-базальт, доставленный станцией «Луна-16», характеризуется высоким содержанием  $\text{SiO}_2$  (43,8 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13,6 %) и  $\text{FeO}$  (19,4 %).

Минералы, содержащиеся в породах Луны, принципиально не отличаются от таковых земного происхождения — это пироксены, плагиоклазы, оливины. Из рудных минералов обна-

Таблица 10.4. Группирование плотностных и механических параметров горных

Группа	Объемная масса $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>		Пористость $P$ , %		Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж} \cdot 10^{-5}$ , Па	
	Предел изменения	Среднее значение	Предел измене- ния	Среднее значение	Предел изменения	Среднее значение
0	До 1,60	1,0±0,6	До 2	1±1	До 100	50±50
1	1,6—2,0	1,8±0,2	2—4	3±1	100—300	200±100
2	2,0—2,4	2,2±0,2	4—6	5±1	300—500	400±100
3	2,4—2,6	2,5±0,1	6—8	7±1	500—700	600±100
4	2,6—2,8	2,7±0,1	8—10	9±1	700—900	800±100
5	2,8—3,0	2,9±0,1	10—14	12±2	900—1100	1000±100
6	3,0—3,4	3,2±0,2	14—18	16±2	1100—1500	1300±200
7	3,4—4,0	3,7±0,3	18—26	22±2	1500—2100	1800±300
8	4,0—5,0	4,5±0,5	26—40	33±7	2100—2900	2500±400
9	Более 5,0	—	Более 40	—	Более 2900	—

ружены ильменит, шпинели, а также металлическое никелистое железо (Ni—Fe).

Выявлено, что реголиту земным аналогом могут служить андезито-базальтовый песок и молотый базальт.

Объемная масса реголита в естественном состоянии варьирует в довольно широких пределах и в среднем составляет около  $(1,2 \div 1,6) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Механическим уплотнением величину  $\rho$  можно повысить до  $2,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Плотность минеральных фракций лунного грунта составляет от  $2,7 \cdot 10^3$  до  $3,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, пористость зерен — около 10—13 %.

Сцепление реголита  $C$  весьма низкое и находится в пределах от 0 до  $1,6 \cdot 10^3$  Па, угол внутреннего трения достигает  $25 \div 30^\circ$  (табл. 10.6).

По мере уменьшения степени уплотнения лунного грунта его сопротивление сдвигу и соответственно сцепление уменьшаются.

Модуль деформации  $E_{\text{деф}}$  реголита также существенно зависит от его уплотнения и изменяется от  $1,6 \cdot 10^4$  до  $2,4 \cdot 10^5$  Па при изменении объемной массы от  $1,12 \cdot 10^3$  до  $1,62 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Объемная масса грунта, доставленного станцией «Аполлон-11», составляет от  $0,87 \cdot 10^3$  до  $1,93 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, плотность его  $(2,9 \div 3,24) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Как установлено исследованиями МГИ, при измерениях в вакууме коэффициент теплопроводности  $\lambda$  рего-

лита при температуре 20—40 °С составляет от  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $2,94 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К).

Удельная теплоемкость реголита составляет  $740 \div 820$  Дж/(кг·К), температуропроводность в вакууме —  $(0,27 \div 0,36) \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с.

Примерно такими же тепловыми параметрами обладают и

пород

Предел прочности при растяжении $\sigma_p \cdot 10^{-5}$ , Па		Модуль упругости $E \cdot 10^{-10}$ , Па		Коэффициент Пуассона $\nu$	
Предел изменения	Среднее значение	Предел изменения	Среднее значение	Предел изменения	Среднее значение
До 10	5±5	До 0,9	0,45	До 0,13	0,1±0,03
10—30	20±10	0,9—2,5	1,7±0,8	0,13—0,17	0,15±0,02
30—50	40±10	2,5—3,5	3,00±0,5	0,17—0,21	0,19±0,02
50—70	60±10	3,5—4,5	4,0±0,5	0,21—0,23	0,22±0,01
70—90	80±10	4,5—5,5	5,0±0,5	0,23—0,25	0,24±0,01
90—110	100±10	5,5—6,5	6,0±0,5	0,25—0,27	0,26±0,01
110—130	120±10	6,5—9,5	8,0±1,5	0,27—0,29	0,28±0,01
130—170	150±20	9,5—12,5	11±1,5	0,29—0,33	0,31±0,02
170—230	200±30	12,5—17,5	15±2,5	0,33—0,41	0,37±0,04
Более 230	—	Более 17,5	—	Более 0,41	—

земные аналоги реголита в соответствующих условиях.

Исследования лунного грунта показали, что наличие или отсутствие вакуума существенно изменяет тепловые свойства дисперсных пород. Так,  $\lambda$  лунного грунта в атмосфере гелия был в 50 раз, а температуропроводность — в 55 раз больше, чем в вакууме.

Удельная теплоемкость лунных пород, доставленных космическими кораблями «Аполлон», находится в пределах  $720 \div 770$  Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,76 \div 2,5 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К). При увеличении плотности грунта параметр  $\lambda$  в вакууме возрастает, в атмосфере гелия уменьшается.

Изменения тепловых свойств лунных пород от температуры подобны изменениям этих же свойств земных пород.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  реголита по данным МГИ составляет 1,8—3,5 в пределах частот  $10^5$ — $10^7$  Гц. Тангенс угла диэлектрических потерь равен  $0,15 \cdot 10^{-2}$ — $1,6 \cdot 10^{-2}$ , удельное электрическое сопротивление  $(3,2 \div 3,6) \cdot 10^8$  Ом·м.

Таким образом, коэффициент теплопроводности лунного грунта в вакууме приблизительно на три порядка ниже коэффициента теплопроводности плотных горных пород Земли аналогичного состава.

Значения же электрических свойств реголита и земных пород приблизительно одинаковы. Характер изменения  $\epsilon_r$ ,  $\rho_a$ ,  $\text{tg } \delta$  лунного грунта от частоты, температуры, уплотнения ана-

Таблица 10.5. Группирование тепловых и электромагнитных параметров

Группа	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)		Удельная теплоемкость $c$ , кДж/(кг·К)		Удельное электрическое сопротивление $\rho_p$ , Ом·м	
	Предел изменения	Среднее значение	Предел изменения	Среднее значение	Предел изменения	Среднее значение
0	До 0,5	0,3±0,2	До 0,25	0,15±0,10	До 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>
1	0,5—0,9	0,7±0,2	0,25—0,35	0,30±0,05	10 <sup>-3</sup> —10 <sup>1</sup>	10 <sup>-1</sup>
2	0,9—1,3	1,1±0,2	0,35—0,45	0,4±0,05	10 <sup>1</sup> —10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>
3	1,3—1,7	1,5±0,2	0,45—0,55	0,5—0,05	10 <sup>3</sup> —10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>
4	1,7—2,3	2±0,3	0,55—0,65	0,6±0,05	10 <sup>5</sup> —10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>
5	2,3—2,7	2,5±0,2	0,65—0,75	0,7±0,05	10 <sup>7</sup> —10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>
6	2,7—3,3	3±0,3	0,75—0,85	0,8±0,05	10 <sup>9</sup> —10 <sup>11</sup>	10 <sup>10</sup>
7	3,3—4,7	4±0,7	0,85—0,95	0,9±0,05	10 <sup>11</sup> —10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup>
8	4,7—7,3	6±1,3	0,95—1,45	1,2±0,25	10 <sup>13</sup> —10 <sup>17</sup>	10 <sup>15</sup>
9	Более 7,3	—	Более 1,45	—	Более 10 <sup>17</sup>	—

Продолжение табл. 10.5

Группа	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$		Магнитная проницаемость $\mu$ (числитель), восприимчивость $\chi$ (знаменатель)	
	Предел изменения	Среднее значение	Предел изменения	Среднее значение
0	До 4	3±1	До 1 0	0—95±0,5 0
1	4—6	5±1	1—1,001 0—10 <sup>-3</sup>	1,0005±0,0005 10 <sup>-3,5</sup>
2	6—8	7±1	1,001—1,01 10 <sup>-3</sup> —10 <sup>-2</sup>	1,0055±0,0045 10 <sup>-2,5</sup>
3	8—10	9±1	1,01—1,1 10 <sup>-2</sup> —10 <sup>-1</sup>	1,052±0,045 10 <sup>-1,5</sup>
4	10—12	11±1	1,1—1,5 10 <sup>-1</sup> —5·10 <sup>-1</sup>	1,3±0,2 0,3±0,2
5	12—14	13±1	1,5—2,0 0,5—1,0	1,75±0,25 0,75±0,25
6	14—16	15±1	2,0—2,5 1,0—1,5	2,25±0,25 1,25±0,25
7	16—20	18±2	2,5—3,0 1,5—2,0	2,75±0,25 1,75±0,25
8	20—26	23±3	3,0—3,5 2,0—2,5	3,25±0,25 2,25±0,25
9	Более 26	—	Более 3,5 2,5	—

Продолжение табл. 10.5

Группа	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^5$		$\text{tg } \delta \cdot 10^3$	
	Предел изменения	Среднее значение	Предел изменения	Среднее значение
0	До 0,4	0,2	До 1	0,5
1	0,4—0,6	$0,5 \pm 0,1$	1—10	$5,5 \pm 4,5$
2	0,6—0,8	$0,7 \pm 0,1$	10—70	$40 \pm 30$
3	0,8—1,0	$0,9 \pm 0,1$	70—130	$100 \pm 30$
4	1,0—1,2	$1,1 \pm 0,1$	130—190	$160 \pm 30$
5	1,2—1,4	$1,3 \pm 0,1$	190—250	$220 \pm 30$
6	1,4—1,8	$1,6 \pm 0,2$	250—350	$300 \pm 50$
7	1,8—2,2	$2,0 \pm 0,2$	350—450	$400 \pm 50$
8	2,2—3,2	$2,7 \pm 0,5$	450—750	$600 \pm 150$
9	Более 3,2	—	Более 750	—

логичен характеру изменения этих параметров для земных пород подобного состава.

Удельная магнитная восприимчивость реголита и лунных пород находится в пределах  $(0,9—9,6) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ . В образцах реголита имеется около 3—4 % ферромагнитных минералов. При изучении магнитных свойств реголита обнаружено явление спада намагниченности со временем до некоторого постоянного значения, устанавливающегося через 5—6 мин после выключения намагничивающего поля. Это явление характерно только для многокомпонентных порошкообразных смесей, где в качестве одной из составляющих присутствуют силикаты.

Таким образом, изучение лунных пород показало, что свойства любых пород определяются их составом и строением, изменения физических параметров подчиняются общим закономерностям. Это позволяет с высокой достоверностью переносить данные, полученные при изучении пород Земли, на другие космические объекты с учетом соответствующих внешних условий.

Таблица 10.6. Механические свойства лунного грунта

Проба	Насыпная плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент трения $f_{\text{тр}}$ относительно стали	Угол внутреннего трения $\varphi$ , градус	Сцепление $C$ , Па	Модуль деформации $E_{\text{деф}}$ , Па
Лунный грунт	1900	0,3	29,5	3000	$2,4 \cdot 10^5$
Молотый базальт	1730	0,25	29	—	—
Андезито-базальтовый песок	1460	0,3	26	1600	—

## Раздел III

### Физико-технические свойства горных пород и процессы в массиве и в разрыхленных породах

---

## 11. СТРОЕНИЕ, СОСТАВ И СОСТОЯНИЕ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ

### 11.1. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СОСТАВА ГОРНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ

Основные факторы, обуславливающие более сложное строение горных пород в массиве по сравнению с образцом, — это развита трещиноватость пород — геологические нарушения, естественные и искусственные трещины.

Трещиной называют плоский разрыв сплошности среды, величина которого на порядок и более превосходит межатомные расстояния в кристаллической решетке (т. е. более  $10^{-9}$  м).

Трещины различаются по следующим признакам:

1. По степени раскрытия: открытые, закрытые, скрытые.

Открытые трещины — это трещины с разомкнутыми стенками. Открытые трещины могут быть зияющими или заполненными другой породой или минералами.

В закрытых трещинах наблюдается плотное смыкание их стенок. Скрытые трещины вообще неопределимы визуально, однако при нагружении породы разрушение происходит именно по ним.

2. По размерам: внутрикристаллические трещины, вызванные условиями возникновения и развития в породе отдельных кристаллов (размеры порядка  $10^{-9}$  —  $10^{-5}$  м); межкристаллические трещины, ориентированные хаотично (размеры  $10^{-4}$  —  $10^{-2}$  м); макроскопические трещины — кливаж, тектонические нарушения, трещины усыхания и остывания, выветривания и т. д. (размеры от  $10^{-1}$  до  $10^2$  м).

3. По форме: прямолинейные и изогнутые (коленчатые, дугообразные и кольцеобразные).

Выделяют также системы трещин: радиальные, концентрические, кулисообразные, ветвящиеся и др.

4. По геометрическому взаимоотношению трещин со слоистостью: трещины продольные, параллельные линии простираения; поперечные, пересекающие породу в направлении линии падения; диагональные, которые пересекают породу под различными вертикальными углами; согласные трещины, поверх-

ности которых параллельны плоскостям слоистости или сланцеватости.

5. По углам наклона к горизонтали: вертикальные (угол падения  $80-90^\circ$ ), крутые ( $60-80^\circ$ ), средней крутизны ( $30-60^\circ$ ), пологие ( $10-30^\circ$ ) и горизонтальные ( $0-10^\circ$ ).

Трещиноватость пород определяется густотой расположения трещин, количеством систем трещин и их взаиморасположением.

Трещины, группируясь в системы, разбивают породу на блоки (отдельности горных пород), форма и величина которых зависят от числа систем трещин, направления и частоты трещин в системе.

Система трещин может оказать влияние на физические параметры пород, если исследуемый объем породы таков, что эти трещины в нем присутствуют.

В лабораторных экспериментах большинство трещин, характеризующих горную породу в массиве, не может быть учтено.

В связи с этим наблюдается отличие свойств образца от горной породы в массиве. Это различие называется масштабным эффектом.

По технологическим соображениям при оценке разрабатываемых массивов в известное подразделение пород по силам связей на твердые, связные и рыхлые (см. разд. 1.1) вводят дополнительные группы пород в зависимости от их строения. Так, твердые породы подразделяют на скальные и полускальные, связные — на плотные и мягкие, рыхлые — на сыпучие и разрушенные.

К скальным относят большую часть изверженных и метаморфических пород и некоторые породы осадочного происхождения.

К полускальным относят часть изверженных и метаморфических пород (со сравнительно слабыми силами сцепления между частицами) и породы осадочного происхождения. Характерная технологическая особенность полускальных пород в отличие от связных и рыхлых — необходимость их разрушения перед выемочно-погрузочными работами. К полускальным породам относятся, например, слабые песчаники, мергели, слабые известняки и сланцы, гипс, каменная соль, крепкие каменные угли и др.

Плотные породы представлены твердыми глинами, мелями, бурыми и каменными углями и др.

Их можно разрабатывать горными машинами без предварительного разрушения при достаточных усилиях резания: В случае динамических нагрузок плотные породы разрушаются хрупко, но при длительном воздействии нагрузок они ведут себя как пластичные тела.

Мягкие породы представлены песчаными суглинками, супесями, мягкими углями и др. Такие породы достаточно легко

разрабатываются без предварительного рыхления всеми видами выемочных машин. При высыхании они становятся полутвердыми, а под действием воды набухают.

Сыпучие породы — это различные пески.

Разрушенные породы — это первоначально твердые или связные породы, которые под воздействием природных или искусственных факторов разрушены, превращены в рыхлые.

Скальные и полускальные породы по степени трещиноватости подразделяются на пять технологических категорий:

1. Практически монолитные, у которых размер отдельностей превышает 1,5 м, средний размер — около 1 м, видимые трещины отсутствуют.

2. Малотрещиноватые, у которых среднее расстояние между трещинами и размер отдельностей — до 1,5 м (в среднем 0,7 м). Такие породы имеют блочное строение, видимые трещины в них заполнены мелким материалом.

3. Средней трещиноватости, у которых расстояние между трещинами и средний размер отдельностей составляют около 0,5 м. Они имеют блочное строение, хорошо различимые, иногда заполненные мелким материалом трещины.

4. Сильнотрещиноватые с отдельностями в среднем около 0,3—0,4 м. Часто имеют место напластования и видимые сомкнутые трещины.

5. Чрезвычайно трещиноватые, имеющие средний размер отдельностей в массиве около 0,2 м. Отсутствуют отдельности крупнее 1 м.

Степень трещиноватости пород варьирует в широких пределах даже на одном месторождении. Поэтому одинаковые по наименованию породы одного месторождения на различных участках могут быть отнесены к разным категориям трещиноватости.

Преобладание какой-то определенной ориентированной системы трещин в горной породе в массиве может привести к возникновению анизотропии.

Породный массив, состоящий из нескольких пород, обладает некоторыми усредненными свойствами слагающих пород. Однако дополнительное влияние оказывают такие факторы, как мощность, характер и форма залегания отдельных пород, их чередуемость, слоистость, нарушенность.

По строению массивы пород характеризуются мощностью и углом падения слоев, наличием геологических нарушений, зон трещиноватости, секущих жил, интрузий и т. д.

Так, в первую очередь, все массивы горных пород подразделяют (рис. 11.1) на тектонически не нарушенные (а) и нарушенные, среди которых выделяют массивы с моноклиальным залеганием пород (б), простого складчатого строения без разрывов сплошности (в), сложного складчатого строения с вторичной складчатостью пород (г), сложного складчатого

строения с развитыми разрывами (*д*), сложного складчатого строения с магматическими внедрениями (*е*).

При изучении строения и состава пород в толще массива можно наблюдать сильное влияние выветривания на породы верхних слоев и влияние уплотнения, обезвоживания и цементации на свойства тех же пород нижних слоев.

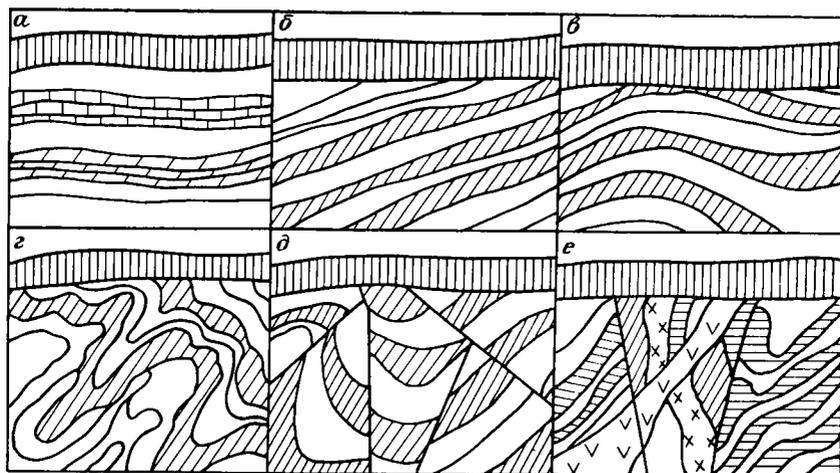


Рис. 11.1. Схемы различного строения массивов горных пород

В слоистой толще массива горных пород одни и те же породы могут вести себя либо как жесткие, либо как пластичные в зависимости от того, между какими породами они залегают. Так, угольный пласт может быть жестким элементом в толще глинистых пород и выступать податливым, пластичным пропластком между плотными песчаниками.

Поэтому массив горных пород должен рассматриваться и изучаться как единое целое с учетом его специфического состава, строения и состояния.

## 11.2. ФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ

В массивах горных пород выделяют начальное состояние, когда массив не нарушен никаким искусственным воздействием, и нарушенное состояние, появляющееся в результате ведения горных работ. Начальное состояние характеризуется естественными физическими полями. В первую очередь, это жидкости и газы, насыщающие массивы горных пород.

Вода на земном шаре составляет около 1 % всей массы Земли. При этом на подземные воды приходится более 20 % всех мировых запасов воды — около  $3,6 \cdot 10^8$  км<sup>3</sup>.

В связи с тем, что при температуре 364 °С вода при любом давлении находится в парообразном состоянии, нижняя граница распространения подземных вод располагается на глубине 10 ÷ 12 км.

До глубины примерно 30 м выделяют так называемую зону аэрации, в которой вода не полностью заполняет поры и пустоты в массивах пород, хорошо насыщена кислородом, поступает из атмосферы (так называемая верховодка).

Ниже зоны аэрации располагаются безнапорные грунтовые воды со свободным зеркалом, и далее между водонепроницаемыми пластами — напорные артезианские.

Все эти воды относятся к зоне насыщения, вода в которой полностью заполняет пустоты и поры в породах и находится под давлением.

По условиям залегания выделяют воды поровые, пластовые, трещинные, карстовые.

Газы, содержащиеся в массивах горных пород, различаются по химическому составу. Наиболее распространенными являются углекислый газ, сероводород, азот, метан, водород, пары воды. Наибольшее количество газов сконцентрировано в породах органического происхождения.

Газы в породах накапливаются, как правило, в результате биохимических процессов. Так, метан и водород — продукты метаморфизма углей. Сероводород появляется при взаимодействии сульфатных вод с метаном. За счет различного давления в разных точках массива наблюдаются перемещение (дренаж) газов в сторону пониженного давления и выделение в атмосферу, где газовое давление становится равным атмосферному. Эти зоны называются зонами газового выветривания. В Донбассе, например, эта зона достигает глубин 100 ÷ 300 м, в Кузбассе — 50 ÷ 150 м.

Горные породы в массивах, кроме того, находятся под воздействием различных естественных нагрузок — давления вышележащих слоев пород, сил тектонического движения земной коры, напора подземных вод, давления газов и др. Вся совокупность этих сил, приводящих к возникновению напряженно-деформированного состояния породы, называется горным давлением.

В плотных нетрещиноватых породах максимальные вертикальные напряжения  $\sigma_z$ , вызванные действием гравитационных сил на глубине  $H$ , могут быть рассчитаны по известному объемному весу пород  $\gamma$ :

$$\sigma_z = \gamma H. \quad (11.1)$$

Горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , вызванные горизон-

тальными составляющими гравитационного поля, рассчитывают, используя уравнения теории упругости:

$$\sigma_x = \sigma_y = \nu \gamma H / (1 - \nu). \quad (11.2)$$

Величину  $\nu/(1-\nu)$  называют коэффициентом бокового распора  $k_6$ . Он находится в пределах  $0,2 \div 0,9$ . Так, для глин Подмосковского бассейна  $k_6$  составляет  $0,7-0,98$ ; для глинистых сланцев Донбасса —  $0,72-0,92$ ; для глинистых песчаников КМА —  $0,45$ . Таким образом, на глубине 500 м напряжения от гравитационных сил в зависимости от плотности пород могут быть в пределах от 7,5 до 18,0 МПа.

Наряду с напряжениями, вызванными действием гравитационных сил, в массивах пород существует поле тектонических напряжений, возникающих вследствие тангенциального сжатия земной коры. Тектонические напряжения в первом приближении можно принять горизонтальными. Часто тектонические напряжения превосходят гравитационные в десятки раз.

Различный характер и форма залегания пород в массивах, их слоистость, перемiatость, трещиноватость, тектонические нарушения, различное чередование пород с разными свойствами вызывают неравномерность распределения напряжений в массиве, появление зон повышенного и пониженного давлений, растягивающих и сдвигающих напряжений. Измерения показывают, что реальные напряжения вблизи тектонических разломов всего на глубине нескольких сотен метров могут достигнуть 100 МПа. Наряду с естественными напряжениями породы в массиве могут испытывать и напряжения, которые появляются в результате технологического воздействия на породы (бурение, взрывание, дробление и т. д.).

Естественные тепловые поля в массивах горных пород обусловлены, в первую очередь, внутренними источниками тепла, среди которых выделяют распад радиоактивных элементов, приливное трение, гравитационную дифференциацию, химические реакции и др. Приток тепла к земной поверхности происходит с глубин 700 км, плотность теплового потока изменяется примерно от  $2 \cdot 10^{-2}$  до  $13 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Термические условия массива горных пород характеризуются геотермическим градиентом  $\Gamma$ , показывающим, на сколько градусов возрастает температура в массиве при углублении на 1 м. Так, если в Подмосковье  $\Gamma$  составляет  $1,5 \cdot 10^{-2}$  К/м, то в районе Донбасса он доходит до  $3 \cdot 10^{-2}$  К/м. В зависимости от строения массива горных пород тепловое поле может существенно исказиться. На распределение температур влияют неоднородность, слоистость, складчатость толщи горных пород, движение жидкости и газов в породах. При  $\Gamma = 3,3 \cdot 10^{-2}$  К/м температура на глубине 1 км составляет 48 °С, а на глубине 3 км 115 °С. На некоторых глубоких рудниках естественная температура горных пород приближается к 80—

90 °С. При этом ощутимо меняется ряд свойств горных пород (реологические, электрические и др.). С возрастанием температуры снижается вязкость растворов, циркулирующих в массиве, усиливается их фильтрация, возрастают скорость диффузии молекул и ионов, растворимость пород.

Верхний слой горных пород подвержен сезонным колебаниям температур. В районе Москвы слой постоянной годовой температуры находится на глубине 25—37 м.

При разработке сульфидных руд и каменных углей возможны локальные источники повышенного нагрева горных пород, вызванные их окислением. Так, при окислении 1 кг углерода до углекислого газа выделяется до 33,5 МДж тепла. Это тепло способно нагреть на 50 °С 1 т породы.

Кроме того, возможно повышение температуры пород при выполнении различных технологических операций, даже не связанных с тепловым воздействием на породы. Например, при механическом бурении забой скважины интенсивно разогревается. В месте контакта с инструментом породы могут нагреваться до температуры 800 °С.

Магнитное поле Земли характеризуется вектором полной напряженности  $T$ . В естественных условиях вектор  $T$  направлен приблизительно на север и в глубь Земли.

Распределение элементов геомагнитного поля на поверхности Земли показывает, что Земля приближенно может рассматриваться как однородно намагниченный шар с магнитным моментом, равным  $6,77 \cdot 10^{21}$  А · м<sup>2</sup>.

Напряженность магнитного поля Земли колеблется в пределах от 24 до 48 А/м.

Существуют локальные магнитные поля, которые могут значительно превосходить магнитное поле Земли. Так, в районе Курской магнитной аномалии, где находятся мощные залежи железистых кварцитов, аномалия вертикальной составляющей магнитного поля достигает 143,24 А/м, а угол склонения отличается от нормального более чем на 120°.

Геомагнитное поле непостоянно во времени.

Изменения геомагнитного поля создают в массивах пород электрические поля.

Плотность нормального электрического поля Земли составляет  $1,1 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>2</sup>, общий потенциал всей поверхности Земли —  $5,4 \cdot 10^8$  В. На фоне нормального электрического поля выделяются поля более высоких напряженностей — теллурические и локальные.

Причиной теллурических полей являются изменения электрического состояния ионосферы под воздействием солнечной радиации. Электромагнитные поля в атмосфере индуцируют переменные поля в земной коре. Поэтому теллурические поля переменные, они могут быть одновременно охарактеризованы векторами напряженности как электрического, так и магнитного поля.

В аномальных случаях напряженность теллурических полей достигает  $(5-6) \cdot 10^{-3}$  В/м. Эти токи не влияют существенно на физические свойства пород. Однако они служат важным источником информации о составе и строении массивов горных пород.

Локальные поля, как правило, постоянны и образуются на контактах различных пород с разным типом электрической проводимости.

Причины их возникновения — окислительно-восстановительные, диффузионно-адсорбционные, фильтрационные, термоэлектрические и биологические явления в породах, а также взаимное трение отдельных массивов в процессе горообразования, сдвижений и т. д. Напряженности этих полей могут быть различны.

Локальные поля, приуроченные к месторождениям полезных ископаемых, имеют небольшую напряженность и могут служить лишь источником информации о массивах пород.

Наибольшей интенсивностью обладают естественные поля электрохимической природы, наблюдаемые в сульфидных, угольных и графитовых месторождениях и возникающие в результате окислительно-восстановительных реакций при активном участии подземных вод.

Окислительные реакции сопровождаются высвобождением электронов в атомах окисляющих элементов. Залежь заряжается положительно. Если же протекают восстановительные реакции, связанные с присоединением электронов, залежь заряжается отрицательно. Наличие в двух частях залежи обеих процессов приводит к тому, что в окружающей среде возникает разность электрических потенциалов.

На контактах различных пород с различной минерализацией подземных вод возникают диффузионно-адсорбционные явления. Из раствора с большей минерализацией в раствор с меньшей минерализацией происходит диффузия ионов. Так, в растворе KCl отрицательный ион  $Cl^-$  перемещается быстрее, чем положительный  $K^+$ . Поэтому в растворе с большой концентрацией  $C_1$  появится избыток положительных зарядов, а в растворе с малой концентрацией  $C_2$  — избыток отрицательных зарядов. Возникает диффузионный потенциал

$$E_d = K_c \lg_2(C_1/C_2), \quad (11.3)$$

где  $K_c$  — коэффициент свободного диффузионного потенциала, например, для KCl  $K_c = 12$  мВ.

Чаще всего диффузионно-адсорбционные потенциалы возникают на контакте глин и песков.

Фильтрационные потенциалы появляются в результате фильтрации жидкости по трещинам и порам породы, стенки которых способны адсорбировать ионы одного знака — чаще всего отрицательные. Положительные же заряды выносятся по направлению движения, в результате чего возникает

разность потенциалов между началом и концом фильтрационного потока. Напряженность электрического поля, вызванного фильтрацией,  $E_{\phi}$  зависит от минерального состава, пористости пород, гидрогеологических факторов (например, напора) и может быть подсчитана по формуле

$$E_{\phi} = 2\varepsilon_r \rho_s \Delta U v_{\text{ср}} / (\pi r_0^2), \quad (11.4)$$

где  $\Delta U$  — разность потенциалов между стенкой канала и раствором;  $v_{\text{ср}}$  — средняя скорость движения раствора;  $r_0$  — радиус канала (поры).

Аномалии напряженности электрического поля, возникающие в результате локальных токов, достигают нескольких сотен милливольт.

### 11.3. УПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ В МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД

В массивах горных пород распространение упругих волн в целом подчиняется тем же закономерностям, которые были рассмотрены применительно к образцам (см. разд. 3.9). Однако, так как в массивах упругие колебания высокой частоты сильно поглощаются, больший интерес представляют низкочастотные колебания. Такие волны возбуждают чаще всего механическими одиночными импульсами.

Волны низкой частоты, распространяющиеся в земной коре, вызванные ударом, взрывом, землетрясением и т. д., быстро затухающие, носят название сейсмических.

Выделяют пластовую  $v_{\text{пл}}$ , среднюю  $v_{\text{ср}}$  и граничную  $v_{\text{г}}$  скорости распространения упругих волн.

Пластовая скорость — это истинная скорость распространения упругих волн в каждом пласте изучаемого геологического разреза. Средняя скорость равна скорости распространения упругих колебаний перпендикулярно ко всем имеющимся пластам в данном массиве.

Эта скорость определяется по формуле гармонического средневзвешенного (2.2). Граничная скорость представляет собой скорость распространения упругой волны на границе раздела двух пластов.

На границе раздела различных пластов или геологических тел в массиве горных пород происходят отражение и преломление упругих волн. Количественно этот процесс оценивается соответствующими коэффициентами отражения и преломления.

Коэффициентом отражения  $k_{\text{э}}$  называют отношение энергии отраженной волны  $A_{\text{о}}$  к энергии падающей волны  $A_{\text{п}}$

$$k_{\text{э}} = A_{\text{о}} / A_{\text{п}}. \quad (11.5)$$

Коэффициент отражения  $k_{\text{э}}$  в случае нормального падения волны можно выразить также через удельные волновые сопротивления:

$$k_{\text{э}} = [(z_1 - z_2) / (z_1 + z_2)]^2. \quad (11.6)$$

Чем больше разница в волновых сопротивлениях сред, тем больше энергии отражается.

Так, при переходе упругих колебаний из воздуха в воду отражается 99,8 %, а при переходе из воды в породу — около 85 % их энергии.

Углы падения  $\delta_{\Pi}$  и преломления  $\psi$  упругой волны, проникающей в горную породу, подчиняются известному закону Снел-

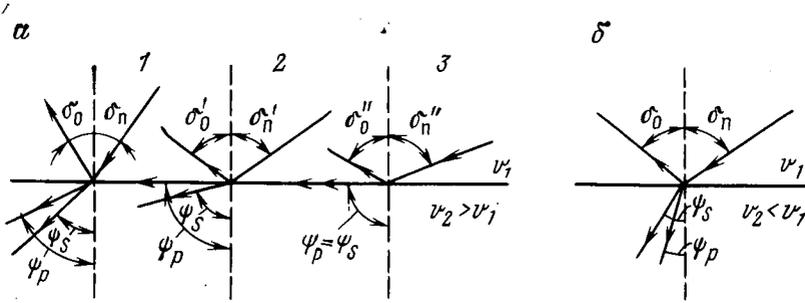


Рис. 11.2. Преломление и отражение упругой волны на границе раздела двух сред:  
 а — при условии  $v_2 > v_1$ ; 1 — общий случай; 2 — момент внутреннего отражения продольной волны; 3 — то же, поперечной волны; б — при условии  $v_2 < v_1$

лиуса (рис. 11.2), согласно которому соотношение  $\sin \delta_{\Pi} / \sin \psi$  является величиной постоянной для конкретных веществ. Это соотношение равно отношению скоростей распространения упругих волн в первой  $v_1$  и второй  $v_2$  средах и называется коэффициентом преломления  $n$  упругой волны относительно первой среды:

$$n = \sin \delta_{\Pi} / \sin \psi = v_1 / v_2. \quad (11.7)$$

Коэффициент преломления  $n$  больше единицы, если  $v_1 > v_2$ , и меньше единицы, если  $v_2 > v_1$ .

В последнем случае ( $v_2 > v_1$ ), постепенно увеличивая угол  $\delta_{\Pi}$ , можно добиться момента полного внутреннего отражения (угол преломления  $\psi = 90^\circ$ ) сначала продольной  $\psi_P = 90^\circ$  (первый критический угол падения  $\delta'_{\Pi}$ ), а затем и поперечной  $\psi_S = 90^\circ$  волны (второй критический угол падения  $\delta''_{\Pi} > \delta'_{\Pi}$ ).

#### 11.4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В МАССИВАХ ПОРОД

Как известно, электромагнитное поле — это особый вид материи, характеризующийся наличием электрического и магнитного полей, связанных непрерывным взаимным превращением.

Взаимная связь электрических и магнитных полей описывается уравнениями Максвелла.

В общем случае все параметры электромагнитного поля, входящие в эти уравнения, связаны с электрическими и магнитными свойствами вещества:

$$\bar{B} = \mu_a \bar{H}, \quad \bar{D} = \epsilon_a \bar{E}_s, \quad j = \sigma_s \bar{E}_s, \quad (11.8)$$

где  $\bar{B}$  и  $\bar{D}$  — соответственно магнитная и электрическая индукция;  $j$  — плотность электрического тока.

Электромагнитное поле, возникшее в некотором месте пространства, распространяется во все стороны со скоростью, зависящей от свойств среды.

Так как большинство горных пород является диэлектриками, токи проводимости  $\sigma_s$  у них малы. Поэтому волновые уравнения электрической и магнитной составляющих поля можно записать в следующем виде:

$$\nabla^2 \bar{E}_s = -\omega^2 \epsilon_a \mu_a \bar{E}_s; \quad \nabla^2 \bar{H} = -\omega^2 \epsilon_a \mu_a \bar{H}. \quad (11.9)$$

Согласно уравнениям (11.9) скорость распространения электромагнитных волн в веществе

$$v = \sqrt{1/(\epsilon_a \mu_a)}; \quad (11.10)$$

в вакууме

$$v = c_s = \sqrt{1/(\epsilon_0 \mu_0)} = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}. \quad (11.11)$$

Из формул (11.10)—(11.11) видно, что скорость электромагнитных волн в веществе меньше, чем в вакууме:

$$v = c_s / \sqrt{\epsilon_r \mu}. \quad (11.12)$$

Скорость электромагнитных волн в плохо проводящих ток породах практически не зависит от частоты поля (при отсутствии изменения  $\epsilon_r$  с изменением частоты), а в хорошо проводящих наблюдается возрастание  $v$  прямо пропорционально  $\sqrt{f}$

$$v = \sqrt{4\pi f / (\sigma_s \mu_a)}. \quad (11.13)$$

В реальных породах имеют место потери электромагнитной энергии. Уменьшение интенсивности электромагнитных волн с увеличением расстояния от точки излучения происходит по экспоненциальному закону

$$I_s = I_{s0} \exp(-\theta x), \quad (11.14)$$

где  $\theta$  — коэффициент поглощения электромагнитной энергии, зависящий от свойств породы и частоты электромагнитного поля.

В диэлектриках

$$\theta = \sqrt{0,5 \epsilon_a \mu_a \omega^2 \left[ \sqrt{1 + (\delta_s / \epsilon_a \omega)^2} - 1 \right]}, \quad (11.15)$$

Из выражения (11.15) следует, что зависимость коэффициента поглощения от частоты поля можно принять приблизительно прямолинейной.

Однако в горных породах эта зависимость сохраняется далеко не всегда. В ряде случаев возрастание  $\theta$  с частотой наблюдается лишь до определенного значения  $f$ .

Коэффициент поглощения хорошо проводящих пород, определенный по формуле

$$\theta' = \sqrt{0,5\omega\sigma_3\mu_a}, \quad (11.16)$$

значительно больше, чем диэлектриков.

С увеличением диэлектрической и магнитной проницаемостей и проводимости пород усиливается поглощение электромагнитной волны и уменьшается скорость ее прохождения. Так, в сухом песке, обладающем очень большим сопротивлением, амплитуда электромагнитных волн с частотой 50 кГц на глубине 10 м уменьшается на 4,5%, на глубине 100 м — на 36,6%. В хорошо проводящих глинах уменьшение амплитуды волн составляет соответственно 37,3 и 99,1%. Еще быстрее волны затухают в рудных телах.

Практическое значение имеет показатель глубины проникновения электромагнитных волн  $h_{эм}$  — расстояние в породе, на котором амплитуда волны уменьшается в  $e$  раз. В случае диэлектрика

$$h_{эм} = 9,55 \cdot 10^7 / (f \sqrt{\mu\epsilon, \operatorname{tg} \delta}). \quad (11.17)$$

Влияние внешних полей на распространение электромагнитных волн связано с изменением при этом электрических и магнитных свойств пород. Так как в большинстве случаев породы имеют  $\mu$ , близкое к единице, решающее влияние при этом оказывают параметры  $\rho_0$  и  $\epsilon_r$  пород. Поэтому при увлажнении пород всегда уменьшаются скорость и глубина распространения волн. Повышение температуры вызывает рост удельной электрической проводимости и диэлектрической проницаемости (см. разд. 9.3) и, следовательно, уменьшение глубины проникновения электромагнитных волн в породе.

На границе двух сред электромагнитная волна частично отражается, а частично проходит в другую среду и испытывает преломление.

Соотношение между интенсивностью падающих, отраженных и преломленных волн определяется волновыми (характеристическими) сопротивлениями сред.

Волновое сопротивление неограниченной среды в простейшем случае

$$z_3 = z_{30} \sqrt{\epsilon_r^{-1} \mu}, \quad (11.18)$$

где  $z_{30}$  — волновое сопротивление вакуума;  $z_{30} = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi$ .

Коэффициенты отражения  $K_H$  и преломления  $n$  волн по величине напряженности поля в случае перпендикулярного падения волны на границу раздела сред 1 и 2 могут быть вычислены по следующим формулам:

$$K_H = E_{отр}^3 / E_{пад}^3 = (z'_{э2} - z'_{э1}) / (z'_{э2} + z'_{э1}); \quad (11.19)$$

$$n = E_{пр}^3 / E_{отр}^3 = 2z'_{э2} / (z'_{э2} + z'_{э1}) = 1 + K_H, \quad (11.20)$$

где  $E_{отр}^3$ ,  $E_{пад}^3$  и  $E_{пр}^3$  — напряженности электромагнитных соответственно отраженных, падающих и преломленных волн;  $z'_{э} = \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a}$  — так называемое волновое число пород.

Согласно законам геометрической оптики геометрический коэффициент преломления  $n_r$  может быть вычислен как отношение скоростей распространения волн  $v_1$  и  $v_2$  в двух средах, т. е.

$$n_r = v_1 / v_2 = \sqrt{\epsilon_{r2} \mu_2 / (\epsilon_{r1} \mu_1)}. \quad (11.21)$$

Связь между  $K_H$  и  $n_r$  в случае слабого поглощения электромагнитной волны преломляющей средой описывается формулой

$$K_H = (n_r - 1) / (n_r + 1). \quad (11.22)$$

Показатели, характеризующие поведение горной породы под воздействием электромагнитных волн оптического диапазона ( $10^{13} - 10^{15}$  Гц) — инфракрасных, световых и ультрафиолетовых лучей, относятся к группе оптических. Это коэффициенты отражения, преломления и поглощения света. Все оптические параметры подчиняются закономерностям распространения электромагнитных волн. Так как для воздуха  $\epsilon_v \approx 1$ ,  $\mu_v \approx 1$ , используя уравнение (11.21), можно записать, что коэффициент преломления света  $n_r$  относительно воздуха равен

$$n_r = \sqrt{\epsilon_r \mu}. \quad (11.23)$$

Для породы, если  $\mu \approx 1$ , существует связь  $n_r^2 = \epsilon_r$ .

Обычно свет характеризуется интенсивностью — величиной, пропорциональной квадрату амплитуды вектора электрической составляющей волны. Отношение интенсивностей отраженного и падающего света называется коэффициентом отражения  $K_H$  породы по интенсивности.

Коэффициент отражения по напряженности  $K_H$  связан с коэффициентом отражения по интенсивности  $K_H$  соотношением

$$K_H = K_H^2, \quad (11.24)$$

так как

$$I_{отр} / I_{пад} = E_{отр}^2 / E_{пад}^2, \quad (11.25)$$

где  $I_{пад}$ ,  $I_{отр}$  — соответственно интенсивность падающего и отраженного луча света.

Падая на поверхность твердого тела, световые волны воздействуют на электроны и часть ионов. Они возбуждаются и создают вторичные электромагнитные колебания, которые распространяются как в самом веществе, так и вне его. Последние и представляют собой отражение.

Зависимости между основными оптическими параметрами для изотропных рудных минералов (сильное поглощение волны) выражается формулой

$$K_n = [(n_r - 1)^2 + (n_r \theta)^2] / [(n_r + 1)^2 + (n_r \theta)^2], \quad (11.26)$$

где  $\theta$  — коэффициент поглощения.

Световое воздействие выражается в фотоэлектрическом эффекте — выбивании электронов из проводников и полупроводников и повышении их электрической проводимости; в нагреве горных пород и минералов; в возникновении люминесценции.

### 11.5. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ, СОСТАВА И СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Учитывая большое влияние характеристик состояния, строения и состава породного массива на все процессы ведения горных работ, начиная с проектирования вскрытия и выбора системы разработки, весьма существенно получение предварительной информации по этим характеристикам массива.

Трещиноватость горных пород может быть оценена различными коэффициентами трещиноватости.

Так, среднее число параллельных трещин, приходящееся на единицу расстояния, называется линейным модулем трещиноватости. Он удобен тем, что может характеризовать степень выраженности в массиве каждой системы трещин в отдельности.

Общую трещиноватость удобнее описывать объемным модулем трещиноватости, равным отношению  $1 \text{ м}^3$  массива к среднему объему структурного блока, отделенного трещинами.

Измерение параметров систем трещин ведут непосредственно на обнажениях массива. По всем трещинам измеряют элементы залегания, расстояния между ними, величину раскрытия, характер трещин, протяженность, искривленность и т. д.

По результатам измерений строят различные диаграммы, наглядно отображающие пространственную ориентировку трещин, например, розы трещин, на которых отмечают азимут их простирания или азимут падения.

Строят также диаграммы трещиноватости массива пород в изолиниях и карты трещиноватости по всему изучаемому массиву пород.

Кроме визуальных измерений параметров трещиноватости массива производят также оценку его нарушенности различ-

ными физическими методами, в частности по скорости распространения упругих колебаний. Если в монолитном образце породы принять скорость распространения упругих колебаний за эталонную, то появление любых нарушений в виде трещин должно ее уменьшать.

Поэтому, измерив скорость распространения упругих волн в горной породе в массиве  $v_m$  и в образце  $v_{обр}$ , можно рассчитать акустический показатель трещиноватости:

$$A_i = (v_m/v_{обр})^2. \quad (11.27)$$

Для практически монолитных пород  $A_i = 1 \div 0,9$ ; для весьма трещиноватых мелкоблочных — около 0,1.

Определение параметров строения и состава массивов горных пород — гидрогеологических условий, элементов залегания, тектонического строения, размеров, формы, чередуемости породных тел — осуществляют в настоящее время геофизическими методами — непосредственно с поверхности (так называемыми методами полевой геофизики) и скважинными методами.

### 11.5.1. Методы полевой геофизики

Поверхностные (полевые) методы исследования массивов основаны на различии плотностных, электрических и других свойств горных пород разного минерального состава и строения. В этих методах используют либо аномалии естественных физических полей, вызванные различными свойствами пород, либо закономерности распространения искусственно возбуждаемых в массиве физических полей.

В зависимости от используемых свойств пород и физических полей все эти методы исследования подразделяют на гравитационные, магнитные, радиометрические, сейсмические, электрические, термические и радиоволновые.

**Гравитационные методы.** Как известно, сила взаимного притяжения двух масс  $M$  и  $m$  подчиняется закону Ньютона

$$F = kMm/r^2, \quad (11.28)$$

где  $k$  — гравитационная постоянная;  $k = 66,7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ ;  $r$  — расстояние между центрами притягивающихся тел.

Отсюда ускорение свободного падения.

$$g = kM/r^2, \quad (11.29)$$

где  $M$  — масса Земли.

Очевидно, что изменение плотности в какой-то точке земной коры должно приводить к изменению силы тяжести и соответственно величины  $g$  в данной точке.

Действительно, над более плотными рудными телами возникают так называемые гравитационные аномалии  $\Delta g$  (рис. 11.3).

В результате интерпретации измеренной аномалии находят глубину залегания аномального породного тела, устанавливают его форму и размеры.

Гравитационным методом можно оценить рельеф и состав кристаллического фундамента, наличие тектонических нарушений, зон пониженной плотности, уступов и сдвигов в пластах, геосинклиналией.

В процессе эксплуатации месторождения этим методом можно отыскивать слепые рудные тела, засекают карстовые полости, включения плотных пород, раздробленные и рыхлые зоны и т. д.

#### Магнитные методы.

Как и в случае гравитационного поля, напряженность магнитного поля в каждой точке поверхности Земли зависит от намагниченности  $I$  (или магнитного момента  $M$ ) находящихся под этой точкой геологических объектов.

Так, для вертикально намагниченного шара составляющие напряженности магнитного поля  $\Delta H$  и  $\Delta Z$  описываются уравнениями:

горизонтальная

$$\Delta H = 3Mhx / (x^2 + h^2)^{5/2}, \quad (11.30)$$

вертикальная

$$\Delta Z = M(2h^2 - x^2) / (x^2 + h^2)^2, \quad (11.31)$$

где  $h$  — глубина залегания рудного тела.

Величина магнитной аномалии обусловлена магнитной восприимчивостью пород. Если магниторазведкой установлен вид аномалии, то, зная величину  $x$  пород, можно рассчитать объем рудного тела и глубину его залегания.

Пользуясь магнитными методами, изучают не только месторождения ферромагнитных руд, но и нерудные полезные ископаемые.

По результатам магнитной съемки можно судить о геолого-петрографических особенностях массива, трещиноватости пород, наличии карстовых полостей, контактах различных пород, разломах и т. д. (рис. 11.4).

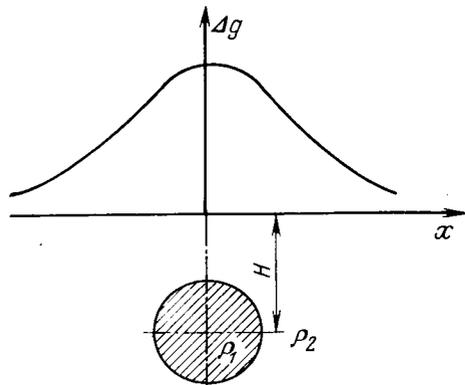


Рис. 11.3. Гравитационная аномалия  $\Delta g$  над шарообразным рудным телом повышенной плотности:

$h$  — глубина залегания рудного тела;  $\rho_1 > \rho_2$  — плотности соответственно рудного тела и вмещающих пород

**Радиометрические методы.** При этом виде исследования массивов используют естественные радиоактивные поля. Метод позволяет изучать и обнаруживать не только радиоактивные руды, но и многие другие геологические тела, гранитные массивы, области нефтегазоносности и т. д. Радиометрической съемкой устанавливают также строение массивов — выявляют

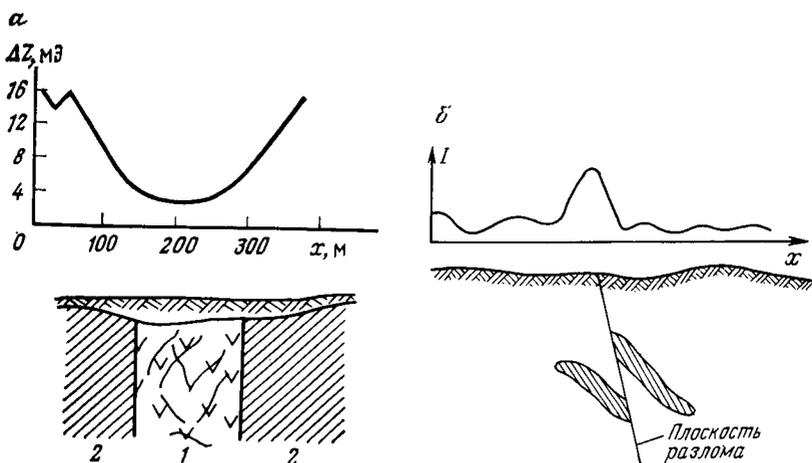


Рис. 11.4. Обнаружение нарушенных зон в массивах:

*а* — аномалия магнитного поля над зоной разрушенных серпентинитов: 1 — разрушенные серпентиниты; 2 — плотные серпентиниты (по Ф. Н. Рябченко); *б* — аномалия интенсивности *I* естественного гамма-излучения над зоной разлома

плоскости разлома (см. рис. 11.4) и трещиноватости, интрузии и дайки.

**Сейсмические методы.** Эти методы основаны на использовании закономерностей распространения упругих колебаний в массивах пород (рис. 11.5). На практике применяют два метода сейсморазведки — метод отраженных волн (МОВ) и корреляционный метод преломленных волн (КМПВ).

Упругие колебания в породах можно возбуждать взрывом, ударом, механическими вибраторами, пьезоэлектрическими или магнитострикционными датчиками. Вдоль изучаемого направления (сейсмопрофиля) располагают серию (до 60) сейсмоприемников, которые регистрируют моменты прихода упругих колебаний к соответствующей точке профиля.

График зависимости времени прихода упругих волн *t* к изучаемым пунктам профиля от их расстояния *x* до пункта возбуждения колебаний называется годографом упругих волн.

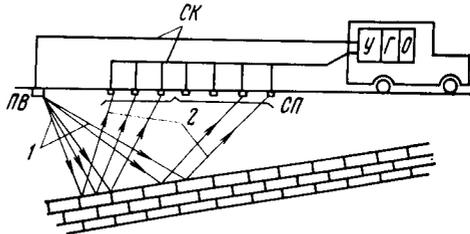
Волна, проходящая к изучаемой точке непосредственно от пункта возбуждения, называется прямой. Годограф такой волны — прямая линия, выходящая из начала координат. Ско-

рость распространения упругих волн в массиве по годографу прямых волн (рис. 11.6) определяют по формуле

$$v = \Delta x / \Delta t. \quad (11.32)$$

Годограф отраженных волн представляет собой гиперболу, причем при  $x=0$   $t=t_0>0$ , так как упругая волна

Рис. 11.5. Принципиальная схема сейсмического метода исследования массива пород: ПВ — пункт возбуждения упругих колебаний; СП — сейсмоприемники; СК — сейсмическая коса; У — усилитель; Г — гальванометр; О — осциллограф; 1 — прямые лучи упругих колебаний; 2 — отраженные лучи



должна дойти до границы двух сред, отразиться от нее и вернуться к сейсмоприемнику (см. рис. 11.8).

$$t = \sqrt{x^2 + 4H^2} \pm 4Hx \sin \varphi / v_1, \quad (11.33)$$

где  $t$  — время прихода отраженной упругой волны в точку, находящуюся на расстоянии  $x$  от пункта излучения колебаний;  $v_1$  — скорость распространения упругих волн в массиве пород выше границы отражения;  $H$  — глубина расположения границы отраженных волн;  $\varphi$  — угол наклона границы, отражающей упругие волны.

По уравнению годографа (11.33) и графическому его изображению вычисляют глубину залегания отражающего слоя, угол его падения и скорость упругих колебаний  $v_1$ .

МОВ применим во всех случаях, когда удельные волновые сопротивления двух сред различны ( $z_1 \neq z_2$ ).

На явлении полного внутреннего отражения упругой волны основан КМПВ. В этом случае на поверхность массива выходит так называемая головная преломленная волна.

Уравнение годографа преломленных волн имеет следующий вид (см. рис. 11.6):

$$t = [x \sin (i \pm \varphi) + 2H \cos i] / v_1, \quad (11.34)$$

где  $i$  — критический угол полного внутреннего отражения ( $\sin i = v_1/v_2$ );  $v_1$  и  $v_2$  — скорости распространения упругих колебаний соответственно в верхнем и нижнем пластах;  $\varphi$  — угол наклона нижнего пласта, вызвавшего преломление упругой волны.

По годографу преломленных волн вычисляют скорость распространения упругих волн в нижнем пласте  $v_2$ , глубину его залегания  $H$  и угол наклона  $\varphi$ .

КМПВ применим только при условии, если  $v_2 > v_1$ .

Сейсмические методы находят широкое применение при разведке месторождений полезных ископаемых, в инженерно-геологических изысканиях, при оценке состояния массивов горных пород, зон нарушенностей, обнаружении разломов, карстовых полостей, зон многолетней мерзлоты и талых зон, при

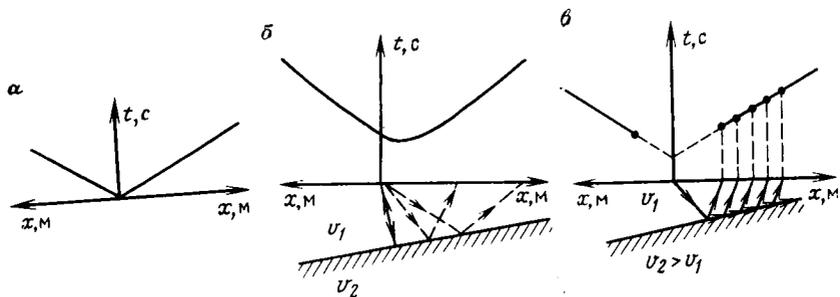


Рис. 11.6. Годографы прямых (а), отраженных (б) и преломленных (в) упругих волн

определении мощности зон выветривания пород и уровня грунтовых вод и т. д. Сейсмические наблюдения позволяют оценить физические свойства массивов горных пород — параметры упругости и прочности, а следовательно, прогнозировать возможную технику и технологию разработки месторождения.

**Электрические методы.** Наиболее распространены следующие электрические методы исследования массивов пород:

Метод естественного электрического поля — собственных потенциалов (ПС) заключается в последовательном замере потенциалов точек, расположенных по профилю относительно одной центральной точки (рис. 11.7).

Выявленные аномалии потенциала обычно указывают на наличие какого-либо источника естественных локальных токов (см. разд. 11.2).

Метод вызванной поляризации (ВП) основан на измерении потенциалов, возникающих при поляризации горных пород после пропускания через них постоянного электрического тока.

По результатам измерений вычисляют поляризуемость пород  $\eta$ , позволяющую судить о характере и состоянии породных массивов.

Метод кажущихся электрических сопротивлений основан на определении кажущегося усредненного электрического сопротивления массивов пород.

Электрометрия методом электрических сопротивлений чаще всего выполняется с помощью четырехэлектродной установки (рис. 11.8). Зная силу тока в питающей цепи  $I$  и разность по-

тенциалов  $\Delta U$  в измерительной, можно вычислить величину  $\rho_k$  измеряемого участка:

$$\rho_k = k_y \Delta U / I, \quad (11.35)$$

где  $k_y$  — коэффициент установки, зависящий от разноса питаю-

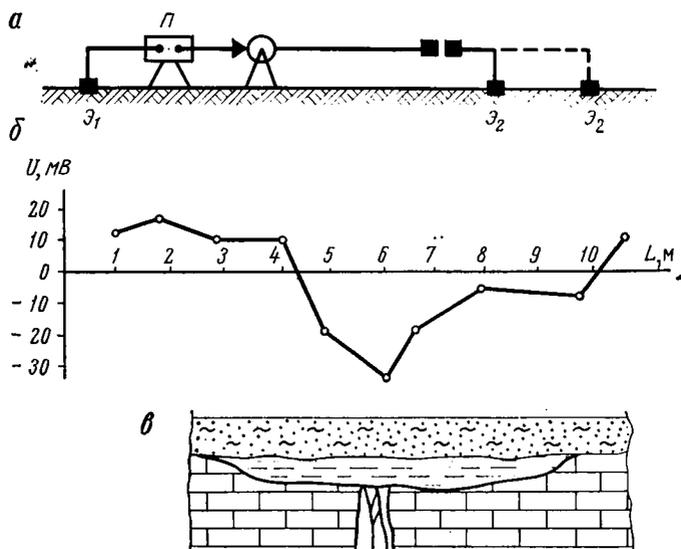


Рис. 11.7. К методу собственных потенциалов (ПС):

*a* — схема установки; *б* — график естественного потенциала по профилю; *в* — место поглощения вод, соответствующее аномалии электрического поля; П — электроразведочный потенциометр;  $Z_1$  — неподвижный электрод;  $Z_2$  — подвижный электрод

щих электродов  $AB$  и измерительных электродов  $MN$ ; для симметричной установки вычисляется по формуле

$$k_y = \pi (AB^2 - MN^2) / (4MN). \quad (11.36)$$

Из теории электрического поля известно, что в однородной среде более 70 % всего тока, подводимого к электродам, проходит на глубине от  $1/3$  до  $1/10$  расстояния между питающими электродами  $AB$ . Поэтому, увеличивая постепенно расстояние между ними, одновременно увеличивают глубину проникновения тока в массив. Такой вариант метода электрических сопротивлений носит название метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

Построив в логарифмическом масштабе кривую ВЭЗ — график  $\rho_k = f(AB/2)$  (см. рис. 11.8), осуществляют его интерпретацию, в результате которой устанавливают истинные удельные электрические сопротивления слоев пород  $\rho_{\Sigma 1}$ ,  $\rho_{\Sigma 2}$ ,  $\rho_{\Sigma 3}$  и их мощности  $h_1$ ,  $h_2$ . Интерпретация производится при помощи специальных палеток. В случае двухслойной кривой

ВЭЗ, на которой правая ветвь наклонена к оси абсцисс под углом  $45^\circ$  (см. рис. 11.8), глубина залегания пласта находится как абсцисса точки пересечения асимптот, проведенных к правой и левой ветвям кривой, а электрическое сопротивление  $\rho_{31}$  — как ордината этой же точки.

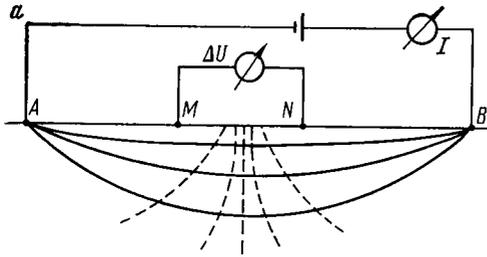
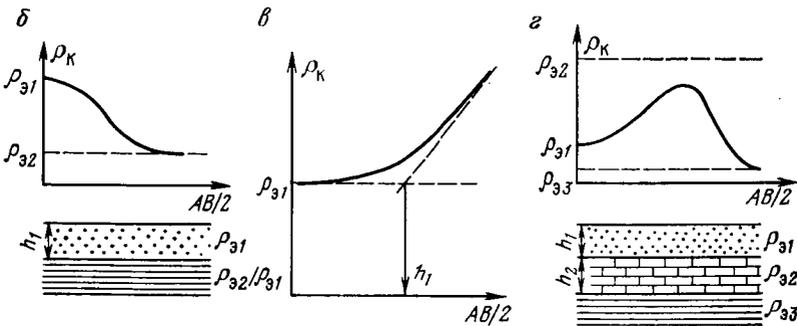


Рис. 11.8. К методу кажущихся сопротивлений:

*a* — четырехэлектродная электрозвездочная установка; *b* — кривая ВЭЗ для двухслойного массива при  $\rho_{31} > \rho_{32}$ ; *в* — то же, для двухслойного массива при  $\rho_{32} \rightarrow \infty$ ; *г* — то же, для трехслойного массива при  $\rho_{32} > \rho_{31} > \rho_{33}$



Так как правая ветвь на кривой ВЭЗ в данном случае не выполаживается, это значит, что удельное электрическое сопротивление второго слоя  $\rho_{32}$  близко к бесконечности.

Измеряя  $\rho_k$  пород четырехэлектродной установкой с одним и тем же разном питающих электродов  $AB$  вдоль какого-либо профиля, получают кривую изменения  $\rho_k$  по профилю примерно на одной и той же глубине, зависящей от расстояния  $AB$ . Такой метод называют методом электропрофилеирования (ЭП). Он используется при изучении крутых пластов, штоков и даек. При помощи этого метода исследуют погребенные структуры, выявляют разрывные нарушения (сбросы, сдвиги, разломы, зоны дробления), картируют мерзлые породы, трещиноватые и карстовые зоны (рис. 11.9), осуществляют поиски обводненных зон и т. д.

Пьезоэлектрический метод применяют при поисках и исследовании кварцевых жил и пегматитовых рудных тел. Сущность его заключается в том, что упругие волны, возбужденные в массиве взрывом, встретив на своем пути, например, кварцевую жилу, преобразуются последней в электромагнитные. Электрическая составляющая электромагнитной волны

принимается заземленными электродами. По электросейсмограммам судят о наличии и глубине залегания кварцевой жилы (или других горных пород — пьезоэлектриков).

Магнитотеллургические методы изучения массивов пород используют естественные переменные электромагнитные поля в земной коре. Измерив электрические  $E_{zx}$  и магнитные  $H_y$  компоненты теллургического поля и определив его период колебаний  $2T$ , можно рассчитать кажущееся электрическое сопротивление пород:

$$\rho_k = 2T \mu_a E_{zx}^2 / H_y^2. \quad (11.37)$$

Среди радиоволновых методов исследования массивов выделяют методы индуктивные, радиоволновых просвечиваний, интерференционные и др.

В индуктивных методах электромагнитное поле в массиве создается индуктивным способом при помощи незаземленных рамок и петель, по которым пропускают ток разной частоты. Наличие хорошо проводящих тел в массивах приводит к индуцированию в них вторичных полей.

Таковыми методами кроме хорошо проводящих рудных тел обнаруживают угли, графит, выявляют тектонические нарушения и обводненные зоны.

Метод радиоволнового просвечивания заключается в просвечивании радиоволнами массива породы между двумя или несколькими выработками.

Рудные тела, хорошо проводящие ток, являются практически непроницаемыми для электромагнитных волн.

Так, методом просвечивания на многих месторождениях обнаруживают дополнительные рудные тела, а на соляных месторождениях определяют положения полостей, заполненных соляным, хорошо проводящим раствором. Этим методом возможно обнаружение талых областей в зонах многолетней мерзлоты, пльвунов в песках и т. п.

Интерференционный метод основан на приеме радиоволн, излученных с земной поверхности и отраженных от границы раздела между двумя горными породами, обладающими разными показателями величин  $\rho_z$  и  $\epsilon_r$ . В приемнике интерферируют два вида волн — отраженные и прямые. Резуль-

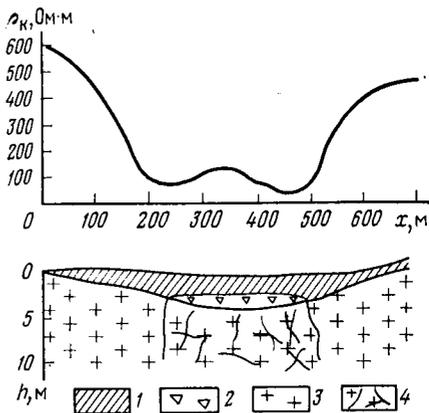


Рис. 11.9. Результаты электропрофиллирования над трещиноватой зоной в граните:

1 — песчано-глинистые отложения; 2 — дресва; 3 — граниты плотные; 4 — граниты трещиноватые водонасыщенные

тат интерференции зависит от глубины отражающей поверхности.

Как известно, с увеличением частоты усиливается поглощение электромагнитных волн. Поэтому волны высокой частоты не могут применяться при исследовании больших глубин в породах. В то же время применение электромагнитных волн большой длины снижает точность исследований из-за дифракционных явлений, возникающих в случае, когда геометрические размеры изучаемого тела становятся соизмеримыми с длиной волны.

### 11.5.2. Скважинные методы исследования

Геофизические методы исследования скважин (каротаж) основаны на изучении пород непосредственно в скважинах, буренных без отбора кернов.

В скважину опускают скважинный снаряд (зонд-датчик), включающий в себя источник какого-либо поля (в случае применения метода искусственного поля) и приемные устройства. Снаряд соединен посредством кабеля с каротажной станцией, расположенной на поверхности и фиксирующей измеряемые величины по глубине скважины (рис. 11.10).

По данным скважинных исследований строят геологические разрезы, оценивают структуру месторождений, расчленяют породы по литологическим признакам, выявляют полезные ископаемые, определяют физические свойства пород.

При каротаже применяют те же поля и методы, которые используются в полевой геофизике. Однако техническое воплощение этих методов и приемы выполнения работ из-за специфических условий измерения существенно отличаются от рассмотренных выше.

Наиболее часто применяют методы электрического каротажа собственных потенциалов (ПС) и кажущихся сопротивлений (КС), термокаротажа, радиоактивного каротажа и др. (см. рис. 11.10).

По данным метода ПС выделяют пласты с различной электрохимической активностью (напротив глинистых пластов наблюдаются максимумы ПС, напротив песчаных — минимумы) и определяют мощности пластов.

В методах КС определяют значения  $\rho_k$  пластов трехэлектродными зондами. Используя зонды разной длины, получают различную глубину проникновения тока в стенки скважины и соответственно выявляют изменение  $\rho_k$  с удалением от стенки скважины. Это один из вариантов метода КС — метод бокового электрического зондирования (БЭЗ), позволяющий оценить пористость и проницаемость горных пород. Кривые БЭЗ интерпретируют с помощью специальных палеток.

Широко используют также магнитный и акустический ка-

ротаж. Первый метод основан на измерении магнитной восприимчивости по глубине скважины, второй — на измерении скорости распространения упругих колебаний.

В применяемом также термическом методе исследования скважин (термокаротаже) используют как естественные температурные поля Земли, так и искусственные, создаваемые в пробуренных скважинах нагнетанием в них горячих пульп.

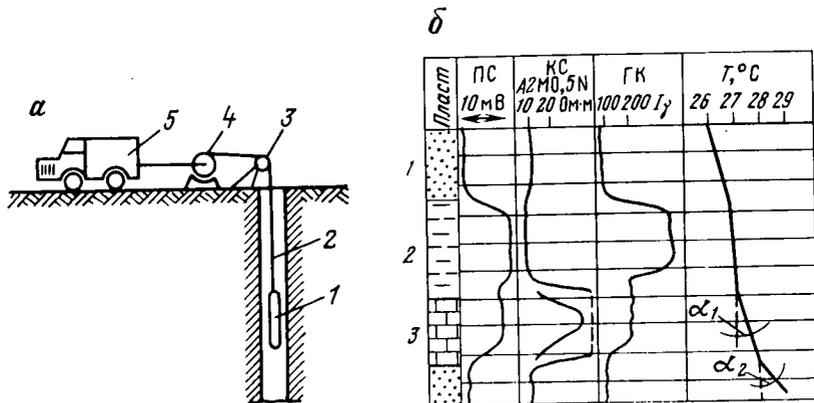


Рис. 11.10. К скважинному методу изучения массивов:

*а* — принципиальная схема каротажа: 1 — скважинный снаряд (датчик); 2 — кабель; 3 — блок-баланс; 4 — лебедка; 5 — регистрирующая аппаратура; *б* — комплекс каротажных диаграмм по участку скважины; ПС — потенциал собственной поляризации; КС — кажущееся сопротивление; А2 М0,5 N — тип каротажного зонда; ГК — гамма-каротаж;  $I_{\gamma}$  — интенсивность гамма-излучения; Т — термокаротаж; 1 — песок; 2 — глина; 3 — известняк;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — углы наклона термограммы

В результате термокаротажа скважины можно, во-первых, установить геотермический градиент и, во-вторых, расчленить массив на породы с различными тепловыми свойствами (см. рис. 11.10).

Термокаротаж используют для определения границы зоны многолетней мерзлоты, мест подтока глубинных вод, местоположения газоносных пластов, а также зон оттаивания, степени промерзания пород и т. д. Движущиеся потоки воды служат переносчиком тепла, и на термограммах места притоков обнаруживаются по температурным аномалиям: сульфидные руды и каменные угли создают в результате процессов окисления повышенные геотермические аномалии; газоносные пласты создают в результате охлаждающего эффекта пониженные аномалии.

Радиоактивный каротаж осуществляют либо измерением естественной радиоактивности горных пород по глубине скважин — гамма-каротаж (ГК), либо посредством искусственного облучения горных пород. В последнем случае в скважину одновременно с регистрирующим прибором опускают источник гамма-лучей или нейтронов.

Существуют различные методы каротажа искусственным облучением: гамма-гамма-каротаж (ГГК), нейтронный гамма-каротаж (НГК) и др.

В методе гамма-гамма-каротажа излучаются  $\gamma$ -лучи и принимаются те же прошедшие через горную породу  $\gamma$ -лучи.

В методе нейтронного гамма-каротажа породы в скважине облучают потоком быстрых нейтронов. Последние, проходя по породам, сталкиваются с ядрами разных элементов. От тяжелых ядер нейтроны отскакивают, не теряя энергии и скорости; легким ядрам они передают часть своей энергии и замедляются, превращаясь в так называемые тепловые нейтроны, которые затем легко поглощаются ядрами других элементов. При этом возникает вторичное гамма-излучение, величина которого прямо пропорциональна числу тепловых нейтронов.

Больше всего нейтроны замедляются ядрами водорода, так как последние по своей массе близки к массе нейтронов.

Содержание водорода в разных горных породах различно. Например, у пород, содержащих кристаллизационную воду (гипсы), водорода намного больше, чем у других пород. Это обстоятельство позволяет диагностировать породы при обследовании скважин.

Количество водорода в породах связано также с их влажностью. Это означает, что нейтронным способом можно оценивать влажность пород и на основании этого обнаруживать нефтяные или водоносные пласты при обследовании разведочных скважин.

Оптические свойства пород используют в фотометрических методах каротажа скважин. Таким методом можно легко выявить наличие пластов и прослоек горных пород, обладающих различными коэффициентами отражения света.

В частности, по отражающей способности хризотил-асбеста, которая у него в несколько раз больше, чем у вмещающих пород, определяют общее его содержание на месторождении и мощность пластов и прослоек.

## **12. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ**

### **12.1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ**

Натурные методы по характеру проведения испытаний разделяются на имитирующие лабораторный эксперимент (как правило, с изменением масштаба); пенетрационные; геофизические; расчетные.

Применение методов, имитирующих лабораторный эксперимент, требует предварительной подготовки блока

пород, частичного его отделения от окружающего массива. Этими методами проводят определение прочностных параметров пород, частично гидравлических и тепловых свойств массивов. Методы дают информацию о свойствах горных пород в массиве достаточно больших объемов, однако они трудоемки и не позволяют получить требуемого количества данных.

С помощью пенетрационных методов, основанных на внедрении в горные породы различного рода инденторов, можно получить информацию о прочностных, упругих, пластических свойствах и горно-технологических параметрах пород. Основное их достоинство — быстрота и простота определений. Однако исследуемый объем породы при каждом испытании очень мал.

Все пенетрационные методы — косвенные. Для оценки тех или иных физических характеристик пород они должны быть предварительно протарированы в лабораторных условиях (при одновременном определении изучаемого параметра каким-либо лабораторным методом).

К группе геофизических методов относятся все имеющиеся модификации этих методов исследования массивов пород (см. разд. 11.5). Однако непосредственное использование геофизических методов разведки для оценки свойств пород невозможно, так как последние применяются при определении строения и состава массивов горных пород и для интерпретации получаемых данных уже требуется знание физических свойств пород. Таким образом, необходимо решение обратной задачи — по известным характеристикам строения массива и данным геофизики оценить его физические свойства.

Использование в этих методах мобильных физических полей, проникающих достаточно глубоко в массивы пород, позволяет давать действительно интегральную характеристику значительных объемов массива.

Расчетные методы включают в себя группу методов расчета физических свойств пород в массиве по свойствам образцов, определенным в лаборатории, а также методы расчета одних физических параметров пород по другим, определенным в натуре. В последнем случае широкое применение находят взаимосвязи свойств пород.

Так определяют прочностные параметры по скорости распространения упругих волн, плотность пород — по поглощению  $\gamma$ -лучей, проницаемость пород — по результатам электрокаротажа скважин и т. д.

Расчетными методами при известных закономерностях изменения свойств пород от структурных факторов массива можно произвести корректировку значений, полученных в лабораторных условиях, на массив.

**Объемную массу** горных пород в массиве измеряют либо непосредственно — путем выемки некоторого объема пород из массива, взвешивания его и определения объема получившейся

выемки в массиве, либо различными геофизическими методами. Для этих целей можно использовать гравиметрию и плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-П) (рис. 12.1). Последний основан на эффекте взаимодействия  $\gamma$ -квантов с электронами атома вещества (комpton-эффект). Рассеяние  $\gamma$ -квантов при этом пропорционально количеству электронов  $N_e$ , в свою очередь, зависящему от объемной массы  $\rho$  породы:

$$N_e = ZN\rho/A, \quad (12.1)$$

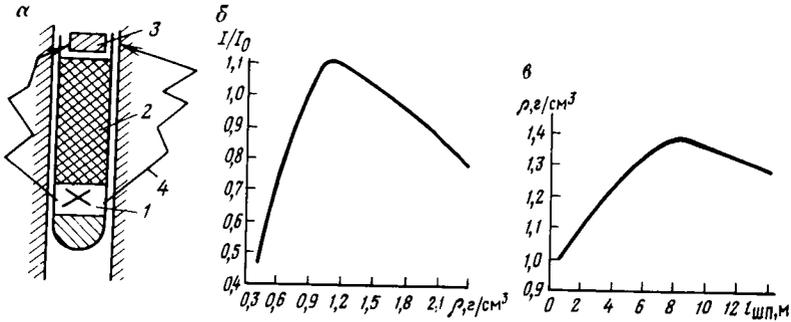


Рис. 12.1. К измерению плотности горных пород методом ГГК:

*a* — схема ГГК: 1 — источник  $\gamma$ -квантов; 2 — экран; 3 — детектор; 4 — путь  $\gamma$ -квантов по породе; *б* — тарировочный график определения плотности  $\rho$  пород;  $I/I_0$  — относительное изменение интенсивности гамма-излучения;  $\rho$  — изменение плотности  $\rho$  углей по длине шпура  $l_{шп}$

где  $Z$  — заряд ядра;  $A$  — атомная масса;  $N$  — число Авогадро.

В осадочных породах  $Z/A \approx 0,5$ , поэтому  $N_e$  прямо пропорционально  $\rho$ . Для пересчета показаний ГГК-П на плотность породы используют определенные для данной аппаратуры тарировочные графики зависимости интенсивности рассеянного  $\gamma$ -излучения от объемной массы породы (см. рис. 12.1).

**Упругие свойства** пород в массивах определяют, как правило, различными вариантами сейсмических методов.

Значения скоростей распространения упругих волн в верхних частях массива горных пород  $v_1$  определяют в результате интерпретации годографов отраженных волн.

Скорость распространения упругих волн по годографу отраженных волн может быть подсчитана способом постоянной разности (рис. 12.2):

$$v_1 = \sqrt{2m\Delta x/\Delta U}, \quad (12.2)$$

где  $m$  — произвольно взятый отрезок на оси абсцисс годографа, которому соответствует время прихода упругих колебаний  $t_2$  и  $t_1$ ;  $U = t_2^2 - t_1^2$  — некоторая функция.

На годографе берут несколько пар точек  $t_1$  и  $t_2$ ,  $t'_1$  и  $t'_2$  и т. д. (см. рис. 12.2, *a*), соответствующих началу и концу отрезков  $m$ .

Для каждой пары времен находят функцию  $U$  и строят график  $U=f(x)$  (см. рис. 12.2, б). Далее берут приращение  $\Delta U$  для какого-нибудь  $\Delta x$  и находят  $v$  по формуле (12.2).

Если необходимо исследовать более плотные, залегающие на некоторой глубине слои, используют метод преломленных волн.

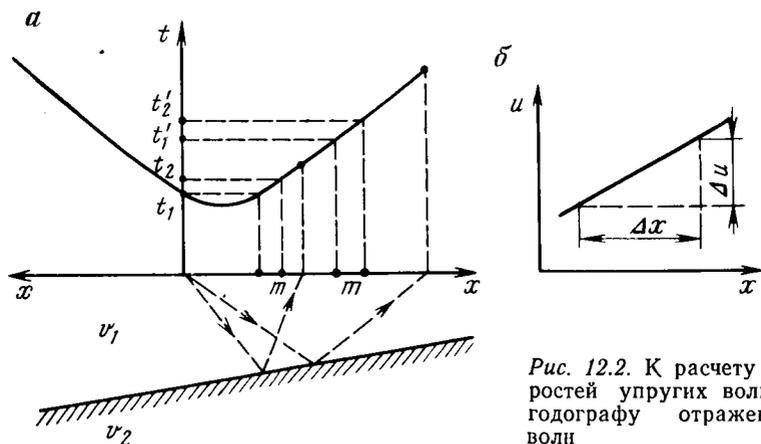


Рис. 12.2. К расчету скоростей упругих волн по годографу отраженных волн

По годографу преломленных волн можно определить скорость распространения упругих волн в нижележащей среде  $v_2$ , которая примерно равна граничной скорости  $v_1$ .

Для этого чаще всего используют так называемые встречные годографы, полученные на одном и том же участке профиля с двух противоположных пунктов возбуждения колебаний (рис. 12.3).

Построив график  $\Theta_p=f(x)$  (см. рис. 12,3, б), на нем берут произвольные отрезки  $\Delta x$  и  $\Delta\Theta_p$  и находят  $v_2$  по формуле

$$v_2 = v_1 = 2\Delta x / \Delta\theta_p, \quad (12.3)$$

где  $\Theta_p$  — разностный годограф [ $\Theta_p = t_1(x) - t_2(x) + T$ ];  $t_1(x)$  и  $t_2(x)$  — время прихода головных преломленных волн в точку  $x$  соответственно по первому и второму годографам;  $T$  — время прихода волны из первой точки возбуждения упругих колебаний  $O_1$  во вторую точку  $O_2$ .

**Коэффициенты проницаемости и фильтрации** в массивах горных пород часто определяют непосредственным экспериментом, например, путем опытной откачки воды из какой-либо центральной скважины, около которой пробурены наблюдательные скважины.

При этом для безнапорных вод

$$K_\phi = 2A / (2H - S_1 - S_2), \quad (12.4)$$

для напорных вод

$$K_{\phi} = A/h,$$

где

$$A = 0,365Q(\lg x_2 - \lg x_1)/(S_1 - S_2); \quad (12.5)$$

$H$  — высота столба воды от почвы водоносного пласта до

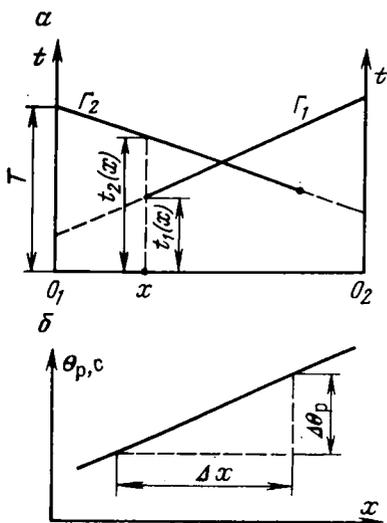


Рис. 12.3. К расчету граничной скорости упругих волн в массиве по встречным годографам  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  преломленных волн:

$t$  — время прихода упругой волны к сейсмоприемнику

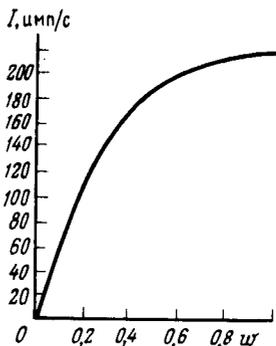


Рис. 12.4. Зависимость интенсивности вторичного  $\gamma$ -излучения  $I$  в методе НГК от влажности пород, измеренной датчиком на базе 12 см

уровня ее в скважине до откачивания;  $s_1$  и  $s_2$  — понижение уровня воды соответственно в первой и второй скважинах;  $h$  — мощность водоносного пласта;  $Q$  — расход воды при откачивании из центральной скважины;  $x_1$  и  $x_2$  — расстояние соответственно от первой и второй наблюдательных скважин до оси центральной скважины.

Коэффициенты фильтрации и направление движения подземных вод устанавливают также с помощью гидрогеологического варианта метода заряда. В скважину, пересекающую изучаемые водные потоки, засыпают соль, которая растворяется и превращает воду, окружающую скважину, в электролит — своеобразное подвижное низкоомное тело, которое можно зарядить и с поверхности следить за изменением эквипотенциальных линий во времени, характеризующим перемещение зарядженного электролита в пласте.

Скорость и направление фильтрации вод можно определить также методом радиоактивных изотопов.

Проницаемость пород определяют также по данным электрокаротажа скважин методом бокового электрического зондирования. Это позволяет определить изменения  $\rho_a$  пород с увеличением расстояния от стенки скважины и установить зону проникновения бурового раствора в пласт. Величина последней пропорциональна проницаемости пород в массиве. Влажность в массиве пород можно непосредственно определить методом НГК (рис. 12.4).

**Пористость** определяют по данным акустического каротажа (используется зависимость между  $P$  и временем распространения упругих волн), по данным нейтронного каротажа (используется связь между содержанием воды в полностью водонасыщенной породе и ее пористостью), по данным измерений потенциалов собственной поляризации с использованием тарировочных графиков, а также по результатам электрокаротажа с использованием зависимости между  $\rho_{вп}/\rho_{в}$  и  $P$ , где  $\rho_{вп}$  и  $\rho_{в}$  — удельное электрическое сопротивление соответственно насыщенной водой породы и воды, насыщающей породу (рис. 12.5).

**Прочностные свойства пород.** В методах, имитирующих лабораторный эксперимент, замеряют разрушающие напряжения по результатам нагружения (искусственного или за счет проведения горных работ) элементов массива, отделенных щелями или выработками от окружающих пород (рис. 12.6). Этими методами определяют прочностные характеристики пород в объемах до нескольких десятков кубических метров.

Широко применяют также инденторные методы.

Более предпочтительны геофизические методы определения прочности пород, основанные на зависимости ее от свойств, легко определяемых в массивах, например скорости распространения и коэффициента поглощения упругих колебаний.

**Тепловые свойства** горных пород в массиве определяют специальными прямыми методами, повторяющими лабораторный эксперимент, а также по термограммам, полученным в результате термического каротажа. Так как тепловой поток  $q$ , идущий из недр Земли, в определенном районе постоянен,

$$\lambda = q/\Gamma. \quad (12.6)$$

Температуропроводность пород можно рассчитать по скорости остывания или нагревания промывочной жидкости, заполняющей скважину:

$$a = f(\Delta t/\Delta t_0, \tau, \tau_1, \tau_3, r_0), \quad (12.7)$$

где  $\Delta t$  — изменение температуры жидкости за время простоя скважины в покое  $\tau$ ;  $\Delta t_0$  — разность температур жидкости и породы в начале эксперимента;  $\tau_1$  — время нарушения термического режима;  $\tau_3$  — эффективное время, для непроницаемых

пород  $\tau_a = r_c^2 / 4a_c$ ;  $a_c$  — температуропроводность промывочной жидкости;  $r_c$  — радиус скважины.

**Удельное электрическое сопротивление массивов горных пород** измеряют методом кажущихся сопротивлений.

Если пласт однородный и достаточно мощный, то  $\rho_k = \rho_a$ .

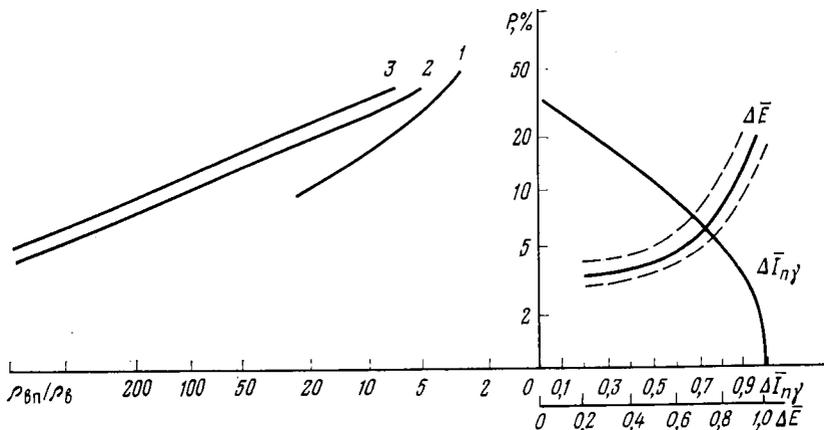


Рис. 12.5. К методам оценки пористости пород:

по данным НКГ для карбонатов  $\Delta I_{\gamma} = \frac{I_{\gamma}^* - I_{\gamma \min}}{I_{\gamma \max} - I_{\gamma \min}}$ , где  $I_{\gamma}^*$ ,  $I_{\gamma \min}$ ,

$I_{\gamma \max}$  — интенсивность вторичного  $\gamma$ -излучения соответственно напротив данного пласта, минимальное и максимальное в карбонатах; по данным ПС  $\Delta E = \Delta E^* / \Delta E_{\max}$  (по Б. Ю. Вендельштейну), где  $\Delta E^*$ ,  $\Delta E_{\max}$  — потенциалы собственной поляризации напротив изучаемого пласта и максимальный; по электрокаротажу для песков (1), песчаников (2), плотных известняков (3) (по В. Н. Дахнову)

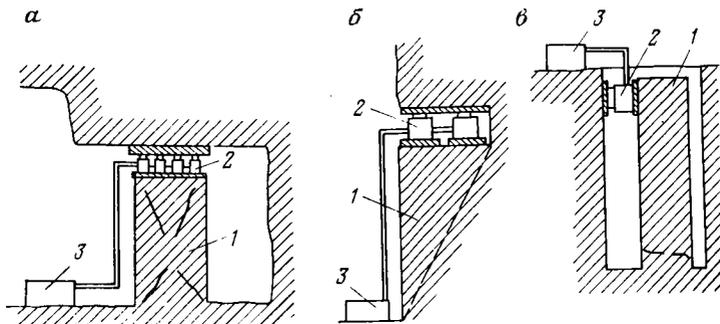


Рис. 12.6. Схемы непосредственного определения прочностных свойств в массивах горных пород:

*а* — предела прочности при одноосном сжатии; *б* — предела прочности при сдвиге со сжатием; *в* — предела прочности при изгибе; 1 — испытываемый массив; 2 — гидродомкрат; 3 — насос

Для больших слоистых массивов пород удельное электрическое сопротивление каждого пласта определяют в результате интерпретации данных ВЭЗ.

При наличии скважин  $\rho_{\text{э}}$  пластов пород определяют посредством каротажа методом КС.

Диэлектрическую проницаемость массивов пород определяют по распространению электромагнитных волн в породах (скорости, коэффициентам поглощения и отражения), а также

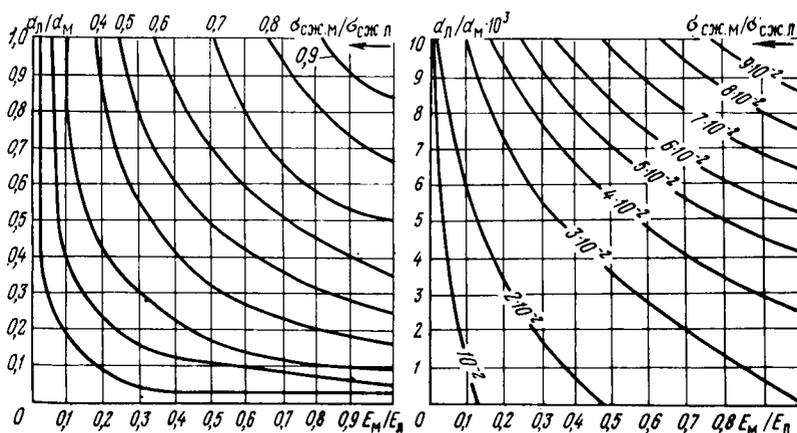


Рис. 12.7. Номограммы для определения предела прочности при сжатии пород в массиве  $\sigma_{\text{сж.м}}$  по известной прочности в куске  $\sigma_{\text{сж.л}}$

непосредственно методом диэлектрического каротажа скважин или имитацией лабораторного эксперимента с накладными датчиками (развернутый конденсатор).

Естественная радиоактивность горных пород измеряется радиометрами непосредственно с поверхности либо в скважинах (гамма-каротаж).

**Магнитная проницаемость** массивов пород устанавливается либо по данным магниторазведки, либо в результате магнитного каротажа скважин.

Практически все физические свойства пород в массиве с той или иной достоверностью могут быть также рассчитаны по данным лабораторного эксперимента. Расчетные методы требуют знания отличительных структурных особенностей массива и характера зависимости свойств от этих особенностей.

Так, объемную массу массива пород  $\rho_{\text{м}}$  можно рассчитать по известной объемной массе  $\rho_{\text{ли}}$  лабораторных образцов:

$$\rho_{\text{м}} = \omega + (1 - K_{\text{скв}}) \sum_{i=1}^n \rho_{\text{ли}} V_i, \quad (12.8)$$

где  $\omega$  — объемная влажность массива;  $K_{\text{скв}}$  — коэффициент скважности массива, представляющий собой отношение дополнительной трещинной пористости  $P_{\text{т}}$  к истинному объемному

содержанию плотной фазы [ $K_{\text{сжв}} = P_T / (1 - P)$ ];  $\rho_{\text{ли}}$  — объемная масса породы (определенная в лаборатории), относительное объемное содержание которой в массиве  $V_i$ .

Для определения  $P_T$  можно использовать вышеперечисленные методы.

Прочность массива  $\sigma_{\text{сж. м}}$  можно приближенно рассчитать по прочности  $\sigma_{\text{сж. л}}$  образцов пород, определенной в лабораторных условиях.

Так, используя теорию Риттингера, одно из следствий которой состоит в том, что работа разрушения обратно пропорциональна диаметру  $d$  кусков разрушенных твердых тел, для идеально упругой горной породы можно написать (рис. 12.7)

$$\sigma_{\text{сж. л}}^2 E_M / (\sigma_{\text{сж. м}}^2 E_L) = d_M / d_L. \quad (12.9)$$

Отсюда

$$\sigma_{\text{сж. м}} = \sigma_{\text{сж. л}} \sqrt{d_L E_M / (d_M E_L)}. \quad (12.10)$$

Как правило, отношение  $d_L / d_M$  предварительно известно исходя из применяемого способа разрушения пород. Отношение  $E_M / E_L$  примерно равно отношению квадратов скоростей распространения упругих волн в массиве и в образце.

## 12.2. АНАЛИЗ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ

**Объемная масса** горных пород в массиве независимо от степени ее насыщения водой ниже или, по крайней мере, равна объемной массе образца. Плотность, обусловленная только минеральной составляющей пород, не зависит от места измерений (при условии одинакового минерального состава изучаемых пород).

**Прочность** горных пород в массиве и массива горных пород всегда ниже, чем прочность, определенная на образцах.

Значения  $\sigma_{\text{сж}}$ , определенные на образцах пород Кузбасса размерами  $5 \times 5 \times 5$  см, составляли 15—23 МПа, а определенные в массиве — 4,4—9 МПа (табл. 12.1). Прочность каменного угля Кузбасса в целиках составляет 3—9 МПа, а в образцах размерами  $5 \times 5 \times 5$  см — 15—18 МПа, что в 2—4 раза выше, чем в массиве.

В технических расчетах снижение прочности массива условно обозначается коэффициентом структурного ослабления  $k_{\text{с.о.}}$ , равным отношению сцепления отдельного куска породы при отрыве его от массива к сцеплению в куске.

Наиболее существенно на величину  $k_{\text{с.о.}}$  влияет ориентирование системы трещин относительно плоскостей напластования. Для одних и тех же пород величина  $k_{\text{с.о.}}$ , измеренная под углом к трещинам, оказывается больше в 2—5 раз, чем измеренная по отдельным трещинам и по их направлению.

Согласно рекомендациям В. Д. Слесарева, для расчета горно-технологических процессов, захватывающих большие пространства, необходимо ввести следующие коэффициенты структурного ослабления к параметрам, определенным в лабораторных условиях на образцах:

$$\sigma_{сж.м} = (0,3 \div 0,35) \sigma_{сж.л}; \quad (12.11)$$

$$\sigma_{р.м} = k_{с.о} \sigma_{р.л}, \quad (12.12)$$

Таблица 12.1. Сравнение прочности углей в образцах  $\sigma_{сж.л}$  и в массиве  $\sigma_{сж.м}$  (по С. Е. Чиркову)

Бассейн. пласт	$\sigma_{сж.л}$ , МПа	$\sigma_{сж.м}$ , МПа	$\sigma_{сж.л} / \sigma_{сж.м}$
Кузбасс, пласт XXVII	17,0	4,4	3,9
Кузбасс, пласт Польшаевский I	15	7—9,0	2,1—1,7
Кузбасс, пласт Красногорский	18,5	6,1	3,0
Кузбасс, пласт Наджуринский II	18,0	5,5	3,3
Львовско-Волынский бассейн, пласт Волынский	12,5	8,2	2,1

где  $k_{с.о} = 0$  — при густой сети трещин, полностью расчленяющих массив;  $k_{с.о} = 0,01 \div 0,1$  — при закрытых макротрещинах;  $k_{с.о} = 0,05 \div 0,2$  — при микротрещиноватости.

Сцепление горных пород в массиве по плоскостям ослабления также зависит от характера ослабления. При поверхности ослабления, представленной сетью микротрещин,  $C_m \leq (0,6 \div 0,9) C_n$ , по контактными поверхностям  $C_m \leq (0,05 \div 0,25) C_n$  и, наконец, по плоскостям пластовой и текущей отдельностей  $C_m = (0,01 \div 0,2) C_n$ . В массивах горных пород различают сцепление, обусловленное силами связей между частицами породы, и сцепление, обусловленное капиллярным натяжением воды, находящейся в породе. Первый вид сцепления характерен для скальных пород, второй — для влажных рыхлых и связных пород.

Угол внутреннего трения уменьшается с увеличением содержания в породе мелких фракций, увеличением количества глинистых частиц (особенно монтмориллонита) и влажности, так как все это способствует взаимному скольжению одной частицы породы относительно другой.

Считается, что угол внутреннего трения  $\phi$  в массиве в условиях одноосного сжатия не превышает  $40-50^\circ$ , в условиях объемного напряженного состояния —  $30-40^\circ$ . Для глинистых прослоек  $\phi$  принимают равным  $18-20^\circ$ .

**Модуль упругости** пород массива  $E_m$  ниже модуля упругости  $E_n$ , определенного в лаборатории, из-за наличия плоскостей

ослабления и трещиноватости породы. Влажность горных пород приводит к некоторому росту модуля Юнга, однако степень влияния этого фактора ниже, чем трещиноватости.

Влияние различных горных пород в массиве на интегральную характеристику модуля упругости массива пород может быть оценено по формуле логарифмического средневзвешенного

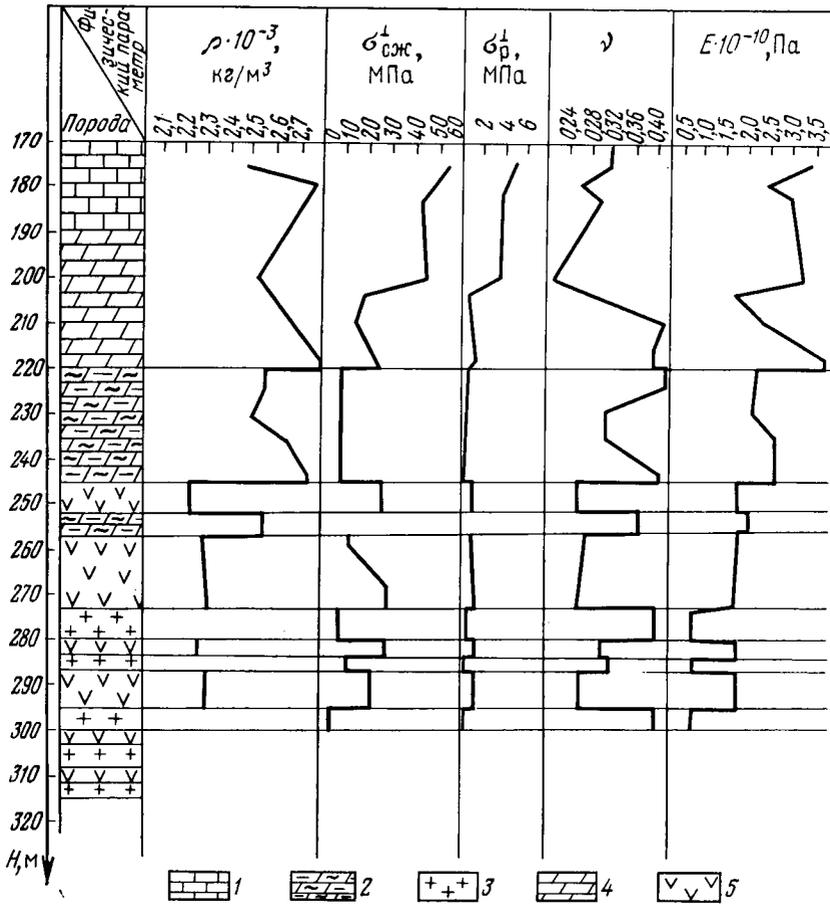


Рис. 12.8. Пример изменения механических свойств пород по глубине скважины (по данным В. Г. Зильбершмидта)

с учетом поправки на трещиноватость и пористость как образца, так и массива:

$$\lg E_m = \sum_{i=1}^n V_i \lg E_{li} + \sum_{i=1}^n V_i \lg(1 - a_i P_i), \quad (12.13)$$

где  $a_i$  — коэффициенты формы порового пространства, соответствующие пористости  $P_i$  пород в образце и в массиве.

В целом следует подчеркнуть существенную изменчивость механических свойств массивов горных пород как по глубине (рис. 12.8), так и по горизонтали. Чаще всего это связано с различными породами, слагающими массивы, и с их состоянием — степенью нарушенности, увлажненностью и т. д.

**Теплопроводность** сухого массива горных пород меньше теплопроводности образца из-за наличия дополнительных пустот и трещин в массиве. При этом коэффициент теплопроводности уменьшается за счет удлинения пути распространения тепла из-за наличия трещин и уменьшения площади сечения, через которое передается тепловой поток.

Для массива, полностью насыщенного водой, приближенное среднее значение теплопроводности

$$\lambda_m = \sqrt{\frac{\lambda_0^2 \lambda_B (1-w) + \lambda_0 \lambda_B^2 w}{\lambda_0 w + \lambda_B (1-w)}}, \quad (12.14)$$

где  $\lambda_0$  — теплопроводность минерального скелета массива пород при  $P=0$ ;  $\lambda_B$  — теплопроводность воды;  $w$  — полная объемная влагоемкость массива с учетом дополнительной по сравнению с образцом трещиноватости.

Отношение  $\lambda_m$  к теплопроводности сухого образца  $\lambda_{л}$  после преобразований

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_{л}} = \sqrt{\frac{\lambda_0 \lambda_B (1-w) + \lambda_B^2 w}{\lambda_0 [\lambda_0 w + \lambda_B (1-w)] [1 - \sqrt{P(2-P)}]^2}} \quad (12.15)$$

Из этого выражения следует, что теплопроводность максимально увлажненного массива может быть как меньше, так и больше теплопроводности сухого образца.

При отсутствии дополнительной трещиноватости величина  $\lambda_m$  всегда больше коэффициента теплопроводности  $\lambda_{л}$ , определенного в лабораторных условиях вследствие увлажнения массива.

Если пористость в образце практически отсутствует, а массив трещиноватый и влажный, то его коэффициент теплопроводности будет меньше коэффициента  $\lambda_{л}$ .

**Удельная теплоемкость** массива горных пород  $c_m$  отличается от удельной теплоемкости  $c_{л}$  сухих образцов из-за наличия дополнительной влажности. Поэтому

$$c_m/c_{л} = c_B w_e/c_{л} + (1-w_e), \quad (12.16)$$

где  $c_B$  — удельная теплоемкость воды;  $w_e$  — естественная влажность пород массива.

Если теплоемкость определяется на сухих образцах породы, то  $c_B/c_{л} \approx 4 \div 5$  и поэтому

$$c_m/c_{л} = 1 + (3 \div 4) w_e. \quad (12.17)$$

**Коэффициенты теплового расширения** массива горных пород меньше их значений, определенных лабораторным путем,

так как дополнительная трещиноватость массива увеличивает деформируемость пород.

Основную роль в изменении удельного электрического сопротивления  $\rho_{\Sigma}$  пород в массивах, однотипных по составу, играют трещиноватость и влажность.

Рассмотрение связи между удельными электрическими сопротивлениями массива и лабораторного образца ( $\sigma_{\Sigma, \text{м.с}}$  и  $\sigma_{\Sigma, \text{л}}$ ) показывает, что наиболее вероятные значения  $\sigma_{\Sigma, \text{м.с}}$  на несколько порядков выше значений, определенных в лабораторных условиях на сухих образцах. Сравнение  $\sigma_{\Sigma, \text{л}}$  сухих образцов с  $\sigma_{\Sigma, \text{м.с}}$  влажного массива практически не имеет смысла, поэтому необходимо определение  $\sigma_{\Sigma, \text{л}}$  влажных пород.

Если порода представляет собой идеальный диэлектрик, то

$$\sigma_{\Sigma, \text{м.с}}/\sigma_{\Sigma, \text{л}} = K_{\text{и. л. в}}(P + P_2)/(K_{\text{и. м. в}}P), \quad (12.18)$$

и наоборот, если порода сложена хорошо проводящими ток минералами, то

$$\sigma_{\Sigma, \text{м.с}}/\sigma_{\Sigma, \text{л}} = K_{\text{и. л. о}}(1 - P_2)/K_{\text{и. м. о}}, \quad (12.19)$$

где  $K_{\text{и. м. о}}$ ,  $K_{\text{и. м. в}}$  — коэффициенты извилистости токопроводящих каналов соответственно в минеральном скелете и в насыщенном водой поровом пространстве для породы в массиве;  $K_{\text{и. л. о}}$ ,  $K_{\text{и. л. в}}$  — то же, для породы в образцах;  $P$  и  $P_2$  — соответственно пористость образца и дополнительная пористость (трещиноватость массива).

В массивах пород пластовые воды имеют различные степени минерализации и температуру, что существенно изменяет сопротивление как самих вод, так и массивов.

Отличие диэлектрической проницаемости горных пород массива  $\epsilon_{\text{ГМС}}$  от  $\epsilon_{\text{ГЛ}}$  лабораторного образца определяется трещиноватостью и влажностью последнего.

Влияние сухих трещин аналогично влиянию пористости, поэтому

$$\epsilon_{\text{ГМС}}/\epsilon_{\text{ГЛ}} = \epsilon_{\text{ГМ}}^{-P_2} < 1. \quad (12.20)$$

Для влажных горных пород массива

$$\epsilon_{\text{ГМС}} = \epsilon_{\text{ГМ}}^{1 - \omega_{\text{м}}} \cdot \epsilon_{\text{ГВ}}^{\omega_{\text{м}}}. \quad (12.21)$$

Диэлектрическая проницаемость воды  $\epsilon_{\text{ГВ}}$  значительно превышает величину  $\epsilon_{\text{ГМ}}$  минеральной фазы пород. В связи с этим наблюдается увеличение  $\epsilon_{\text{ГМС}}$  влажных пород в массиве по сравнению с  $\epsilon_{\text{ГЛ}}$  сухих пород в образце. Степень этого увеличения можно оценить по формуле

$$\epsilon_{\text{ГМС}}/\epsilon_{\text{ГЛ}} = \epsilon_{\text{ГВ}}(P_2 + P)/(\epsilon_{\text{ГМ}}P_2) \gg 1. \quad (12.22)$$

Поэтому для расчета диэлектрической проницаемости массива нужно использовать данные лабораторного определения влажных образцов горных пород  $\epsilon'_{\text{ГЛ}}$ .

Тогда

$$\epsilon_{r_{mc}}/\epsilon'_{r_{л}} = (\epsilon_{r_{в}}/\epsilon_{r_{м}})^{P_2} \quad (12.23)$$

Максимальное различие  $\epsilon_{r_{mc}}$  и  $\epsilon_{r_{л}}$  при этом полностью определяется величиной дополнительной трещиноватости массива  $P_2$ .

Связь тангенса угла диэлектрических потерь сухих массивов пород  $\operatorname{tg} \delta_{mc}$  с лабораторными образцами  $\operatorname{tg} \delta_{л}$  может быть оценена по формуле

$$\operatorname{tg} \delta_{mc}/\operatorname{tg} \delta_{л} = \operatorname{tg} \delta_{м}^{2P_2} < 1. \quad (12.24)$$

**Горно-технологические параметры** массива горных пород также отличаются от измеренных на образцах. Крепость пород в массиве ниже, чем в образцах; твердость, определяемая локальным действием, чаще всего такая же, как и в образцах. Однако коэффициент вариации твердости в массиве значительно больше. То же относится к таким показателям, как абразивность и дробимость пород.

Пластичность и ползучесть массивов горных пород, как правило, всегда значительно выше, чем определенные в лаборатории. Это, в первую очередь, обусловлено повышенными давлением, влажностью и температурами в массиве пород.

### 12.3. ОСОБЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИХ РАЗРАБОТКЕ

При изучении угольных пластов в массивах необходимо учитывать их характеристики, оценивающие особое поведение пластов в процессе их выемки. К таковым относятся газоносность пластов, газообильность, самовозгораемость и выбросоопасность. Газоносность горных пород — объемное количество свободных или сорбированных газов, содержащихся в единице массы или объема горных пород в природных условиях.

Газоносность измеряется в  $\text{м}^3/\text{м}^3$  или в  $\text{м}^3/\text{т}$ . В угольных пластах главным образом содержится метан, представляющий наибольшую опасность при разработке угольных месторождений. Угольные пласты — это естественные коллекторы метана.

На современных глубинах разработки природная газоносность пластов составляет 12—17  $\text{м}^3/\text{т}$ , достигая в отдельных случаях 60—80  $\text{м}^3/\text{т}$ ; давление метана на глубинах свыше 400—600 м находится в пределах 3—5 МПа, повышаясь в ряде случаев до 13 МПа.

Система метан—уголь в природных условиях находится в равновесном состоянии, которое нарушается при ведении горных работ, что обуславливает выделение метана в рудничную атмосферу.

Количество выделившегося из углей газа, отнесенное к единице массы добытого угля, называется газообильностью углей.

Быстрое и обильное выделение газа происходит при высоком начальном его давлении, небольшой вязкости, высокой газопроницаемости пласта.

По газоносности (метаносности) угольные пласты в промышленных целях подразделяют на четыре категории: I категория — до 5 м<sup>3</sup> метана на 1 т добытого угля; II — от 5 до

Таблица 12.2. Распределение шахт по газообильности (%)

Бассейн	Негазовые шахты	Категория шахты			Сверхкатегорные шахты
		I	II	III	
Донецкий	18,7	13,1	9,4	7,6	51,2
Кузнецкий	—	13,9	21,5	10,1	54,5
Карагандинский	—	—	8,8	11,8	79,4
Печорский	—	11,6	34,6	3,8	50,0

10 м<sup>3</sup>/т; III — от 10 до 15 м<sup>3</sup>/т; сверхкатегорные — более 15 м<sup>3</sup>/т (табл. 12.2).

Количество метана, выделяющегося в угольных шахтах, увеличивается с углублением горных работ.

Так, за последние 30 лет метановыделение из угольных пластов в СССР увеличилось в 25 раз.

Самовозгораемость — параметр, характеризующий способность углей к самовозгоранию; определяется скоростью реакций окисления и критической температурой самовозгорания углей.

Выбросоопасность — параметр, определяющий склонность угольных пластов к внезапным выбросам угля и газа. Внезапные выбросы проявляются также и в других породах, например в силвинитовых и карналлитовых пластах.

Внезапный выброс — явление быстрого разрушения призабойного участка массива, сопровождающееся дроблением и измельчением породы и выбрасыванием ее в выработку с одновременным выделением газа.

Склонность угля к внезапным выбросам определяется сочетанием физических свойств угля, особенностей технологии выемки, геологических условий, форм и размеров обнажений, т. е. теми факторами, которые обеспечивают возможность быстрого развития трещин, разрушения и измельчения угля, насыщенного газом.

В. В. Ходот выделяет три основных условия возбуждения и развития внезапных выбросов в породах:

сумма потенциальной  $W$  и кинетической  $R$  энергий в изучаемом участке массива пород должна превышать величину работы, необходимой для смещения  $A_F$  и разрушения  $A_U$  выбрасываемой массы:

$$W + R > A_F + A_U; \quad (12.25)$$

скорость разрушения (развития трещин)  $v_{тр}$  пород должна быть больше скорости падения давления  $v_s$  газа в массиве:

$$v_{тр} > v_s; \quad (12.26)$$

среднее давление газа  $p_{ср}$  в массиве должно быть больше удельных усилий сопротивления породы в массиве разрушению  $\sigma_p$ :

$$p_{ср} > \sigma_p. \quad (12.27)$$

На основе этого разработаны различные показатели выбороопасности, величина которых зависит, в первую очередь, от давления газов в массивах, газоотдачи и крепости пород.

Внезапные выбросы впервые были зафиксированы в шахтах Франции еще в XVIII в. В России первые выбросы угля и газов проявились в Донбассе в начале XX в. Сейчас выбороопасными являются шахты таких крупнейших бассейнов страны, как Донецкий, Кузнецкий, Карагандинский, Печорский.

Разработка скальных массивов пород на больших глубинах часто сопровождается горными ударами.

Горный удар — это явление хрупкого взрывоподобного разрушения предельно напряженного участка массива, сопровождающееся дроблением и измельчением породы. В отличие от внезапного выброса при горных ударах не происходит выделения газов. В СССР первые горные удары зарегистрированы в 40-х годах на шахтах Кизеловского каменноугольного бассейна.

Это явление оценивают показателем удароопасности массивов горных пород.

Удароопасность обусловлена напряженным состоянием горных пород, большой запасенной энергией упругого деформирования, хрупкостью пород и целым рядом других факторов. Удароопасность возрастает с увеличением глубины разработки месторождений. Установлено, что минимальная глубина возникновения горных ударов зависит от величины тектонических напряжений в районе месторождения (рис. 12.9).

Запас потенциальной энергии в массиве  $\Pi$ , приводящий к горному удару, может быть рассчитан по формуле

$$\Pi = 0,5\sigma^2 S [m/E_n + 2a/(2E_p)], \quad (12.28)$$

где  $\sigma$  — наибольшее нормальное напряжение в очаге удара;  $E_n$ ,  $E_p$  — модули упругости полезного ископаемого и вмещающих пород соответственно;  $S$  — площадь разрушения, захватываемая ударом;  $m$  — мощность рудного тела;  $a$  — ширина зоны разгрузки породы при ударе.

Слабые проявления горного удара наблюдаются в виде стрельяния — динамического хрупкого откола от обнажения чешуек породы массой от 0,1 до 10 кг.

Выбросоопасность и удароопасность горных пород в настоящее время оценивают различными критериями в зависимости от принятой физической модели развития выброса или горного удара. По этим категориям осуществляют прогноз потенциальной выбросо- или удароопасности пород (см. разд. 20.4).

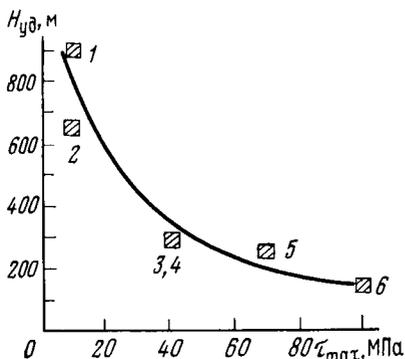


Рис. 12.9. Начальная глубина проявления горных ударов в угольных бассейнах и месторождениях в зависимости от величины тектонических напряжений  $\tau_{max}$ :

1 — Донбасс; 2 — Воркутинский бассейн; 3 — Кизеловский бассейн; 4 — Кузбасс; 5 — Сучанское месторождение; 6 — Шурабское месторождение

## 13. СТРОЕНИЕ, СОСТАВ И СОСТОЯНИЕ РАЗРЫХЛЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

### 13.1. КЛАССИФИКАЦИЯ РЫХЛЫХ ПОРОД

Рыхлые породы подразделяются на естественно рыхлые и разрыхленные в результате ведения горных работ.

Естественно рыхлые (так называемые сыпучие) породы — это, в первую очередь, пески различной крупности.

Разрыхленные (разрушенные) породы в зависимости от степени разрушения делятся на следующие технологические виды:

1. Связновзорванные скальные и полускальные породы — отдельности массива пород, находящиеся в таком состоянии, не разрываются полностью, лишь увеличивается трещиноватость массива и в значительной мере сохраняются силы сцепления между отдельностями. Линейные размеры отдельностей зависят от естественной блочности и могут превышать 1,5 м; средний размер отдельностей достигает 1 м.

2. Крупновзорванные породы — это породы с большими промежутками между блоками и кусками, которые зажаты во взорванной массе. Силы сцепления существуют по неразрушенным природным трещинам в кусках и зацепление — между кусками. Линейные размеры наиболее крупных кусков составляют 1—1,5 м.

3. Мелковзорванные породы характеризуются наличием большого числа промежутков между кусками. Отдельные куски часто зажаты во взорванной массе. Линейные размеры наиболее крупных кусков составляют 0,6—0,7 м.

4. Раздробленные породы — это все взорванные породы, дополнительно раздробленные другими способами, с кусками крупностью не более 0,2 м. Они обладают сыпучестью. Обычно до такой крупности дробят только полезные ископаемые.

5. Мелкораздробленные (щебеночного типа) породы с частицами размером не более 0,1 м, получающиеся в результате дробления и отсева по крупности добытых полезных ископаемых. Породы подчиняются закономерностям сыпучих сред.

6. Разрыхленные мягкие породы, теряющие естественное сцепление. Разрыхленные мягкие породы характеризуются непостоянными показателями трения и сцепления.

### 13.2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СТРОЕНИЯ РЫХЛЫХ ПОРОД

Рыхлые и разрушенные породы описываются особыми характеристиками строения. К ним относятся:

параметры дисперсности: средний диаметр частиц разрыхленной породы; гранулометрический состав; удельная поверхность;

характеристики формы частиц рыхлого материала: соотношение линейных размеров куска; угловое распределение;

параметры укладки, среди которых основной — коэффициент разрыхления.

Средний диаметр частиц  $d_{ср}$  характеризует среднюю крупность горной массы.

Иногда пользуются понятием дисперсности  $D$  — мерой раздробленности рыхлых пород, равной величине, обратной среднему размеру частиц грунта.

Значительно полнее горную массу характеризуют сведения о распределении частиц каждого диаметра в горной массе.

Измеренный количественно выход (по массе, объему или числу зерен) отдельных классов крупности, выраженный в процентах к общей массе, объему или числу, называется гранулометрическим составом породы.

Гранулометрический состав породы изображают в виде кривой на графике, где по оси абсцисс откладывают диаметры частиц  $d$ , а по оси ординат — суммарное содержание (количество, объем или массу) частиц с диаметром, меньшим или равным данному (рис. 13.1).

Для численной оценки неоднородности рыхлых пород по размерам зерен пользуются также отношением, называемым коэффициентом неоднородности,

$$k_{н.р} = d_{60}/d_{10}. \quad (13.1)$$

Здесь  $d_{60}$  и  $d_{10}$  — максимальные диаметры кусков, составляющих соответственно 60 и 10 % общей массы рыхлой породы.

Гранулометрический состав является важнейшей характеристикой рыхлых пород, в значительной степени обуславливающей свойства рыхлой горной массы.

Гранулометрический состав определяет величину свободной поверхности частиц породы.

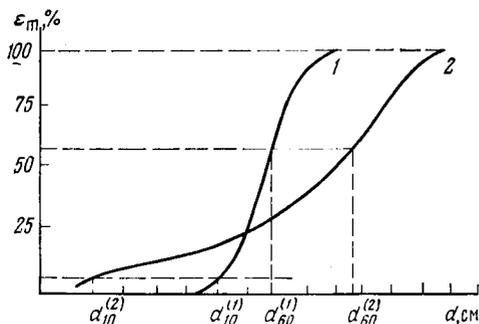


Рис. 13.1. Кривые гранулометрического состава однородной (1) и неоднородной (2) породы

Отношение суммарной площади поверхности  $S_{\text{пов}}$  всех частиц и кусков рыхлой породы к ее объему  $U_{\text{пор}}$  называется удельной поверхностью  $s_{\text{уд}}$ :

$$s_{\text{уд}} = S_{\text{пов}}/V_{\text{пор}}. \quad (13.2)$$

Если считать частицы породы по форме шароподобными с объемом  $V_{\text{шар}}$ , то  $s_{\text{уд}}$  приближенно может быть рассчитана по известному  $d_{\text{ср}}$ .

Так как  $S_{\text{пов}} = \pi d_{\text{ср}}^2 N$ ,

$$N = V_{\text{пор}}(1 - P)/V_{\text{шар}} = 6V_{\text{пор}}(1 - P)/(\pi d_{\text{ср}}^3), \quad (13.3)$$

$$s_{\text{уд}} = 6(1 - P)/d_{\text{ср}}, \quad (13.4)$$

где  $N$  — количество частиц в изучаемом объеме породы  $V_{\text{пор}}$ ;  $P$  — пустотность (внешняя пористость) рыхлой массы пород, доли единицы.

Иногда рассчитывают удельную поверхность на единицу массы породы. Тогда

$$s_{\text{уд}} = 6/(\rho_0 d_{\text{ср}}). \quad (13.5)$$

Формулы (13.4) и (13.5) справедливы для расчета удельной поверхности горной массы, состоящей как из сферических, так и кубических (или близких к ним) зерен одного размера.

Фактически же удельная поверхность пород зависит от распределения частиц по размерам, доли мелких частиц в массе и формы частичек. Так,  $s_{\text{уд}}$  особенно возрастает, если куски породы представлены пластинками или столбиками, т. е. образцами удлиненной формы. На  $s_{\text{уд}}$  оказывают влияние величина и количество ребер граней и вершин в куске. Если форма кусков при последующем измельчении сохраняется, то удельная по-

верхность возрастает меньше, чем при изменении этой формы.

Удельная поверхность кварцевого песка составляет около  $0,27 \text{ м}^2/\text{кг}$ , суглинистой почвы —  $26 \text{ м}^2/\text{кг}$ , плотных глин —  $100 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Объем любой разрыхленной горной породы обусловлен гранулометрическим составом, а также формой и характером укладки кусков и частиц в массе. Так как наряду с общей пористостью внутри кусков горной породы возникает дополнительная пустотность, обусловленная неплотным прилеганием кусков и частиц друг к другу, как правило, объем разрыхленной породы  $V_p$  всегда больше ее объема в плотном неразрушенном состоянии  $V_{п.}$ .

Отношение  $k_p' = V_p/V_{п.}$  называется коэффициентом разрыхления пород.

Коэффициент разрыхления, в первую очередь, обусловлен характером и качеством дробления породы и значительно меньше — типом породы.

Наибольшее влияние на величину  $k_p$  оказывает наличие свободных поверхностей, позволяющих кускам породы перемещаться и свободно укладываться. Для смеси шаров одного и того же размера в бесконечно большой емкости минимальное значение  $k_p$  равно 1,35, а максимальное, при котором смесь остается все еще устойчивой, — 1,9. В связи с этим коэффициенты разрыхления зависят от размеров и формы частиц породы, вместимости и формы емкости, в которую порода погружается (рис. 13.2).

$k_p$  существенно зависит от параметров и условий взрывания, а именно от удельного расхода взрывчатого вещества (ВВ) (рис. 13.3), ширины буровзрывной заходки, схемы короткозамедленного взрывания и т. д. При этом в основном на  $k_p$  сказывается характер укладки различных по классу фракций и почти не сказывается гранулометрический состав.

При наличии одной свободной поверхности коэффициент разрыхления в результате взрыва имеет значение 1,05—1,2, при шести — может достигнуть 2 и более.

Коэффициент разрыхления возрастает при увеличении удельного расхода ВВ — от сотрясательного взрыва до уровня оптимального расхода ВВ. При дальнейшем увеличении расхода ВВ величина  $k_p$  не растет, поскольку энергия ВВ в дальнейшем тратится только на разброс, а не на дробление кусков породы.

Природная трещиноватость сказывается прежде всего на оптимальном удельном расходе ВВ, но непосредственного влияния на величину  $k_p$  практически не имеет.

Анализ соответствующих технологических видов разрыхленных горных пород показывает, что связновзорванные породы имеют небольшой  $k_p$  — 1,03—1,10, крупновзорванные — 1,2—1,3, мелковзорванные — 1,4—1,65, мелкораздробленные — 1,6—1,85.

Разрыхленные мягкие породы имеют коэффициент разрыхления порядка  $1,15 \div 1,30$ .

При укладке рыхлой породы в емкости решающее значение имеет величина соотношения между длиной  $l$  наименьшего ребра сосуда и средней крупностью кусков  $d_{\text{ср}}$  (см. рис. 13.2).

При уменьшении  $l/d_{\text{ср}}$   $k_p$  резко падает, особенно при превышении некоторых критических значений  $l/d_{\text{ср}}$ , величина которых находится в интервале 5—10.

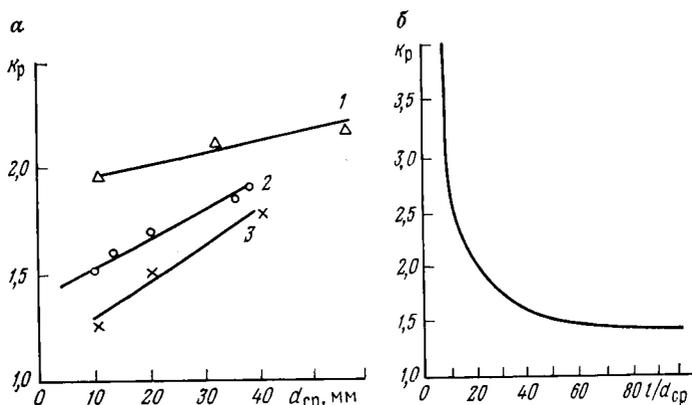


Рис. 13.2. Изменение коэффициента разрыхления  $k_p$ :

а — от величины  $d_{\text{ср}}$  при постоянном гранулометрическом составе (1 — доломитизированные известняки Ковровского карьероуправления; 2 — гранитная щебенка; 3 — экибастузский уголь); б — от отношения минимального линейного размера основания емкости  $l$  к среднему диаметру куска руды  $d_{\text{ср}}$

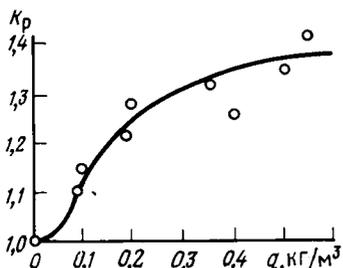


Рис. 13.3. Влияние удельного расхода  $q$  взрывчатого вещества на коэффициент разрыхления горной массы  $k_p$

Исследованиями выявлено, что существует четкая зависимость между коэффициентом разрыхления и таким показателем, как внутренняя удельная поверхность емкости  $S_{\text{уд.е}}$ , куда загружается порода.

Если средний размер кусков породы  $d_{\text{ср}}$  определяется непосредственными измерениями, то, по данным С. В. Ржевской,

$$k_p = 1,71 + 0,27 \operatorname{arctg} (2s_{\text{уд.е}} d_{\text{ср}} - 4) \quad (13.6)$$

Это выражение может служить основой для определения  $k_p$  в любых типах промышленных емкостей, используемых в горном деле, при любых крупностях и гранулометрическом составе разрыхленной горной массы.

Высота емкости  $H_e$  практически не влияет на величину  $k_p$  при соотношении  $H_e/d_{\text{ср}} = 5$  и более. При меньших соотноше-

ниях  $H_c/d_{ср}$  коэффициент разрыхления увеличивается на 10—15 %.

Все это обуславливает непостоянство  $k_p$  при перемещении горной массы из одной емкости в другую. Если одно и то же количество разрыхленной породы, занимавшее в относительно большой емкости объем  $V_0$ , разместить в емкостях меньших

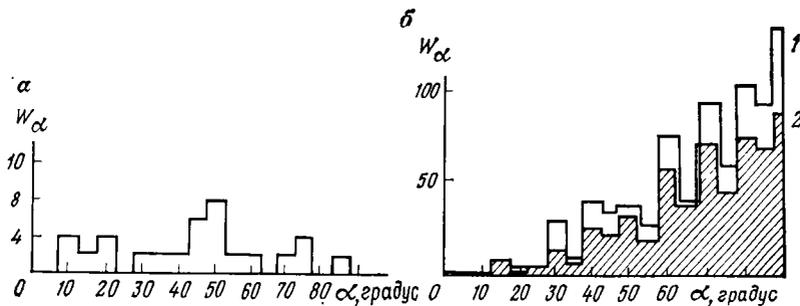


Рис. 13.4. Угловые распределения  $W_\alpha$ :

*a* — для наиболее распространенных систем геологической трещиноватости пород МГОКа; *b* — для фракций железистого кварцита крупностью 35—50 мм (1) и 25—30 мм (2) (по С. В. Ржевской)

размеров, то новый суммарный объем  $V_1$  всех этих емкостей может быть в 1,1—1,4 раза больше исходного.

Увеличение шероховатости и липкости частиц ведет к увеличению  $k_p$ .

При размещении рыхлой горной массы в емкостях на величине коэффициента разрыхления существенно сказывается гранулометрический состав пород (в отличие от коэффициента разрыхления пород при взрыве в свободном пространстве).

Если известна близкая к истинному значению для данного процесса дробления функция распределения гранулометрического состава, то можно отыскать степень измельчения пород, соответствующую минимальному коэффициенту разрыхления.

Гранулометрический состав горной массы, обеспечивающий минимальную величину  $k_p$ , приведен ниже.

Относительный класс крупности по отношению $d_{ср}/d_{max}$	0—0,2	0,2—0,4	0,4—0,6	0,6—0,8	0,8—1,0
Объемное содержание класса крупности, %	40	60	75	90	100

Как уже отмечалось, на рассмотренные характеристики строения, а также физические и технологические параметры пород оказывает существенное влияние форма кусков породы.

В связи с этим при анализе строения рыхлой массы С. В. Ржевской предложено вводить еще два параметра — соотношение линейных размеров куска и угловое распределение.

Соотношение линейных размеров куска — это отношение трех взаимно перпендикулярных размеров куска  $a$ ,  $b$  и  $c$ , взятое как среднее по всей рыхлой массе —  $a/b: 1:c/b$ .

Угловое распределение  $W_\alpha$  — это количественное выражение частоты появления величины конкретного двугранного угла для всех ребер куска разрыхленной горной породы, взятое по всей смеси (рис. 13.4). Угловое распределение зависит от формы частиц рыхлой породы. С увеличением числа граней в частицах средний двугранный угол  $\alpha_{\text{ср}}$  возрастает с  $70$  до  $140^\circ$ ; например, у тетраэдра  $\alpha_{\text{ср}}=70,48^\circ$ ; у октаэдра  $\alpha_{\text{ср}}=109,4^\circ$ .

### 13.3. ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ХАРАКТЕР РАЗРЫХЛЕНИЯ ПОРОД

Степень разрыхления и, следовательно, все параметры рыхлых пород зависят от первичного состояния породы, вида разрыхляющих нагрузок и внешних условий.

По первичному состоянию разрыхляемые объемы пород подразделяют на разрушаемые массивы и разрушаемые отдельности. Разрушаемые массивы, в свою очередь, подразделяют на неоконтуренные и оконтуренные различными горными выработками (этажи, рудные блоки, лавы, уступы на карьерах и т. д.). Неоконтуренные массивы, в свою очередь, разделяют на однородные и разнородные по слагающим их породам.

Разрушаемые отдельности подразделяют на разбитые по плоскостям естественной трещиноватости и разрушенные по новым поверхностям.

Разрушение неоконтуренных однородных массивов дает горную массу с достаточно устойчивым гранулометрическим составом и малым переизмельчением.

Разрушение оконтуренных массивов приводит к разрыхлению с различным фракционным составом в различных зонах и переизмельчением в ряде зон.

При разрыхлении естественных отдельностей сохраняется их форма, а при разрыхлении кусков породы природная форма и отдельности отсутствуют.

Разрыхляющие нагрузки по виду бывают равномерно расщепоченные (например, горное давление), сосредоточенные в точке с передачей усилий разрушения на весь массив, сосредоточенные в малом объеме породы без передачи усилий разрушения на весь массив (бурение), расщепоченные внутренние (термические, остаточные напряжения).

В результате длительного действия внешних расщепоченных сил продукты разрыхления сохраняют форму природных

блоков и отдельностей, фракционный состав относительно однородный, количество переизмельченного материала — минимальное,  $k_p$  имеет минимальное значение.

Воздействие внешних сил, сосредоточенных в точке, ведет, как правило, к большому диапазону фракционного состава. Вблизи действующих сил находится зона переизмельчения, далее расположены зоны мелкого, среднего и крупного дробления. В зонах переизмельчения, мелкого и частично среднего дробления форма частиц и кусков значительно отличается от первичных природных форм отдельностей и блоков.

Важное значение имеет скорость приложения сил. Чем интенсивнее и быстрее прикладывается усилие, тем больше неоднородность гранулометрического состава, неравномерность дробления, выше  $k_p$ .

Воздействие сосредоточенных в объеме породы сил приводит к переизмельчению продуктов малого объема, где действуют силы. Первичные характеристики разрыхляемой породы не сохраняются, коэффициент разрыхления большой.

Воздействие внутренних сил, как правило, приводит к разрушению пород по системам природной трещиноватости, при этом гранулометрический состав продуктов разрыхления сравнительно однороден, продуктов переизмельчения мало. Коэффициент разрыхления меньше, чем при воздействии сосредоточенных внешних сил.

Если разрушаемый объем имеет свободные поверхности, то эффективность разрушения растет практически пропорционально росту числа свободных поверхностей. Количество переизмельченных пород уменьшается с ростом числа свободных поверхностей. Коэффициент разрыхления возрастает примерно на 0,08—0,2 на каждую поверхность, по гранулометрическому составу разрушенная порода становится более однородной. Если разрыхляемый объем предварительно обработан с ослаблением связей между частицами в трещинах, гранулометрический состав еще более однороден.

Процесс разрыхления породы в очень большой степени зависит от соотношения направления действующих сил и направления ослабленных поверхностей в породе. От этого же во многом зависят формы и размеры продуктов разрыхления.

При действии разрушающих усилий, направленных по плоскостям ослабления или параллельно им, разрыхление наиболее эффективно.

Если разрушающие силы действуют перпендикулярно главным плоскостям ослабления в породе, эффект разрыхления будет наименьшим.

## 14. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗРЫХЛЕННЫХ ПОРОД

### 14.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

В связи с тем, что разрыхленные горные породы имеют особое строение, практически все их физические параметры отличаются от параметров твердых кусков пород, из которых состоит горная масса.

Однако кроме количественных изменений параметров наблюдается также изменение сущности некоторых известных характеристик пород. В ряде случаев используют новые, присущие только рыхлым породам физико-технические параметры.

Так, из-за разрыхления пород показатель объемной массы для рыхлой породы оказывается неприменимым. Вместо него пользуются показателем насыпной плотности  $\rho_n$ .

Насыпная плотность  $\rho_n$  — это масса единицы объема рыхлой горной породы в ее насыпном состоянии:

$$\rho_n = M/V_p. \quad (14.1)$$

Насыпная плотность сухой породы всегда меньше (за редким исключением уплотнения в результате разрушения первоначально рыхлых или высокопористых —  $p > 60\%$  — пород) объемной массы  $\rho$  и может быть рассчитана по формуле

$$\rho_n = \rho/k_p. \quad (14.2)$$

Так как  $k_p$  зависит от целого ряда ранее перечисленных факторов, насыпная плотность — величина непостоянная даже для породы одного гранулометрического состава.

Насыпная плотность разрыхленных пород для размеров частиц 5—50 мм находится в пределах 1200—1600 кг/м<sup>3</sup> (табл. 14.1).

Угол естественного откоса  $\varphi_0$  — параметр, присущий только рыхлым породам. Это угол, образованный свободной поверхностью рыхлой горной массы с горизонтальной плоскостью.  $\varphi_p$  — это как бы предельное значение угла внутреннего трения  $\varphi$ . Действительно, если для рыхлой породы построить паспорт прочности — огибающую предельных кругов напряжений Мора, то окажется, что она имеет вид прямой линии (рис. 14.1), исходящей из начала координат (так как для рыхлой породы  $\sigma_p = 0$  и  $\sigma_{сж} = 0$  при  $\sigma_3 = 0$ )

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi. \quad (14.3)$$

При этом угол внутреннего трения  $\varphi$  равен углу естественного откоса  $\varphi_0$  рыхлых массивов, а сцепление  $C = 0$ .

Угол естественного откоса связан с коэффициентом трения и зависит от шероховатости и формы частиц породы, степени

их увлажнения, гранулометрического состава, а также от плотности кусков породы, слагающих горную массу.

Углы естественного откоса песков составляют 19—37°. Пылеватые увлажненные мелкодисперсные породы (пльвуны, болотистый грунт, обводненный лёсс) имеют угол естественного откоса, не превышающий 3—5°.

Таблица 14.1. Значения насыпной плотности щебня при размерах частиц 5—50 мм (по А. М. Викторову)

Порода	Объемная масса $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Насыпная плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент разрыхления $k_p$
Песчаник Донбасса	2,54—2,59	1,28—1,51	1,98—1,7
Известняк доломитизированный	2,22—2,56	1,18—1,36	1,9
Гранит среднезернистый	2,58—2,71	1,37—1,48	1,9—1,8
Гранит мелкозернистый	2,60—2,79	1,36—1,62	1,9—1,7
	2,64	1,26	2,1
Порфирит диабазовый	2,64	1,51	1,7
Песок	—	1,40—1,66	—

С увеличением влажности горной породы до некоторого предела (для угля, например, до 14 %) угол естественного откоса возрастает (увеличивается сцепление между частицами при незначительном увлажнении), а затем уменьшается.

Для разрыхленных пород средний угол естественного откоса в сухом состоянии составляет 32—45°, влажных — 25—40°, а водонасыщенных — 10—25°.

Угол  $\phi_0$  увеличивается также с увеличением крупности и угловатости частиц породы. В результате этого  $\phi_0$  даже для одного и того же сыпучего материала может колебаться в широких пределах.

В определенных условиях рыхлые породы обладают некоторым сцеплением между частицами и соответственно их  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_p$  отличны от нуля.

Так, разнозернистые плотные пески имеют сцепление  $C = 0,03 \div 0,05$  МПа.

Некоторые виды жирных тонкодисперсных глин, пылеватые пески, заторфованные осадки, обводненный лёсс, почвы имеют предел прочности при сжатии  $\sigma_{сж}$  около 0,05 МПа.

В этом случае угол естественного откоса  $\phi_0$  несколько отличается от угла внутреннего трения породы  $\phi$ .

Для влажных рыхлых пород  $\phi$  составляет от 15 до 40°, для сухих сыпучих — 35—60°. С увеличением размеров частиц  $\phi$  увеличивается, однако, незначительно.

Так, при увеличении размеров частиц кварцевого песка от 0,1 до 6 мм (в 60 раз)  $\tan \phi$  увеличивается от 0,6 до 1,1 (т. е. в 1,8 раза), а увеличение во фракции 5—2,5 мм мелкой фрак-

ции кварцевого песка (менее 0,5 мм) приводит к уменьшению  $\operatorname{tg} \varphi$  от 1 до 0,8.

Угол внутреннего трения сыпучих пород с увеличением давления уменьшается (рис. 14.2).

При рассмотрении упругих свойств рыхлых пород обращает на себя внимание практическая невозможность оценить их мо-

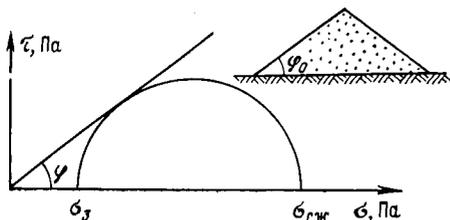


Рис. 14.1. Паспорт прочности рыхлых пород:

$\varphi$  — угол внутреннего трения, равный углу естественного откоса  $\varphi_0$

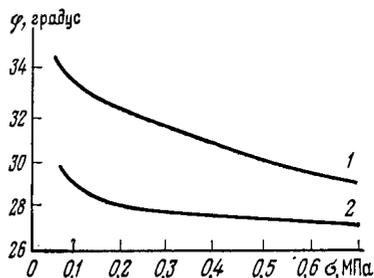


Рис. 14.2. Зависимость угла внутреннего трения  $\varphi$  сыпучих пород от давления  $\sigma$ :

1 — при  $P=58\%$ ; 2 — при  $P=66\%$

дуль упругости на одноосное сжатие и коэффициент Пуассона. В связи с этим для рыхлых пород используют понятие модуля одностороннего сжатия  $M$  — коэффициента пропорциональности между нормальным напряжением и соответствующей ему деформацией при расположении рыхлой пробы в цилиндре с жесткими стенками. Зная  $M$  и  $K$  рыхлой породы, по формулам взаимосвязи параметров упругости можно рассчитать ее модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ :

$$E = 9K(M - K)/(M + 3K); \quad (14.4)$$

$$\nu = (3K - M)/(3K + M). \quad (14.5)$$

Рыхлые породы имеют незначительное сопротивление сдвиговым усилиям, величина которых определяется внутренним трением, поэтому в них, подобно жидкостям, часто распространяются только продольные волны.

Скорости распространения продольных волн в рыхлых породах также очень малы и приближаются к скоростям распространения упругих волн в воздухе (330 м/с).

В рыхлых породах, особенно мелкодисперсных, сильно выражены пластические (точнее квазипластические) и реологические свойства.

Уплотнение рыхлых пород под действием нагрузки может достигать нескольких десятков процентов от исходного объема и характеризуется так называемыми компрессионными кривыми.

Среди горно-технологических параметров рыхлых и связных пород, имеющих особое значение, следует отметить коэффициент набухания, характеризующий способность породы увеличивать свой объем  $V$  при насыщении водой  $V_n$  и коэффициент усадки, оценивающий способность породы уменьшать объем при высыхании  $V_c$ .

Они определяются по формулам

$$k_n = V_n/V; \quad k_y = V_c/V. \quad (14.6)$$

При этом  $k_n \geq 1$ ,  $k_y \leq 1$ .

Набухание происходит в результате проникновения воды между пакетами кристаллических решеток ряда минералов. Коэффициент набухания глин колеблется от 2 до 1,5, супесей — от 1,5—1,05, у песков он равен 1.

Набухание горных пород отрицательно влияет на горные выработки: в сочетании с горным давлением оно вызывает явление пучения и приводит к деформации выработок, разрушению крепи, сдвигению железнодорожных путей и т. д.

Изменение свойств при увлажнении грунтов оценивают также липкостью.

Липкость — способность грунтов и разрыхленных пород при определенном содержании влаги прилипать к поверхности инструмента и оборудования. Сущность прилипания заключается в том, что при определенной влажности толщина пленок воды, обволакивающих частицы грунта, становится такой, что они с одинаковой силой взаимодействуют как с минеральными частицами, так и с поверхностью соприкасающихся с ними предметов. Наибольшая липкость соответствует влажности грунта вблизи молекулярной влагоемкости. Увеличение толщины пленки при дальнейшем насыщении породы водой приводит к резкому уменьшению липкости (рис. 14.3). Липкость оценивается напряжениями, требуемыми для отрыва прилипшего тела от грунта. Липкость грунтов изменяется в пределах  $(0,2—5) \cdot 10^4$  Па. Она зависит не только от свойств грунта, но и от материала и характера поверхности контактирующего тела.

В некоторых породах, содержащих в основном физически связанную воду, при сотрясении происходит преобразование последней в свободную. Это явление носит название тиксотропии. По окончании механического воздействия появившаяся свободная вода трансформируется в физически связанную и восстанавливает структуру грунта.

Тиксотропии подвержены влажные глинистые грунты (особенно монтмориллонитовые), содержащие более 2 % частиц размером менее 2 мкм с довольно высоким пределом текучести. Явление тиксотропии может быть вызвано механическим встряхиванием, вибрацией, ультразвуком, электрическим током.

Целый ряд физико-технических параметров рыхлых пород обусловлен особым состоянием дисперсных частиц.

Как известно, поверхностные слои твердых частиц характеризуются значениями свободной и полной энергии, химическим потенциалом и энтропией.

Реальная свободная поверхностная энергия твердых тел отличается от рассчитанной теоретически в связи с искажением кристаллической структуры, особенно значительным в поверхностных слоях.

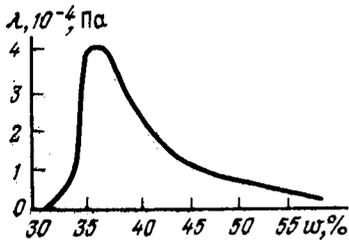


Рис. 14.3. Зависимость липкости  $\lambda$  грунта от влажности  $\omega$  (по В. Я. Калачеву)

При высоких значениях дисперсности и большой удельной поверхности роль этих искажений, а также всех поверхностных эффектов значительно возрастает. Так, в высокодисперсных породах наблюдается явление агрегации (окомкования, слипания). Существенное влияние агрегации на свойства порошковых тел наблюдается при размерах частиц менее 0,15 мкм.

Учет этих эффектов в ряде горно-технологических процессов (например, при измельчении и обогащении) обязателен.

#### 14.2. ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА РЫХЛЫХ ПОРОД

Тепловые свойства рыхлых и разрушенных пород обусловлены как минеральным составом твердых компонент, так и структурой рыхлой системы.

Выделяют две основные разновидности рыхлых пород — ячеистые и зернистые.

Ячеистые породы — это чаще всего связанные горные породы, зернистые породы — сыпучие несвязные. При ячеистом строении рыхлых пород теплопроводность осуществляется в основном через стенки ячеек, при зернистом — через контакты между частицами. Так как рыхлые породы имеют большую пористость, а контакты между зернами слабые, влияние минерального состава породы на теплопроводность такой системы незначительно. Преобладает влияние формы и размеров зерен и пор, плотности их укладки, характера и степени насыщения породы жидкостями. Кроме того, в рыхлых породах доля радиационного теплообмена выше, чем в ненарушенных.

Коэффициент радиационной теплопроводности  $\lambda_p$  пор рассчитывают по формуле

$$\lambda_p = 2\zeta^2 \xi T^3 d, \quad (14.7)$$

где  $\xi$  — степень черноты поверхности пор;  $\xi$  — коэффициент лучеиспускания;  $d$  — средний размер пор.

Как видно из формулы (14.7), с увеличением размеров пор увеличивается коэффициент радиационной теплопроводности и, следовательно, коэффициент теплопроводности всей дисперсной системы. Так, при температуре  $T=0^\circ\text{C}$  для пор размером около 0,1 мм  $\lambda_p=0,024$  Вт/(м·К), а для пор размером около 2 мм — в 12 раз больше [ $\lambda_p=0,31$  Вт/(м·К)].

С уменьшением размеров частиц  $d_{\text{ч}}$ , составляющих скелет разрушенной породы, теплопроводность ее также уменьшается, если все остальные факторы остаются неизменными. Так, если при  $d_{\text{ч}}=5$  мм  $\lambda=1,02$  Вт/(м·К), то при  $d_{\text{ч}}=2$  мм коэффициент теплопроводности уменьшается до 0,14 Вт/(м·К) при постоянной плотности породы 960 кг/м<sup>3</sup>.

Это объясняется уменьшением размеров пор и увеличением числа обладающих пониженной теплопроводностью контактов между зернами.

Уплотнение рыхлых пород приводит к увеличению их коэффициента теплопроводности.

На  $\lambda$  рыхлых пород особенно сильно сказывается их увлажнение (рис. 14.4), так как при этом дополнительно передается тепло за счет конвекции и переноса влаги.

В многофазной пористой и рыхлой среде коэффициент конвективной теплопроводности  $\lambda_{\text{кв}}$  равен сумме внутрипоровой свободной  $\lambda_{\text{св}}$  и вынужденной  $\lambda_{\text{в}}$  конвекции:

$$\lambda_{\text{кв}} = \lambda_{\text{св}} + \lambda_{\text{в}}. \quad (14.8)$$

При этом

$$\lambda_{\text{св}} = \gamma_{\text{т}} \Delta T g \rho^2 P^2 c h / (9 s_{\text{уд}} \eta), \quad (14.9)$$

где  $\gamma_{\text{т}}$ ,  $\eta$ ,  $\rho$  — соответственно коэффициент объемного теплового расширения, динамическая вязкость и плотность жидкости, заполняющей поры;  $\Delta T$  — разность температур в слое толщиной  $h$ ;  $g$  — ускорение свободного падения;  $P$  — пористость,  $c$  — удельная теплоемкость породы;  $s_{\text{уд}}$  — удельная поверхность пор (на единицу объема);

$$\lambda_{\text{в}} = \lambda_{\text{л}} + 4 B v_{\text{м}} c / s_{\text{уд}}, \quad (14.10)$$

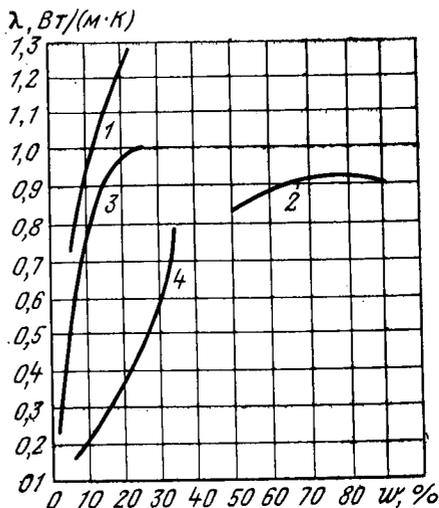


Рис. 14.4. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  рыхлых пород от влажности  $\omega$ :

1 — сулеси; 2 — суглинки; 3 — крупнозернистый песок; 4 — мелкозернистый песок

где  $\lambda_{л}$  — коэффициент конвективной теплопроводности при ламинарном движении жидкости:

$$\lambda_{л} \approx 10,5\lambda_{ж}; \quad (14.11)$$

$B$  — эмпирический коэффициент;  $v_m$  — массовая скорость движения потока жидкости,  $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ .

Количество теплоты, переносимое паром при температурах  $50^\circ\text{C}$  и выше, превышает 10% общего количества переносимой теплоты и не может не учитываться при расчетах.

Процессы совместного распространения тепла и вещества рассматриваются теорией тепло- и массопереноса. При этом дифференциальное уравнение диффузии массы аналогично дифференциальному уравнению теплопроводности.

Закономерностям тепло- и массопереноса подчиняются оттаивание и замораживание пород при ведении горных работ.

Электрическая проводимость рыхлых и несвязных пород в сухом состоянии определяется в основном проводимостью контактов между зернами и зависит от крупности зерен, но почти не зависит от формы порового пространства.

Если сравнивать  $\rho^{\text{с}}$  сухих рыхлых пород с  $\rho^{\text{п}}$  той же плотной породы, то всегда наблюдается значительно большее значение  $\rho^{\text{с}}$ . Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  существенно меньше в рыхлых породах.

Все эти характеристики могут изменяться в другую сторону ( $\rho^{\text{с}}$  может понизиться,  $\epsilon_r$ ,  $\text{tg}\delta$  — значительно возрасти), если рыхлую породу насытить водой.

Воздействие электрического поля на слоистые рыхлые породы приводит еще к одному практически важному явлению — электроосмосу. Электроосмос связан с избирательной адсорбцией частицами породы из растворов ионов одного знака (обычно анионов). В результате водные растворы, находящиеся в поровом пространстве, приобретают противоположный знак и под воздействием внешнего электрического поля перемещаются к электроду (чаще всего отрицательному).

### 14.3. СВОЙСТВА РЫХЛЫХ ПОРОД В МАССИВАХ

Рыхлые породы в массивах часто встречаются попеременно со скальными породами в самых различных сочетаниях.

Такие породные массивы называются разнородными. Физические свойства и состояние разнородного массива пород являются сложными функциями свойств и состояния рыхлых и твердых пород.

Разнородные породы могут быть представлены уплотненными мягкими и сыпучими породами со скальными включениями в виде гравия, валунов, конгломератов, кремнистых или известняковых прожилков и линз, хаотически расположенных

в массиве основной породы. К такому типу относится большинство массивов песчано-гравийных месторождений.

В этом случае определяющую роль играют свойства рыхлой части массива.

Возможен и обратный случай, когда в целом в твердом скальном массиве встречаются включения рыхлых пород, зоны дробленных и измельченных пород и т. д. В этом случае свойства массива в основном определяются свойствами скальной матрицы, однако при конкретном рассмотрении вопросов проходки выработок, обработки отдельных участков месторождения надо ориентироваться на состояние конкретно тех частей массива, которые подвержены действию горных работ.

#### **14.4. О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И НАГРУЖЕНИЯ РАЗРУШЕННЫХ ПОРОД**

Довольно часто рыхлые и разрушенные породы используются в качестве элементов, несущих различные нагрузки. Так, при отвалообразовании отвалы, сложенные рыхлыми породами, должны выдерживать нагрузки от вышележащих слоев, а также от находящихся на их поверхности экскаваторов, транспортных средств, бульдозеров и т. д.

В то же время в классическом понимании нагружения и разрушения скальной породы предполагается, что после наступления напряжений, равных пределу прочности данной породы, она теряет способность сопротивляться внешним нагрузкам. Опыт показывает, что это не так.

Поэтому в настоящее время проводят исследования пород с целью определения их деформационных характеристик за область уже наступившего их разрушения.

Оказывается, что при этом можно дополнить известный график напряжения — деформация нисходящей ветвью за пределами  $\sigma_{сж}$  (рис. 14.5). На основе этого графика выделяют три типа запредельного деформирования пород — плавное снижение несущей способности (прочности) разрушенной породы с увеличением ее деформации, резкое снижение, практически мгновенный спад  $\sigma$ .

Соответственно выделяют определенные параметры пород, характеризующие их состояние запредельного деформирования. К ним относится уровень сохранившейся несущей способности разрушенной породы, равный соответствующим минимальным напряжениям при данной величине деформации, которые порода выдерживает без дальнейшего деформирования и разрушения, — так называемая остаточная прочность  $\sigma_{ост}$ .

Отношение  $\sigma^* = \sigma_{ост} / \sigma_{сж}$ , где  $\sigma_{сж}$  — предел прочности породы при сжатии, характеризует уровень потери несущей способности.

Ниспадающая ветвь на графике  $\sigma$ — $\epsilon$  характеризуется также модулем запредельной упругости  $E_3$  и модулем деформации

$M_0$  при заданном уровне потери несущей способности. Модуль деформации  $M_0$  часто называют модулем спада. Можно также определить другие характеристики упругости пород за пределом прочности, например коэффициент поперечной деформации  $\nu_3$ . Так, алевролит из шахты «Распадская» имеет модуль спада  $M_0$ , равный  $3,4 \cdot 10^4$  МПа, остаточную прочность  $\sigma_{ост}$  порядка 5 МПа.

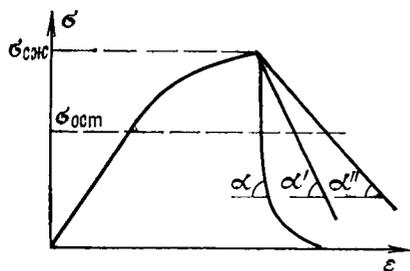


Рис. 14.5. График запредельного деформирования пород:  
 $\text{tg}\alpha$ ,  $\text{tg}\alpha'$ ,  $\text{tg}\alpha''$  — модули спада  $M_0$

Г. Т. Кирничанским установлены следующие связи между параметрами запредельного деформирования:

$$E^* = \sigma^* / (0,35\sigma^* + 0,72). \quad (14.12)$$

$$M_0^* = 0,83\sigma^* + 0,1, \quad (14.13)$$

где  $E^* = E_3 / E_0$ ;  $M_0^* = E_{\text{деф}} / M_0$ .

Параметры запредельного деформирования характеризуют остаточную несущую способность уже разрушенной породы и поэтому имеют весьма важное значение при решении вопросов устойчивости целиков, откосов, уступов, отвалов и т. д.

#### 14.5. МЕРЗЛЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

Понижение температуры ниже  $0^\circ\text{C}$  приводит к смерзанию рыхлых влажных пород. Это, в свою очередь, сказывается на всех физических свойствах породы. По существу, рыхлая порода при этом перестает существовать — возникает особая скальная порода, имеющая в качестве цементирующего вещества лед со своеобразной ледовой (криогенной) текстурой.

Формирование мерзлых пород происходит в результате длительного действия отрицательных температур воздуха на поверхность массива.

Мерзлые горные породы по времени существования разделяют на сезонно-мерзлые и многолетнемерзлые. Многолетнемерзлые, в свою очередь, подразделяются на сингенетические — возникшие в одно геологическое время с образованием самой породы, и эпигенетические — промерзавшие после накопления и формирования толщи пород.

При замерзании влажной дисперсной породы не вся ее влага переходит в лед сразу после  $0^\circ\text{C}$ . Значительная часть ее остается в незамерзшем состоянии. Так, в глинах и суглинках даже при минус  $10$ — $16^\circ\text{C}$  около  $38$ — $40\%$  влаги не замерзает. В общем случае количество незамерзшей воды прямо пропорционально содержанию  $C$  глинистой компоненты в породе (%). Полное замерзание воды наблюдается в мерзлом песке при

$T = -20 \text{--} -30 \text{ } ^\circ\text{C}$ , а в мерзлом каолине даже при  $T = -80 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Поэтому мерзлые породы наряду с показателем общей влажности (независимо от ее агрегатного состояния) характеризуются еще количеством незамерзшей влаги  $w_n$  и льдистостью  $w_l$  (т. е. количеством льда в породе).

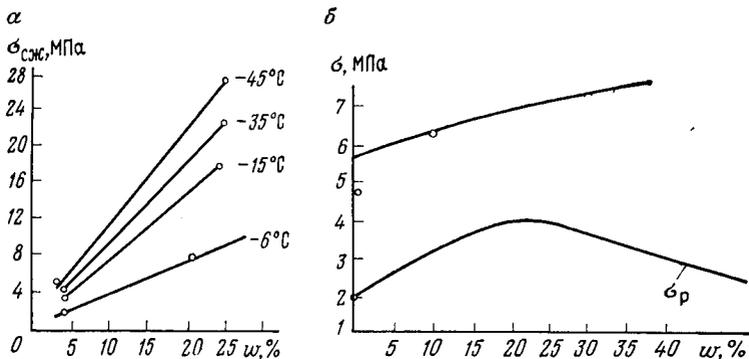


Рис. 14.6. Зависимости  $\sigma_{сж}$  мерзлого песка от влажности  $w$  и температуры (а) и  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_p$  мерзлой глины от влажности  $w$  при  $t = -30 \text{ } ^\circ\text{C}$  (б)

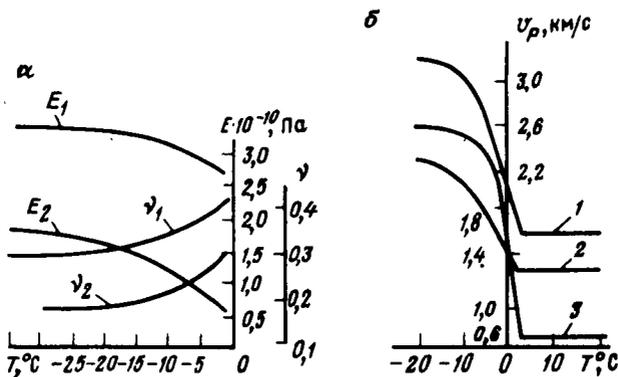


Рис. 14.7. Изменение модуля Юнга  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$  (а) и скорости распространения упругих волн  $v_p$  (б) в рыхлых и связных породах при переходе в область отрицательных температур  $T$ :  $E_1$  и  $\nu_1$  — для влажного песка;  $E_2$  и  $\nu_2$  — для каолина; 1, 2 и 3 — соответственно для песчанника, песка и глины

В зависимости от характера распределения льда в мерзлой породе выделяют три основных типа криогенных текстур: массивную; слоистую и ячеистую.

При этом наименьшей прочностью и наибольшими деформациями обладают глинистые породы, имеющие слоистую криогенную текстуру, а наибольшей прочностью — крупнозернистые песчаные породы со сложной текстурой.

По мере увеличения влажности пород (до полного водонасыщения) и понижения температуры их предел прочности при сжатии существенно возрастает. Прочность мерзлых сыпучих пород становится близкой к прочности плотных и полускальных пород (рис. 14.6).

Если прочность мерзлых песков, супесей и суглинков при

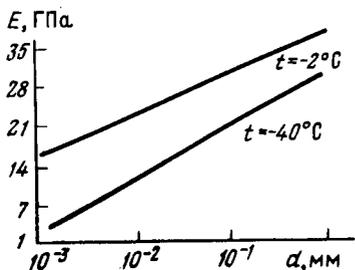


Рис. 14.8. Зависимость модуля Юнга влагонасыщенных мерзлых пород от степени их дисперсности:

$E = k \lg d + E'$ , где  $k = (7,5 + 10) \cdot 10^9$  Па;  $E'$  — модуль Юнга тяжелой глины

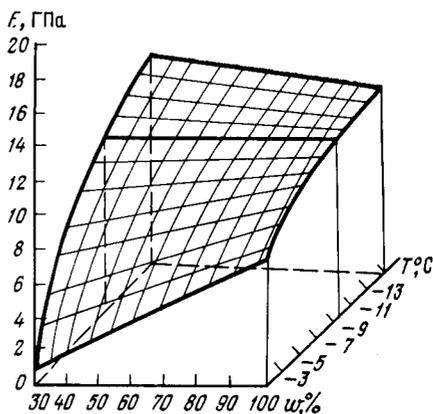


Рис. 14.9. Поверхность изменения  $E$  мерзлого каолина от влажности  $w$  и температуры  $T$  при полном водонасыщении

влажности 20—25 % и температуре  $-1^\circ\text{C}$  составляет 0,5—0,6 МПа, то при температуре  $-40^\circ\text{C}$  она возрастает до 5—6 МПа, у мерзлых глин величина  $\sigma_{\text{сж}}$  достигает 4 МПа.

Дальнейшее постепенное понижение температуры приводит к увеличению прочности мерзлых пород. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, оставшаяся в породах незамерзшая влага постепенно переходит в мерзлое состояние, во-вторых, наблюдается повышение прочности самого льда с понижением температуры, сопровождающееся снижением его пластичности и соответственно возрастанием хрупкости мерзлой породы.

Все упругие свойства рыхлых и связных влажных пород с замерзанием также изменяются. Наблюдается скачок модуля Юнга пород и скоростей распространения в них упругих волн при переходе в область отрицательных температур (рис. 14.7). Коэффициент Пуассона, в свою очередь, при переходе в область низких температур уменьшается. Увеличение размеров зерен, из которых сложена порода, приводит к возрастанию модуля упругости влажной мерзлой породы (рис. 14.8).

Дальнейшее понижение температур приводит к увеличению  $E$  пород. Существенное влияние на рост упругих и прочностных параметров пород оказывает степень их водонасыщения.

При полном влагонасыщении пород увеличение их пористости (т. е. одновременное увеличение влажности и количества льда в составе мерзлой породы) приводит к увеличению  $E$ ,  $K$ ,  $G$  в области относительно высоких температур (примерно  $-6-14^{\circ}\text{C}$ ), а в области низких температур (ниже  $-10-15^{\circ}\text{C}$ ) — к уменьшению параметров упругости (рис. 14.9).

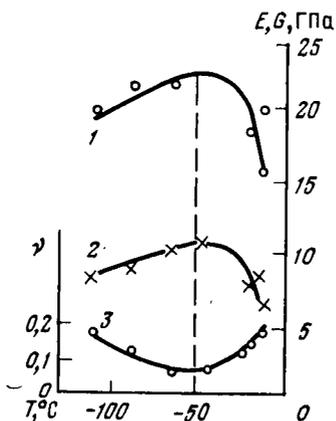


Рис. 14.10. Температурная зависимость  $E$  (1),  $G$  (2) и  $\nu$  (3) мерзлого песка при глубоком охлаждении (по А. Д. Фролову)

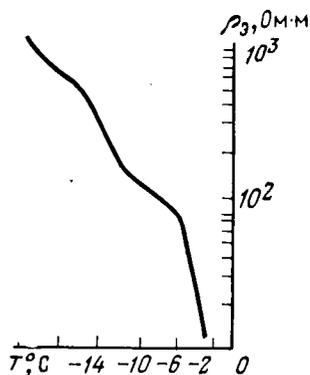


Рис. 14.11. Температурная зависимость  $\rho_0$  мерзлых суглинков

Уменьшение параметров упругости при низких температурах обусловлено снижением общего количества минеральной составляющей в криогенном образовании, обладающей большими значениями параметров упругости, чем лед.

А. Д. Фроловым установлена интересная закономерность изменения параметров упругости мерзлых пород при глубоком их охлаждении (ниже  $-100^{\circ}\text{C}$ ). Оказывается, рост модулей упругости и снижение коэффициента Пуассона наблюдаются лишь до определенных значений температур (так, для мерзлого песка максимум  $E$  и  $G$  находится в области  $-50^{\circ}\text{C}$ ). Дальше происходит снижение  $E$  и  $G$  мерзлых пород (рис. 14.10). Это связано с возникающими на границах минеральных зерен и льда термическими напряжениями, которые при температурах ниже  $-50^{\circ}\text{C}$  приводят к трещинообразованию и растрескиванию пород.

Примерное значение параметров упругости мерзлых пород при охлаждении их до  $-20^{\circ}\text{C}$  приведено в табл. 14.2.

Переход в область отрицательных температур меняет также тепловые и электрические свойства рыхлых пород. Это связано, в первую очередь, с физическими свойствами льда, отличающимися от свойств воды.

Электрическое сопротивление льда значительно больше, чем воды (превышает в 3 раза  $\rho_0$  даже чистой воды). Поэтому при изменении, например, температуры влажного песка от  $+0,5$  до  $-0,5$  °С его удельное электрическое сопротивление увеличивается в десятки раз.

Таблица 14.2. Значения упругих свойств мерзлых пород

Порода	$v_p$ , км/с	$E \cdot 10^{-9}$ , Па	$G \cdot 10^{-9}$ , Па	$K \cdot 10^{-9}$ , Па	$\nu$
Песок влажный ( $\omega = 40\%$ )	3,6—4,2	20—36	8—15	14—19	0,2
Каолин	1,6—3,1	3—13	1—5	4—17	0,3—0,4
Суглинок	0,7—2,5	1—19	1—6	1—17	0,32—0,38
Лед пресный	3,3	8—11	2,5—4	10—12	0,3—0,33

При дальнейшем понижении температуры, как это видно из графика, приведенного для суглинков (рис. 14.11),  $\rho_0$  пород увеличивается на 2—3 порядка.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  и  $\text{tg} \delta$  мерзлых пород с понижением температуры уменьшаются (рис. 14.12).

В связи с этим глубина проникновения электромагнитных волн  $h_{эм}$  в мерзлых породах возрастает. Так, понижение темпе-

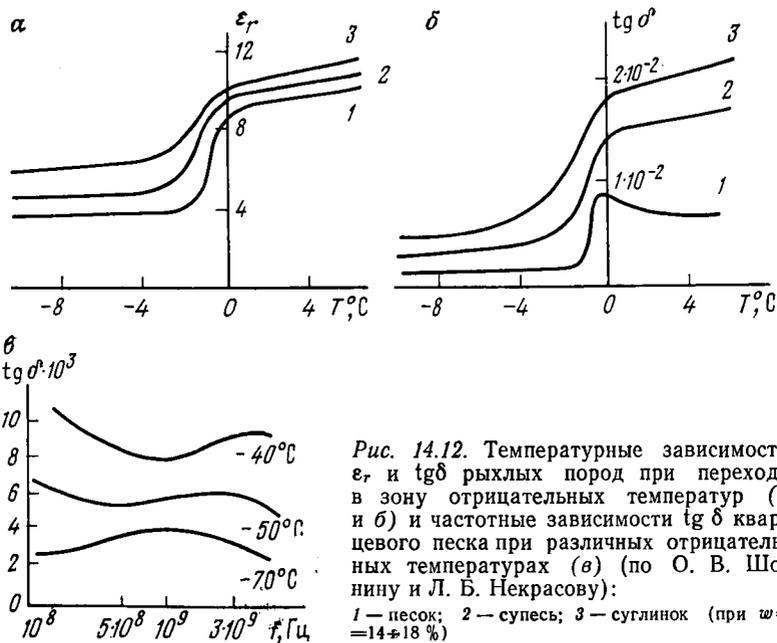


Рис. 14.12. Температурные зависимости  $\epsilon_r$  и  $\text{tg} \delta$  рыхлых пород при переходе в зону отрицательных температур (а и б) и частотные зависимости  $\text{tg} \delta$  кварцевого песка при различных отрицательных температурах (в) (по О. В. Шонину и Л. Б. Некрасову):

1 — песок; 2 — супесь; 3 — суглинок (при  $\omega = 14 \pm 18\%$ )

ратуры влажных песков от 0 до  $-10^{\circ}\text{C}$  (при  $w=15-20\%$ ) приводит к увеличению  $h_{эм}$  в 2—2,5 раза.

Коэффициент теплопроводности при замерзании пород резко возрастает ( $\lambda$  льда больше  $\lambda$  воды в 4 раза), удельная теплоемкость уменьшается ( $c$  льда меньше  $c$  воды в 2 раза).

Это предопределяет весьма высокие значения температуропроводности мерзлых пород.

#### 14.6. МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Неоднократные замораживание и оттаивание приводят в конце концов к остаточным нарушениям в объеме даже скальных пород. Это так называемое морозное выветривание горных пород обусловлено напряженным состоянием пород из-за замерзания воды в порах и трещинах.

При этом одновременно на скелет породы давит как лед, так и оставшаяся незамерзшая вода, сдавливаемая льдом. Установлено, что влияние последнего фактора преобладающее. Давление воды, замерзающей при  $-22^{\circ}\text{C}$  в замкнутом пространстве, составляет около 220 МПа.

Морозостойкость пород — это характеристика сопротивляемости пород разупрочению под воздействием циклического оттаивания и замораживания.

Морозостойкость оценивается коэффициентом морозостойкости  $k_{мст}$ , равным отношению предела прочности пород после 25 циклов замораживания и оттаивания к пределу прочности полностью водонасыщенной исходной породы в условиях положительных температур:

$$k_{мст} = \sigma_{сж}^{(25)} / \sigma_{сж}. \quad (14.14)$$

Если  $k_{мст} > 0,75$ , образец считается морозостойким. Так, например, гранодиориты имеют  $k_{мст} = 144/178 = 0,86$ , известняки — от 0,82 до 0,47.

Довольно часто морозостойкость оценивают количеством циклов замораживания и оттаивания, приводящих к разрушению образца породы. Так, карбонатные породы выдерживают 100—200 циклов, песчаники и порфириты до 400, гравий — от 15 до 300 циклов.

Морозостойкость определяет устойчивость откосов бортов и уступов на карьерах при длительном их стоянии (например, нерабочий борт карьера).

Морозостойкость является важным показателем качества строительных каменных материалов.

## 15. ПРОЦЕССЫ ПОДГОТОВКИ МАССИВА ПОРОД К ВЫЕМКЕ

### 15.1. ОСУШЕНИЕ МАССИВОВ

Обводненность массивов горных пород вызывает снижение их несущей способности, сползание бортов карьеров и отвалов, прилипание и примерзание породы к механизмам, пучение и другие отрицательные явления. Осушением достигается упрочнение горных пород, повышение их устойчивости и т. д.

Так как процесс осушения связан с распространением воды в породах, ее накоплением и удалением из пород, в расчетах систем осушения непосредственно используются гидравлические характеристики пород — коэффициенты фильтрации и водопроницаемости, а также естественная влажность и водоотдача горных пород.

**Расчет процессов осушения.** Предполагаемый водоприток  $Q$  в вертикальную горную выработку рассчитывают, используя коэффициент фильтрации  $k_{\phi}$  горных пород данного месторождения (рис. 15.1):

$$Q = 1,36k_{\phi}(2H - m) m/lg(R/r), \quad (15.1)$$

где  $R$  и  $r$  — радиусы соответственно депрессионной воронки и ствола;  $m$  — мощность напорного водоносного пласта;  $H$  — напор подземных вод.

Водоприток в горизонтальную горную выработку, пройденную в пласте большой мощности, приближенно определяется с учетом коэффициента водоотдачи  $\xi$  по формуле

$$Q = \frac{2\pi k_{\phi} m l h_y}{l \ln \frac{l + vt}{\sqrt{l^2 + 4h^2}} + 2 \left( vt \operatorname{arctg} \frac{l}{vt} - h \operatorname{arctg} \frac{l}{2h} \right)}, \quad (15.2)$$

где  $l$  — половина длины выработки;  $h_y$  — понижение уровня воды;  $\phi = k_{\phi}/\xi$ ;  $t$  — время откачки;  $h$  — глубина заложения выработки от статического уровня воды;  $m$  — мощность водоносного горизонта.

Водоприток в карьер приближенно (в случае безнапорных вод) рассчитывается по формуле

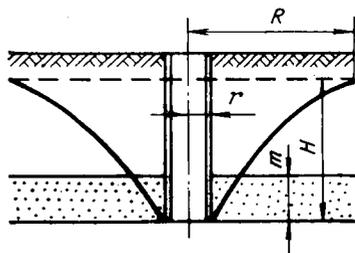
$$Q = 3,14k_{\Phi}(m^2 - H_0^2)/[l_n(R/r_k)], \quad (15.3)$$

где  $H_0$  — давление воды на бортах карьера;  $r_k$  — приведенный радиус карьера.

Фильтрационные характеристики пород применяются также

Рис. 15.1. Схема притока воды в вертикальную выработку, пересекающую напорный горизонт:

$R$  — радиус влияния;  $H$  — напор подземных вод;  $r$  — радиус выработки;  $m$  — мощность водоносного пласта



для расчета площади осушения пород. Так, установившийся радиус депрессионной воронки  $R$  вокруг колодца может быть рассчитан по эмпирической формуле

$$R = 2h_y \sqrt{mk_{\Phi}}, \quad (15.4)$$

Неустановившийся радиус депрессионной воронки

$$R = r_d + 1,5 \sqrt{vh_{cp}t}, \quad (15.5)$$

где  $r_d$  — приведенный радиус реального контура дренажа;  $h_{cp}$  — средняя глубина потока воды при осушении;  $t$  — время осушения.

**Управление фильтрационными характеристиками массивов при водоосушении.** В процессе фильтрации может произойти постепенное заиливание водопроводящих трещин и каналов к скважине и уменьшение водопритоков.

Для восстановления водопритока применяют методы, увеличивающие проницаемость массива пород, — торпедирование, простреливание, гидравлический разрыв пласта, соляно-кислотную обработку скважин и т. д.

Торпедирование заключается во взрывании специальных зарядов взрывчатых веществ (торпед), в результате чего вокруг скважины образуется зона с повышенным коэффициентом фильтрации.

Соляно-кислотная обработка скважин производится в карбонатных породах. Кислота, залитая в скважину, вступает в реакцию с породами, что способствует разглинизации стенок, расширению трещин, образованию каналов выщелачивания. Для обеспечения более глубокого проникновения кислоты в пласт добавляют вещества, замедляющие реакцию нейтрализации

(уксусную кислоту, нитробензол). Действие соляно-кислотной обработки распространяется на глубину 3—4 м и повышает дебит скважины в некоторых случаях до 20—30 раз.

Гидравлический разрыв пласта осуществляют закачиванием в скважину вязкой жидкости (водного раствора сульфата спиртовой барды, соляной кислоты и др.), содержащей значительное количество зернистого песка. При достижении определенного давления в забое скважины жидкость разрывает пласт и увеличивает его водопроницаемость. Зерна песка препятствуют смыканию трещин после прекращения нагнетания жидкости в пласт. Необходимый объем закачиваемой жидкости определяют с учетом коэффициента проницаемости пород.

**Совершенствование физических процессов водоосушения.** Повысить водопиток в породах, обладающих слабой водоотдачей, только путем разрыхления массива невозможно. В этом случае следует использовать физические методы воздействия с целью интенсификации притока воды без изменения коэффициента фильтрации пород, например, воздействие постоянного электрического поля, приводящего к явлению электроосмоса.

Электроосмос целесообразно использовать в глинистых, илестых породах и плывунах, так как они обладают очень малой водоотдачей и фильтрацией ( $k_{\phi} < 0,1$  м/сут). Например, в Подмосковном бассейне использование электроосмоса в сочетании с иглофильтрами привело к росту дебита последних в 4 раза.

## 15.2. РАЗУПРОЧНЕНИЕ ПОРОД

Разупрочнение (ослабление) пород — технологический процесс, применяемый с целью либо исключения буровзрывных работ, либо повышения их эффективности. Ослаблению чаще всего подвергают мерзлые горные породы. Как известно, из-за смерзаемости рыхлых и связных пород вскрышные работы, открытая добыча мягких и влажных руд, глин, песка, гравия в зимнее время затруднены.

Многочерпаковые и роторные экскаваторы, а также бульдозеры и скреперы вообще не способны разрабатывать мерзлую горную породу без предварительной ее подготовки к выемке.

Подготовка горных пород к выемке в зимний период включает три группы мероприятий: предотвращение смерзания пород; оттаивание пород; рыхление смерзшихся пород.

Применение того или иного мероприятия зависит от свойств пород, производительности карьера и применяемых механизмов, характера добываемого полезного ископаемого и климатических условий.

**Расчеты физических процессов ослабления мерзлых пород.** Глубина промерзания породы  $h_m$  зависит от коэффициента теп-

лопроводности массива  $\lambda_m$  и длительности  $t$  действия низких температур:

$$h_m = \sqrt{2\lambda_m(T_0 - T_n)t/Q}, \quad (15.6)$$

где  $T_0$  и  $T_n$  — соответственно исходная температура массива и температура поверхности Земли;  $Q$  — количество теплоты, выделяемой единицей объема породы при промерзании,

$$Q = 0,334\rho_0(\omega - \omega_n); \quad (15.7)$$

0,334 — размерный коэффициент,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $\rho_0$  — плотность породы;  $\omega$  и  $\omega_n$  — исходная (до замораживания) и конечная (после замораживания) влажность пород.

При температуре воздуха минус  $25^\circ\text{C}$  примерно через месяц грунт промерзает до глубины 1,5 м. В то же время механические лопаты с ковшем емкостью 0,5—1  $\text{м}^3$  могут разрабатывать без предварительного рыхления лишь слой мерзлого грунта мощностью не более 0,15—0,25 м, а емкостью 3—4  $\text{м}^3$  — мощностью до 0,5—0,6 м.

Ослабление мерзлых пород осуществляют механическими и немеханическими методами.

Наиболее часто механическое рыхление осуществляют бурозрывными работами, рыхлителями, дизель-молотами и т. д.

При этом в расчетах производительности и параметров рыхления используют соответствующие горно-технологические показатели пород. Так, глубину рыхления определяют с учетом удельного сопротивления породы рыхлению  $K_F$  ( $K_F = 2 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ ).

**Совершенствование процессов ослабления мерзлых пород.** При ослаблении мерзлых пород немеханическими методами используют явления поглощения электрической энергии породой, электрической проводимости породы, теплопередачи и соответствующие тепловые и электрические свойства пород.

Разогрев пород с поверхности при большой глубине нагрева длителен, малопроизводителен и дорог. Так, для оттаивания почвы до глубины 25 см требуется непрерывно поддерживать температуру  $800^\circ\text{C}$  на поверхности породы в течение примерно 10 ч.

Оттаивание пород осуществляют также непосредственным пропусканием электрического тока по разогреваемому участку. На площади карьера, подлежащей оттаиванию, бурят шпуры, в которые помещают электроды так, чтобы их концы находились в талой породе. При подключении напряжения образуется замкнутая электрическая сеть в талой породе, так как электрическая проводимость талой породы во много раз выше, чем мерзлой (рис. 15.2).

Слой, по которому протекает ток, нагревается и передает тепло вышележащему слою, который после оттаивания сам

начинает проводить ток. Постепенно процесс оттаивания достигает поверхности.

Перспективны методы оттаивания током высокой частоты, не требующие бурения шпуров и большого числа электродов (см. рис. 15.2). При этом ток высокой частоты в основном поглощается льдом. Действительно, при температуре  $T_0 = -15^\circ\text{C}$

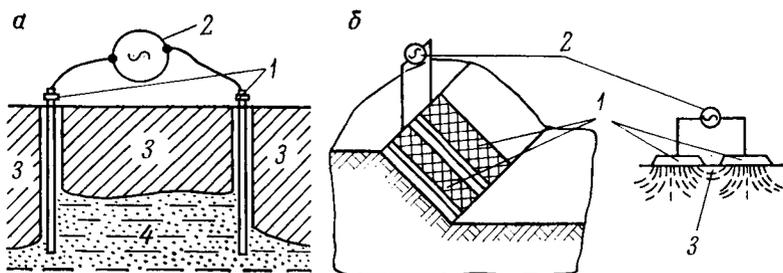


Рис. 15.2. Схемы электрических способов оттаивания грунта:  
 а — токами низкой частоты; б — токами высокой частоты; 1 — электроды; 2 — генератор тока; 3 — оттаиваемый слой; 4 — талая порода

фактор потерь  $\epsilon_r \text{tg} \delta$  льда составляет 2,4, а кварцевого песка — около 0,05.

Общее количество теплоты  $Q_1$ , необходимое для таяния льда, объем которого в породе  $V_{\text{л}}$ , составляет

$$Q_1 = [(T_{\text{пл}} - T_0) c_{\text{вл}} + q_{\text{пл}}] V_{\text{л}}, \quad (15.8)$$

где  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления льда, К;  $c_{\text{вл}} = 2,05 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  — объемная теплоемкость льда;  $q_{\text{пл}} = 330 \text{ МДж}/\text{м}^3$  — теплота плавления льда.

Так как  $(T_{\text{пл}} - T_0) c_{\text{вл}}$  на порядок меньше  $q_{\text{пл}}$ , приравняв  $Q_1 = Q_2$ , где  $Q_2$  — количество теплоты, выделившейся во льду за счет поглощения тока высокой частоты [см. уравнение (8.10)], можно рассчитать время плавления льда:

$$t_{\text{пл}} \approx q_{\text{пл}} / (2\pi f \epsilon_0 \epsilon_{\text{л}} \text{tg} \delta_{\text{л}} f E_{\text{э}}^2) \approx 2,5 \cdot 10^{18} / f E_{\text{э}}^2. \quad (15.9)$$

Комплексный параметр, учитывающий свойства породы и ее компонент, — критерий эффективности нагрева пород  $B$  в случаях, подобных описанному, с учетом дополнительного нагрева минеральной фазы с объемной теплоемкостью  $c_{\text{вл}}$  и объемом  $V_{\text{п}}$  может быть представлен следующим образом:

$$B = 55,6 t_{\text{пл}} E_{\text{э}}^2 = \frac{(T_{\text{пл}} - T_0) (c_{\text{вл}} V_{\text{п}} + c_{\text{вл}} V_{\text{л}}) + q_{\text{пл}} V_{\text{л}}}{\epsilon_{\text{л}} \text{tg} \delta_{\text{л}} V_{\text{л}}} 10^{12}. \quad (15.10)$$

Если же порода сложена из минералов, при которых происходит высокочастотный нагрев как льда, так и вмещающей по-

роды ( $\varepsilon \operatorname{tg} \delta = \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1 \approx \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2$ ), то после расчетов и преобразований получаем:

$$B = \frac{(T_{\text{пл}} - T_0)(c_{V\text{п}} V_{\text{п}} + c_{V\text{л}} V_{\text{л}}) + q_{\text{пл}} V_{\text{л}}}{\varepsilon \operatorname{tg} \delta (V_{\text{п}} + V_{\text{л}})} 10^{12}. \quad (15.11)$$

Ослаблению подвергают не только мерзлые грунты, но и скальные и полускальные горные породы. При этом часто используют увлажнение пород, которое, как известно (см. разд. 8.1), снижает их прочность. На этом явлении основаны методы ослабления угля нагнетанием в пласт воды под давлением через шпуровые или скважинные. Вода, распространяясь по плоскостям напластования и трещинам, раздвигает их, создает дополнительную трещиноватость и снижает прочность угля на 30—40 %. Это, в свою очередь, позволяет увеличить производительность очистных комбайнов, выход крупных фракций угля и на 60—85 % снизить запыленность шахтной атмосферы.

Влияние разупрочняющегося породе действия воды увеличивается при добавлении к ней поверхностно-активных веществ (понижителей твердости), увеличивающих подвижность воды.

Так как этот метод основан на распространении флюидов в породах, расчет его производят с учетом коэффициента фильтрации и влажности горных пород.

Скальные породы можно предварительно ослаблять воздействием постоянного и высокочастотного электрического поля, инфракрасными излучателями и т. д. (см. разд. 8.5 и 8.6).

Эффективность ослабления пород этими методами существенно зависит от состояния породного массива, крупности зерен (чем меньше зерна минералов, тем большая требуется скорость нагрева) и комплекса электрических, тепловых, упругих и прочностных свойств пород.

### 15.3. УПРОЧНЕНИЕ ПОРОД

При упрочнении используют физические явления уплотнения пород в результате тампонажа, искусственного замораживания, химических и электрохимических реакций, плавления, а также воздействия ударных волн.

Тампонаж пород состоит в нагнетании через скважины в закрепляемый массив под давлением тампонажного раствора, способного вытеснить из трещин и пустот воду, заполнить их и затвердеть; по типу используемых растворов тампонаж подразделяют на цементацию, глинизацию и битуминизацию.

В расчетах тампонажа используют плотностные свойства пород и характеристики проницаемости массива. Так, давление нагнетаемого раствора зависит от глубины  $H$  залегания тампонируемого пласта; оно должно быть выше давления  $\gamma H$  на данной глубине и выше давления пластовых вод.

Искусственное замораживание широко используется при проходке шахтных стволов и подземных выработок

в обводненных и рыхлых породах. Его осуществляют через специальные замораживающие колонки и скважины, пробуравленные по контуру замораживаемой выработки.

По колонкам циркулирует хладагент (аммиак, углекислота, фреоны), в результате чего вокруг них происходит замерзание породы.

Размеры ледопородного цилиндра (ограждения) обусловлены требуемой прочностью.

Для ограждения большой (бесконечной) высоты при проходке вертикальных выработок его требуемый внешний  $b$  и внутренний  $a$  радиусы рассчитывают по формуле

$$b/a = \left[ 1 + (\beta - 1) \sigma_{\text{рд}} / (2C \sqrt{\beta}) \right]^{\frac{1}{\beta - 1}}, \quad (15.12)$$

где  $\beta$  — параметр, зависящий от угла внутреннего трения [ $\beta = \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2)$ ];  $\sigma_{\text{рд}}$  — внешнее радиальное равномерно распределенное горное давление (см. разд. 11.2);  $C$  и  $\varphi$  — соответственно сцепление и угол внутреннего трения замороженной породы.

Учет длительности действия нагрузки в расчетах на прочность мерзлых пород особенно важен, так как они обладают ярко выраженными реологическими свойствами. Так, при температуре  $-20^\circ\text{C}$  предел прочности глины при сжатии в первые 10 мин составляет 7 МПа, а после действия нагрузки в течение 24 ч — 4,5 МПа, предел прочности мерзлого песка — соответственно 1,3 и 7 МПа.

Для получения ледопородной стенки требуемой толщины необходимо рассчитать время циркуляции хладагента, которое зависит от тепловых свойств пород — коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости.

Закрепление пород химическим воздействием (силикатизация) заключается в том, что в породу нагнетают два химических раствора (коллоидный раствор силиката натрия — жидкое стекло и раствор хлористого кальция). Растворы вступают в реакцию между собой, в результате которой выделяется гидрогель кремневой кислоты, закрепляющий породу. Получившаяся прочная масса не растворяется в воде.

Силикатизация успешно применяется в среднезернистых плотных породах при  $k_{\text{ф}} = 5-80$  м/сут. Силикатизации не поддаются глины, пльвуны и илы с  $k_{\text{ф}} = 10^{-2} \div 10^{-3}$  м/сут. В лёссовые породы достаточно нагнетать только жидкое стекло, так как лёсс содержит серноокислые соли, которые заменяют раствор хлористого кальция.

Для химического закрепления применяют также другие растворы (карбамидную смолу, менозоль и др.).

Электрохимическое закрепление осуществляют путем пропускания постоянного электрического тока через влажные породы. В результате реакции калий и натрий, имеющиеся в насыщающих породу водах, замещаются водородом и

алюминием или железом и в породе образуются гидраты окиси металлов (например, боксит).

При электрохимическом закреплении глина теряет 30—40 % влаги, существенно возрастает ее предел прочности при сжатии. Грунт приобретает способность не размокать в воде и не теряет прочности после прекращения электрозакрепления.

При электроплавлении водоносные пески нагревают пропусканием электрического тока до температуры 1700—1800 °С, в результате чего песок расплавляется. Остывшая масса образует стекловидное вещество высокой прочности, водонепроницаемое и не разрушаемое агрессивными растворами. Электроплавлением плавунув в Подмосковном угольном бассейне была получена толщина сплавленной корки 60—70 см. Расход электроэнергии составил  $3 \cdot 10^4$  МДж на 1 м<sup>3</sup> расплава.

Уплотнение пород взрывом применяется для создания и одновременно укрепления различных полостей в массивах связных пород — лёссах, глинах и суглинках. Специальные заряды ВВ располагают в скважине на всю длину. Взрыв происходит без выброса породы. При взрыве образуется выемка, диаметр которой в 20 раз больше диаметра скважины. Стенки выемки уплотняются настолько, что она может оставаться без крепления длительное время.

## 16. МЕХАНИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ, ДРОБЛЕНИЕ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

### 16.1. РАБОТА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Разрушение горных пород — основной процесс горного производства. Разрушение происходит при отделении пород от массива механическими и любыми другими способами — при бурении горных пород, их взрывании, дроблении и измельчении на последующих стадиях переработки.

Разрушаемость пород может быть оценена соответствующей работой разрушения; ее величина обусловлена пределами прочности, упругими и пластическими свойствами горных пород.

Расчет работы разрушения породы можно приблизительно подсчитать по графику напряжение — деформация (см. рис. 4.3).

Так, при нагрузках на породу, не превышающих предела упругости, количество накопленной в единице объема породы потенциальной энергии  $e_E$  равно площади, ограниченной кривой и осью деформации. При одноосном сжатии

$$e_E = \sigma \Delta l / (2l) = \sigma^2 / (2E). \quad (16.1)$$

При двухосном сжатии

$$e'_E = [\sigma_2(\sigma_2^{\frac{2}{3}} - 2\nu\sigma_1) + \sigma_1^2] / (2E). \quad (16.2)$$

Если  $\sigma_1 = \sigma_2$ , то

$$e'_E = \sigma^2 (1 - \nu)/E. \quad (16.3)$$

При трехосном сжатии

$$e''_E = [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]/(2E). \quad (16.4)$$

Если  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , то

$$e''_E = 3\sigma^2 (1 - 2\nu)/(2E) = \sigma^2/(2K). \quad (16.5)$$

Из формул (16.1) — (16.5) видно, что при  $\nu = 0,25$  и  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$   $e'_E/e_E = e''_E/e_E = 1,5$ .

Уравнения (16.1) — (16.5) выведены при наличии в породе только нормальных напряжений. Если же имеются касательные напряжения, то в этом случае общее выражение энергии упругодеформированного тела будет иметь вид

$$e'''_E = [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\nu(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x)]/(2E) + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)/(2G); \quad (16.6)$$

Если порода хрупкая, т. е. предел упругости  $\sigma_E$  равен  $\sigma_{сж}$ , то приведенные уравнения пригодны для оценки удельной работы разрушения пород. При этом вместо  $\sigma$  в уравнениях (16.1) — (16.6) подставляют соответствующие пределы прочности горной породы.

Если порода к тому же обладает пластической деформацией, то в этом случае к энергии упругой деформации  $e_E$  добавляются затраты энергии на пластическое деформирование  $e_{пл}$  (см. рис. 4.1):

$$e = e_E + e_{пл}. \quad (16.7)$$

Соответственно работа разрушения при одноосном сжатии

$$e = \sigma_{сж}^2/E_{деф} - \sigma_{сж}^2/(2E). \quad (16.8)$$

Так как  $E_{деф} < E$ ,  $e > e_E$ . Так, если  $E_{деф} = 0,5E$ , то  $e = 3\sigma_{сж}^2/(2E)$ , т. е. удельная работа разрушения пластичной породы превысит работу разрушения хрупкой в три раза (при постоянной прочности и постоянных упругих свойствах породы).

Таким образом, повышение предела прочности пород не всегда затрудняет их разрушение. Высокопрочные, но хрупкие породы значительно легче поддаются динамическому разрушению (например, взрыванию), чем более слабые, но высокопластичные.

Уравнения (16.1) — (16.8) применяют для оценки энергоемкости разрушения при взрывах, бурении, дроблении пород как механическими, так и электрическими и термическими способами.

Однако в данном случае под разрушением понимается простой раскол породы, разделение ее на неопределенное количество частей неопределенного размера. Для расчета работы раз-

рушения в зависимости от степени измельчения пород существуют другие уравнения (см. разд. 16.7).

При разрушении породы в массиве существенно знать строение массива, в частности его слоистость. Работа разрушения породы вдоль слоистости  $A_{\parallel}$  будет всегда меньше таковой поперек слоистости  $A_{\perp}$ ; возможно увеличение работы разрушения  $A_{\perp}$  в 1,8—2 раза по сравнению с  $A_{\parallel}$  из-за различия  $\sigma_{сж\parallel}$  и  $\sigma_{сж\perp}$ .

Полная работа разрушения породы  $A_{\Pi}$  состоит из следующих слагаемых — работы  $A_0$ , идущей на непосредственное создание разрушающих напряжений, и работы, идущей на непроизводительные затраты, связанные с конструктивными особенностями рабочего механизма  $A_K$  и особенностями свойств пород  $A_{\Phi}$ :

$$A_{\Pi} = A_0 + A_K + A_{\Phi}. \quad (16.9)$$

Независимо от метода разрушения при одной и той же степени дробления пород первое слагаемое  $A_0$  в уравнении (16.9) будет постоянно для конкретной горной породы. Оно может быть подсчитано по формулам (16.1)—(16.6).

Пластические деформации приводят к дополнительным затратам работы [см. формулу (16.8)].

Отношение уравнений (16.1) и (16.8) характеризует потери энергии, связанные со свойствами породы при механическом разрушении.

## 16.2. ПОКАЗАТЕЛЬ ТРУДНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Как известно, для относительной оценки добываемости горных пород механическими способами на практике широко пользуются коэффициентом крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова. Однако, этот показатель во многих случаях недостаточен, так как он учитывает только прочность пород при сжатии.

В случае сложного воздействия нагрузок на породы может быть выведен некоторый средний показатель предела прочности при разрушении  $\sigma_{\text{раз}}$ , представляющий собой частное от деления величины суммарных действующих на породу сил  $F_i$  на поверхности разрушения  $\Delta S$ :

$$\sigma_{\text{раз}} = \sum F_i / \Delta S = (F_{\text{сж}} + F_{\text{р}} + F_{\text{сдв}}) / \Delta S \approx k_1 \sigma_{\text{сж}} + k_2 \sigma_{\text{р}} + k_3 \tau_{\text{сдв}}, \quad (16.10)$$

где  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  — доля участия соответственно сжимающих, растягивающих и скалывающих усилий в данном процессе разрушения.

Для общей относительной оценки трудности разрушения пород можно принять условие одинакового участия в разрушении усилий сжатия, сдвига и растяжения.

Тогда

$$\sigma_{\text{раз}} = (\sigma_{\text{сж}} + \sigma_p + \tau_{\text{сдв}})/3. \quad (16.11)$$

В реальных условиях разрушение пород (бурение, взрывание, дробление) всегда сопровождается их перемещением, на что также затрачивается работа. В связи с этим при оценке трудности разрушения пород в технологических процессах необходим учет их объемного веса. В итоге показателем относительной трудности разрушения пород  $\Pi_{\text{тр}}$  может быть выражен следующим образом:

$$\Pi_{\text{тр}} = k_{\text{с.о}} A (\sigma_{\text{сж}} + \sigma_p + \tau_{\text{сдв}}) + B\gamma, \quad (16.12)$$

где  $k_{\text{с.о}}$  — коэффициент структурного ослабления массива;  $A$  и  $B$  — некоторые коэффициенты.

С целью удобства пользования показателем  $\Pi_{\text{тр}}$  коэффициент  $A$  принят равным  $5 \cdot 10^{-8}$ , а коэффициент  $B = 5 \cdot 10^{-5}$  м.

Все породы по относительной трудности разрушения разделены на пять классов и 25 категорий.

I класс — мягкие, плотные и полускальные связные породы ( $\Pi_{\text{тр}} = 1 \div 5$ );

II класс — легкоразрушаемые скальные породы ( $\Pi_{\text{тр}} = 5,1 \div 10$ );

III класс — скальные породы средней трудности разрушения ( $\Pi_{\text{тр}} = 10,1 \div 15$ );

IV класс — трудноразрушаемые скальные породы ( $\Pi_{\text{тр}} = 15,1 - 20$ );

V класс — весьма трудноразрушаемые скальные породы ( $\Pi_{\text{тр}} = 20,1 \div 25$ ).

Редко встречающиеся породы с  $\Pi_{\text{тр}} > 25$  относятся к внекатегорным.

По величине  $\Pi_{\text{тр}}$  можно определить и правильно выбрать способ механизации горных работ, а также виды оборудования для каждого производственного процесса. Однако показатель  $\Pi_{\text{тр}}$  непригоден для расчетов производительности отдельных механизмов и машин. Для этого используются показатели трудности бурения, взрывания, экскавации и транспортирования пород, имеющие единую с показателем  $\Pi_{\text{тр}}$  методологическую основу.

### 16.3. МЕХАНИЧЕСКОЕ БУРЕНИЕ ПОРОД И ИХ БУРИМОСТЬ

Бурение горных пород в процессе разработки месторождений полезных ископаемых осуществляют, в первую очередь, для создания сети взрывных скважин или шпуров. Кроме того, производят еще технологическое и разведочное бурение с целью оценки состояния, состава массивов пород или осуществления определенного воздействия на массив (например, нагнетания жидкостей или, наоборот, осушения месторождения).

В зависимости от характера приложенных в процессе бурения усилий к горной породе и движения рабочего органа (долота) бурового станка различают ударный, вращательный, ударно-вращательный и шарошечный способы бурения. При ударном способе порода разрушается за счет хрупкого откола в результате действия динамических сжимающих нагрузок, на-

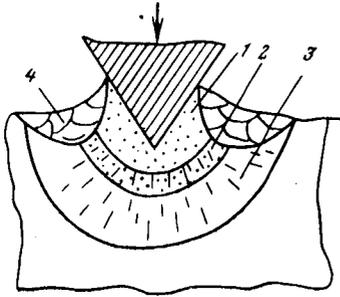


Рис. 16.1. Схема внедрения бурового инструмента в породу:

1 — зона дробления; 2 — зона разрушения; 3 — зона трещинообразования; 4 — зона скола

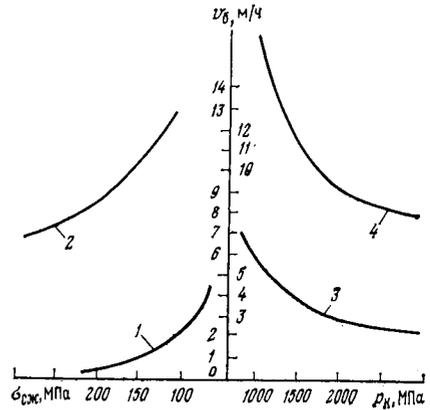


Рис. 16.2. Зависимость скорости бурения  $v_b$  при вращательном (1) и ударно-поворотном (2) бурении от предела прочности пород при сжатии  $\sigma_{сж}$  и при бурении двухшарошечным долотом от контактной прочности пород  $p_k$  при постоянной скорости вращения и усилия подачи  $6 \cdot 10^4$  Н (3) и  $12,5 \cdot 10^4$  Н (4)

правленных перпендикулярно к плоскости забоя. При вращательном способе разрушение породы наступает под воздействием статического усилия резания и скола, направленного под острым углом к поверхности забоя скважины. При шарошечном бурении по забою под давлением перекатываются специальные шарошки, которые осуществляют хрупкое разрушение и скол частиц породы.

Внедрение бурового инструмента в породу сопровождается образованием четырех характерных зон (рис. 16.1). Величина и соотношение этих зон определяют эффективность бурения.

Эффективность бурения взрывных скважин зависит от свойств пород, определяющих их способность разрушаться под действием бурового инструмента; вида и формы бурового инструмента и способа бурения; усилий и скорости воздействия бурового инструмента на забой скважины; диаметра и глубины скважины; способа, скорости и тщательности удаления из забоя скважины буровой мелочи, препятствующей разрушению породы (рис. 16.2).

Расчеты процесса бурения горных пород. Глубина внедрения долота  $h$  с лезвием в виде двустороннего клина, согласно

Н. С. Успенскому, обратно пропорциональна пределу прочности породы при сжатии  $\sigma_{сж}$ :

$$h = \frac{P_{oc} \cos(\alpha/2) \cos f_{тр}}{2d\sigma_{сж} \sin[(\alpha/2) + f_{тр}]}, \quad (16.13)$$

где  $P_{oc}$  — усилие подачи;  $\alpha$  — угол приострения лезвия;  $d$  — длина лезвия долота;  $f_{тр}$  — угол трения долота о породу.

Это уравнение положено в основу расчетов скорости бурения горных пород различными способами.

Так как в процессе бурения разрушение породы происходит с высокой степенью измельчения, а толщина единичного скалываемого слоя сравнима с размером зерен и прослоек в породе, в расчетах бурения перпендикулярно к слоям используют пределы прочности минералов, слагающих горную породу. Учитывая, что процесс бурения должен происходить даже при встрече бурового инструмента с наиболее неблагоприятными по свойствам прослойками, конструктивные расчеты производят по прочности данной прослойки (или минерала, слагающего прослойку).

При расчетах процесса бурения слоистого массива вдоль слоев используют характеристики  $\sigma_{сж}$  и  $E$ , определенные для породы в целом вдоль слоистости, так как в этом случае одностороннее воздействие всегда распространяется на несколько слоев, расположенных перпендикулярно к плоскости забоя скважины.

КПД передачи энергии от инструмента к породе ударом зависит от удельных волновых сопротивлений инструмента  $z_1$  и породы  $z_2$ :

$$\eta = 4z_1z_2/(z_1 + z_2)^2. \quad (16.14)$$

Скорость ударного, вращательного и шарошечного бурения скважин рассчитывают по формулам, куда входят как конструктивные параметры станков, так и свойства пород.

Если в формулах все параметры, относящиеся к конструкции инструмента, объединить под одним коэффициентом  $k$ , то можно выделить комплексы физических параметров породы, которым пропорциональны скорости бурения. Так, для ударного способа бурения:

$$v_y = k_1/[\sigma_{сж}\tau_{сдв} \operatorname{tg}[(\alpha/2) + f_{тр}]}, \quad (16.15)$$

где  $f_{тр}$  — коэффициент трения;  
для вращательного способа бурения

$$v_b = k_2 \cos^2 \varphi/[\sigma_{сж} \sin(\alpha + 2\varphi)]; \quad (16.16)$$

для шарошечного способа бурения

$$v_{ш} = k_3 \sqrt[3]{E/\sigma_{сж}^4}; \quad (16.17)$$

для перфораторного бурения

$$v_{п} = k_4/\sigma_{сж}^{0,59}. \quad (16.18)$$

На основании этих формул можно выявить наиболее благоприятные по физическим свойствам пород области применения каждого способа бурения.

На практике широко используют упрощенные корреляционные зависимости.

Так, установлены различные зависимости скорости бурения от крепости пород.

Например, по П. М. Кошулько, в случае постоянных параметров перфораторов скорость бурения (в мм/мин) перфораторами можно рассчитать по формуле

$$v_m = 415 - 32f + 0,65f^2. \quad (16.19)$$

Скорость бурения бурильным молотком

$$v_m = 2,9 \cdot 10^2 N / [d^2 (f_d + 2,6)], \quad (16.20)$$

где  $N$  — мощность привода бурильного молотка, кВт;  $d$  — диаметр буровой коронки, мм;  $f_d$  — динамический коэффициент крепости.

Скорость бурения (м/мин) пород станками БСШ-1м в зависимости от крепости выражается формулой

$$v_{ш} = 0,64/f - 7,8 \cdot 10^{-3}, \quad (16.21)$$

станками СБШ-250

$$v_{ш} = 0,68/f + 0,03. \quad (16.22)$$

В расчетах используют корреляционные зависимости скорости бурения не только от крепости, но и от других горно-технологических параметров.

Например, выявлено, что скорость бурения перфоратором (см/мин) с однодолотчатой коронкой пропорциональна показателю дробимости пород  $V_{max}$  (по Л. И. Барону):

$$v_n = AnV_{max}^{0,85}/d_{ш}, \quad (16.23)$$

где  $A$  — энергия единичного удара, Дж;  $n$  — частота ударов в минуту;  $d_{ш}$  — диаметр шпура, мм.

Скорость бурения шпуров перфоратором, по В. Г. Паносяну, зависит от контактной прочности  $p_k$  следующим образом (при  $600 < p_k < 1900$  МПа):

$$v_m = (7,2 \cdot 10^{-9} p_k - 2,75)^{-1}. \quad (16.24)$$

Скорость бурения горных пород положена в основу различных классификаций пород по буримости.

Буримость принято оценивать по длине шпура или скважины, пробуренной в исследуемой породе за 1 мин чистого времени бурения в стандартных условиях, или, наоборот, по количеству чистого времени бурения 1 м шпура или скважины при тех же условиях. Кроме свойств пород буримость зависит также от конструктивных особенностей бурового оборудования и режима его работы [см. уравнения (16.15) — (16.18)]. Поэтому

при определении буримости требуется строгое соблюдение стандартных условий — применение определенного инструмента, армированного стандартными сплавами; сохранение определенного диаметра шпура и режима работы инструмента (например, давления в воздушной магистрали при бурении перфораторами).

Значительно более широко применим параметр трудности бурения  $P_6$  рассчитанный аналогично показателю трудности разрушения  $P_{тр}$ .

При относительной оценке пород по трудности бурения учитывается, что в разрушении принимают основное участие сжимающие и скалывающие усилия.

Так как разрушение возможно только при постоянном удалении буровой мелочи забоя скважины, при оценке буримости учитывают удельный вес породы  $\gamma$ .

В итоге

$$P_6 = A (\sigma_{сж} + \tau_{сдв} + B\gamma), \quad (16.25)$$

где коэффициент  $A = 7 \cdot 10^{-8}$ , а  $B = 10^3$  м.

Влияние трещиноватости массива на процесс механического бурения сказывается относительно слабо.

Все горные породы по величине  $P_6$  подразделяются на 25 категорий с выделением пяти классов: легкобуримые ( $P_6 = 1 \div 5$ ), средней трудности бурения ( $P_6 = 6 \div 10$ ), труднобуримые ( $P_6 = 11 \div 15$ ), весьма труднобуримые ( $P_6 = 16 \div 20$ ) и исключительно труднобуримые ( $P_6 = 21 \div 25$ ).

**Расчет оптимальных конструктивных параметров бурового инструмента.** Скорость бурения зависит от правильного выбора различных конструктивных параметров бурового инструмента, которые, в свою очередь, определяются свойствами пород.

Усилие подачи, по Л. А. Шрейнеру, на шарошечное долото  $P_{ос}$  зависит от твердости горных пород:

$$P_{ос} = k_{фк} p_{ш} \Sigma S_k (1 + a/k_{пл}), \quad (16.26)$$

где  $k_{фк}$  — коэффициент, учитывающий влияние факторов, действующих в реальных условиях бурения;  $p_{ш}$  — твердость пород по Шрейнеру;  $\Sigma S_k$  — суммарная площадь опорных площадок зубьев применяемого долота, одновременно контактирующих с породой;  $k_{пл}$  — коэффициент пластичности;  $a$  — коэффициент, равный 1,5—6.

Шаг в шарошечных долотах  $l$ , обеспечивающий наиболее эффективное разрушение породы, по В. В. Царицину, обратно пропорционален пределу прочности породы при сжатии  $\sigma_{сж}$ :

$$l = 4,54 m_0 P_{ос} \operatorname{tg}(\alpha/2) / d \sigma_{сж} \left[ \frac{0,69}{\operatorname{ctg}(\alpha/2)} + \frac{\operatorname{tg}(\alpha/2) + f_{тр}}{\cos(\alpha/2)} \right], \quad (16.27)$$

где  $m_0$  — число шарошек;  $d$  — диаметр долота;  $\alpha$  — угол разрушения горной породы;  $f_{тр}$  — коэффициент трения.

Оптимальная частота вращения  $n_{\text{опт}}$  ( $\text{мин}^{-1}$ ), по О. Д. Алимову, при бурении шпуров вращательным способом обратно пропорциональна крепости пород

$$n_{\text{опт}} = 2200/f. \quad (16.28)$$

Оптимальная длина лезвия  $V_{\text{опт}}$  (мм) при ударном способе бурения зависит от контактной прочности пород  $p_k$ :

$$V_{\text{опт}} = 3629A^{0.5}/p_k^{0.4}, \quad (16.29)$$

где  $A$  — энергия удара, Дж.

Б. А. Симкиным предложена номограмма выбора оптимальных осевых давлений и частота вращения долота при шарошечном бурении (рис. 16.3) в зависимости от крепости пород.

Оптимальный угол поворота  $\beta_{\text{опт}}$  при ударно-вращательном бурении по Э. О. Миндели зависит от предела прочности породы при сжатии  $\sigma_{\text{сж}}$

$$\beta_{\text{опт}} = \alpha (6 \cdot 10^{-2}A - 6 \cdot 10^{-3}A^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}A^3), \quad (16.30)$$

где  $\alpha$  — угол приострения инструмента ( $\alpha = 80 \div 110^\circ$ );

$$A = 10^7 \omega / (\sigma_{\text{сж}} d^3);$$

$\omega$  — энергия единичного удара, Дж;  $d$  — диаметр лезвия долота, см.

Совершенствование способов механического бурения связано с применением дополнительного воздействия на породы жидкостями, упругими колебаниями, динамическими нагрузками и т. д.

Гидравлическое воздействие. Используются явления размокания, адсорбции, частичного растворения пород. С этой целью в скважину добавляют различные смачивающие растворы — поверхностно-активные вещества (ПАВ), обладающие большой адсорбционной способностью. Скорость разрушения пород под действием таких растворов увеличивается на 15—50 % по сравнению со скоростью бурения в обычных условиях.

В песчаниках, сланцах и известняках в качестве ПАВ можно использовать слабые растворы  $\text{NaCl}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{MgCl}$ ,  $\text{NaCO}_3$ , в кварцитах и кварцевых песчаниках — нафтоловое масло.

Иногда целесообразно использовать динамическое воздействие воды. На основе импульсных гидромониторов, создающих компактные водные струи с давлением у сопла, превышаю-

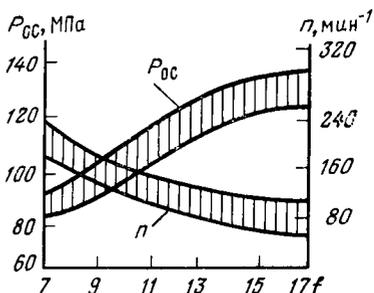


Рис. 16.3. Рекомендуемые осевые давления  $P_{\text{ос}}$  и частоты вращения  $n$  при шарошечном бурении в зависимости от крепости пород  $f$  (по Б. А. Симкину)

щим 100—200 МПа, сконструированы различные гидравлические и механогидравлические буровые установки.

Упругие колебания. Наложение ультразвуковых полей на резец приводит к появлению кавитации в буровой жидкости. На кавитации основана работа ряда экспериментальных ультразвуковых буровых установок.

При наложении упругих колебаний на резец скорость резания пород увеличивается не только в результате кавитации, но и за счет дополнительных динамических усилий и снижения сил сопротивления движению резца. В итоге происходит виброинтенсификация процесса и скорость бурения увеличивается в 2—6 раз.

Ударные волны. Динамическое воздействие позволяет сосредоточить в единичном ударе большие мощности. На этой основе созданы установки взрывного бурения.

Процесс бурения такими установками происходит следующим образом. В специальной камере вблизи забоя скважины формируются микрочастицы из жидких или твердых взрывчатых смесей и затем эти микрочастицы направляются в забой скважины, при соударении с которым они взрываются. Такие микровзрывы дробят крепчайшие породы и способны весьма быстро образовывать скважину требуемого диаметра и глубины.

#### 16.4. ВЗРЫВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД, ВЗРЫВАЕМОСТЬ

(Взрывание — наиболее распространенный в настоящее время способ разрыхления скального массива пород.)

Взрыв осуществляют разнообразными взрывчатыми веществами (ВВ). Разрушение пород при взрыве происходит в результате совокупного воздействия расширяющихся продуктов взрыва (газов), детонации, ударных волн и волн разгрузки. Влияние того или иного фактора на разрушение пород взрывом определяется величиной их удельного волнового сопротивления — акустической жесткости (табл. 16.1).

Расширяющиеся газы разрушают породу непосредственно в месте закладки ВВ. Одновременно они передают энергию взрыва в массив. Коэффициент передачи энергии взрыва в массив составляет 0,4—0,6. Энергия в массиве вблизи заряда распространяется в виде ударной волны.)

Ударные волны отличаются от упругих тем, что деформации и напряжения, вызванные ими, превосходят предел упругости и достигают пределов прочности пород. Скорость распространения ударной волны выше скорости продольной упругой и составляет  $(1,1 \div 1,3) v_p$ .

С удалением от заряда ударная волна переходит в упругую волну, распространяющуюся со звуковой скоростью.

При взрыве в радиусе действия ударной волны образуется зоны сжатия, в которой порода либо переизмельчается (скальные и полускальные породы), либо уплотняется (часть плотных

и мягкие глинистые породы, рис. 16.4). При этом преодолевается сопротивление породы силам сжатия и сдвига. При взрывном дроблении массива скважинными зарядами радиус зоны сжатия составляет  $(1 \div 7,5)$  диаметра заряда  $d_z$ .

За зоной сжатия расположена зона трещинообразования; радиус ее при скважинных зарядах составляет  $(20-50) d_z$ .

Таблица 16.1. Механизм разрушения пород взрывом

Акустическая жесткость $z \cdot 10^{-6}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Порода	Основной фактор, вызывающий разрушение
0,2—5	Рыхлая и связная	Расширяющиеся газы
5—15	Полускальная	Ударные и упругие волны и газы
15—25	Скальная	Ударные и упругие волны (прямые и отраженные)

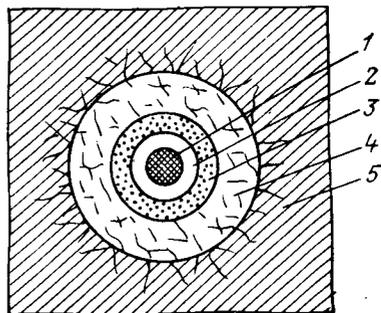


Рис. 16.4. Зоны взрыва:

1 — заряд ВВ; 2 — газовая полость; 3 — зона сжатия; 4 — зона трещинообразования; 5 — зона сотрясения

Здесь энергия взрыва расходуется на преодоление сопротивления породы сдвигу, растяжению и частично сжатию. За зоной трещинообразования расположена зона сотрясения, которая с удалением от заряда переходит в зону упругих деформаций. Зоны сжатия и трещинообразования образуют вместе зону регулируемого дробления. В зоне сотрясения также частично происходит разрушение пород по естественным трещинам (без дробления отдельностей массива) — это зона нерегулируемого дробления. При взрывных работах стремятся максимально увеличить зону регулируемого дробления путем управления действием взрыва.

Так как взрыв воздействует практически одновременно на большой массив породы, в расчетах процесса взрывания используют физические параметры массива. При этом совершенно обязателен учет анизотропии массива.

Если взрыв производят, например, в скважинах, пробуренных перпендикулярно к слоистости, то сдвиг происходит вдоль слоев, а отрыв — перпендикулярно к слоям. Поэтому в расчетах применяют  $\tau_{сдв}$  и  $\sigma_{р.1}$ .

Кроме того, так как процесс взрывания динамический, то и физические параметры должны быть динамическими (например,  $E_d$ ,  $\sigma_{сж}^{МГН}$  и т. д.).

В простейшем случае удельную работу разрушения пород взрывом можно представить в следующем виде:

$$e = k_{пл} \sigma_p^2 / (2E) + k_{пл} \tau_{сдв}^2 / (2G) = k_{пл} [\sigma_p^2 + 2(1 + \nu) \tau_{сдв}^2] / (2E), \quad (16.31)$$

где  $k_{пл}$  — коэффициент пластичности породы;  $k_{пл} = (2E - E_{деф}) / E_{деф}$ .

Так как  $\tau_{сдв} > \sigma_p$ , эффективность разрушения взрывом в основном определяется пределом прочности породы при сдвиге. Минимальная энергоемкость разрушения при взрыве наблюдается тогда, когда сдвиг происходит вдоль слоистости, ибо  $\tau_{сдв} \parallel < \tau_{сдв} \perp$ .

Сопротивление пород действию взрыва принято оценивать удельным расходом взрывчатого вещества  $q$  (кг/м<sup>3</sup>) — количеством ВВ, необходимым для разрушения 1 м<sup>3</sup> породы.

В практике производства горных работ выделяют заряды, образующие воронку нормального выброса (в результате взрыва из воронки удаляется вся порода), и заряды, приводящие к нормальному дроблению (порода дробится в объеме воронки, но не выбрасывается).

Удельный расход ВВ в последнем случае составляет 1/3 удельного расхода ВВ при зарядах нормального выброса.

Для определения удельного расхода ВВ применительно к конкретным породам используют различные шкалы и классификации пород по взрываемости, например, шкалу Союзвзрывпрома, в которой породы разделены на 16 категорий по удельному расходу аммонита № 9, создающему воронку нормального выброса.

Широко известна также Единая классификация пород по буримости и взрываемости проф. А. Ф. Суханова.

Аналогично показателю трудности разрушения (см. разд. 16.2) можно рассчитать некоторый эталонный удельный расход ВВ по известным значениям прочности и объемного веса пород. При этом принято, что доля участия сжимающих, сдвигающих и растягивающих напряжений в дроблении одинакова, а расход энергии на перемещение взорванной массы пропорционален объемному весу пород.

Эталонный удельный расход ВВ  $q_0$  для большинства взрываемых горных пород изменяется от 50 до 500 г/м<sup>3</sup>, достигая для внекатегорных пород 700 ÷ 1000 г/м<sup>3</sup>.

**Расчет процессов взрывания.** В расчетах взрывания удельный расход ВВ является основной используемой физико-технической характеристикой горных пород. Поэтому большое значение имеет правильный расчет  $q$  пород с учетом всего комплекса физических параметров, определяющих его величину.

Общую массу требуемого заряда ВВ  $m$  определяют в зависимости от типа заряда по различным формулам.

Так, при сосредоточенных зарядах расчеты ведут исходя из предположения, что при взрыве образуется воронка нормального выброса. Если радиус воронки  $r$  равен ее глубине, то ее

объем примерно равен  $r^3$ . В данном случае  $r$  — это кратчайшее расстояние от центра заряда до ближайшей обнаженной поверхности, называемое линией наименьшего сопротивления  $W$ . Поэтому общая масса заряда

$$m = f(n) q W^3, \quad (16.32)$$

где  $f(n) \leq 1$  — функция показателя действия взрыва ( $n = r/W$ ).

Для заряда выброса  $f(n) = 1$ , для заряда дробления  $f(n) \approx 0,33$ .

При расчете удлинненных зарядов, расположенных параллельно обнаженной поверхности, используют формулу Г. П. Демидюка и П. П. Назарова

$$m = f(n) q (W^2 l + W^3), \quad (16.33)$$

где  $l$  — длина заряда.

При взрывании серии удлинненных зарядов массу заряда рассчитывают по объему породы, разрушаемой одним зарядом:

$$m = q W a H, \quad (16.34)$$

где  $a$  — расстояние между смежными удлинненными зарядами, м;  $H$  — высота уступа, м.

Далее, по удельному расходу ВВ  $q$  определяют: мощность взрываемого слоя

$$K_{ВВ} = \sqrt{2G/q(3-q)}, \quad (16.35)$$

где  $G$  — масса ВВ, размещаемого в 1 м скважины, кг; расстояние между зарядами в ряду

$$a = (0,7 \div 0,9) \sqrt{G/q}; \quad (16.36)$$

длину перебура

$$l_{пер} = 0,5qa; \quad (16.37)$$

ширину развала взорванной массы

$$B = 5q \sqrt{W l_3}, \quad (16.38)$$

где  $l_3$  — длина заряда.

Подобным образом определяют линию наименьшего сопротивления (л. н. с.), длину заряда, глубину скважины и т. д.

В настоящее время в расчетах взрывных работ все шире используют непосредственно свойства пород.

Так, установлено, что величина л. н. с.  $W$  для одиночной скважины должна быть обратно пропорциональна  $\sqrt{\sigma_p}$  породы

$$w = 0,8r_0 D_{ВВ} \sqrt{\rho_{ВВ}/\sigma_p}, \quad (16.39)$$

где  $r_0$  — радиус скважины;  $D_{ВВ}$  и  $\rho_{ВВ}$  — соответственно скорость детонации и плотность ВВ.

Радиус зоны трещинообразования  $R_{тр}$  при взрыве скважины рассчитывают по формуле, куда входят  $E$ ,  $\sigma_{сж}$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  пород:

$$R_{тр} = R_0 \left( \frac{\rho_0 D^2}{8P_\sigma} \right)^{\frac{1}{6}} \left[ \frac{E}{8\sigma_{сж}(1-\nu)} \right]^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\nu}{(1-\nu)} \cdot \frac{\sigma_{сж}}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (16.40)$$

где  $R_0$  — начальный радиус зарядной полости;  $D$  — скорость детонации;  $P_\sigma$  — максимальное давление в полости взрыва.

При короткозамедленном взрывании (взрывании серии или отдельных зарядов с интервалами в тысячные доли секунды) производят расчет интервала замедления, обеспечивающего максимальное дробление породы.

Экспериментально установлена следующая эмпирическая зависимость интервала замедления  $t$  от акустической жесткости  $z$  пород:

$$t = 31,5W/\sqrt[4]{z} - 6\sqrt[4]{z} + 9,6.$$

(16.41)

Величина  $z$  выражается в  $\text{т}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Одна из основных задач буровзрывных работ — это обеспечение оптимального куска разрушенной взрывом породы. Несмотря на то что в результате более мелкого дробления пород в массиве повышается стоимость буровзрывных работ, стоимость всех остальных технологических процессов (рис. 16.5) существенно снижается.

Применяют различные методы расчета оптимального размера куска проектируемого взрыва.

**Совершенствование способов взрывания горных пород** идет, в первую очередь, по направлению улучшения качества дробления горной породы. При этом применяют различные предварительные воздействия на массивы пород перед взрыванием. Так, установлено, что на качество взрывной отбойки пород влияет их увлажнение поверхностно-активными веществами. Увлажнение массива  $w$  пород от 6 до 20 % приводит к уменьшению выхода негабарита размером +300 мм до 5—12 % (вместо 8—16 %), а куски размером свыше 1000 мм вообще не встречаются.

На Алтын-Топканском руднике при проходке горных выработок в процессе бурения шпуров в качестве промывочной жидкости использовался раствор ПАВ (0,8 %). Только это по-

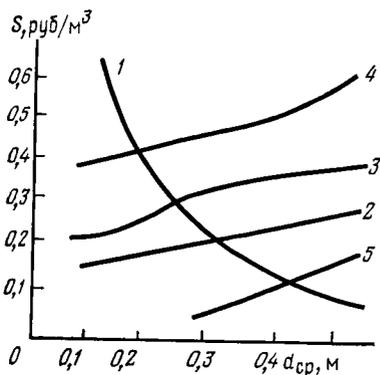


Рис. 16.5. Зависимость затрат  $S$  от среднего размера  $d_{ср}$  куска руды:

1 — на буровзрывные работы; 2 — на экскавацию; 3 — на автотранспорт; 4 — на дробление на дробильной фабрике; 5 — на вторичное дробление (по Н. В. Василец)

звонило уменьшить количество шпуров в забое с 30 до 26, повысить глубину заходки, на 13 % снизить расход ВВ. В целом затраты на проведение 1 м выработки снизились на 12 %.

#### 16.5. ВЫЕМКА, МЕХАНИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ПОРОД ОТ МАССИВА, ЭКСКАВИРУЕМОСТЬ

Скальные породы после их разрушения в результате вышерассмотренного буровзрывного процесса подвергаются выемке из забоя различными выемочными машинами и агрегатами.

Рабочий орган выемочной машины внедряется в разрыхленную массу пород, преодолевая остаточные силы сцепления, трения и силы зацепления между кусками породы.

При этом основное значение имеют размеры кусков  $d$  взорванной массы пород (рис. 16.6) и ее объемный вес  $\gamma$ .

Связность взорванной породы обратно пропорциональна ее коэффициенту разрыхления  $k_p$ . Поэтому  $k_p$  входит в формулу расчета параметра трудности экскавации разрушенных скальных горных пород  $P'_3$ :

$$P'_3 = 2,2 A (1 + 10 k_p^{-9}), \quad (16.42)$$

где  $A$  — коэффициент;  $A = 10^{-4}(\gamma d_{cp} + 10^{-4} \tau_{сдв})$ ;  $\tau_{сдв}$  — предел прочности разрыхленной породы при сдвиге, обусловленный сцеплением, трением и зацеплением кусков породы.

$P'_3$  пород меняется от 3 до 30.

Связные рыхлые, некоторые полускальные и ряд мерзлых пород отделяют от забоя непосредственно выемочными агрегатами без их предварительного рыхления. Например, подавляющее большинство угля на шахтах добывается очистными комбайнами или стругами без проведения взрывных работ.

При этом режущая кромка или зуб агрегата (скрепера, бульдозера, экскаватора, врубной машины, очистных и проходческих комбайнов и струговых установок) под действием статических или динамических усилий внедряется в массив и скалывает (или срезает) относительно небольшие куски (стружки) от массива.

Основные разрушающие усилия в этом процессе — сжимающие и сдвигающие.

Режущие органы скрепера, бульдозера, экскаватора, имеющие заполняющуюся породой емкость, затрачивают работу на преодоление:

сопротивления породы резанию

$$A_1 = alm; \quad (16.43)$$

силы тяжести породы

$$A_2 = klm \gamma H; \quad (16.44)$$

силы трения породы о режущую кромку и стенки ковша и между собой

$$A_3 = f_{\text{тр}} A_2, \quad (16.45)$$

где  $l$  и  $t$  — соответственно ширина и толщина срезаемой стружки, м;  $H$  — высота заполнения ковша, м;  $a$  — удельные усилия резания, Н/м;  $k$  — коэффициент, учитывающий высоту подъема породы, м;  $f_{\text{тр}}$  — коэффициент трения породы.

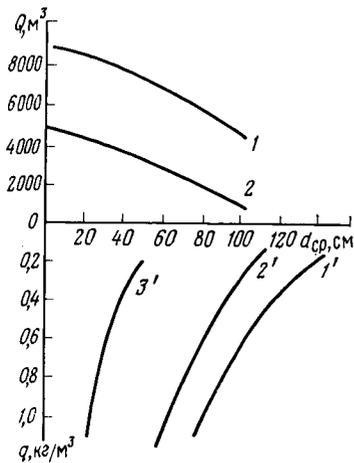


Рис. 16.6 Зависимость сменной производительности  $Q$  экскаваторов ЭКГ-20 (1) и ЭКГ-8 (2) от размера кусков горной массы и зависимость  $d_{\text{ср}}$  от удельного расхода ВВ  $q$ : 1' — трудновзрываемые породы; 2' — средневзрываемые; 3' — легко-взрываемые (по Н. Я. Репину)

Удельные усилия резания  $a$  — это параметр, определяющий величину усилий, требуемых для резания пород в массиве и приходящихся на единицу длины лезвия (Н/м).

Удельные усилия резания для мягких углей составляют в среднем  $1,5 \cdot 10^5$  Н/м, для крепких углей —  $4,5 \cdot 10^5$  Н/м.

Форма поперечного сечения стружек (тел выкола) и их фактические размеры зависят от схемы выемки, типа и структуры пород.

Сопротивляемость пород при их выемке экскаваторами принято характеризовать величиной удельного сопротивления копания  $K_F$ .

$$K_F = F_k / S, \quad (16.46)$$

где  $F_k$  — касательная сила сопротивления породы копанию, Н;  $S$  — площадь поверхности отрыва,  $\text{м}^2$  ( $S = B_k h$ );  $B_k$  — ширина ковша;  $h$  — глубина внедрения ковша в породу при копании, м.

Удельные сопротивления копанию зависят, в первую очередь, от прочностных параметров и плотности породы. При выемке механической лопатой рыхлых сухих песков  $K_F = (0,16 - 0,25) \cdot 10^5$  Па, у тяжелых влажных глин  $K_F = (2 \div 3) \cdot 10^5$  Па, у полускальных пород в пределах одного структурного блока  $K_F$  достигает 1 МПа. При  $K_F < 1,2 \cdot 10^5$  условия копания легкие, при  $K_F > 2,8 \cdot 10^5$  — тяжелые.

По Ю. И. Белякову,  $K_F$  зависит от сцепления пород  $C$ :

$$K_F = (1,54 C + 1,7 \cdot 10^5) \mu_3, \quad (16.47)$$

где  $\mu_3$  — коэффициент, учитывающий тип экскаватора ( $\mu_3 < 1$ ).

Удельное сопротивление копанию мерзлых мягких и плотных, а также промерзших полускальных пород значительной влажности ( $\omega > 12\%$ ) в несколько раз выше, чем этих же по-

род в талом состоянии, и зависит от глубины промерзания  $h_{\text{пр}}$  массива.

Величина  $K_F$  определяет относительную продолжительность рабочего цикла экскаваторов.

На величину  $K_F$  влияют тип применяемой выемочной машины, геометрия и емкость исполнительного органа. Например, при выемке суглинков и легких глин мехлопатовой величиной  $K_F$  находится в пределах  $(0,6—1,3) \cdot 10^5$  Па, скрепером —  $(0,95—1,8) \cdot 10^5$  Па, роторным экскаватором —  $(1,5—2,9) \cdot 10^5$  Па.

Для сопоставления невзорванных пород по экскавируемости на основе их физических свойств вместо  $K_F$  используют относительный показатель трудности экскавации породы  $P_n$ , определяемый по формуле

$$P_n = [0,3 k_{c.o} (0,2 \sigma_{сж} + \tau_{сдв} + \sigma_p) + 300 \gamma] \cdot 10^{-6}, \quad (16.48)$$

где  $k_{c.o}$  — коэффициент структурного ослабления пород массива в направлении экскавации.

Для агрегатов, режущими органами которых являются зубья и резцы (врубные машины, комбайны и т. д.), суммарное сопротивление резанию  $F_p$ , действующее на зуб, определяют с учетом удельных усилий резания  $a$  и коэффициента трения  $f_{\text{тр}}$  породы:

$$F_p = H k_{\text{фр}} a (1 + k_3 f_{\text{тр}}), \quad (16.49)$$

где  $H$  — глубина резания, м;  $k_{\text{фр}}$  — коэффициент формы поверхности угольного забоя, м;  $k_3$  — коэффициент зацепления зуба.

Параметры  $H$ ,  $k_{\text{фр}}$  и  $k_3$  характеризуют конструктивные и технологические особенности машины, параметры  $a$  и  $f_{\text{тр}}$  — свойства горной породы.

**Совершенствование методов отделения пород от массива.** Поскольку прочность пород при растяжении значительно меньше, чем при сжатии, целесообразно создавать механизмы, разрушающие породы за счет растягивающих напряжений. Разрабатываются, например, методы отрыва угля и пород от массива специальным рабочим органом — отрывником, введенным в заранее прорезанную в забое щель. Оптимальная толщина отрываемого слоя составляет 13—18 см. При таком способе разрушения углей достигаются большая кусковатость и малое пылеобразование при весьма низких энергозатратах.

Методы выемки пород совершенствуют наложением на исполнительные органы динамических усилий, упругих колебаний и т. д.

Разработаны угольные комбайны динамического действия, способные осуществлять откол от массива крепких каменных углей и антрацитов.

Упругие колебания инфразвуковой и звуковой частот используют в конструкциях породопогрузочных машин,

имеющих вибрирующие лезвия. В результате рабочие усилия внедрения ковшей в рыхлую массу снижаются в 3—4 раза, а производительность машин увеличивается на 20 % и более. Применение вибрации в гребковом рабочем механизме увеличивает его производительность до 60 %.

## 16.6. ПРОЦЕССЫ ВТОРИЧНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ДРОБЛЕНИЯ ПОРОД В ЗАБОЕ

Использование разнотипного оборудования для выемки, перемещения и дробления разрушенных пород накладывает определенные ограничения на максимальные линейные размеры

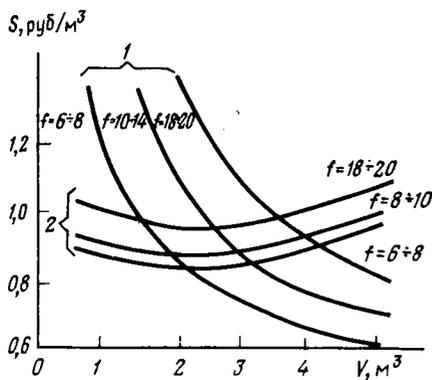


Рис. 16.7. Зависимость затрат  $S$  на вторичное дробление негабаритных кусков от их объема  $V$  при различной крепости пород  $f$ : 1 — методом шпуровых зарядов с гидроразбойкой; 2 — гидровзрывным способом в виде накладных зарядов (по Н. В. Василец)

кусков. Принято руководствоваться определенными зависимостями между характерными параметрами горного оборудования и максимально допустимыми линейными размерами кондиционных кусков.

Куски породы, имеющие размеры больше допустимых, называются негабаритами и подлежат измельчению (вторичному дроблению). Негабарит — понятие относительное, определяемое емкостью погрузочно-транспортного оборудования.

Вторичное дробление обычно осуществляют взрывным способом. В разрушаемом куске породы пробуривают шпур, закладывают заряд и производят взрывание. В таких случаях процесс разрушения по своей физической сущности мало чем отличается от ранее рассмотренного применительно к взрыванию массива.

С целью повышения производительности и снижения затрат на вторичное дробление иногда разбуривание не применяют, а используют накладные заряды. В этом случае требуется больший расход ВВ.

Для того чтобы повысить эффективность дробления накладными зарядами, используют гидравлический экран (пластиковую емкость, заполненную водой и покрывающую заряд),

а также специальные кумулятивные патроны, позволяющие направить энергию в определенную точку породы и концентрировать ее в ней.

При применении шпурового метода дробления негабарита возможно существенно повысить эффективность взрыва, используя гидрозабойку — заполнение шпура водой, так как в этом случае на породу дополнительно динамически воздействует вода.

Затраты на вторичное дробление зависят от крепости пород, величины разрушаемого объема и метода разрушения (рис. 16.7).

### 16.7. ПРОЦЕССЫ ДРОБЛЕНИЯ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО В ДРОБИЛКАХ И МЕЛЬНИЦАХ

Полезные ископаемые после извлечения из недр в большинстве случаев подвергаются дальнейшему дроблению и измельчению. Эта дополнительная обработка вызвана необходимостью либо получения конечного продукта определенного гранулометрического состава (например, строительные материалы), либо раскрытия и разделения минеральных сростков для последующего обогащения измельченной руды.

В зависимости от физико-технических характеристик пород применяют четыре основных способа дробления и измельчения: раздавливание, раскалывание, удар и истирание.

Для твердых и хрупких горных пород обычно используют раздавливание, пород средней крепости — раскалывание, слабых пород и углей — удар. Для твердых и вязких пород применяют раздавливание и истирание. В соответствии с этим созданы дробилки раздавливающего действия — щековые и конусные, раскалывающего действия — зубчатые, валковые и ударного действия — молотковые.

Энергоемкость процесса дробления зависит от степени измельчения пород.

Кирпичевым (1874 г.) и Киком (1885 г.) предложена теория дробления, согласно которой энергоемкость дробления пропорциональна логарифму отношения диаметров исходных кусков  $D$  к диаметрам кусков конечного продукта  $d$ :

$$A_K = e_K V \lg(D/d), \quad (16.50)$$

где  $e_K$  — удельная работа дробления, равная работе, затраченной на единичный раскол единицы объема породы [ $e_K = = \sigma_n^2 / (2E)$ ];  $V$  — полный объем дробимой породы.

В соответствии с этой формулой влияние степени дробления на энергоемкость процесса незначительно (рис. 16.8). Это соответствует действительности только при крупном дроблении.

Поэтому при мелком дроблении и измельчении используют теорию Риттингера (1867 г.), согласно которой работа дроб-

ления  $A_R$  прямо пропорциональна величине площади вновь образованной поверхности:

$$A_R = e_S \Delta s_{уд} V, \quad (16.51)$$

где  $e_S$  — удельная поверхностная энергия, работа, затрачиваемая на образование единицы площади новой поверхности (Дж/м<sup>2</sup>);  $\Delta s_{уд}$  — удельная площадь вновь образованной поверхности (м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>).

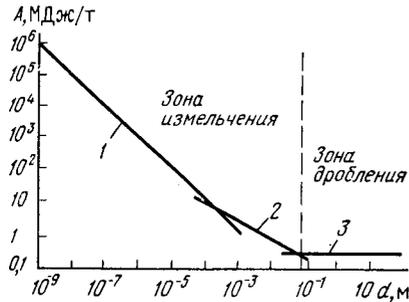


Рис. 16.8. Области применения различных формул расчета энергоемкости процесса дробления и измельчения:

1 — по Риттингеру; 2 — по Бонду; 3 — по Кириичеву — Кикку

Если принять, что исходные куски, так же как и конечные, имеют примерно форму шаров диаметрами  $D$  и  $d$ , то число шаров после измельчения каждого исходного шара  $n = D^3/d^3$ .

Отсюда

$$\Delta s_{уд} = 6(d^{-1} - D^{-1}). \quad (16.52)$$

Удельную поверхностную энергию можно рассчитать по формуле

$$e_S = A_0 V_0 / \Delta S_0, \quad (16.53)$$

где  $A_0$  — удельная работа единичного разрушения [ $A_0 = \sigma_p^2 / (2E)$ ];  $V_0$  — объем разрушаемого куска (шара) ( $V_0 = \pi D^3 / 6$ );  $\Delta S_0$  — площадь вновь образованной поверхности после раскола шара.

Отсюда

$$e_S = \sigma_p^2 D / (6E). \quad (16.54)$$

Следовательно, по Риттингеру

$$A_R = \sigma_p^2 D V k_{пл} (d^{-1} - D^{-1}) / E, \quad (16.55)$$

где  $k_{пл}$  — коэффициент пластичности породы;  $k_{пл} = 2E/E_{деф} - 1$ .

По этой теории работа разрушения  $A_{R1}$  и  $A_{R2}$  возрастает примерно обратно пропорционально диаметрам зерен  $d_1$  и  $d_2$  конечного дробленого продукта:

$$A_{R1} / A_{R2} = d_2 / d_1. \quad (16.56)$$

Измельчение горных пород осуществляется ударом и истиранием в барабанных мельницах. В зависимости от вида дробящей среды различают мельницы шаровые, стержневые, галечные и самоизмельчения.

Барабаны, в которых загружены дробящие элементы и из-

мельчаемая порода, вращаются с определенной скоростью. Измельчение происходит в результате перемешивания и соударения дробящихся элементов и кусков породы.

Так как полезная мощность мельницы  $N = A_R/t$ , производительность мельницы

$$Q = V/t = NEd / [\sigma_p^2 (D-d) k_{пл}], \quad (16.57)$$

где  $V$  — объем измельчаемой породы в течение времени  $t$ .

Примерные удельные расходы энергии на дробление медных и магнетитовых руд составляют около 180 МДж/м<sup>3</sup>, гематитовых и пиритовых руд — около 120—150 МДж/м<sup>3</sup>, угля — около 50—75 МДж/м<sup>3</sup>, кварца — 130 МДж/м<sup>3</sup>.

Удельная поверхностная энергия мрамора составляет 90—125 Дж/м<sup>2</sup>, диабаз — 250 Дж/м<sup>2</sup>.

**Совершенствование методов дробления и измельчения** ведется в направлении максимального использования особенностей пород, в частности изменения их прочностных характеристик от скорости воздействия нагрузки. Как известно, быстрое нагружение породы определяет более хрупкий характер ее разрушения, снижает величину пластических деформаций и энергоемкость разрушения. Поэтому в настоящее время ведутся исследования по применению ударных нагрузок для разрушения скальных горных пород. Так, расширяется область применения дезинтеграторов — машин для дробления хрупких материалов. Дезинтегратор состоит из двух вращающихся в противоположные стороны роторов, на диске которых расположены цилиндрические пальцы (билы), дробящие горную породу.

По принципу самоизмельчения работают струйные мельницы, в которых энергия частицам для соударения сообщается струей сжатого воздуха, перегретого пара или газа. Струйные мельницы используются для тонкого и сверхтонкого измельчения.

Измельчение магнетитового кварцита в воздушно- и паро-струйных мельницах обеспечивает более полное раскрытие (выделение из вмещающей породы) рудных минералов по сравнению с шаровым помолом. Воздействие высокотемпературной струи также способствует более полному раскрытию минералов и при этом, кроме того, может осуществляться одновременный обжиг руды (для дальнейшей магнитной сепарации).

Исследования показали, что у ряда руд (например, серных) способность раскрываться по контактам минеральных зерен увеличивается не с повышением, а с понижением температуры. Это явление может быть использовано в струйных мельницах, где в качестве струи служит сверхзвуковой поток охлажденного азота.

Эффективность транспортирования и производительность средств транспорта зависят не только от конструктивных параметров, но и от соответствия их свойствам перевозимых пород.

В большинстве случаев выбор способа перемещения пород осуществляется только сравнительными методами с учетом степени дробления, влажности, абразивности и плотности пород.

Средствами транспорта перемещают только измененные в процессах выемки и погрузки горные породы — разрушенные и разрыхленные. Эти породы характеризуются широким диапазоном свойств, по-разному влияющих на трудность их транспортирования. Целесообразно выделить и сопоставить характеристики пород, оказывающие основное влияние на трудность их перемещения.

В качестве основы сопоставления пород по сопротивляемости их перемещению применяется относительный показатель трудности транспортирования породы  $P_T$ .

На выбор транспортных средств по степени использования их емкости и износостойкости основное влияние оказывают плотность, прочность и гранулометрический состав перемещаемой породы.

На трудность разгрузки породы, связанную с налипанием и примерзанием ее к рабочим поверхностям транспортных средств, решающее влияние оказывают содержание глинистых частиц и влажность породы.

Степень налипания и примерзания, а следовательно, выбор способов предотвращения этих явлений и очистки транспортных средств зависят от времени транспортирования породы и температуры воздуха.

При указанных предпосылках величина  $P_T$  для условий открытых горных работ может быть определена из эмпирического выражения

$$P_T = 6 \cdot 10^{-5} \gamma + 5 d_{cp} A + 20 \omega n B C, \quad (16.58)$$

где  $\gamma$  — удельный вес породы в образце, Н/м<sup>3</sup>;  $d_{cp}$  — средний размер куска породы в транспортном сосуде, м;  $A$ ,  $B$  и  $C$  — коэффициенты ( $A = 1 + \tau_{сдв} \cdot 10^7$ ;  $B = 1 + \lg(t - 1)$ ;  $C = 1 - 0,025T$ );  $\omega$  — влажность породы, доли единицы;  $n$  — содержание в породе глинистых частиц, доли единицы;  $t$  — продолжительность транспортирования породы, ч;  $T$  — температура воздуха, °С (учитывается только  $T < 0$  °С).

Все транспортируемые горные породы по величине  $P_T$  подразделяются на пять следующих классов:

- I класс — весьма легкотранспортируемые ( $P_T \leq 2$ );
- II класс — легкотранспортируемые ( $2 < P_T \leq 4$ );
- III класс — средней трудности транспортирования ( $4 < P_T \leq 6$ );

IV класс — труднотранспортируемые ( $6 < P_T \leq 8$ );

V класс — весьма труднотранспортируемые ( $8 < P_T \leq 10$ ).

Породы с  $P_T > 10$  относятся к внекатегорным. Введение показателя  $P_T$  позволяет упорядочить выбор вида транспорта и производить его технологические расчеты.

Производительность транспорта, как правило, рассчитывают с использованием следующих характеристик пород: объемной массы  $\rho$ , насыпной плотности  $\rho_n$ , угла естественного откоса  $\varphi_0$  и коэффициента трения породы  $f_{тр}$ .

Например, производительность транспортирования породы конвейером с плоской лентой рассчитывают по формуле

$$\mathcal{Q} = 576 B^2 v \rho_n \lg(\varphi/2), \quad (16.59)$$

где  $B$  и  $v$  — соответственно ширина и скорость движения конвейерной ленты.

Срок службы конвейерных лент зависит от гранулометрического состава транспортируемого материала. Для карбонатных пород установлена следующая зависимость между сроком службы  $t$  (тыс. ч) и средним размером кусков  $d$  (мм):

$$t = 8700 d^{-1.33}. \quad (16.60)$$

При транспортировании пород существенную роль играет коэффициент разрыхления (рис. 16.9). Желательно иметь минимальное его значение. Уменьшения  $k_p$  можно добиться соответствующим подбором гранулометрического состава пород (смешиванием мелких кусков породы с крупными — см. табл. 13.2), сотрясением и т. д.

Более компактно частицы породы можно расположить, добавляя в нее углеводородные жидкости (керосин, изоамиловый спирт), обладающие смазочными свойствами и уменьшающие силы сцепления между частицами. Насыпная плотность угля в последнем случае увеличивается на 20 % (рис. 16.10).

Одним из факторов, значительно влияющих на величину насыпной плотности горных пород, является влажность. Так, насыпная плотность угля имеет минимальное значение при содержании влаги 6—7 %. При увеличении влаги в породе появляются силы, препятствующие более плотной укладке раздробленной смеси угля. Они возникают при полном насыщении всех точек контакта капиллярной водой. Вода в контактах стремится занять объем с минимальной свободной поверхностью, препятствуя более плотной укладке частиц.

Для снижения влажности уголь сушат или добавляют в него гигроскопические вещества, например известь.

При гидротранспортировании особое внимание должно уделяться гранулометрическому составу, плотности и абразивности транспортируемых пород. От этих характеристик зависят диаметр трубопроводов, оптимальные скорости транспортирования, напоры и т. д. Так, при гидротранспортировании крупного гравия плотностью  $2,62 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> скорость потока должна быть

в 2 раза больше, чем при гидротранспортировании угля ( $\rho = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), т. е. соответственно 3,05 и 1,53 м/с.

Плотность пульпы  $\rho_{п}$  определяют по формуле

$$\rho_{п} = \rho_{от} (\rho_{т} + q_{в} \rho_{в}) / (q_{в} \rho_{от} + \rho_{т}), \quad (16.61)$$

где  $\rho_{от}$ ,  $\rho_{в}$  — плотность соответственно породы и воды;  $\rho_{т}$  —

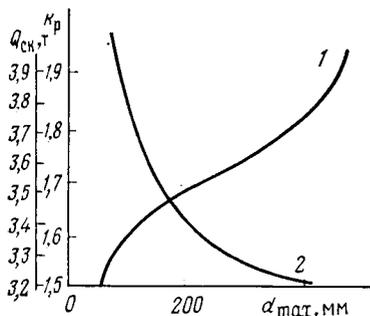


Рис. 16.9. Зависимость коэффициента разрыхления  $k_p$  (1) и вместимости скипа  $Q_{ск}$  (2) емкости 2 м<sup>3</sup> от крупности  $d_{max}$  загружаемой в скип железной руды

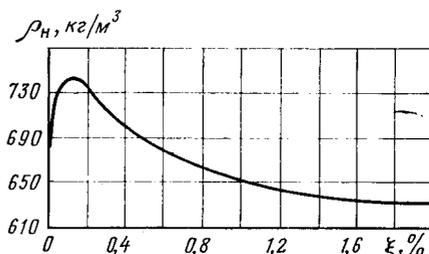


Рис. 16.10. Влияние добавок керосина  $\xi$  на насыпную плотность  $\rho_n$  угля

объемная масса сухой породы в целике;  $q_v$  — удельный расход воды.

Способы доставки пород могут быть совершенствованы на основе более полного использования физических свойств транспортируемого материала.

Так, гидротранспорт можно совершенствовать путем использования жидкостей, имеющих большую плотность и низкую температуру замерзания. Транспортирование пород может осуществляться под действием электростатического или магнитного поля.

Развивается метод взрывной доставки руды в условиях подземной разработки месторождений. Установлено, что дальность падения кусков руды в данном методе зависит от ее плотности и прочности.

## 17. НЕМЕХАНИЧЕСКИЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ СПОСОБЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

### 17.1. ТЕРМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ БУРЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

В настоящее время из немеханических способов наиболее широко в практике используют термическое бурение. Оно осуществляется воздействием на породу высокотемпературной сверх-

звуковой газовой струи, интенсивно разогревающей тонкий поверхностный слой породы, в котором возникают термические напряжения, приводящие к хрупкому отколу от поверхности мелких чешуек и частиц (рис. 17.1).

Так как эффективность термобурения, в первую очередь, определяется величиной возникающих в породе термонапряже-

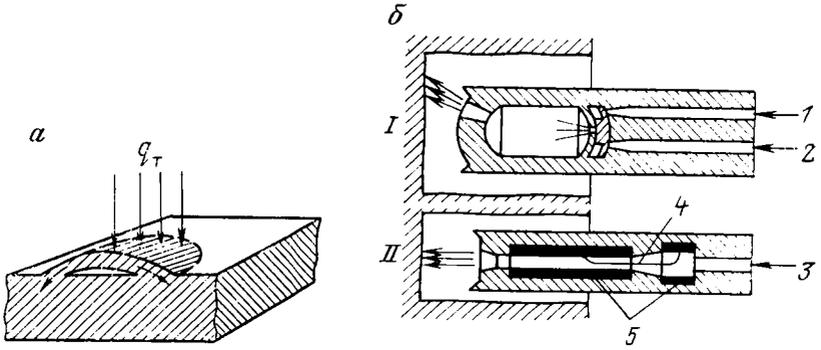
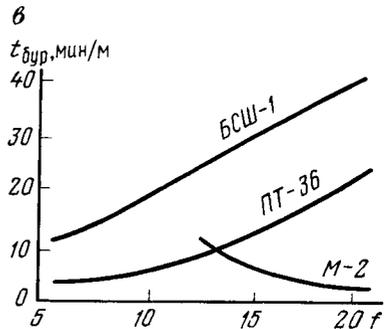


Рис. 17.1. К термическому бурению пород:

*a* — схема отделения шелушки от породы под воздействием теплового потока  $q_T$ ; *б* — принципиальные схемы термических инструментов; *I* — бензовоздушная горелка; *II* — плазменная горелка; 1 и 3 — подача сжатого воздуха; 2 — подача бензина; 4 — плазменный шнур; 5 — электроподвод



ний, которые тем больше, чем больше жесткость породы, т. е. модуль Юнга  $E$  (см. разд. 6.5), при термобурении в отличие от механических способов бурения наблюдается увеличение скорости бурения с ростом крепости пород (см. рис. 17.1, в).

Условием разрушения породы является равенство термических напряжений  $\sigma_T$  разрушающим  $\sigma_{рз}$ . Отсюда можно вычислить температуру разрушения  $T_p$ :

$$T_p = \sigma_{рз} (1 - 2\nu) / (\alpha E). \quad (17.1)$$

Как видно из формулы (17.1), напряжения в породе достигают значения разрушающих при относительно невысоких температурах — 300—600°C. Например, у кварца, микрокварцита, железистых кварцитов  $T_p = 400 \div 450^\circ\text{C}$ , у гранитогнейса  $T_p = 500 \div 600^\circ\text{C}$ . Но для того чтобы процесс бурения шел быстро, необходимы высокие градиенты температур. Последние зависят не только от свойств породы, но и от интенсивности

теплопередачи и, следовательно, от скорости истечения газовой струи и величины теплового потока. Чем больше градиент температур, тем больше термические напряжения, но меньше толщина откальзываемых чешуек.

Интенсивные тепловые потоки создаются специальными газовыми горелками, в рабочей камере которых происходят перемешивание горючего и окислителя и бурное их сгорание (см. рис. 17.1, б).

В зависимости от типа окислителя в качестве горючего применяют либо керосин (окислитель — кислород), либо бензин (окислитель — воздух).

Горячие газы через сопло выбрасываются наружу и, ударяясь о породу, передают последней тепловую энергию.

Удельный тепловой поток  $q_T$  вычисляют по формуле

$$q_T = k_T (T_T - T_n), \quad (17.2)$$

где  $k_T$  — коэффициент теплопередачи;  $T_T$ ,  $T_n$  — температуры соответственно газов и поверхности пород.

В отечественных станках огневого бурения скорость газовой струи достигает 1600—2000 м/с, а удельные тепловые потоки  $q_T = (2 \div 10)$  МВт/м<sup>2</sup>, температура теплоносителя в среднем составляет 1600 ÷ 2800 °С, при плазменном бурении — 5000 °С.

Отделение частиц породы от массива происходит в результате действия напряжений растяжения и сдвига.

Наиболее эффективно разрушаются породы, сложенные минералами с различными коэффициентами теплового расширения, имеющие жесткий, противодействующий расширению зерен цемент, небольшие коэффициенты теплопроводности и большие значения модуля упругости  $E$ .

Высокая теплопроводность пород и низкие градиенты температур отрицательно сказываются на эффективности термобурения. Производительность бурения резко снижается в случае увеличения пластичности породы при нагреве ее и плавлении. На плавление затрачивается большое количество тепла, а шлак, получающийся в результате плавления, плохо удаляется из забоя и затрудняет бурение.

В мягких и рыхлых породах (группа строения 3) возникающие термические напряжения невелики. Железистые породы склонны к плавлению, легко прогреваются газовой струей на большие глубины, что приводит к снижению градиента температур и термических напряжений. Поэтому перечисленные породы трудно поддаются термическому разрушению.

В трещиноватых породах скорость бурения уменьшается до двух раз.

С целью выявления влияния комплекса физических свойств горных пород на скорость термического бурения  $v_b$  произведем следующий расчет.

Количество теплоты, поступающей в объем  $V$  породы,

$$Q = cm\Delta T = c\rho V\Delta T, \quad (17.3)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость;  $m$  — масса породы;  $\Delta T$  — температура нагрева породы; удельный тепловой поток

$$q_T = Q/(St), \quad (17.4)$$

где  $S$  — нагреваемая площадь породы;  $t$  — время нагрева до создания разрушающих термических напряжений.

Используя уравнения (17.1) — (17.4) и приравняв  $\Delta T = T_p$ , можно написать:

$$v_6 = v/(St) = q_T \alpha E / [c\rho\sigma_p(1 - 2\nu)] = P_{T6} q_T, \quad (17.5)$$

где  $P_{T6}$  — комплексный параметр, показывающий влияние свойств пород на их термобуримость (критерий термобуримости):

$$P_{T6} = \alpha E / [c\rho\sigma_p(1 - 2\nu)]. \quad (17.6)$$

Величина  $P_{T6}$  соответствует объему идеально упругой породы, разрушаемой при воздействии на нее 1 Дж теплоты. Чем меньше значение  $P_{T6}$ , тем труднее порода поддается термическому разрушению.

Для пород критерий  $P_{T6}$  может иметь значения от  $10^{-8}$  до  $10^{-7}$  м<sup>3</sup>/Дж.

Так, хорошо термобуримые микрокварциты и железистые кварциты имеют  $P_{T6}$  в пределах  $10^{-7} \div 3 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/Дж. Плохо термобуримые породы (габбро, перидотиты, пироксениты) имеют  $P_{T6} < 2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/Дж.

Уравнение (17.5) не может быть непосредственно использовано для конкретных расчетов скорости термобурения, так как в нем не учитываются конструктивные особенности горелки, градиенты температур в слоях породы, изменения упругих и прочностных свойств при нагреве и т. д.

Для практических расчетов используют эмпирические связи между комплексным показателем  $P_{T6}$  и скоростью термобурения пород  $v_6$ . Например, по А. П. Дмитриеву,

$$v_6 = AP_{T6} - B. \quad (17.7)$$

При бурении скважин малогабаритным воздушно-огнеструйным термобуром коэффициенты  $A$  и  $B$  равны соответственно  $5 \cdot 10^8$  и 3,2 (если  $v_6$  выражается см/мин).

Как показывает опыт, термическому бурению хорошо поддаются породы, в состав которых входит кварц, обладающий высоким параметром  $P_{T6}$ , высокой температурой плавления и не теряющий своей хрупкости с повышением температуры.

Производительность станков термического бурения значительно более высокая, чем механического, в том числе шаро-

шечного. Так, среднесменная производительность станка огневого бурения по бакальским кварцитами составляет 90 м, по железистым кварцитами ЮГОКа — 16—18 м, по железистым кварцитами Оленегорска — 9—10 м.

На карьерах работают бензовоздушные станки СБТМ-20, СБО-5, кислородно-керосиновые СБО-1Б, СБО-160/20. Стоимость проходки 1 м скважины составляет от 4,5 до 8,7 руб. или на 1 м<sup>3</sup> горной массы — от 0,1 до 0,18 руб. (рис. 17.2).

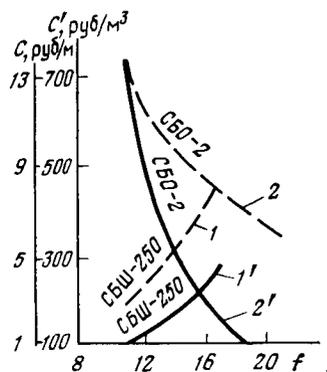


Рис. 17.2. Сравнительная оценка затрат  $C$  (1 и 2) на бурение 1 м скважины и приведенных затрат  $C'$  (1' и 2') на 1 м<sup>3</sup> выбуренного объема станком шарошечного (СБШ-250) и огневого бурения (СБО-2)

Термобуры используют не только для бурения взрывных скважин, но и для обработки поверхности пород, резания их, дробления негабарита и т. д.

Станки огневого бурения хорошо зарекомендовали себя при разработке мерзлых грунтов на горных предприятиях Воркуты, Казахстана, Донецкой области. Скорость бурения буровым станком ТБА-1 по мерзлым глинам составляет 19 м/ч, мерзлым пескам — 70 м/ч, суглинкам — 4—12 м/ч.

Дальнейшее совершенствование термического бурения ведется в направлениях:

совершенствования конструкции газовой горелки;

использования электродуговых или плазменных горелок (см. рис. 17.1, в).

Высокотемпературная струя ионизированных газов в плазменных борах образуется при пропускании сжатого воздуха через мощный электродуговой разряд.

Плазменные буры не требуют горючего или окислителя, позволяют плавно регулировать температуру газовой струи в пределах 500—8000 °С. Последнее особенно существенно, так как исследованиями установлено, что многие горные породы наиболее эффективно разрушаются лишь в определенном температурном интервале;

использования знакопеременных температурных полей. Сущность этого метода заключается в том, что забой скважины поочередно обрабатывают потоками горячего и охлажденного газа или жидкого азота. Породы при охлаждении становятся более хрупкими. Это позволяет разрушать породы, не буримые обычными газовыми горелками;

использования при бурении явления детонации. Для возникновения эффекта детонационного горения необходимо, чтобы сверхзвуковая струя имела избыток одной из химических компонент. При детонационном горении возникают мощные де-

тонационные и ударные волны, которые дополнительно разрушают породу;

совместного применения термического и механического воздействия (комбинированные методы).

## 17.2. ТЕРМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ РАЗРУШЕНИЯ НЕГАБАРИТА

Наиболее известный термический способ разрушения негабарита — это раскалывание кусков пород нагревом любым источником тепла (например, термитом), располагаемым на поверхности или в углублении (в шпуре).

Хорошие результаты получены при разрушении роговиков, джеспилитов, кварцитов.

Метод создания разрушающих напряжений в куске горной породы нагреванием его электрической дугой опробован на песчанике, мраморе и гранит-порфирах как в лабораторных условиях, так и в карьерах. Под действием тепла электрической дуги порода раскалывается через несколько минут. Расход энергии при этом сравнительно небольшой.

Если источник тепла расположен на поверхности куска породы, то расчет энергоемкости такого процесса разрушения сводится к задаче нагрева некоторого полубесконечного твердого тела источником тепла постоянной мощности.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности для таких условий дает следующую формулу для определения температуры породы в любой точке:

$$(T_d - T_s)/(T_0 - T_s) = \Phi [d/(2\sqrt{at})]^2, \quad (17.8)$$

где  $T_d$  — температура в точке, удаленной на расстояние  $d$  от поверхности нагрева;  $T_s$  — температура поверхности породы в процессе нагрева;  $T_0$  — первоначальная температура породы;  $\Phi$  — функция интеграла вероятностей;  $a$  — температуропроводность породы;  $t$  — время нагрева породы.

Если в двух точках, удаленных от поверхности на различных расстояниях  $d_1$  и  $d_2$ , порода нагревается до одной и той же температуры, то

$$d_1/(2\sqrt{at_1}) = d_2/(2\sqrt{at_2}). \quad (17.9)$$

Отсюда отношение времени нагрева этих точек

$$t_1/t_2 = d_1^2/d_2^2. \quad (17.10)$$

Таким образом, время, необходимое для нагрева какой-то точки до определенной температуры, прямо пропорционально квадрату ее расстояния от нагреваемой поверхности (рис. 17.3).

Из уравнения (17.10) следует также, что время нагрева породы обратно пропорционально ее температуропроводности,

а поскольку с глубиной резко возрастает время нагрева породы, тепло, поглощаемое породой, скапливается в основном в некотором ее объеме (рабочем теле), размеры которого определяются временем нагрева и температуропроводностью породы.

Если представить, что тепловые свойства породы во всех направлениях одинаковы, то форма рабочего тела будет близка к полусфере (см. рис. 17.3, б). Расширение этого тела приводит к расколу породы. Очевидно, чем больше относительные размеры этого тела и чем оно ближе к клиновидному, тем легче произойдет разрушение породы. Поэтому при разрушении негабарита высокая температуропроводность и слоистость породы, направленная вдоль требуемой плоскости раскола, играют положительную роль.

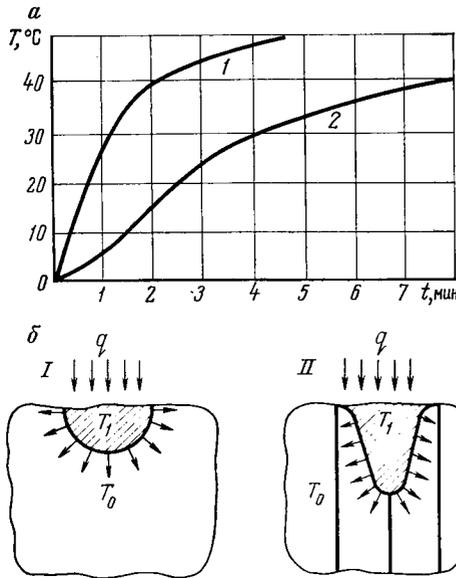


Рис. 17.3. К процессу нагрева пород с поверхности:

а — типичные кривые изменения температуры в зависимости от времени нагрева на глубине 1 см (1) и 2 см (2); б — форма рабочего тела при нагреве массивной (I) и слоистой (II) пород;  $q$  — тепловой поток;  $T_0$  и  $T_1$  — исходная и конечная температура нагрева породы

### 17.3. КОМБИНИРОВАННОЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ БУРЕНИЕ ПОРОД

Как известно, удельная работа термического разрушения пород  $A_T$  складывается из работы  $A_0$ , потраченной на собственно механическое

разрушение, и работы  $A_{ф.т}$ , потерянной за счет термических преобразований в породе:

$$A_T = A_0 + A_{ф.т} = \sigma_{сж} \rho (1 - 2\nu) [2E/E_{деф} - 1] / (\alpha E). \quad (17.11)$$

Из уравнения (17.11) видно, что при термическом разрушении существуют дополнительные по сравнению с механическим разрушением [см. уравнение (16.8)] потери энергии, обусловленные коэффициентом преобразования тепла в механические напряжения

$$\eta_T = A_{ф.т} / A_T = \sigma_{сж} \alpha / [2\rho (1 - 2\nu)] \approx 0,2 \div 0,01, \quad (17.12)$$

где  $A_{ф.т}$  — удельная работа механического разрушения породы.

Чем больше параметры  $\sigma_{сж}$ ,  $E$  и  $\alpha$  пород, тем больше коэффициент преобразования энергии в механическую.

Следовательно, формальное сравнение работ разрушения пород указывает на меньшую энергоемкость механического способа. Фактически же часто выгоднее производить разрушение пород немеханическими (термическими, электротермическими и др.) способами. Это обусловлено следующими факторами: разрушение пород механическими способами возможно только весьма прочными износостойкими внедряющимися в породу рабочими органами при приложении к ним больших усилий;

механическое разрушение связано с преобладанием сил сжатия в отличие от немеханических способов, при которых в процессе разрушения, как правило, основную роль играют растягивающие напряжения;

энергоемкость разрушения пород механическими способами прямо пропорциональна квадрату их прочности, в то время как при немеханических методах прочность может вообще не влиять на величину работы разрушения.

Практика и эксперименты показывают, что механическое разрушение эффективно только при удельной работе разрушения не более 10 МДж/м<sup>3</sup>, термическое — до 500 МДж/м<sup>3</sup>.

Таким образом, для достижения минимальной энергоемкости процесса разрушения пород наиболее перспективно использование комбинированных методов, при которых физическим воздействием не разрушают породу, а снижают ее прочность до величины, позволяющей осуществить эффективное механическое разрушение.

Термомеханическое бурение осуществляют либо совмещением обычного механического бурения с нагревом, либо воздействием на породу потоком твердых частиц наряду с тепловым потоком.

При этом на термические напряжения накладываются механические, способствующие более быстрому разрушению породы.

В первом случае тепловой поток создается, как обычно, с помощью газовой или плазменной горелки. Механическое воздействие осуществляют шарошками.

На подобном принципе работают станки СБШО-250, СБШ-250К. Прирост скорости бурения по сравнению с обычным термическим в породах крепостью  $f = 15 \div 16$  составляет 30 %. Скорость бурения достигает 32 м/ч.

МГИ совместно с институтом Гипромашобогатение разработаны термогидробуры (ТГБ-2), где в качестве теплоносителя используется воздушно-водяная смесь, нагревающая породу в забое скважины до 300 °С. Одновременно с этим осуществляется механическое бурение шарошками.

Применение потока твердых частиц, образующих с горячими газами двухфазную среду, также повышает производительность бурения. В качестве твердых частиц используют либо мелкие частицы самой разрушенной породы, либо стальную

дробь, засыпанную в скважину. Твердые частицы, ударяясь о нагретую породу, производят окончательное ее разрушение. Производительность бурения возрастает на 40 %. На таком принципе работает термобур ТВР-46, созданный в МГИ.

#### 17.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СПОСОБЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Электромагнитные способы разрушения горных пород подразделяются на электродинамические и электромагнитотермические.

Электродинамические (ЭД) способы основаны на осуществлении электрического пробоя. Электромагнитотермические (ЭМ), в свою очередь, подразделяются на электротермические (ЭТ) способы, основанные на электротепловом пробое (ЭТП) и на разогреве пород электромагнитными полями без осуществления пробоя (ЭТН), магнитные, инфракрасные и оптические.

При ЭД способах разрушения пробой производят либо непосредственно по горной породе, либо по жидкости над поверхностью разрушаемой породы.

В первом случае разрушение происходит непосредственно за счет динамического действия электрического разряда в породе, приводящего к ее растрескиванию и разрыву по линии канала пробоя.

Электрический пробой по породе используют для раскалывания негабарита, отбойки от массива, бурения скважин. Однако для его осуществления требуются высокие напряжения импульсного электрического поля.

Уменьшение электрической прочности  $E_{п}$  наблюдается с увеличением влажности, пористости пород, с возрастанием давления на них. Эти закономерности позволяют управлять процессом ЭД разрушения.

Положительным качеством электрического разрушения является его быстрое действие — практически мгновенный пробой и разрушение при достижении пробивного напряжения. Время осуществления пробоя —  $10^{-5} \div 10^{-6}$  с. Разрушение наиболее эффективно в хрупких горных породах. ЭД способ разрушения горных пород был использован Московским горным институтом (Ю. И. Протасов, Н. И. Андриенко) при строительстве Рогунской ГЭС. Выходное напряжение при этом было порядка 120 кВ, энергоемкость разрушения пород составила  $1,5 \text{ МДж/м}^3$ , производительность отбойки пород от массива — порядка  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Коэффициент полезного действия ЭД способа разрушения равен 60—70 %.

Разрушение пород пробоем по жидкости связано с так называемым электрогидравлическим эффектом (ЭГЭ). В данном случае величина пробивного напряжения зависит от  $E_{п}$  жидкости, в которой проходит разряд.

За счет разряда в жидкости возникает мощная ударная волна, воздействующая на расположенную вблизи горную породу и разрушающая ее. Кроме того, в канале разряда образуется кавитационная полость, которая, захлопываясь, значительно усиливает разрушающее действие разряда.

Электрогидравлическое разрушение пород может быть использовано для бурения горных пород, разрушения негабарита, дробления и измельчения полезных ископаемых. Однако достигнутые в настоящее время КПД разрушения данным способом все еще весьма низки (несколько процентов).

Электротермические методы разрушения пород пробоем (ЭТП) подразделяются по частоте применяемого электромагнитного поля на низкочастотные (частота поля до 1 МГц) и высокочастотные (частота поля от 1 до 300 МГц).

Основной предпосылкой применения низкочастотных методов (НЧ) является относительно высокая первоначальная проводимость тока пород. Горная порода разогревается под действием электрического поля, в ней образуется канал пробоя. Разрушение наступает либо непосредственно сразу после теплового пробоя, либо после дополнительного прогрева породы за счет усиленного выделения тепла в канале пробоя и возникновения разрушающих термических напряжений.

Повышение частоты электромагнитного поля, как правило, приводит к повышению электрической проводимости породы и более быстрому ее разогреву. Поэтому для разрушения пород, имеющих высокие значения электрического сопротивления, применяют высокочастотные методы (ВЧ). Как НЧ, так и ВЧ методы осуществляют приложением к породе электродов, по которым к ней подводится электромагнитная энергия. Поэтому они называются контактными способами.

В зависимости от формы электродов и их взаимного расположения в породе возникает электрическое поле определенной конфигурации. Таким образом, можно создать направленное электрическое поле или концентрировать его на определенных участках породы.

Если доступ к разрушаемой породе возможен только с одной стороны, электроды располагают на одной поверхности породы. При этом разрушение менее эффективно, чем при расположении электродов с противоположных сторон (рис. 17.4).

Методы ЭТН подразделяются на методы постоянного тока (или промышленной частоты) и сверхвысокочастотные (СВЧ) методы.

В методах постоянного тока осуществляют контактный подвод электрического тока (постоянного или частотой 50 Гц) к породам, обладающим значительной проводимостью. За счет выделения в породе тепла происходит постепенный разогрев определенного ее участка, возникают и нарастают термические

напряжения, которые при достижении критических значений разрушают породу.

В СВЧ методах для разогрева породы используется электромагнитная энергия частотой свыше 300 МГц, направляемая на породу посредством специальных излучателей.

Радиоволна проникает в горную породу на глубину  $h_{эм}$  (см. разд. 11.4) и поглощается в ее объеме. За счет этого породе

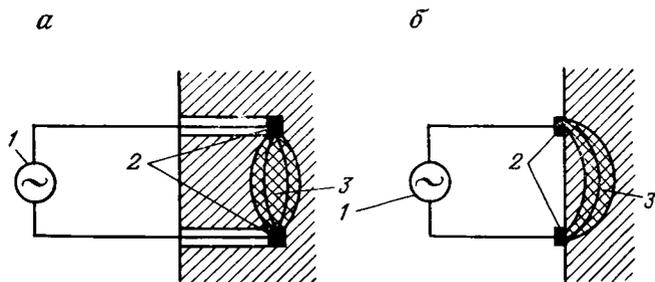


Рис. 17.4. Разрушение горных пород электротермическим высокочастотным контактным методом при расположении электродов с противоположных сторон разрушаемой породы (а) и с одной стороны ее (б):

1 — генератор электрического тока различной частоты; 2 — электроды; 3 — нагретый током объем породы, вызывающий разрушающие напряжения (рабочее тело)

разогревается, в ней появляются термические напряжения, приводящие к разрушению. Изменяя частоту радиоволн, можно менять глубину проникновения и, следовательно, концентрацию электромагнитной энергии.

Эт разрушение, несмотря на эффект разрушения горной породы тепловым полем, отличается от термического. Как известно, при термическом разрушении тепловой поток воздействует непосредственно на поверхность горной породы и поэтому происходит ее поверхностное шелушение.

В результате же воздействия электромагнитного поля порода прогревается на значительную глубину, которая зависит от частоты поля и электрических свойств породы. Эффективность процесса разрушения увеличивается, а энергоемкость снижается, поскольку разрушение породы происходит в большей мере от растягивающих напряжений.

Основным условием разрушения пород является их способность нагреваться в электрическом поле, которая может быть оценена некоторым параметром  $b$ , равным энергии электрического поля, необходимой для нагрева 1 м<sup>3</sup> данной породы на 1 °С,

$$b = cp / (\epsilon_r \operatorname{tg} \delta). \quad (17.13)$$

Параметр  $b$  называется показателем сопротивляемости пород высокочастотному нагреву. Чем меньше  $b$ , тем эффективнее нагрев породы.

Другим условием, как и при термическом разрушении, является способность пород превращать накопленную тепловую энергию в механическую. Эта способность, как указывалось ранее, оценивается параметром  $\alpha E$ .

В случае нагрева породы по сквозному каналу растягивающие напряжения в ненагретой части породы

$$\sigma_p = \alpha \Delta T E_{\text{пр}} / (1 - 2\nu), \quad (17.14)$$

где  $E_{\text{пр}} = E_n E_0 S / [(1 - S) E_0 + E_n S]$  — приведенный модуль Юнга с учетом модулей Юнга нагретого  $E_n$  и ненагретого  $E_0$  объема породы;  $S$  — относительная площадь сечения канала нагрева.

Так как требуемая мощность  $W$  для нагрева единичного объема породы на температуру  $\Delta T$

$$W = \Delta T c_p / t, \quad (17.15)$$

учитывая формулу (17.14),

$$W = \eta \sigma_p c_p (1 - 2\nu) / (\alpha E_{\text{пр}} t), \quad (17.16)$$

где  $\eta$  — коэффициент, учитывающий потери мощности;  $t$  — время нагрева породы, с.

Так как при прохождении высокочастотного тока количество выделяющейся в единице объема породы теплоты выражается уравнением (7.21), можно составить уравнение энергетического баланса

$$55,5 \epsilon_r f E_s^2 \text{tg } \delta \cdot 10^{-12} = \eta \sigma_p c_p (1 - 2\nu) / (\alpha E_{\text{пр}} t). \quad (17.17)$$

Уравнение (17.17) представляет собой условие электротермического разрушения пород токами высокой и сверхвысокой частоты.

Критерий, объединяющий физические свойства пород и обуславливающий эффективность их разрушения электротермическим способом,

$$P_{\text{эт}} = \alpha E_{\text{пр}} \epsilon_r \text{tg } \delta / [c_p \sigma_p (1 - 2\nu)], \quad (17.18)$$

или

$$P_{\text{эт}} = P_{\text{тб}} \epsilon_r \text{tg } \delta, \quad (17.19)$$

где  $P_{\text{тб}}$  — критерий термобуримости [см. уравнение (17.6)].

Чем больше значение  $P_{\text{эт}}$ , тем легче разрушаются породы при электротермическом способе. Эксперименты показывают, что разрушению легко поддаются породы, у которых  $P_{\text{эт}} \geq 5 \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Дж}$ .

Электротермическим способом, так же как и термическим, плохо разрушаются породы пористые и разлагающиеся при высоких температурах, например известняки (уменьшается  $\alpha E_{\text{пр}}$  и, следовательно,  $P_{\text{эт}}$ ).

В области высоких частот с повышением влажности сильно увеличивается теплоемкость и теплопроводность пород, а

диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  и  $\operatorname{tg} \delta$  практически не меняются. Поэтому увлажнение пород снижает критерий  $P_{\text{ЭТ}}$ .

Повышение температуры вызывает рост  $\epsilon_r$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\alpha$  пород и, следовательно, улучшает эффективность их разрушения.

$$A_{\text{э}} = A_0 + A_{\text{ф.э}} = \sigma_{\text{сж}} c_p (1 - 2\nu) k_{\text{пл}} / (E_{\text{пр}} \alpha \epsilon_r \operatorname{tg} \delta), \quad (17.20)$$

где  $A_{\text{ф.э}}$  — потери энергии при электротермическом разрушении породы.

Соответственно коэффициент преобразования электрической энергии в механические напряжения

$$\eta_{\text{э}} = A_{\text{п}} / (A_0 + A_{\text{ф.э}}) = \sigma_{\text{сж}} \alpha \epsilon_r \operatorname{tg} \delta / [2c_p (1 - 2\nu)]. \quad (17.21)$$

Сравнение  $\eta_{\text{э}}$  с механическим методом, так же как и при термическом разрушении, показывает, что  $\eta_{\text{э}} \ll 1$ .

$$\sigma_{\text{сж}} < c_p (1 - 2\nu) / (\alpha \epsilon_r \operatorname{tg} \delta). \quad (17.22)$$

Однако при осуществлении выбора между механическим или ЭТ разрушением горных пород только этого сравнения недостаточно.

ЭТ способы обладают целым рядом преимуществ. Это, во-первых, практически полное отсутствие зависимости производительности разрушения от прочности пород.

Энергоемкость разрушения крепких пород часто бывает меньше, чем слабых. Так, на ЭТ разрушение (отделение от забоя) 1 т роговиков ( $\sigma_{\text{сж}} = 200$  МПа) затрачивалось 40 МДж энергии, а на отделение 1 т песчаника ( $\sigma_{\text{сж}} = 110$  МПа) — 100 МДж.

Электротермическим методом разрушают негабариты горных пород, осуществляют откол пород от массива, разрушают мерзлые горные породы.

Разработаны соответствующие установки для ЭТ дробления негабаритов на карьерах. Разрушение железистых кварцитов и хорошо проводящих пород можно осуществлять на частотах 50—500 КГц, время разрушения при этом составляет около 5 мин, энергоемкость —  $0,4 \div 1$  МДж/м<sup>3</sup>. Для разрушения плохо проводящих горных пород используют установки ВЧ диапазона. Так, в ИГД им. А. А. Скочинского разработана экспериментальная установка «Электра», способная эффективно разрушать граниты, гнейсы и тому подобные породы. Рекомендовано применять электромагнитное поле частотой 5,7—13,6 МГц и напряжением 5—12 кВ.

Такая передвижная установка мощностью 150 кВт в условиях открытых горных работ позволяет разрушать 25—40 м<sup>3</sup> негабарита в час.

При нагреве куска породы по оси в нем возникают тангенциальные, радиальные и осевые напряжения, которые с увеличением расстояния  $r$  от оси нагрева меняют как свою величину, так и знак, при этом радиальные напряжения всегда сжимаю-

щие, тангенциальные — сначала сжимающие, затем растягивающие (рис. 17.5). Разрушение наступает в момент, когда соответствующие напряжения превысят предельные.

Радиус разогретого объема горной породы (рабочего тела)  $R$  со временем  $t$  увеличивается за счет теплопроводности породы по следующему закону:

$$R = r_0 + 3,6 \sqrt{\lambda t / (c\rho)}, \quad (17.23)$$

где  $r_0$  — радиус исходного нагретого объема породы (в частности, канала пробоя).

Мощность, необходимая для ЭТ разрушения куска горной породы объемом  $V$ ,

$$N = 62\sigma_p \lambda \sqrt{(1-\nu) V k_{пл} / R} / (\alpha E_i \ln R), \quad (17.24)$$

где  $k_{пл}$  — коэффициент пластичности.

Энергоемкость  $q$  разрушения породы подсчитывается по формуле

$$q = 62\sigma_p \lambda \sqrt{(1-\nu) k_{пл} t^{3,2} / 3,6 \alpha^1 2^2 V} / (\alpha E \ln 2R). \quad (17.25)$$

Магнитные способы разрушения пород основаны на их разогреве высокочастотными магнитными полями. Как известно (см. разд. 8.5), хорошо проводящие породы и породы ферромагнетики достаточно хорошо разогреваются в переменных магнитных полях.

Эксперименты показали, что воздействие на породу, имеющую  $\mu \approx 3$  и  $\rho_a = 10^4$  Ом·м, магнитным полем частотой 0,2 МГц и напряженностью около  $7 \cdot 10^4$  А/м в течение 2 мин приводит к ее растрескиванию. Глубина эффективного прогрева составляет 6—8 см.

Инфракрасные способы разрушения основаны на передаче в горную породу электромагнитной энергии инфракрасного диапазона ( $10^{13}$ — $10^{14}$  Гц), излучаемой специальными инфракрасными нагревателями. Нагрев и разрушение породы при этом происходит так же, как и в СВЧ методе.

Этот способ более универсален, так как в инфракрасном диапазоне электрические свойства пород мало отличаются друг от друга (в пределах 20 %).

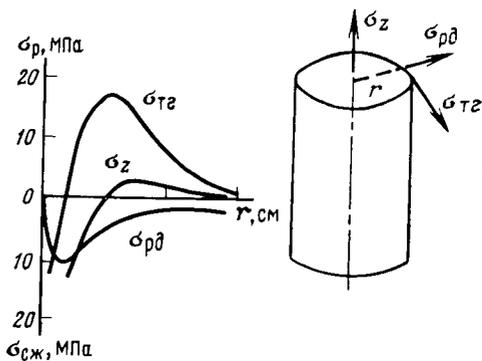


Рис. 17.5. Распределение тангенциальных  $\sigma_{\tau r}$ , радиальных  $\sigma_{\rho r}$ , осевых  $\sigma_z$  напряжений в породе при возникновении в ней цилиндрического нагретого тела:  $\sigma_r$  и  $\sigma_{сж}$  — растягивающие и сжимающие напряжения на расстоянии  $r$  от оси цилиндра

Оптическое разрушение основано на использовании когерентного (лазерного) излучения для концентрации электромагнитных волн оптического диапазона в горной породе, ее нагрева и разрушения.

Так как при этом в узком пучке выделяется большое количество энергии, в зоне ее концентрации порода плавится. Процесс плавления весьма энергоемкий (плавление 1 м<sup>3</sup> породы требует 360 ГДж энергии), поэтому лазерным лучом целесообразно лишь образование щелей и нарезание блоков в массиве породы. Тогда энергоемкость может быть снижена до 360 МДж/м<sup>3</sup>, что сравнимо с энергоемкостью механического разрушения пород.

### 17.5. КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД

Электротермические способы, подобно термическим, основаны на разрушении пород термонапряжениями, приводящими к расщеплению пород. В то же время возникновение любой трещины приводит к резкому спаду термических напряжений. Поэтому для отделения кусков породы от массива целесообразно использовать дополнительное механическое воздействие на забой. С этой целью созданы электротермомеханические машины, сочетающие в себе электротермическое и механическое воздействие. Электромагнитное поле, воздействуя на породу, подготавливает ее к разрушению, которое происходит под воздействием механических нагрузок.

В настоящее время получают развитие высокочастотные контактные, сверхвысокочастотные и инфракрасные электротермомеханические (ЭТМ) методы разрушения пород.

ВЧ ЭТМ методы основаны на использовании электродов, подводящих электромагнитную энергию к породе в качестве механического породоразрушающего инструмента. Механическое воздействие электродов на породу может быть как статическим (давление), так и динамическим.

Примером статического воздействия на породу служит так называемый метод внедряющегося электрода.

Данный метод заключается в том, что высокопотенциальный электрод, воздействуя на породу ВЧ электрическим полем, расплавляет ее в месте контакта и углубляется в нее под действием механических усилий. Вместе с электродом происходит углубление зоны наибольшего разогрева породы. Это позволяет откалывать куски породы от массива за счет растягивающих напряжений.

Метод внедряющегося электрода целесообразно использовать для разрушения мерзлых пород. К электроду, который одновременно представляет собой режущий орган, подводится электрический ток высокой частоты (0,5—2 МГц). За счет вы-

деления тепла происходит оттаивание мерзлой породы вокруг электрода и создается талая область, в которую внедряется электрод под действием механических усилий. В результате происходит отделение откалываемого блока от мерзлого массива (рис. 17.6).

Скорость внедрения  $v_{вн}$  электрода в мерзлый массив прямо пропорциональна фактору потерь горных пород  $\epsilon_r \text{tg} \delta$  и обратно пропорциональна  $\sigma_{сж}^2$ :

$$v_{вн} = k_{ф.э} \epsilon_0 \epsilon_r \text{tg} \delta f U^2 F / (\sigma_{сж}^2 d^2 a), \quad (17.26)$$

где  $k_{ф.э}$  — некоторый коэффициент, учитывающий форму электродов и изменения свойств пород при нагреве;  $U$  — напряжение электрического поля, В;  $F$  — механическое усилие внедрения электрода, Н;  $a$ ,  $d$  — соответственно половина ширины и толщины электрода, м.

Затраты на рыхление мерзлых пород электротермомеханическим способом в 2 раза ниже, чем буровзрывным.

В ЛГИ на этом принципе создан ВЧ ЭТМ ручной инструмент для разрушения искусственно замороженных пород при проходке подземных выработок мощностью 1,6 кВт, работающих на частоте около 40 МГц.

Установка внедряющегося электрода также весьма эффективна при дроблении кусков скальных пород (негабаритов).

Установлено, что методом внедряющегося электрода хорошо разрушаются различные скарны, монзониты, эпидозит, сиениты, гранодиориты, кварц-полевошпатовые порфиры и сульфидные руды.

Породы, которые трудно плавятся (безрудные и жилные кварциты), откалываются только по поверхности. Породы, разлагающиеся при высоких температурах (известняки, мрамор), разрушаются медленно. Внутри них образуется канал из продуктов разложения, в котором невозможно создать большие термические напряжения.

СВЧ ЭТМ метод в настоящее время применяется в основном для разрушения мерзлых пород при проходке выработок.

СВЧ метод основан на передаче к нагреваемому массиву электромагнитной энергии частотой  $f = 2000 \div 3000$  МГц. Эта энергия проникает на глубину  $h_{эм}$  (см. разд. 11.4), обусловлен-

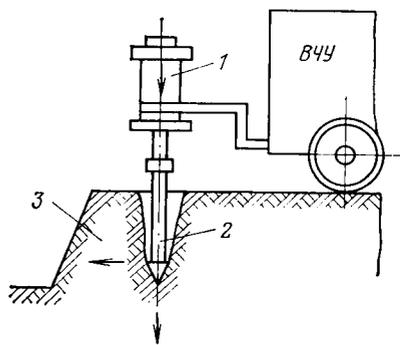


Рис. 17.6. К методу высокочастотного электротермомеханического разрушения горных пород:

1 — гидравлическая система нагружения; 2 — внедряющийся электрод; 3 — отделяемый блок; ВЧУ — высокочастотная установка

ную физическими свойствами пород. С повышением температуры  $h_{эм}$  уменьшается. Так, при повышении температуры от  $-10$  до  $0^\circ\text{C}$   $h_{эм}$  уменьшается в  $2\div 2,5$  раза.

В объеме породы на глубину  $h_{эм}$  происходит ее нагрев, плавление льда и разупрочнение. Затем разупрочненный объем механическим способом отделяется от массива и извлекается.

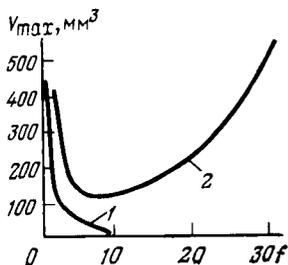


Рис. 17.7. Зависимость объема  $V$  отбитой породы от ее крепости  $f$ : 1 — при механическом разрушении; 2 — при ЭТМ разрушении

Механические воздействия могут быть осуществлены совмещенным рабочим органом. Этот принцип, например, использован в ЭТМ землеройной машине — бульдозере, где рупоры-излучатели СВЧ энергии расположены непосредственно на рабочем органе — отвале. Используют также разнесенные в пространстве излучатели и рабочие органы. При этом предварительно воздействуют СВЧ полем, затем механическим инструментом.

Сущность ЭТМ метода инфракрасного нагрева (ИН) заключается в нагреве забоя инфракрасными нагревателями и последующем механическом разрушении ослабшего из-за появления интенсивной трещиноватости слоя.

ЭТМ ИН метод можно применять как в процессах проходки подземных горных выработок (горизонтальных, вертикальных, наклонных), так и при очистной выемке в подземных условиях и на карьерах.

Сравнение экспериментальных объемов отбитой породы при ударе в случае чисто механического разрушения и после ЭТМ воздействия в зависимости от крепости пород (рис. 17.7) наглядно показывает эффективность ЭТМ ИН метода.

Известно, что механический способ разрушения целесообразно применять в породах с коэффициентом крепости  $f \leq 6$ . Комбинированный способ значительно расширяет границы применимости безвзрывного разрушения горных пород. При этом в качестве механического воздействующего органа в пластичных породах наиболее применим резец, в прочных скальных породах — ударный механизм.

ЭТМ ИН метод эффективен при модуле Юнга пород  $E \geq 5 \times 10^{11}$  Па и объемном коэффициенте теплового расширения  $\gamma_t > 10^{-5} \text{K}^{-1}$ .

Так как при ЭТМ ИН разрушение складывается из механических и термических усилий, приложенных к породе, весь этот процесс зависит от комплекса тепловых и механических свойств пород.

В Московском горном институте проф. Ю. И. Протасовым разработан ЭТМ проходческий комбайн «Ясиноватец-2ЭТМ» с роторным исполнительным органом. Нагревательные эле-

менты нагревают и разупрочняют поверхностный слой породы, а шарошки ее разрушают и отделяют от забоя. Отбитая порода отгружается ковшами на конвейер с защитным пылеподавляющим кожухом. Выработку диаметром 3,6 м в породах с коэффициентом крепости  $f \geq 10$  этот комбайн проходит со скоростью 1—1,25 м/ч. На исполнительном органе комбайна установлено свыше 30 генераторов ИК излучения общей мощностью 420 кВт и 15 трехлезвийных дисковых шарошек. Для сравнения отметим, что скорость проходки выработки в таких породах только механическим или ЭТ способом составляет всего лишь 0,2 м/ч.

Скорость проходки восстающих ЭТМ способом в апатито-нефелиновых породах с коэффициентом крепости  $f = 8 \div 10$  составляет в смену около 2,5 м при энергоемкости 450 МДж/м<sup>3</sup>.

Предварительная электромагнитная обработка полезных ископаемых перед измельчением в мельницах позволяет существенно повысить эффективность их измельчения.

Так, по данным исследований МГИ при облучении минералов и пород электромагнитным полем частотой 25 МГц и напряженностью 100—300 кВ/м величина затрачиваемой на их дробление работы существенно уменьшается: у магнетита в 2 раза, сфалерита и фосфоритовой руды — в 1,3—1,7 раза.

Так как изменение прочностных и упругих характеристик различных минералов под действием высокочастотного электромагнитного поля неодинаково, это обстоятельство может существенно улучшить эффект раскрытия минеральных зерен при дроблении, а значит, и повысить качество последующего обогащения.

Перспективно сочетание не только механического и электротермического воздействия на породы, но и другие, например: электродинамического и механического, электродинамического и электротермического, высокочастотных вибраций и электрогидравлического удара и др.

Так, при совместном ЭД и ЭТ воздействии на породы энергоемкость разрушения песчаника снижается до весьма малых значений — 0,36 МДж/м<sup>3</sup> (тепловой пробой при 30 кВ, ЭД пробой — при 120 кВ), а производительность возрастает в 5 раз по сравнению только с ЭТ или ЭД разрушением.

## **18. ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ И ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ**

### **18.1. ПОДДЕРЖАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Горное давление при ведении горных работ проявляется в виде повышенной концентрации нагрузок на некотором расстоянии от забоя (рис. 18.1) и, как следствие, в виде деформации и отжима породы в призабойной зоне, прогиба, расслоения, растрескивания и разрушения кровли.

Мгновенное высвобождение потенциальной энергии упругой деформации приводит к горным ударам.

Проведение мероприятий, исключающих опасное проявление горного давления, снижающих или регулирующих напряженное и нарушенное состояние массивов пород во времени, называется управлением горным давлением.



Рис. 18.1. Проявления горного давления в выработках:

*a* — изменение главных напряжений в выработке (по И. А. Турчанинову); *b* — разрушение пород на контуре очистной выработки и эпюра напряжений  $\sigma$  в зоне опорного давления.

*H* — глубина залегания выработки;  $\gamma H$  — горное давление в нетронутым массиве

В зависимости от типа выработок методы управления горным давлением различны. К ним относятся крепление выработок, оставление целиков, закладка выработанного пространства, управляемое обрушение кровли в выработанном пространстве и др.

Так как при проведении горных выработок нарушается равновесное состояние пород и образуется новое поле напряжений, возникает задача расчета этих напряжений. Величина и характер распределения в массиве нового поля напряжений существенно зависят от состояния массива пород и могут быть различными в зависимости от того, являются ли породы сплошной однородной упругой средой или средой, состоящей из плит (балок) различной толщины и прочности, или дезинтегрированной средой, характеризующейся только трением и зацеплением между частицами.

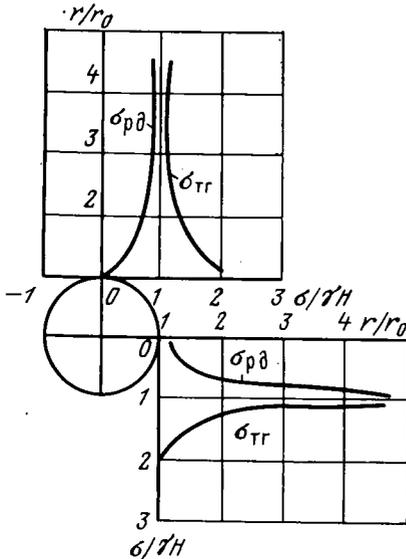
В сплошной однородной среде, подчиняющейся законам теории упругости, новое напряженное состояние зависит от напряжений, имевших место в ненарушенном массиве.

Так, для выработки круглого сечения распределение радиальных  $\sigma_{рд}$  и тангенциальных  $\sigma_{тг}$  напряжений может быть вычислено по формулам (рис. 18.2):

$$\sigma_{рд} = [1 - (r_0/r)^2] [0,5(\sigma_3 + \sigma_1) - 0,5(\sigma_3 - \sigma_1)(1 - 3 \cos 2\theta r_0^2/r^2)]; \quad (18.1)$$

$$\sigma_{\tau r} = 0,5 (\sigma_3 + \sigma_1) (1 + r_0^2/r^2) + 0,5 (\sigma_3 - \sigma_1) (1 + 3r_0^4/r^4) \cos 2\theta, \quad (18.2)$$

где  $r_0$  — радиус сечения выработки;  $r$ ,  $\theta$  — текущие полярные координаты;  $\sigma_3$  и  $\sigma_1$  — компоненты тензора напряжений в нетронутом массиве.

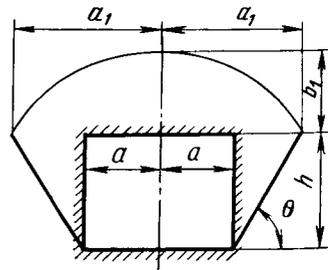


←

Рис. 18.2. Эпюры радиальных  $\sigma_{рд}$  и тангенциальных (окружных)  $\sigma_{\tau r}$  напряжений вокруг горизонтальной выработки круглой формы

Рис. 18.3. Элементы свода давления (обрушения):

$2a$  — ширина выработки;  $2a_1$  — ширина свода давлений (обрушения);  $b_1$  — высота свода обрушения;  $\theta$  — угол сдвига пород под действием свода обрушения



Отсюда, если  $\sigma_3 = \sigma_1$  (что встречается в условиях однородных скальных пород), то все напряжения будут сжимающими:

$$\sigma_{рд} = \sigma_0 [1 - (r_0/r)^2] \quad (18.3)$$

и

$$\sigma_{\tau r} = \sigma_0 [1 + (r_0/r)^2], \quad (18.4)$$

где  $\sigma_0$  — первоначальные напряжения в массиве;  $\sigma_0 = \gamma H$  — для горизонтальных выработок круглого сечения;  $\sigma_0 = \nu \gamma H (1 - \nu)$  — для вертикальных.

Выработка считается устойчивой, если

$$\sigma_{\tau r \max} = \nu \gamma H / (1 - \nu) < \sigma'_{сж}, \quad (18.5)$$

где  $\sigma'_{сж}$  — предел прочности породы при двухосном сжатии.

Если в уравнениях (18.1) и (18.2)  $\sigma_1 > \sigma_3$ , то в кровле возникают растягивающие напряжения, а в стенках выработки — сжимающие.

Если выработка проводится в сыпучей среде, то в этом случае на кровлю выработки давит лишь часть породы, оконтуренная так называемым сводом давления (рис. 18.3), в объеме

которого порода отделяется от всего массива и при отсутствии крепи обрушается.

Тогда нагрузка на каждый метр длины кровли горизонтальной выработки

$$F = 2ab\gamma, \quad (18.6)$$

где  $2a$  — ширина выработки;  $b$  — полная высота свода обрушения (давления).

Высота свода обрушения для рыхлых пород, коэффициент крепости которых  $f < 1$ , может быть определена по формуле

$$b = [a + h \operatorname{ctg} (45^\circ + \beta/2)]/f, \quad (18.7)$$

где  $h$  — высота выработки;  $\beta$  — угол внутреннего сопротивления;  $\beta = \operatorname{arctg} f$ . При  $f=0$ ,  $b \rightarrow \infty$ , при  $f=1$  высота свода обрушения равна  $a$  (половина ширины выработки).

Выработки, пройденные в слабых породах, крепят деревянной, металлической, бетонной крепью. Выбор вида крепи определяется степенью устойчивости вмещающих пород. Прочность элементов крепи должна быть больше значения  $k\gamma H$ , где  $k$  — коэффициент концентрации напряжений, равный 2—2,5.

В устойчивых скальных породах выработки оставляют без крепления.

Очистное пространство на время разработки какого-либо участка поддерживают от обрушения либо крепью, либо оставлением целиков определенной формы и размеров (ленточных — при длине целика  $l$ , значительно большей ширины  $b$ , и столбовых — при  $l \approx b$ ).

При проектировании схем поддержания горных выработок и управления горным давлением вычисляют:

максимальные размеры возможного незакрепленного пространства выработок;

характер возможного распределения напряжений с целью учета наиболее опасных зон их концентрации;

конструктивные параметры крепи;

размеры целиков.

Предельная длина  $L_{\text{пр}}$  устойчивой в незакрепленном состоянии горизонтальной выработки, по В. Д. Слесареву, зависит от предела прочности пород при растяжении  $\sigma_p$  и их объемного веса  $\gamma$  следующим образом:

$$L_{\text{пр}} = 2 \sqrt{\sigma_p H / \gamma}. \quad (18.8)$$

В массивах пород блочной структуры следует учитывать горизонтальные размеры заклинившихся элементарных блоков  $d$ . В этом случае предельная длина устойчивой выработки, по С. В. Ветрову, будет значительно меньше:

$$L_{\text{пр}} = 2d [\sigma_{\text{сж}} / (k\gamma H) - 1], \quad (18.9)$$

где  $k$  — коэффициент запаса; для устойчивого свода  $k=1$ , для неустойчивого  $k > 2,0$ , а для свода в предельном состоянии  $k=2,5$ .

Расчет размеров целиков производят также на основе прочностных свойств пород. Так, по методу Л. Д. Шевякова нагрузка, приходящаяся на целик,

$$F = S\gamma_{\text{ср}}H, \quad (18.10)$$

где  $S$  — площадь выработанного пространства, приходящаяся на целик;  $\gamma_{\text{ср}}$  — средний объемный вес пород по всей мощности  $H$  налегающих слоев (или свода давления).

Условие устойчивости целика определяется соотношением

$$s\sigma_{\text{сж}} \geq (SH\gamma_{\text{ср}} + sh_0\gamma_{\text{ц}}) \cdot n, \quad (18.11)$$

где  $\sigma_{\text{сж}}$  — предел прочности целика при сжатии;  $s$  — площадь поперечного сечения целика;  $h_0$  — высота целика;  $\gamma_{\text{ц}}$  — объемный вес пород целика;  $n$  — коэффициент запаса прочности ( $n = 2 \div 3$ ).

Отсюда

$$s/S = H\gamma_{\text{ср}} / [(\sigma_{\text{сж}}/n) - h_0\gamma_{\text{ц}}]. \quad (18.12)$$

С целью приближения расчетов к реальному состоянию массива пород учитывают неоднородность пород целика по прочностным свойствам, их трещиноватость, а также угол падения залежи  $\alpha$  и соотношение ширины  $a$  и высоты  $h_0$  целика:

$$s = H\gamma_{\text{ср}}S \cos \alpha \sqrt{h_0/a / \{[(\sigma_{\text{сж}}/n) - h_0\gamma_{\text{ц}}] k_{\text{м}}\}}, \quad (18.13)$$

где  $k_{\text{м}}$  — коэффициент однородности рудного массива;  $k_{\text{м}} = k_{\text{тр}}(1 - 3s_n/\sigma_{\text{сж}})$ ;  $s_n$  — среднее квадратичное отклонение предела прочности пород при сжатии, характеризующее однородность пород;  $k_{\text{тр}}$  — коэффициент трещиноватости рудного массива.

Во всех расчетах, кроме выбора правильных исходных уравнений, соответствующих данному состоянию массива, необходимо использование достоверных значений прочности  $\sigma_{\text{сж}}$  и  $\sigma_{\text{р}}$  массива пород. При этом, в первую очередь, надо учитывать строение массива, в частности наличие слабых прослоек.

Так, приведенный предел прочности целика со слабыми прожилками  $\sigma_{\text{пр}}$  значительно ниже  $\sigma_0$  однородной породы, слагающей целик, и может быть рассчитан по формуле, предложенной В. Г. Безкаравайным:

$$\sigma_{\text{пр}} = (\sigma_{\text{сл}}/\sigma_0) \sqrt{m h_0} \sigma_0 \left[ 1 - (0,165 k_{\text{сл}} \sqrt{2h/h_0} / k_{\text{сл. ср}}) \right] \quad (18.14)$$

где  $\sigma_{\text{сл}}$  — прочность слабого прослойка;  $h_0$  — высота целика;  $m$  — мощность прослойка;  $h$  — удаление прослойка от середины целика;  $k_{\text{сл}}$ ,  $k_{\text{сл. ср}}$  — коэффициенты снижения прочности при положении прослойка сверху или снизу и посередине соответственно.

В расчетах устойчивости подземных горных выработок следует применять прочностные параметры пород, определенные

при длительных нагружениях. Известно, что срок службы шахтных стволов составляет  $(3,5 - 4,5) \cdot 10^5$  ч, капитальных выработок (квершлагов, штреков)  $(0,8 \div 1,0) \cdot 10^5$ , откаточных штреков —  $2 \cdot 10^4$  ч и т. д. Все это время выработки должны находиться в устойчивом состоянии.

Породы в кровле и стенках выработки во времени проходят следующие стадии деформирования: упругую деформацию

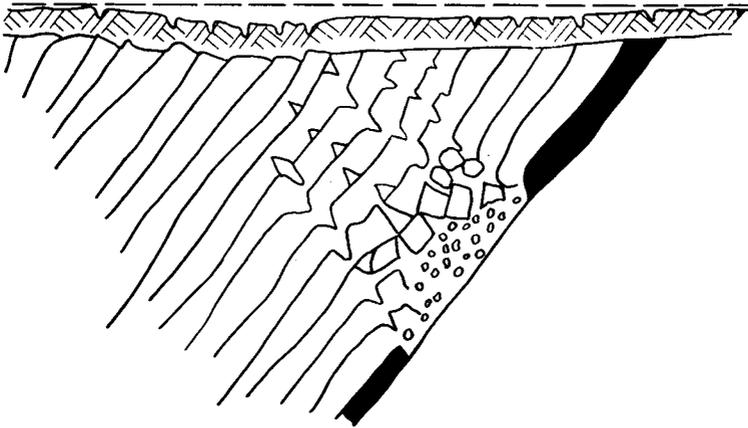


Рис. 18.4. Сдвигение пород при разработке крутого пласта

сразу после проходки, пластическую деформацию (ползучесть), разрывные деформации, уплотнение под крепью; породы в почве выработки — соответственно упругую деформацию и релаксацию напряжений.

В связи с этим проф. А. А. Борисовым предложено рассчитывать предельную длину незакрепленной горизонтальной выработки с учетом коэффициента ползучести пород  $k_{пз}$ . Тогда формула (18.8) приобретает вид:

$$L_{пр} = k_{пз} \sqrt{0,04\sigma_{сж}H/(n\gamma)}, \quad (18.15)$$

где  $k_{пз} = 0,5 \div 0,7$ ;  $n$  — запас прочности ( $n \approx 4$ ).

Естественно, что чем больше запас прочности, тем устойчивее будут выработки. Однако неоправданное завышение запасов прочности приводит к весьма большим потерям полезного ископаемого в целиках (до 60 % на калийных рудниках). Поэтому большое значение имеет повышение надежности и достоверности расчетов горного давления и параметров целика.

В результате разработки месторождения происходит обрушение или оседание пород над выработанным пространством, которое может достигнуть поверхности земли (сдвигение по-

род) (рис. 18.4). Площадь поверхности, захватываемая сдвижением, зависит от величины углов сдвижения  $\delta$ .

Процесс сдвижения обусловлен геологическими факторами и геометрическими размерами рудных тел, тектоническими и гидрогеологическими явлениями, системой разработки, прочностными свойствами массивов и их трещиноватостью.

Аналитический учет всех указанных факторов практически невозможен. Установлены лишь отдельные эмпирические зависимости. Так, обнаружено, что угол сдвижения  $\delta$  зависит от коэффициента крепости горных пород.

Для месторождений, сложенных слоистыми породами,

$$\delta = 55 + 1,5f - 0,45\alpha, \quad (18.16)$$

где  $\alpha$  — угол падения пород.

Устойчивость вмещающих горных пород и руд оказывает существенное влияние не только на выбор метода управления горным давлением, но и предопределяет вообще выбор той или иной системы разработки месторождения.

Так, если в устойчивых рудах и вмещающих породах применимы практически все системы разработки, то в неустойчивых вмещающих породах предпочтительны системы с отбойкой из магазинов, этажно-камерная, с магазинированием и т. д., а в неустойчивых рудах — системы с обрушением руды и пород, с креплением и последующим обрушением вмещающих пород и др.

## 18.2. УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

Устойчивость уступов и бортов карьеров обеспечивается правильным выбором углов откоса и высоты бортов и уступов. При этом важнейшими факторами, обуславливающими значения конечных величин расчета, являются нарушенность массива и их трещиноватость.

Теоретически в ненарушенном массиве высота вертикального уступа может быть очень большой ( $H = \sigma_{сж}/\gamma$ ).

Фактически допустимая величина уступа может оказаться весьма малой из-за трещиноватости, наличия грунтовых вод и воздействия технологических процессов, в первую очередь взрывных работ.

Предельную высоту вертикального откоса  $h$ , по Г. Л. Фищенко, рассчитывают следующим образом:

$$h = 2C \operatorname{ctg} (90 - \varphi/2)/\gamma, \quad (18.17)$$

где  $C$  — сцепление;  $\varphi$  — угол внутреннего трения пород.

Если в массиве существуют плоскости ослабления, направленные в сторону выемки под углом  $\beta > \varphi$ , то

$$h = C_{тр} \cos \varphi_{тв} / [\alpha \cos \beta \sin (\beta - \varphi_{тр}) \gamma], \quad (18.18)$$

где  $\varphi_{тр}$  и  $C_{тр}$  — соответственно угол внутреннего трения и сцепление по плоскости ослабления (трещине),  $\alpha$  — угол устойчивого откоса.

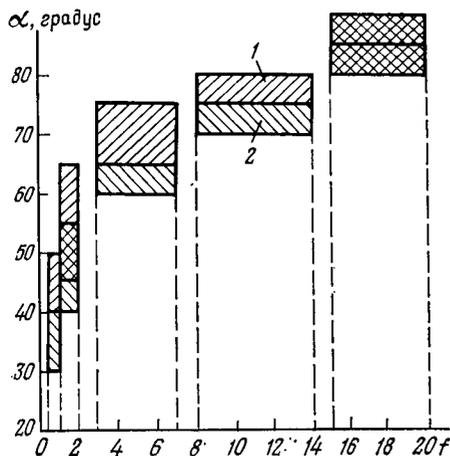


Рис. 18.5. Зависимость угла откоса уступа  $\alpha$  карьера от крепости пород  $f$ :  
1 — рабочий уступ; 2 — нерабочий уступ; высота уступа равна 5–12 м

Чем меньше угол откоса уступа или борта карьера, тем надежнее и дольше стоит откос. Однако неоправданное занижение углов откоса борта карьера приводит к значительному росту вскрышных работ.

Объем породы, подлежащей выемке из карьера, подсчитывается по формуле

$$V = S_d H_k + 0,5 P H_k^2 \operatorname{ctg} \gamma + 0,3 \pi H_k^3 \operatorname{ctg}^2 \gamma, \quad (18.20)$$

где  $S_d$  — площадь дна карьера;  $H_k$  — глубина карьера;  $P$  — периметр дна;  $\gamma$  — усредненный угол откоса бортов.

Так, при глубине карьера 200 м уменьшение угла откоса борта карьера с 60 до 50° приводит к возрастанию объема непроизводительных горных работ в 1,6 раза (на 4 млн. м<sup>3</sup>).

Малые углы откосов отвалов пород увеличивают площади, занимаемые ими, что также крайне нежелательно. Так, при открытом способе добычи, например, на каждый миллион тонн добытого угля приходится от 20 до 35 га нарушенных земель.

Предельную глубину карьера по условию устойчивости бортов, ослабленных трещинами и плоскостями напластования, определяют по формуле Г. Л. Фисенко:

$$H = 2C \operatorname{ctg} (45^\circ - \varphi/2) / \{\gamma [1 - \operatorname{ctg} \alpha_y \operatorname{tg} (\varphi_0/2)]\}, \quad (18.19)$$

где  $\varphi$  и  $\varphi_0$  — углы внутреннего трения пород соответственно по напластованию и под углом к напластованию.

Практика показывает, что достаточно надежно угол откоса уступа можно оценить по крепости горных пород, слагающих массив (рис. 18.5).

### 18.3. БОРЬБА С ПРОЯВЛЕНИЕМ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ УГЛЯ И ГАЗА

На участках месторождения, опасных по выбросу угля и газа или горным ударам, проводят соответствующие мероприятия по предотвращению опасных явлений.

Все мероприятия подразделяются на технологические, физические и физико-химические.

Технологические меры связаны с выбором соответствующих систем разработки, организационных мероприятий, техники и технологии, скорости подвигания забоев, обеспечивающих снижение до минимума вероятности возникновения внезапного выброса или опасных последствий выброса.

Физические меры — это меры предварительного воздействия на угольные пласты с целью ликвидации факторов, обуславливающих выброс. К ним относятся дегазация угольных пластов путем бурения опережающих скважин, увлажнение угольных пластов через скважины, обеспечивающее повышение пластичности и трещиноватости пласта, удаление газов. Воду нагнетают под давлением  $(0,8 \div 0,85) \gamma H$ . В ряде случаев используют камуфлетное и сотрясательное взрывание, приводящее к растрескиванию массива, увеличению газоотдачи, и иногда и к преднамеренному инициированию выброса в условиях отсутствия в забое людей и техники с целью разгрузки массива от скопившейся потенциальной энергии.

В связи с этим представляет интерес практическое использование потенциальной энергии пласта для целей добычания. Это направление разрабатывается проф. И. М. Петуховым и чл.-кор. АН СССР А. В. Докукиным.

Так, увеличение бара добычного комбайна до 2,2 м на шахтах Кизеловского угольного бассейна привело к возникновению микроударов в забое пласта, в результате чего происходило саморазрыхление угля, позволившее обходиться без предварительного рыхления угля буровзрывным способом. В результате интенсивность подвигания лавы увеличилась в 2 раза.

Использование выбросов и горных ударов для рыхления пород и углей наиболее целесообразно в так называемых схемах безлюдной выемки угля (при отсутствии людей непосредственно в очистном забое). Так, в процессе безлюдной выемки угля канатными пилами осуществлялось предварительное инициирование выбросов посредством вибрационного воздействия на пласт. Показатель эффективности работы канатных пил возрос при этом с 1—5 до 20—100.

Дегазацию угольных пластов осуществляют также путем гидроразрыва пласта.

Проф. А. С. Бурчаковым предложено предварительное тепловое воздействие на угольный пласт, основанное на использовании зависимости, согласно которой максимальная

величина сорбции метана  $\Delta a$  зависит от изменения температуры  $\Delta T$  углей:

$$\Delta a = -A\Delta T, \quad (18.21)$$

где  $\Delta a$  — прирост сорбционной емкости угля, м<sup>3</sup>/т горной массы;  $A$  — коэффициент, при давлении 1—10 МПа для углей с выходом летучих 5—50 % равный 0,5—0,2 м<sup>3</sup>/т·К.

Тепловое воздействие осуществляют в две стадии. В первую стадию в скважину нагнетают насыщенный пар при температуре 300 °С. Во вторую стадию в пласт нагнетают воду при температуре 125 °С и давлении 12 МПа. После этого скважина закрывается и выдерживается 3—4 мес.

Осуществление теплового воздействия на пласт по данной методике позволило снизить природную газоносность угля на 9,6 м<sup>3</sup>/т и достичь коэффициента дегазации, равного 0,75.

Снижения напряжений в призабойной части пласта можно достигнуть интенсивным его охлаждением.

Физико-химическое воздействие на угольный пласт осуществляют с целью либо его упрочнения и консервации свободного метана в пласте, либо снижения количества метана в пласте.

Упрочнение пласта производят нагнетанием в него различных смол (например, мочевиноформальдегидной).

Снижение метана в пласте в соответствии с исследованиями проф. Э. М. Москаленко можно осуществить микробиологическим воздействием: в пласт нагнетают раствор, насыщенный бактериями, пожирающими метан.

#### 18.4. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ШАХТ И РУДНИКОВ

При подземной разработке месторождений полезных ископаемых задача регулирования теплового режима горных выработок имеет важное значение, особенно на больших глубинах и в районах вечной мерзлоты.

Источники тепловыделения в горных породах можно подразделить на источники, связанные с физическими и химическими явлениями в породных массивах, и технологические, обусловленные технологическими процессами.

В первую группу входят тепловыделения из породного массива, подземных вод, перемещаемых пород, в результате окислительных реакций и др., во вторую — тепловыделения из-за электрических потерь и потерь механической энергии при работе машин и механизмов, из-за адиабатического сжатия воздуха при движении по выработкам, тепловыделения рабочих.

Тепловыделения породного массива  $Q_T$  зависят от величины коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ :

$$Q_T = \alpha (t_{ст} - t) Pl, \quad (18.22)$$

где  $t_{ст}$  и  $t$  — температура стенок выработки и воздуха соответственно;  $P$  — периметр выработки;  $l$  — длина выработки.

В соответствии с нормами промышленной санитарии температура воздуха в зоне работы людей должна быть не выше 26 °С при соответствующей скорости движения вентиляционной струи.

Параметры вентиляционных струй рассчитывают с учетом тепловых свойств массивов горных пород, омываемых воздушным потоком. Так, температура воздуха в воздухоподающем стволе  $T_{в}$  на глубине  $H$  возрастает по сравнению с температурой поступающего в ствол воздуха  $T_{вн}$ .

$$T_{в} = T_{вн} + RH + 0,5(\Gamma - R)H^2 Pmf(t), \quad (18.23)$$

где  $R$  — конвективный градиент, образующийся от абсолютных источников тепла, К/м;  $\Gamma$  — геотермический градиент пород, К/м;  $P$  — функция, зависящая от тепловых свойств породы;

$$P = 0,9\lambda\Pi / (Qc_v \sqrt{a}); \quad (18.24)$$

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности породного массива;  $Q$  — количество подаваемого воздуха;  $c_v$  — объемная теплоемкость воздуха;  $a$  — температуропроводность пород;  $m$  — коэффициент, учитывающий фактор времени;

$$m = 2\sqrt{t} / (\sqrt{t} + \sqrt{t_1}); \quad (18.25)$$

$t$  и  $t_1$  — время, истекшее соответственно с момента начала и окончания проведения выработки;

$$f(t) = (1 + 0,45 \sqrt[4]{at/D^2}) / \sqrt{t}; \quad (18.26)$$

$D$  — диаметр выработки.

Проветривание выработок на больших глубинах и в скальных породах обеспечивает постепенное снижение их температуры. При проветривании выработок, пройденных в мерзлых породах, наоборот, происходит нагревание окружающего выработки породного массива.

Поэтому основное требование техники безопасности для шахт, расположенных в районах вечной мерзлоты, — предотвращение прогрессирующего оттаивания мерзлых пород вокруг выработок, вызывающего деформирование крепи, ее вдавливание в почву, оползание выработок и т. д.

## 19. ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

### 19.1. ПРОЦЕССЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обогащение производят с целью получения полезных компонентов и концентратов полезных ископаемых, качество которых удовлетворяло бы требованиям либо их промышленного использования, либо дальнейшей переработки. Качество продук-

тов обогащения определяется содержанием в них полезных компонентов, полезных и вредных примесей, крупностью, влажностью, в ряде случаев прочностью частиц и т. д.

При обогащении не происходит химических превращений минералов; оно носит в большинстве случаев характер обработки — разделения или сепарации.

Обогащаемость пород определяется особенностями их состава и строения — размерами минеральных частиц, их взаимным прорастванием, близостью химических и физических свойств минералов, а также методом обогащения.

Методы обогащения пород основаны на различии в свойствах различных минералов.

Существуют следующие методы обогащения: механизированная разборка руды; гравитационные; флотационные; магнитные; электрические; избирательное дробление и др.

При механизированной разборке руды используют наиболее отличительные оптические и радиационные характеристики пород и руд — коэффициенты отражения света, люминесцентную способность минералов при облучении их рентгеновским или ультрафиолетовым излучением, коэффициенты поглощения гамма-излучения и др. На этом принципе работают оптические сепараторы алмазов, ультрафиолетовые сепараторы шеелита.

В урановой промышленности широко используют радиометрические сепараторы, основанные на естественной радиоактивности урановых руд. Существуют такие же устройства для выборки породы из углей, так как радиоактивность каменных углей значительно меньше, чем вмещающих пород.

Известны термоадгезионные методы механизированной разборки, основанные на свойствах минералов по-разному поглощать инфракрасные лучи.

Гравитационные методы обогащения основаны на различии в плотности минералов, слагающих полезное ископаемое.

Одним из видов гравитационного обогащения является обогащение в тяжелых суспензиях.

Суспензия — это взвесь в воде тонкого порошка твердого вещества с достаточно высоким удельным весом, имеющая свойства тяжелой однородной жидкости. Куски минералов, удельный вес  $\gamma_0$  которых меньше удельного веса суспензии  $\gamma_{ос}$ , будут всплывать, куски, у которых  $\gamma_0 > \gamma_{ос}$ , тонуть.

В тяжелых суспензиях обогащают полезные ископаемые крупных фракций — уголь крупностью до 400 мм, руду крупностью до 100 мм. Материал мельче 3—10 мм таким способом, как правило, не обогащают, так как в суспензии он плохо разделяется.

При обогащении углей в тяжелых суспензиях все частицы с плотностью ниже  $1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> относятся к концентрату, с плотностью  $(1,4 \div 1,8) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> — к промежуточному про-

дукту и с плотностью более  $1,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> переходят в хвосты.

Флотационный метод обогащения основан на способности одних минералов прилипать к воздушным пузырькам в водной среде и переходить вместе с ними в пенный слой, других — оставаться в воде. Флотируют только измельченные полезные ископаемые — сульфидные руды с частицами размером не более 0,5 мм и угли с частицами размером не более 1 мм.

Флотуемость полезных ископаемых обусловлена различной удельной поверхностной энергией минералов и определяется по краевым углам смачивания минералов, времени, необходимому для прилипания минерала к пузырьку, прочности прилипания и заряду поверхности минералов.

Различают естественную и искусственную флотуемость минералов. Естественной флотуемостью обладает небольшое число минералов, имеющих высокую степень гидрофобности, — тальк, слюда, графит и сера. У этих минералов краевой угол  $\Theta$  близок к  $90^\circ$ . Остальные минералы перед флотацией проходят специальную обработку агентами, изменяющими величину их смачиваемости.

Сущность технологии флотации каменных углей, например, заключается в повышении гидрофобности зерен органической части угля и в снижении гидрофобности зерен минеральной части. В связи с малой себестоимостью угольного концентрата реагенты, применяемые при флотации, должны быть дешевыми. При обогащении углей, содержащих серу, важно осуществить подавление флотации пирита. Уголь флотируют различными углеводородными маслами, флотуемость пирита подавляют, например, известью.

Магнитные методы обогащения основаны на различии магнитных восприимчивостей минералов, их остаточной намагниченности, коэрцитивной силы и температуры Кюри.

Этими методами обогащают магнитные руды черных и редких металлов. Слабо магнитные марганцевые, бурожелезистые и сидеритовые руды обогащают в сильных магнитных полях, так как воздействие магнитных полей большой напряженности приводит к изменению магнитной восприимчивости минералов  $\kappa$ .

При обогащении сильно магнитных руд применяют магнитные поля напряженностью  $H = (4 \div 9) \cdot 10^4$  А/м, слабо магнитных — поля напряженностью, достигающей  $1,5 \cdot 10^8$  А/м.

Разделение разных частиц руды, обладающих восприимчивостью  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  (при  $\kappa_1 > \kappa_2$ ), происходит при соблюдении условий:

$$F_{1м} = \kappa_1 (H \text{ grad } H)_1 > \Sigma f_{1мех}; \quad (19.1)$$

$$F_{2м} = \kappa_2 (H \text{ grad } H)_2 < \Sigma f_{2мех}, \quad (19.2)$$

где  $F_{1м}$  и  $F_{2м}$  — удельная магнитная сила, действующая на частицы;  $(H \text{ grad } H)_1$  и  $(H \text{ grad } H)_2$  — сила внешнего магнитного

поля, действующего на каждую частицу;  $\Sigma f_{1 \text{ мех}}$  и  $\Sigma f_{2 \text{ мех}}$  — сумма всех механических сил, противодействующих магнитной силе.

Эффективность разделения минералов  $\eta$  в зависимости от их магнитных свойств, по В. И. Кармазину, может быть определена из уравнения

$$\eta = 1 - \exp(k\kappa'), \quad (19.3)$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий конструкцию сепаратора и условия сепарации;  $\kappa'$  — относительная разность магнитных восприимчивостей разделяемых минералов;  $\kappa' = (\kappa_1 - \kappa_2) / \kappa_1$ .

Сущность электрических методов обогащения заключается в избирательном действии электрического поля на заряженные минеральные частицы. В электрическом сепараторе руда перемещается по электрическому полю. В зависимости от электрических свойств, крупности и формы минеральные частицы двигаются по различным траекториям и могут быть разделены.

Сила  $F_1$ , обусловленная неоднородностью электрического поля и действующая на частицу радиусом  $r$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{1r}$  в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{2r}$ , рассчитывается по формуле

$$F_1 = \epsilon_{2r} \epsilon_0 r^3 k_n E_3^2 (\epsilon_{1r} - \epsilon_{2r}) / (\epsilon_{1r} + 2\epsilon_{2r}), \quad (19.4)$$

где  $k_n$  — коэффициент неоднородности электрического поля,  $\text{м}^{-1}$ ;  $k_n = \text{grad } E_3 / E_3$ .

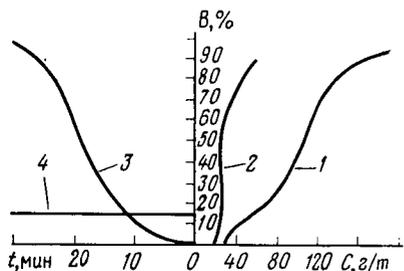
Таким образом, при  $\epsilon_{1r} > \epsilon_{2r}$  частицы перемещаются в сторону возрастания напряженности поля, и наоборот. Этот принцип использован в методе диэлектрической сепарации минералов. Двигаясь в жидкости с определенной величиной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{2r}$ , минералы с большим значением  $\epsilon_{1r}$ , чем у жидкости, притягиваются к металлической ленте, представляющей собой один из электродов, и разгружаются в конце ее в приемник. Минералы с меньшим значением  $\epsilon_{1r}$  выталкиваются из поля.

Частицы минералов заряжаются в поле коронного разряда, трением, нагревом, радиоактивным облучением и т. д.

Электрическая сепарация применяется при доводке концентратов руд редких металлов (титано-цирконовые пески), при обогащении неметаллических полезных ископаемых, например алмазов и т. д.

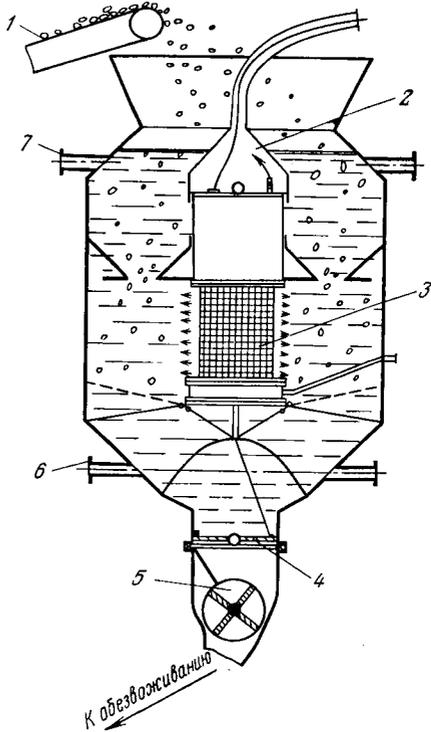
Метод избирательного дробления основан на том, что в некоторых рудах минеральные составляющие значительно различаются по дробимости. При дроблении таких руд, как правило, одни минералы измельчаются больше, другие — меньше. В результате последующей классификации по крупности можно выделить обогащенную фракцию. Такой метод применяют, например, при обогащении бурожелезистых руд (кварц и бурый железняк).

**Совершенствование методов обогащения.** Исследования физических свойств минералов и их изменений в различных внешних полях позволяют либо интенсифицировать существующие методы обогащения, либо разрабатывать новые. Для целей интенсификации широко используют воздействие акустического поля на жидкости и пульпы, в которых происходит обогащение.



*Рис. 19.1.* Степень извлечения полезного компонента  $B$  при флотации ильменита без воздействия ультразвука (1) и после воздействия его на ильменит (2), пирит (3) и халькопирит (4):

$C$  — концентрация флотореагента;  $t$  — время флотации



*Рис. 19.2.* Схема акустической установки для очистки нерудных материалов от глин (по В. С. Ямшикову): 1 — конвейер; 2 — защитный кожух; 3 — излучатель; 4 — затвор; 5 — бункер-дозатор; 6 — водоподающая труба; 7 — сливная труба

Ультразвуковое облучение флотируемых минералов за счет эффекта кавитации снимает с них поверхностные слои — минеральные покрытия, окисные пленки, загрязнения и т. д. В результате эффективность флотации возрастает. Влияние предварительной ультразвуковой обработки на флотацию показано на рис. 19.1. При воздействии ультразвука поверхность минералов очищается избирательно. Так, ультразвуковая обработка пирита приводит к разрушению на его поверхности адсорбционных слоев флотореагентов, в то время как на халькопирит упругие колебания не действуют.

Способность ультразвука очищать поверхность используется и как самостоятельный метод обогащения, например, при очистке кварцевых, стекловых, полевошпатовых песков и др. (рис. 19.2).

Для целей повышения эффективности обогащения широко применяют тепловое воздействие.

Так, часто перед обогащением руду обжигают (до температуры 300—500 °С), поскольку слабо магнитные окислы, гидроокислы и карбонаты железа при обжиге в соответствующей атмосфере переходят в сильно магнитные (например, в магнетит  $\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4$  или маггемит  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ).

Так как с изменением температуры существенно и для разных минералов по-разному меняются электрические свойства пород ( $\epsilon_0$ ,  $\rho_r$ ,  $\text{tg}\delta$ ), посредством нагрева руд с последующим охлаждением (или без него) можно значительно расширить область применения электрических методов их обогащения.

В результате воздействия высоких температур на руды одни минералы разрушаются, а другие остаются без изменения. Например, такие, как барит, кианит, сподумен и флюорит, при нагреве превращаются в порошок. Это явление применяется в методе обогащения — декрипитации. После нагрева, разрушения и охлаждения руду разделяют по крупности и таким образом обогащают.

Воздействие низких температур также положительно влияет на процесс сепарации, так как в этом случае возникают внутренние термические напряжения, способствующие раскрытию минеральных зерен.

Эффективность обогащения руд существенно зависит от качества их измельчения. Измельчение должно быть таким, чтобы происходило четкое отделение зерен различных минералов друг от друга, поэтому в последнее время большое значение приобретают исследования в области усиления эффекта раскрытия минеральных зерен при дроблении и измельчении полезных ископаемых.

## 19.2. СКВАЖИННЫЕ (ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ) МЕТОДЫ ДОБЫВАНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Сущность большинства скважинных способов разработки заключается в проведении скважин до залежи полезного ископаемого, изменении его агрегатного состояния под воздействием различного рода агентов (механическая, электрическая, тепловая энергия, химические реагенты и т. п.) и последующем отводе через скважины измененного полезного ископаемого или его компонентов на поверхность (рис. 19.3).

При скважинных методах полностью меняется технология разработки месторождения, так как чаще всего добывается лишь полезный компонент, а затраты труда и средств на извлечение пустых пород, неиспользуемой части руд и т. д. обычно отсутствуют. Упрощается также дальнейший процесс переработки полезного ископаемого.

Скважинные способы используются только при добыче полезных ископаемых, существенно отличающихся по своим свой-

ствам от вмещающих горных пород. Их можно разделить по способу воздействия на следующие группы:

методы механического воздействия (скважинная гидро-быча);

методы термического воздействия: расплавление, разложение полезного ископаемого на-гревом, восстановление и возгонка;

методы физико-химического воздействия: растворение водой, химическое выщелачивание, электролиз.

Методы механического воздействия основаны на разрушении и измельчении руды непосредственно на месте залегания гидромониторной струей воды через скважины и выдаче руды в виде гидросмеси на поверхность.

Эти методы перспективны при разработке глубокозалегающих месторождений песков, гравия, погребенных россыпных месторождений (янтарные, касситеритовые, ильменитовые, золотоносные), мармитовых, марганцевых руд, бурых углей. Метод механического воздействия был использован при добыче фосфоритоносных песков Кингисеппского месторождения, водонасыщенных песков в Сибири и др.

Гидродинамическое разрушение пород осуществляется струей воды, ударяющей в горную породу с усилием, превосходящим предел прочности породы при сдвиге  $\tau_{сдв}$ . Вибрация струи снижает сопротивление песчаных грунтов сдвигу, добавление ПАВ улучшает эффект разрушения и размывания пород.

Методы физико-химического воздействия. В этой группе весьма перспективны методы выщелачивания полезных компонентов из руд, используемые в гидрометаллургии. Выщелачивание — это селективное растворение ценных минералов; оно может быть использовано для выделения полезного компонента как из богатых, так и из бедных руд.

Каменную соль, сильвин, карналлит и другие минералы, обладающие высокой растворимостью, можно выщелачивать путем непосредственного воздействия на них воды. При этом получают продукты высокой степени чистоты и попутно осуществляют разделение различных галогенидов.

В СССР добыча каменной соли подземным растворением в ближайшие годы достигнет 20 млн. т в год. Добыча этим способом осуществляется через одну скважину. Интенсификация выщелачивания достигается при увеличении активности раство-

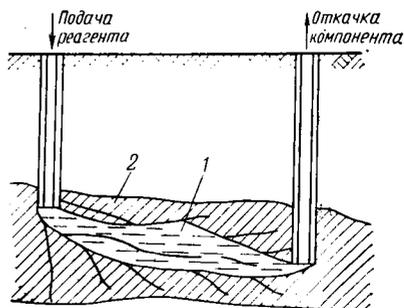


Рис. 19.3. Принципиальная схема простейшего физико-химического метода добычи полезного ископаемого непосредственно из залежи:

1 — реагент; 2 — залежь

рителя посредством повышения его температуры, применении механических устройств для создания турбулентного режима движения растворителя в периферийных участках камеры, использовании гидравлического разрыва соляного пласта.

Выщелачивают также медные и некоторые другие сульфидные и окисленные руды.

Подземное выщелачивание применяют обычно для добычи меди из бедных медных руд, которые разрабатывать другим способом нерентабельно. Выщелачивание осуществляется естественным или искусственным способом. Естественное выщелачивание заключается в сборе рудничных вод, прошедших через рудное тело, и в осаждении из них растворенной меди. При искусственном выщелачивании руду периодически орошают водой. Для ускорения процесса используют химически активные среды — кислоты, щелочи. Эту воду затем собирают и перерабатывают с целью извлечения металла. Выщелачивание может производиться также на земной поверхности. Оно может быть дополнительным источником добычи металла из отвалов бедных некондиционных руд. Аналогично осуществляют выщелачивание бедных урановых руд.

Высокая эффективность выщелачивания достигается дополнительным наложением физических полей (температуры, упругих колебаний, высокочастотных электромагнитных полей, магнитной обработкой воды и др.), которые активизируют течение химических реакций. Так, установлена способность ультразвука в десятки раз усиливать эффект выщелачивания меди из сульфидных медных руд. Это явление объясняется энергетическим воздействием кавитации на выщелачиваемую среду. В ультразвуковом поле в течение 30 мин из хризоколлы извлекается практически 100 % меди, из халькозина — 72 %.

Для интенсификации процесса выщелачивания меди и других ценных металлов используют некоторые виды бактерий (бактериальное выщелачивание), которые усваивают серу и увеличивают концентрацию серной кислоты в рудничных водах. Доказана возможность бактериального выщелачивания медных, никелевых, цинковых, бедных окисленно-карбонатных марганцевых, кобальтовых руд и др. Скорость выщелачивания меди, железа и цинка при наличии бактерий в среде возрастает от 2 до 12 раз.

Интересны предложения по добыче металлов путем электролиза в подземных условиях, так как в этом случае из недр земли непосредственно можно добывать чистый металл, например медь и серебро. Процесс электролитической добычи металлов состоит в предварительном растворении руды и последующем электролизе, осуществляемом с помощью электродов, погруженных в раствор через скважины.

Можно использовать также ионную проводимость. Как известно, ионной проводимостью обладают стекла, галогенидные

соединения, нитраты, сульфаты, соли щелочных, щелочно-земельных металлов и легко ионизируемых тяжелых металлов. Большинство этих соединений имеет униполярную проводимость, т. е. в электрическом поле перемещаются либо катионы, либо анионы. Процесс ионного переноса вещества медленный, поэтому для получения желаемого результата прохождение тока через массив должно быть длительным.

Из методов термического воздействия широко известна подземная газификация углей.

Газификация углей заключается в их подземном сжигании при определенном режиме и отводе получающегося горючего или технологического газа. В простейшем случае для этого бурят скважины, вскрывающие пласт, предназначенный для газификации. Между скважинами производят сбойку. При этом создается канал, по которому могут проходить газы и воздух. После этого пласт поджигают, в одни скважины непрерывно подают воздух, из других отводят горючий газ. В зависимости от режима дутья получают газ различного химического состава. Первые промышленные опыты по газификации были начаты еще в 1940 г. в Донбассе (Лисичанская, Горловская и другие станции) и в Подмосковном угольном бассейне. В настоящее время методы подземной газификации совершенствуются с целью повышения качества газа и полноты отработки пластов.

Подземная перегонка сланцев впервые была осуществлена в Швеции с целью непосредственного получения жидкого топлива. Для этого в намеченном месте бурят скважины, расположенные в плане в виде шестиугольника. В каждую скважину опускают электронагреватель, повышающий температуру пласта до 400—500 °С. При этой температуре сланец разлагается. Продукты перегонки сланца отводят из центральной скважины.

Широко распространен способ подземной выплавки серы, заключающийся в следующем (рис. 19.4). В пласт самородной серы пробуривается вертикальная скважина диаметром 250—300 мм, в которой размещается комплект труб. По одной из них подается перегретая вода (160—170 °С), которая проникает в пласт и выплавляет самородную серу (температура плавления серы 115 °С). Расплавленная сера стекает к скважине и поступает в трубу, по которой она с помощью сжатого воздуха поднимается на поверхность и транспортируется на склад.

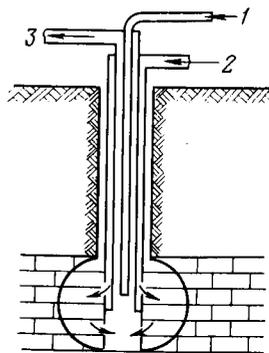


Рис. 19.4. Схема метода подземной выплавки серы перегретой водой:

- 1 — подача сжатого воздуха;
- 2 — подача перегретой воды;
- 3 — выдача расплавленной серы

Одной скважиной можно добыть до 4000 т серы (при мощности пласта примерно 30 м), причем обеспечивается выплавка серы из участка диаметром 20—30 м.

Процесс выплавки серы может быть легко автоматизирован. В СССР в результате работ, проведенных ГИГХСом (проф. В. Ж. Аренс), МГИ и другими организациями, в настоящее время уже введены в эксплуатацию и функционируют скважины подземной выплавки серы в Предкарпатском сероносном бассейне и на Гаурдакском месторождении серы.

Сера плавится, когда весь ее объем нагрет до температуры плавления и получает дополнительное количество теплоты  $Q_{пл}$ , пропорциональное удельной теплоте плавления серы ( $q_{пл} = 80 \text{ МДж/м}^3$ ).

В расчетах подземной выплавки серы используют показатели плотности серы и руды, пористости, удельной теплоемкости и др.

При использовании метода подземной выплавки серы вода в массиве распространяется в основном по трещинам.

Поэтому в слабо проницаемых породах необходимо повышать их коэффициент проницаемости, например, методом соляно-кислотной обработки пласта.

Прогрев и плавление серы, расположенной в плотном массиве, обусловлены весьма малой теплопроводностью массива и поэтому малоэффективны. В связи с этим имеет значение изыскание других способов передачи тепла в массив с целью выплавки серы. Перспективен, например, высокочастотный электромагнитный нагрев серных руд (рис. 19.5). Под воздействием электромагнитного поля массив нагревается за счет диэлектрических потерь независимо от его проницаемости, трещиноватости и теплопроводности. Скорость нагрева, таким образом, определяется только электрическими свойствами и теплоемкостью нагреваемого объема (рис. 19.6). Извлечение серы увеличивается.

Основные свойства, определяющие процесс плавления при ВЧ воздействии, — это диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, удельная теплоемкость, объемная масса и коэффициент теплопроводности пород.

Некоторые соединения, например мышьяковистые, сурьмянистые и другие, способны возгоняться. При нагревании до определенной температуры они переходят из твердого состояния в парообразное. На этом явлении основан метод возгонки. При пропускании через рудную залежь горячего инертного газа соединения переходят в газообразное состояние и выводятся по скважине на поверхность.

Методы восстановления металла непосредственно на месторождении применимы при добыче ртути, так как ртуть выделяется из киновари при нагревании до температуры  $450^\circ\text{C}$ . Этот способ по сравнению с традиционным подземным вдвое экономичнее.

Скорость термической эрозии киновари  $u$  описывается уравнением

$$u = a(T_2 - T_{кр}) / \{\lambda [1/k_T + l\lambda_0](T_{кр} - T_0)\}, \quad (19.5)$$

где  $a$  — температуропроводность;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $T_2$  — температура горячих газов;  $T_0$  — начальная тем-

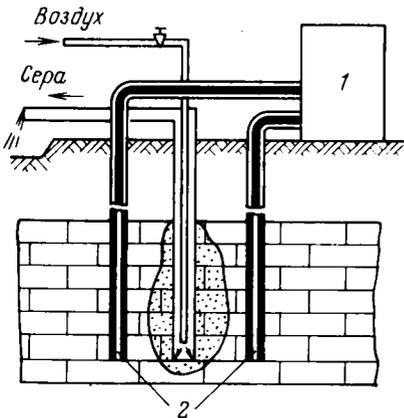


Рис. 19.5. Схема подземной выплавки серы высокочастотным методом:

1 — генератор высокой частоты; 2 — электроды

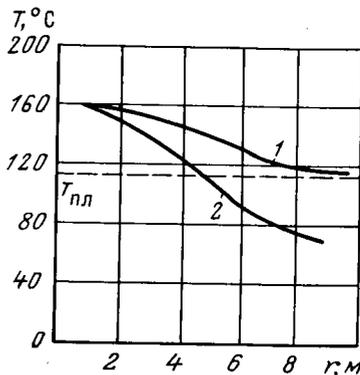


Рис. 19.6. Сравнение радиуса нагрева серосодержащего массива электрическим высокочастотным полем (1) с радиусом нагрева перегретой водой (2) после 16 сут нагрева массива

пература массива;  $T_{кр}$  — температура восстановления;  $k_T$  — коэффициент теплоотдачи;  $l$  — эффективная толщина обожженного слоя;  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности обожженного материала.

## 20. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

### 20.1. СВОЙСТВА ПОРОД КАК ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

Получение информации об изменениях состава и состояния массива горных пород в различных технологических процессах их добычи и переработки является одной из важнейших задач современного горного производства.

Система контроля и управления технологическим процессом включает многие этапы, среди которых исходным является фиксация величины контролируемого переменного параметра.

В физике горных пород рассматриваются процессы получения информации только о горных породах. Это осуществляется разнообразными датчиками, основанными на физических свойствах пород и закономерностях их изменения под воздействием внешних полей, механизмов, технологических процессов.

Иногда в породе закладывается определенный искусственный элемент, на который воздействует порода и изменения которого затем передаются регистрирующему прибору.

Информация от породы может поступать также через датчик к регистрирующему прибору непосредственно, при этом информатором служит сама горная порода.

Сигнал, поступающий на регистрирующий прибор, может быть либо следствием естественных процессов в горной породе, либо ее ответом на воздействие внешнего измерительного поля. В первом случае измерения называются пассивными, во втором — активными.

Технологические методы контроля подразделяются на следующие группы:

методы контроля напряженного состояния, устойчивости и нарушенности массивов пород и горных выработок в процессе ведения горных работ;

методы получения своевременной информации об опасных участках в массивах пород, способных нарушить режим работы предприятия или понизить качество полезного ископаемого (включениях крепких пород, карстах, сильно разрушенных зонах, пльвунах, водонаполненных полостях и т. д.);

методы прогноза опасных динамических явлений в массивах горных пород — внезапных выбросов угля и газа, горных ударов, обрушений и вывалов;

методы определения и контроля качества полезных ископаемых (содержания полезных компонентов, содержания вредных примесей, например золы и серы в углях, влажности, других качественных характеристик, по которым существуют определенные требования);

методы контроля эффективности различных технологических процессов — режимов работы породоразрушающих механизмов с целью согласования их со свойствами пород, направления движения угольных комбайнов по пласту и др.

## **20.2. КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ, УСТОЙЧИВОСТИ И НАРУШЕННОСТИ МАССИВОВ И ВЫРАБОТОК**

В результате наблюдений за напряженным состоянием пород устанавливают:

величину напряжений в породах, окружающих выработку, в целиках и крепи;

изменения напряжений во времени и пространстве; величину деформации выработок, целиков и крепи;

степень нарушенности несущих конструкций и массивов и ее изменения во времени.

Эти данные позволяют прогнозировать опасное состояние на отдельных участках шахты или карьера и, следовательно, заблаговременно принять меры по предотвращению или локализации обрушений.

Наблюдения за откосами и бортами карьеров и отвалов осуществляют преимущественно маркшейдерской съемкой — методом реперов. Для этого по наиболее опасным направлениям в массиве пород забивают реперы, относительное сдвижение которых в плане и по высоте регулярно контролируют при помощи теодолита и нивелира. На основании измерений получают информацию о скорости и направлении смещения отдельных участков массива и устанавливают необходимые профилактические мероприятия.

Метод реперов применим лишь при условии начавшейся деформации массива. Часто же необходимо заранее определить степень его устойчивости, для чего используют различные физические методы.

Весьма существенным фактором, обуславливающим устойчивость горных массивов, является степень их трещиноватости и нарушенности. Для количественной оценки этого параметра можно воспользоваться скоростью прохождения упругих волн  $v$ , так как она зависит от трещиноватости пород. Как известно, отношение скоростей распространения упругих колебаний в нарушенном массиве и монолите может служить характеристикой нарушенности массива  $A_i$ .

Оценить нарушенность массива можно также по отношению скоростей распространения продольных и поперечных волн  $v_p/v_s$ . Как известно, большие значения  $v_p/v_s$  соответствуют более нарушенным породам. Непосредственно с нарушенностью пород связан также коэффициент поглощения упругих колебаний  $\theta$ , характеризующий состояние массива.

Степень нарушенности массива и его напряженное состояние определяют также по измерениям его электрической проводимости. Последняя, так же как и скорость распространения упругих волн, зависит от напряженного состояния пород. Поэтому, заранее установив подобную закономерность для пород определенного месторождения и введя поправки на влажность и возможную нарушенность массива, можно непосредственно по величинам  $v$  или  $\sigma_z$  определить величину напряжений в бортах карьера.

В подземных условиях наиболее распространенный механический метод оценки напряжений — это метод разгрузки, основанный на способности элемента массива упруго восстанавливать первоначальную форму после его отделения от основного нагруженного массива. Этот метод применяют в различных вариантах, одним из них является метод торцовых измерений (схема ВНИМИ).

В изучаемом массиве на требуемую глубину пробуривают скважину (рис. 20.1). Забой скважины выравнивают и на него наклеивают тензодатчики — электрические, фотоупругие или муаровые. Затем буровой коронкой создают разгрузочную щель и получают керн, т. е. отделяют элемент с датчиками от остального массива. Очевидно, если этот элемент до отделения испы-

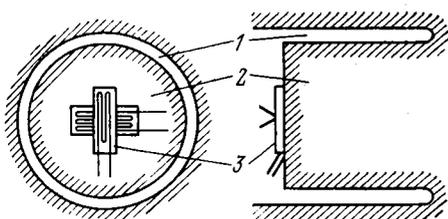


Рис. 20.1. Схема измерения напряжений методом полной разгрузки в скважине в массиве: 1 — разгрузочная щель; 2 — керн; 3 — тензодатчики

тывал напряжения  $\sigma$ , действующие в массиве, то после отделения он должен расширяться на величину относительной деформации  $\epsilon$ , регистрируемую тензодатчиком и зависящую от  $\sigma$  и упругих свойств породы.

Таким образом, зная упругие свойства породы, можно вычислить напряжения в породе.

Для того чтобы учесть как вертикальные, так и горизонтальные напряжения, на забой скважины наклеивают в строго ориентированном положении от двух до четырех датчиков.

Если два датчика расположены друг относительно друга под углом  $90^\circ$  и строго ориентированы по направлению главных нормальных напряжений, то, замерив по ним  $\epsilon_z$  и  $\epsilon_x$ , можно рассчитать напряжения:

нормальное вертикальное

$$\sigma_{\max(z)} = E(\epsilon_z + \nu\epsilon_x)/(1 - \nu^2); \quad (20.1)$$

нормальное горизонтальное

$$\sigma_{\min(x)} = E(\epsilon_x + \nu\epsilon_z)/(1 - \nu^2); \quad (20.2)$$

касательное максимальное

$$\tau_{\max} = E(\epsilon_x - \epsilon_z)/[2(1 + \nu)]. \quad (20.3)$$

Напряжения в массиве можно исследовать также замером деформации скважин при помощи деформометров. Известно, что в общем случае зависимость между напряжениями  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$  и изменением  $\Delta D$  диаметра  $D$  круглого отверстия для изотропной, однородной и упругой пластинки описывается следующим уравнением:

$$\Delta D = D [(\sigma_x - \sigma_y) + 2(\sigma_x - \sigma_y)(1 - \nu^2) \cos 2\varphi + 4\tau_{xy}(1 - \nu^2) \times \sin 2\varphi - \nu\sigma_z]/E, \quad (20.4)$$

где  $\varphi$  — угол между началом отсчета и направлением измерения.

Если  $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ , то, измерив изменение диаметра скважины в направлениях 0, 30 и 90°, получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta D_{0,90} &= D [(\sigma_x + \sigma_y) \pm 2(\sigma_x - \sigma_y)(1 - \nu^2) - \nu\sigma_z] / E; \\ \Delta D_{30} &= D [(\sigma_x + \sigma_y) - (\sigma_x - \sigma_y)(1 - \nu^2) - \nu\sigma_z] / E, \end{aligned} \quad (20.5)$$

по которой можно рассчитать все действующие в массиве напряжения.

Если массив испытывает вертикальные одноосные напряжения, то

$$\sigma_z = \Delta DE / (D\nu). \quad (20.6)$$

Деформометры, применяемые для замера изменений диаметра скважин, бывают механические, на базе тензодатчиков электрического сопротивления, индукционные, емкостные и др.

Деформометрами можно измерять не только изменение диаметра скважин, но и величину отслоения кровли, изменения поперечных размеров целиков, а также контролировать процесс пучения пород почвы или стенок подземных выработок. Для перечисленных целей удобны емкостные и индукционные датчики, так как они могут быть включены в схему радиопередатчика. Это позволяет передавать информацию о состоянии контролируемого участка на приемный пульт посредством радиосигналов. Таким образом можно создать целую систему контроля за устойчивостью выработок горного предприятия.

Используются также методы, основанные на покрытии стенок выработок оптически активными материалами, муаровыми сетками и др. Поляризационно-оптический метод основан на способности большинства прозрачных изотропных материалов (стекло, эпоксидная смола и т. д.) под воздействием напряжений приобретать свойства двойного лучепреломления. Величина двойного лучепреломления зависит от напряжений и может быть измерена оптическим методом.

Метод муаровых сеток основан на принципе механической интерференции, возникающей при наложении двух сеток одна на другую.

**Использование закономерностей распространения упругих колебаний.** Существуют пассивный и активный методы исследования упругих колебаний, применяемые с целью определения устойчивости и напряжений в массивах. Пассивный метод основан на наблюдениях за естественными упругими импульсами, возникающими в массиве горных пород при изменении его напряженного состояния. Рост напряжений в породе сопровождается раскрытием в ней микротрещин, вызывающим эффект потрескивания массива (акустическая эмиссия).

Определив при помощи специального прибора — геофона частоту возникновения звуковых импульсов, можно оценить напряженное состояние массива. Так, выявлено, что в шахтах Кривоужского бассейна 30—40 звуковых импульсов в минуту

характеризуют возможность возникновения местных вывалов породы, а более 40 — неустойчивое состояние, предшествующее обрушению пород на изучаемом участке.

Сейсмоакустический метод широко применяется на шахтах Донбасса. В Карагандинском бассейне проф. Ю. А. Векслером испытан метод частотного анализа акустической эмиссии пласта после механического воздействия на забой, что дает дополнительную информацию о состоянии массива.

Активные акустические методы основаны на зависимости скорости и коэффициента поглощения упругих волн как от напряженного состояния пород, так и от степени их трещиноватости. Для монолитного образца связь между давлением  $\sigma$ , приложенным к образцу, и скоростью распространения  $v_p$  упругих волн может быть описана следующим обобщенным эмпирическим выражением:

$$\sigma = a (v_p)^n, \quad (20.7)$$

где  $a$  и  $n$  — коэффициенты, зависящие от типа пород.

Используется также зависимость коэффициентов поглощения упругих волн от напряжений. Так, в целике

$$\sigma'_c / \sigma''_c = k_1 \theta'_c / \theta''_c, \quad (20.8)$$

где  $k_1$  — некоторый коэффициент;  $\theta'_c$  и  $\theta''_c$  — коэффициенты поглощения, соответствующие двум различным напряжениям  $\sigma'_c$  и  $\sigma''_c$  в целике.

Электрические и магнитные методы. Как известно, с повышением давления электрическая проводимость пород  $\sigma_a$ , замеренная по направлению действия давления, чаще всего возрастает. Одновременно она уменьшается с увеличением степени трещиноватости сухих пород. При одноосных напряжениях в целике наибольшая сеть трещин возникает в вертикальном или близком к вертикальному направлении. Поэтому, замерив  $\sigma_{a, в}$  по высоте целика и  $\sigma_{a, ш}$  по его ширине, можно установить отношение  $\sigma_{a, в} / \sigma_{a, ш}$ , которое характеризует степень устойчивости данного целика. Увеличение  $\sigma_{a, в} / \sigma_{a, ш}$  во времени будет указывать на снижение устойчивости целика.

Явление увеличения электрического сопротивления сухих пород с их растрескиванием использовано в разработанной в МГИ системе контроля нарушенности и заколообразования в кровле подземных горных выработок и очистных камер на рудниках цветной металлургии (рис. 20.2). Электроды-датчики размещают равномерно по контролируемой площади. Через определенные промежутки времени производят измерение электрического сопротивления между каждой парой электродов по всей площади кровли камеры. По полученным данным строятся изообласти сопротивления. Увеличенные в определенных участках значения сопротивления, их рост со временем и перемещение дают информацию о наличии, развитии и перемещении зон, склонных к обрушению.

Изменение диэлектрической проницаемости массивов пород с повышением давления также можно использовать для создания датчика напряженного состояния пород. Так, установлено, что  $\epsilon_r$  каменных углей Кузбасса при нагружении до 11 МПа возрастает для разных углей по-разному — от 1,15 до 6 раз.

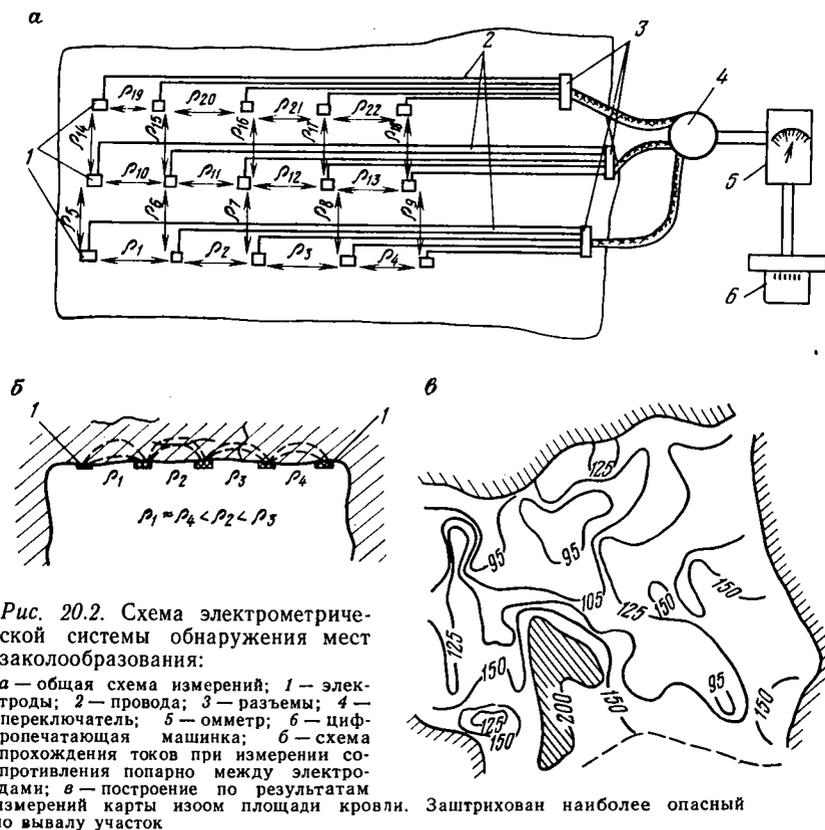


Рис. 20.2. Схема электрометрической системы обнаружения мест заколообразования:

а — общая схема измерений; 1 — электроды; 2 — провода; 3 — разъемы; 4 — переключатель; 5 — омметр; 6 — цифрорпечатающая машинка; б — схема прохождения токов при измерении сопротивления попарно между электродами; в — построение по результатам измерений карты изоом площади кровли. Заштрихован наиболее опасный по вывалу участок

Поскольку распространение и поглощение электромагнитных волн в породах зависят от их электрических свойств, а последние с изменением давления изменяются, на этой основе можно осуществить радиоволновый метод контроля напряжений в породах.

Для бесконтактного измерения малых деформаций горных пород при проявлении горного давления в МГИ предложены оптические квантовые генераторы (лазеры).

Радиометрические методы. На зависимости поглощения гамма-излучения от плотности пород основан радиометрический метод измерения напряжений. С увеличением давления число гамма-импульсов, прошедших поперек направления давления через некоторый объем горной породы, заметно

уменьшается. Радиометрический метод используют для контроля за пучащими породами, так как пучение пород всегда сопровождается их разрыхлением и, следовательно, снижением плотности.

Так, по данным проф. А. А. Борисова, для углей Гуково-Зверовского угленосного района вертикальные напряжения зависят от измеренной  $\gamma$ -методом объемной массы пород следующим образом:

$$\sigma_{\text{верт}} = 5 \cdot 10^8 (A + \sqrt{B + Cp}), \quad (20.9)$$

где  $A, B, C$  — некоторые коэффициенты.

Интенсивность естественного  $\gamma$ -излучения пород также зависит от их напряженного состояния. Так, радиоактивность плагиогранита под нагрузкой сначала уменьшается (до значений нагрузок 70—90 % от разрушающих), затем (перед разрушением) резко возрастает.

Измерения радиоактивности пород в шахте также показали, что в зоне опорного давления (примерно 0,9—1,2 м от забоя) интенсивность  $\gamma$ -излучения уменьшается примерно на 40 %.

### 20.3. ОБНАРУЖЕНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ И ОПАСНЫХ ЗОН В МАССИВАХ ПОРОД

Нарушение режима работы горного предприятия может произойти не только в связи с проявлением горного давления, но и при встрече добычных машин с неожиданными препятствиями — крупными включениями крепких пород, карстами, заполненными водой, сильно разрушенными зонами, плывунами и т. д. В связи с этим необходимо осуществлять непрерывный контроль за строением и составом разрабатываемого массива пород перед забоем на расстояние 5—20 м.

Для технологической разведки (интроскопии) можно использовать практически все ранее описанные локальные методы изучения строения и состава массивов пород. Однако небольшая глубина разработки и объекты контроля обуславливают особенности применения этих методов в горном производстве.

Так, при геофизической разведке ультразвук не находит применения из-за малых баз возможного прозвучивания (до нескольких метров). В то же время в горной практике на принципе отражения упругих колебаний разработан ультразвуковой датчик, позволяющий обнаруживать твердые доломито-углистые включения в каменном угле впереди работающего роторного экскаватора и различные инородные геологические тела при подземной разработке (рис. 20.3).

Так как две породы могут иметь одинаковые значения одних параметров и различные значения других, выбор того или иного способа интроскопии в конкретном случае зависит от возможности обнаружить границу контакта разных тел данным способом.

Акустическими методами можно обнаруживать контакты двух пород, если их удельные волновые сопротивления различны. Так, изменение скорости распространения упругих колебаний при замерзании влажных пород используется для определения мощности мерзлых слоев. Акустическим методом

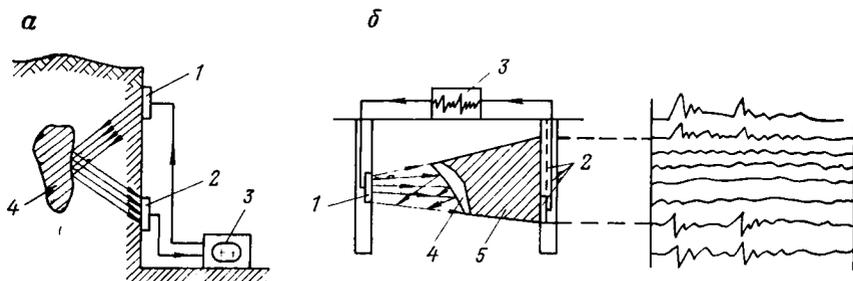


Рис. 20.3. Обнаружение инородного включения в массиве пород методами отражения (а) и просвечивания (б):

1 — излучатель; 2 — приемник; 3 — осциллограф; 4 — включение; 5 — область «тени»

можно выявлять трещиноватые зоны в скальных породах, заполненные льдом.

Метод электрометрии может быть использован для прогноза водоносных зон на угольных шахтах, так как удельное электрическое сопротивление увлажненной зоны значительно меньше сопротивления вмещающей среды. Этот метод используется на шахтах Подмосковского угольного бассейна.

Для выделения пористых и трещинно-кавернозных участков в однородном по химическому составу разрезе карбонатных пород можно применить метод вызванной поляризации.

Коэффициенты поляризуемости трещиноватого блока зависят от степени раскрытия заполненных водой трещин и их электрического сопротивления.

Получена следующая формула связи эффективной пористости  $P_{эф}$  и коэффициента поляризуемости вдоль трещин  $\eta_{||}$ :

$$P_{эф} = \{1 + (m + 1) \rho_{э2} \eta_{||} / [(\eta - \eta_{||}) m \rho_{э1}]\}^{-1}, \quad (20.10)$$

где  $m$  — число трещин;  $\rho_{э1}$  и  $\rho_{э2}$  — удельное электрическое сопротивление соответственно нетрещиноватой породы и трещин, заполненных водой;  $\eta$  — коэффициент поляризуемости нетрещиноватого блока породы.

Изменения магнитной проницаемости руд с изменением температуры используются в методах обнаружения участков массива с повышенной температурой.

С целью выявления тепловых аномалий проводят также геотермические наблюдения через опережающие шпурь. Интерпретация этих аномалий позволяет судить о том, что может встретиться на пути проведения выработки: подземные воды, скопление газов, рудные включения и т. д.

## 20.4. ПРОГНОЗ ОПАСНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД

Прогноз областей потенциальной удароопасности. Так как причиной горных ударов служит комплекс различных факторов — физические свойства пород, повышенные напряжения, состояние массивов, — прогноз горных ударов тем более надежен, чем больше учтено факторов, обуславливающих удароопасность.

Приближенно потенциальную удароопасность угольного пласта оценивают коэффициентом нагруженности  $k_{II}$ :

$$k_{II} = k_k (\gamma H a_\alpha + \sigma_T) / \sigma_{сж}, \quad (20.11)$$

где  $k_k$  — коэффициент концентрации напряжений;  $\gamma$  — объемный вес горных пород;  $H$  — глубина залегания пласта;  $a_\alpha$  — коэффициент влияния угла падения;  $\sigma_T$  — тектонические напряжения;  $\sigma_{сж}$  — предел прочности пласта при сжатии.

Удароопасность, по Я. А. Бичу (ВНИМИ), определяют по параметру  $D_y$ :

$$D_y = (\sigma_{\max} - \sigma_3) \cdot 10^{-6} / l, \quad (20.12)$$

где  $\sigma_{\max} - \sigma_3$  — разность напряжений, зарегистрированных в максимуме опорного давления и на кромке забоя;  $l$  — расстояние до максимума напряжений.

$$\sigma_{\max} = k_k \gamma H; \quad (20.13)$$

$$\sigma_3 = \gamma H e^{-0,27l}. \quad (20.14)$$

Если  $D_y \geq 10$  Н/м<sup>3</sup>, пласт считается удароопасным.

Если  $D_y < 10$  Н/м<sup>3</sup>, пласт неудароопасен. Так, для условий Кузбасса  $D_y$  удароопасных пластов составляет 10,7—12,7 Н/м<sup>3</sup>, неудароопасных — 1,1—7,2 Н/м<sup>3</sup>.

В соответствии с представлениями Я. Б. Фридмана вероятность горного удара возрастает с увеличением  $\beta$  — отношения максимальной растягивающей компоненты  $\sigma_{p \max}$  главных напряжений, испытываемых породой, к максимальным касательным напряжениям  $\tau_{\max}$ :

$$\beta = \sigma_{p \max} / \tau_{\max}. \quad (20.15)$$

При одном и том же напряженном состоянии различные породы имеют разную склонность к проявлению горных ударов.

Наиболее объективным, по мнению Я. А. Бича, критерием способности горных пород вызывать горные удары является отношение работы упругого  $A_y$  к работе неупругого  $A_{пл}$  деформирования породы, которую можно либо измерить графически по площади кривой напряжения — деформации (как, например, в случае подсчета коэффициента пластичности), либо рассчитать аналитически по известным прочностным и деформационным свойствам пород.

Если отношение  $A_y / A_{пл} < 1$ , то разрушение пород сопровож-

дается динамическими явлениями, характеризующими горный удар. Если же  $A_y/A_{пл} < 1$ , разрушение происходит спокойно, без удара.

Прогноз областей потенциальной выбросоопасности. При выбросе угля и газа существенную роль играют кроме вышеперечисленных характеристик пород также давление газа, величина газоотдачи в угольных пластах и т. д.

По методике ИГД им. А. А. Скочинского выбросоопасность угольного пласта оценивается крепостью, характеристиками нарушенности, неоднородности, показателями структуры пласта и т. д.

Показатель  $B$ , характеризующий выбросоопасность, определяют по специальной номограмме (рис. 20.4), предварительно рассчитав показатели действующих сил  $F_d$  и устойчивости пластов  $M$ :

$$F_d = P_{\sigma} \cdot 10^{-5} + 0,1H; \quad (20.16)$$

$$M = M_n - s_{м. н}, \quad (20.17)$$

где  $P_{\sigma}$  — давление газов, Па;  $H$  — глубина разработки, м;  $M_n$  — устойчивость пласта без учета его неоднородности ( $M_n = f - b$ );  $f$  — обобщенный показатель прочности пласта с учетом его нарушенности ( $f = 2,6 \cdot 10^{-6} \sigma_{ж} - 11,4$ );  $b$  — обобщенный показатель структуры пласта с учетом его мощности  $m$  и числа  $n$  пачек в пласте ( $b = m + 1,6n + 0,1$ );  $s_{м. н}$  — среднее квадратичное отклонение показателя устойчивости пласта  $M_n$ , характеризующее его неоднородность.

При  $B < 25\%$  угольный пласт считается неопасным по выбросам, при  $B > 45\%$  — опасным. В пластах, которые характе-

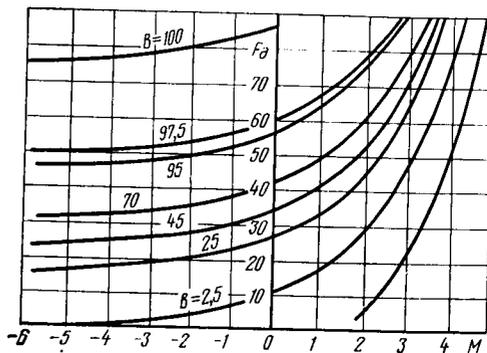


Рис. 20.4. Номограмма ИГД им. А. А. Скочинского для определения выбросоопасности угольных пластов Кузбасса

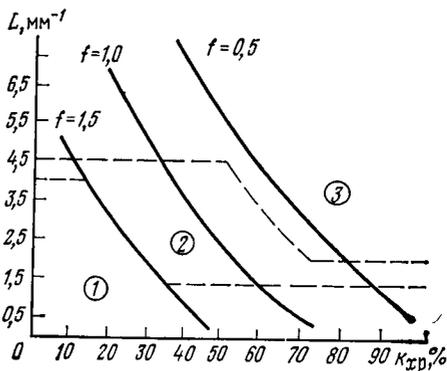


Рис. 20.5. Номограмма для оценки потенциальной выбросоопасности углей Донбасса по их микротрещиноватости  $L$ , микрочехрупокости  $k_{xp}$  и крепости  $f$ : 1 — угли, склонные к выбросам; 2 — промежуточные; 3 — не опасные по выбросам

ризуются показателем  $B=25 \div 45 \%$ , внезапные выбросы угля и газа возможны.

Исследования МГИ показали, что выбросоопасность угольных пластов в значительной степени обусловлена крепостью, микротрещиноватостью и микрохрупкостью углей. Получен

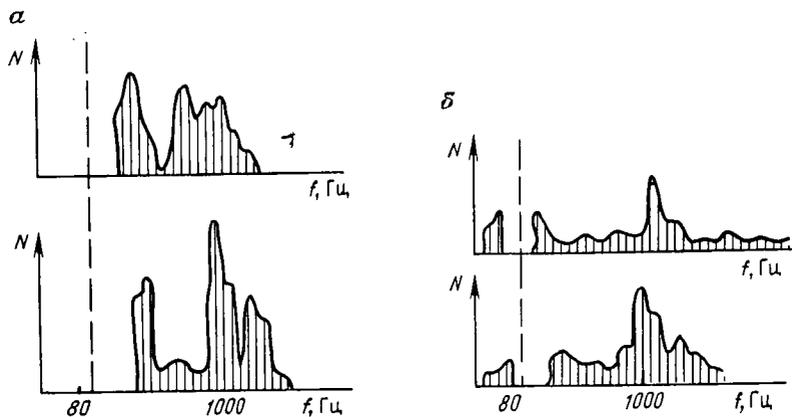


Рис. 20.6. Распределение количества импульсов  $N$  акустической эмиссии по частоте  $f$  в зонах невыбросоопасных (а) и выбросоопасных (б) пластов (по Ю. А. Векслеру)

структурный показатель выбросоопасности углей

$$B = L + 0,06k_{xp} - 22f, \quad (20.18)$$

где  $L$  — микротрещиноватость углей,  $\text{мм}^{-1}$ ;  $k_{xp}$  — микрохрупкость, %;  $f$  — крепость углей. При  $B > 20$  пласты не выбросоопасны; при  $B < 11,5$  — потенциально выбросоопасны, при  $11,5 < B < 20$  выбросоопасность пластов (промежуточная группа) обуславливается дополнительными факторами — насыщенностью газами, горным давлением и т. д.

Для каменных углей Донбасса из участков с различной степенью выбросоопасности Л. А. Темеевой построена соответствующая номограмма прогноза выбросоопасности по величинам  $L$ ,  $k_{xp}$  и  $f$  (рис. 20.5).

Таким образом, для оценки выбросоопасности угольных пластов необходимо в натуре измерять их прочность, проницаемость, степень нарушенности и структуру.

Наряду с этим создаются методы непосредственного контроля за состоянием горных пород и фиксацией в массивах характерных признаков, предшествующих внезапному выбросу угля и пыли.

Так, в Донбассе используется пассивный акустический метод, фиксирующий шумность угольных пластов. При этом установлено, что критерием выбросоопасных зон можно считать

более чем двукратное превышение интенсивности потрескиваний над средним уровнем.

На базе исследований, проведенных Карагандинским политехническим институтом (Ю. А. Векслер), разработан сейсмоакустический метод контроля выбросоопасности в комбайновых забоях подготовительных выработок. Этот метод заключается в регистрации и частотном анализе акустической эмиссии пласта после механического воздействия комбайна на забой.

Наступление выбросоопасного состояния характеризуется сдвигом частотного диапазона акустической эмиссии пласта в область более низких частот — ниже 100 Гц (рис. 20.6). Установлено также, что сама интенсивность потрескиваний не является определяющим фактором для условий Карагандинского бассейна.

## **20.5. КАЧЕСТВО ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО И ЕГО КОНТРОЛЬ**

Понятие «качество полезного ископаемого» — очень емкое. Конкретное содержание его зависит от вида полезного ископаемого и технологии дальнейшей обработки и переработки. На каждой стадии последовательной цепочки горно-производственных операций существуют свои частные требования к качеству продукта, обусловленные особенностями последующей операции.

Под качеством подразумевают либо в отдельности, либо в том или ином наборе или во всей совокупности такие понятия, как крупность, гранулометрический состав, прочность отдельных кусков горной массы, способность не разрушаться и не образовывать пыли в условиях высоких температур, определенное процентное содержание (не ниже) полезного компонента, определенное процентное содержание (не выше) для данного вида сырья вредных компонентов, определенная допустимая влажность и т. д.

Широким диапазоном качественных характеристик должны удовлетворять, например, строительные полезные ископаемые и ископаемые угли.

**Параметры качества ископаемых углей.** Качество углей как объекта технологического использования оценивается следующими параметрами:

теплота сгорания — количество теплоты, выделяемое при полном сгорании 1 кг угля; характеризует угли как энергетическое топливо;

зольность  $A^c$  — относительное массовое содержание несгорающего остатка, образующегося из минеральных примесей в угле при полном его сгорании. В каменных и бурых углях зольность может достигать 45 %, в горючих сланцах — 50—80 %. Зола уменьшает теплоту сгорания, загрязняет поверх-

ность нагрева и вследствие этого снижает интенсивность теплообмена, вызывает износ нагревательных устройств, загрязняет атмосферу;

термохимическая стойкость — свойство углей сопротивляться химическому разложению при нагревании; термохимическая стойкость возрастает с увеличением степени углеликации углей;

спекаемость — свойство углей размягчаться при нагревании без допуска воздуха, переходить в пластическое состояние в интервале температур 350—450 °С и образовывать твердый спекшийся кусок. Спекаемость углей определяют при коксовании их в тигле в виде навески тонкоизмельченного порошка. Толщина образовавшегося пластического слоя  $y$  (мм) служит показателем спекаемости. Дополнительно к этому полученный спекшийся образец подвергают раздавливанию. Величина требуемого для раздавливания усилия также характеризует степень спекаемости угля;

коксуемость — свойство углей образовывать при нагревании кокс. Коксуемость определяют методом лабораторного коксования углей в специальной установке с одновременной фиксацией различных происходящих при этом эффектов — изменения объема угля, разности температур размягчения и затвердевания углей, изменения температуры по высоте загрузки и др.;

выход летучих веществ  $V^r$  — количество выделяющихся газов при нагреве углей без доступа воздуха, выраженное объемом газов на единицу массы угля или относительным массовым количеством летучих веществ в процентах.

За основные показатели при промышленной классификации углей и антрацитов принимают: для каменных углей — выход летучих веществ  $V^r$  и спекаемость, выраженную толщиной пластического слоя  $y$  или характеристикой нелетучего остатка; для бурых углей — содержание влаги в рабочем топливе  $w^p$ ; для антрацитов — выход летучих веществ и теплоту сгорания  $Q_{гб}$ .

А н т р а ц и т ы характеризуются

объемным выходом летучих веществ менее 0,22 м<sup>3</sup>/кг (9 %) и теплотой сгорания  $Q_{гб}$  около 35 МДж/кг;

К а м е н н ы е у г л и подразделяют на десять технологических марок:

тощие (Т) —  $V^r=9\div 17$  %; нелетучий остаток порошкообразный, слипшийся, слабоспекшийся;

слабоспекающиеся (СС) —  $V^r=11\div 32$  %, нелетучий остаток слабоспекшийся;

отощено-спекающиеся (ОС) —  $V^r=15\div 28$  %; остаток спекшийся;

коксовые вторые (К2) —  $V^r=17\text{—}21$  %,  $y=6\text{—}11$  мм;

коксовые (К) —  $V^r=24\div 33$  %;  $y=12\div 18$  мм;

коксовые жирные (КЖ) —  $V^r=18\div 33$  %;  $y=19\text{—}25$  мм;

жирные (Ж) —  $V^r=27\text{—}35$  %;  $y=8\div 20$  мм;

газовые жирные (ГЖ) —  $V^r=30 \div 37$  %;  $y=6 \div 15$  мм;  
газовые (Г) —  $V^r=35 \div 43$  %;  $y=6-15$  мм;  
длиннопламенные (Д) —  $V^r \geq 37$  %; нелетучий остаток по-  
рошкообразный слипшийся.

Бурые угли подразделяют на три технологические группы:  
Б1 — с влажностью  $w^p > 40$  %; Б2 с  $w^p = 30 \div 40$  %; Б3  
с  $w^p \leq 30$  %.

На долю каменных углей приходится 63,1 % общих запасов  
углей в стране (примерно 5000 млрд. т.).

По бассейнам угли характеризуются следующими показате-  
лями качества.

Угли Карагандинского бассейна относятся к маркам Ж,  
КЖ, К2, зольность их средняя и высокая ( $7 \div 37$  %), содержа-  
ние серы 0,5—2,5 %, выход летучих 23—24 %, толщина пласти-  
ческого слоя 8—30 мм.

Печорский бассейн имеет запасы жирных углей для коксо-  
вания. Длиннопламенные и газовые угли составляют 40 % об-  
щих запасов. Зольность углей 12—25 %. Коксовые угли отли-  
чаются низким содержанием серы (0,56 %) и фосфора (0,004—  
0,02 %) и высокой спекаемостью.

Угли Кизеловского бассейна — газовые (слабоспекающиеся  
и жирные), высокозольные, с высоким содержанием серы.

Угли Подмосковского угольного бассейна бурые, высокозоль-  
ные (25—30 %), с высоким содержанием серы (2—6 %), высо-  
кой влажности. Теплота сгорания 11,3 МДж/кг.

Бурые угли Канско-Ачинского бассейна являются хорошим  
энергетическим топливом и сырьем для газификации. Зольность  
углей 8—16 %, влажность 30—45 %, теплота сгорания 11,7—  
16 МДж/кг. Большая часть всего добытого угля (73 %) исполь-  
зуется для энергетических целей, остальная — для коксования.

Угли и антрациты Донецкого бассейна имеют зольность  
14—16 %.

**Параметры качества строительных материалов** (щебня, гра-  
вия и песка) определяются соответствующими государствен-  
ными стандартами (например, ГОСТ 8267—82, ГОСТ 8268—  
82, ГОСТ 10260—74), в которых регламентируется средний раз-  
мер частиц, гранулометрический состав, форма частиц, проч-  
ность, морозостойкость, содержание пылевидных, глинистых,  
сернистых, органических примесей.

Щебень, гравий, песок могут использоваться либо непосред-  
ственно для строительных целей, либо как заполнитель для бе-  
тона.

По размеру зерен, например, гравий и щебень должны соот-  
ветствовать одной из четырех групп: 5—10 мм; 10—20 мм; 20—  
40 мм; 40—70 мм; по гранулометрическому составу — содержа-  
ние зерен крупнее верхнего и мельче нижнего размера должно  
быть не более 5 %. Государственными стандартами регламенти-  
руется содержание в массе зерен пластинчатой и игловатой  
формы не более 30 %.

По прочности, определяемой параметром дробимости, щебень подразделяется на ряд марок. Например, марка щебня 1200 соответствует дробимости щебня в сухом состоянии 6 %, а марка 200—дробимости от 29 до 35 %.

По морозостойкости щебень подразделяется на семь групп в зависимости от количества циклов замораживания — оттаива-

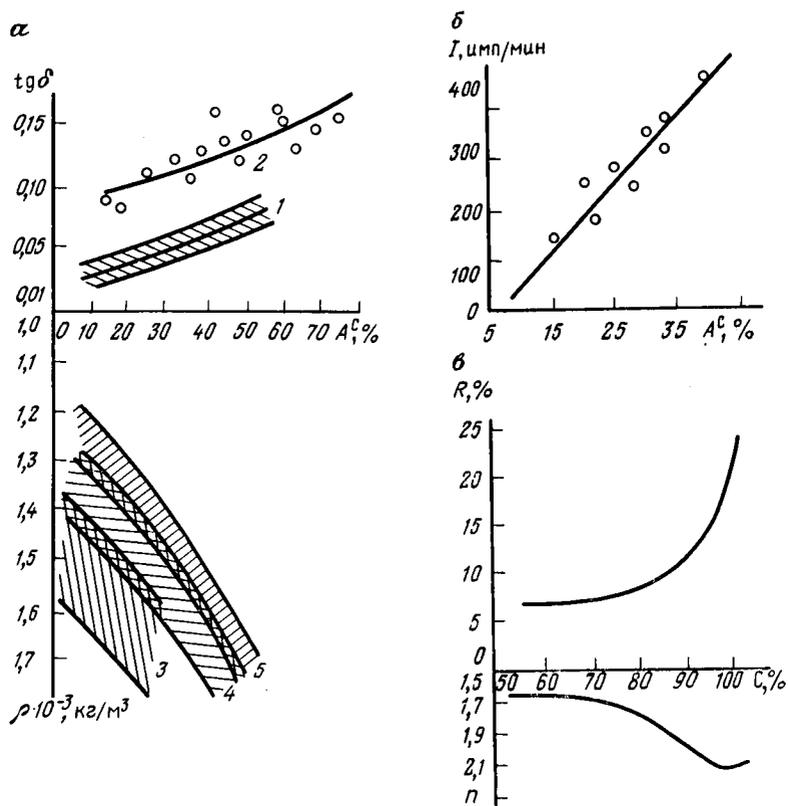


Рис. 20.7. Зависимость физических свойств углей от их качественных характеристик:

$\text{tg } \delta$  газовых углей Донбасса (1), бурых углей Александринского месторождения (2) (по Э. И. Аршу), объемной массы антрацитов (3), каменных (4) и бурых углей (5) (а), радиоактивности  $I$  углей (б) от их зольности  $A_c$ ; коэффициента отражения  $R$  и коэффициента преломления света  $n$  от содержания углерода  $C$  в каменном угле (в)

ния, которые выдерживает порода (15, 25, 50, 100, 150, 200, 300).

Допустимое содержание пылевидных и глинистых частиц в щебне должно составлять не более 1—3 % в зависимости от его марки.

Таким образом, оценка качества полезного ископаемого предполагает определение либо характеристик строения породы,

либо физических или химических параметров, либо состава и влажности.

**Контроль зольности каменных углей.** Обычный метод контроля зольности — это сжигание в стандартных условиях (при температуре печи  $815^{\circ}\text{C}$ ) навески угля и взвешивание минерального остатка. Процесс этот длится 3 ч (ГОСТ 11022—75).

Исследованиями установлено, что от зольности углей зависят практически все их физические свойства. Так, известно, что с увеличением зольности углей возрастает скорость распространения в них ультразвука, с увеличением степени метаморфизации углей повышается их диэлектрическая проницаемость и величина диэлектрических потерь, определенным образом меняется их отражательная способность (рис. 20.7).

Для некоторых угольных бассейнов (например, Подмосковского) вычислены корреляционные зависимости, по которым можно судить о зольности углей по величине их объемной массы.

Существует связь между зольностью углей и содержанием в них тория (%), которая может быть представлена так:

$$\text{Th} = (0,13A^c + 6,66) 10^{-4}. \quad (20.19)$$

Поэтому общая интенсивность  $I$  естественного гамма-излучения (имп./мин) зависит от зольности углей и описывается следующим уравнением:

$$I = 11,42A^c - 39,4. \quad (20.20)$$

В конструкциях датчиков зольности углей используют наиболее четкие для конкретного месторождения зависимости свойств от зольности.

**Контроль качества естественных строительных материалов** можно осуществлять непосредственно по физическим свойствам пород. При этом целесообразно иметь наименьшее число параметров, достаточных для оценки качества.

На производстве контролируют прочность строительных материалов, нарушенность блоков и т. д.

При контроле качества заполнителей для бетонов распространение получил экспресс-метод оценки прочности кусков породы неправильной формы. Метод основан на расколе куска породы между двумя конусными (заостренными) стержнями.

Установлено, что

$$\sigma_p = (0,95 \div 1,05) \sigma_{p.ск}, \quad (20.21)$$

где  $\sigma_{p.ск}$  — предел прочности породы при расколе данным способом ( $\sigma_{p.ск} = F_p/S_p$ );  $F_p$  — нагрузка, при которой происходит раскол;  $S_p$  — площадь раскола куска породы.

Для контроля качества облицовочного и строительного камня в МГИ проф. В. С. Ямщиковым с сотрудниками разработана ультразвуковая корреляционная аппаратура по дефектоскопии блоков природного камня.

## 20.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КОНТРОЛЬ СОСТАВА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Из существующих методов определения состава наиболее распространен прямой метод химического анализа, заключающийся в отборе пород в соответствующей точке технологического звена и анализе их на содержание искомым элементов в лаборатории. Такой метод обладает высокой точностью, но продолжителен по времени. Поэтому оперативный и тем более непрерывный контроль качества с одновременной регулировкой параметров процесса возможен только на базе физических датчиков состава.

Выделяют пять групп физических методов контроля.

**Рентгеновские методы.** В эту группу входят методы, основанные на воздействии рентгеновского излучения на горные породы. Наиболее широко используется рентгеноспектральный метод. Посредством этого метода определяют характеристический спектр вторичного рентгеновского излучения, присущий каждому химическому элементу, и таким образом устанавливают присутствие этих элементов в породе. Он применим не только в лабораторных условиях, но и непосредственно в технологическом потоке в сочетании с автоматическими пробоотборниками и механизмами подготовки проб.

**Радиационные методы.** Эти методы основаны на действии ядерных излучений на ядра и оболочки атомов различных элементов. За счет ядерных реакций возникает поток вторичных частиц, а в ряде случаев наводится вторичная радиоактивность. Интенсивность вторичных излучений служит исходной информативной характеристикой содержания того или иного элемента. К данной группе относятся также различные методы ядерных реакций на заряженных частицах. Известны, например, альфа-нейтронный метод, основанный на возбуждении ядерных реакций и создании потока нейтронов в легких элементах облучением их  $\alpha$ -частицами; метод ядерных реакций на нейтронах, основанный на облучении вещества потоком нейтронов и фиксации ответных потоков различных частиц; метод ядерного гамма-резонанса (эффект Мессбауэра), использующий явление резонансного поглощения  $\gamma$ -квантов.

**Полярографические методы** объединяют физико-химические методы контроля за содержанием полезного элемента (или, в отличие от предыдущих методов, полезного минерала). Данные методы основаны на определении зависимости того или иного параметра тока, проходящего через электролитическую ячейку с контролируемым раствором, от приложенного к электродам напряжения. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость предварительного растворения минералов.

**Оптико-спектральные методы:** эмиссионный,

основанный на регистрации характерного оптического спектра сжигаемых минералов; адсорбционный, основанный на определении спектров поглощения газов и жидкостей; люминесцентный — заключающийся в изучении спектров люминесценции вещества, возбуждаемых ультрафиолетовыми лучами.

Методы, основанные на физических свойствах минералов. Для простейших скалярных параметров (например, плотности) пригодна формула арифметического средневзвешенного (2.1), поэтому, измерив параметр  $X$  и зная параметры  $X_i$  составляющих компонентов для двухминеральной породы, можно непосредственно вычислить относительное объемное содержание  $V$  того или иного минерала в породе.

В случае трехкомпонентной горной породы необходимо вместо одного параметра, определенного экспериментально для данной породы, иметь два: например, дополнительно к плотности  $\rho_0$  — удельную теплоемкость породы  $c$ , которая также зависит от состава.

Действительно, так как

$$\rho_0 c_{cp} = \rho_{01} V_1 + \rho_{02} V_2 + \rho_{03} (1 - V_1 - V_2) \quad (20.22)$$

и

$$c_{cp} = c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 (1 - V_1 - V_2), \quad (20.23)$$

после преобразований получим

$$V_1 = \frac{(\rho_{0cp} - \rho_{03})(c_2 - c_3) - (c_{cp} - c_3)(\rho_{02} - \rho_{03})}{(\rho_{01} - \rho_{03})(c_2 - c_3) - (c_1 - c_3)(\rho_{0cp} - \rho_{03})}. \quad (20.24)$$

Так как на величину определяемых характеристик влияют не только состав пород, но и другие факторы (строение, температура и т. д.), одиночные измерения часто не дают нужной точности. Для повышения точности измерений используют один из следующих приемов:

обеспечивают постоянство второстепенных факторов во всех измерениях;

выбирают такие параметры измерительного поля (например, частоту), при которых влияние второстепенных факторов минимально;

осуществляют перекрестное определение содержания полезного компонента.

В последнем случае используют не одну, а несколько зависимостей физического параметра от состава породы.

Например, для двухкомпонентной горной породы вдоль слоистости:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \rho_{01} V_1' + \rho_{02} (1 - V_1'); \\ c_V &= c_{V1} V_1'' + c_{V2} (1 - V_1''); \\ \lambda &= \lambda_1 V_1''' + \lambda_2 (1 - V_1'''). \end{aligned} \quad (20.25)$$

Рассчитанные по этим уравнениям относительные объемы 1-го компонента  $V_1'$ ,  $V_1''$  и  $V_1'''$  отличаются друг от друга из-за влияния на  $\rho_0$ ,  $c_V$  и  $\lambda$  побочных факторов. Однако это влияние для разных свойств различно. Поэтому среднее значение  $V_{1cp}$  будет более близко к истинному.

Связь между свойствами минералов, средним значением физического параметра и объемным содержанием компонента, имеющего меньшее значение параметра, для физических характеристик может быть представлена соответствующими номограммами (рис. 20.8).

Распространены емкостные, электрические, магнитные, плотностные, термографические и другие методы определения состава полезных ископаемых.

Емкостные (диэлектрические) методы основаны на зависимости  $\epsilon_r$  и  $\text{tg } \delta$  пород от их минерального состава.

Определение  $\epsilon_r$  и  $\text{tg } \delta$  или параметров, пропорциональных им, осуществляют различными приемами:

измерением поглощения электромагнитных волн в предварительно высушенной пробе и определением содержания компонента по тарировочному графику зависимости коэффициента поглощения от содержания компонента;

сравнением показаний двух генераторов, один из которых подключен к эталонному образцу.

В электрических (кондуктометрических) методах используют зависимость

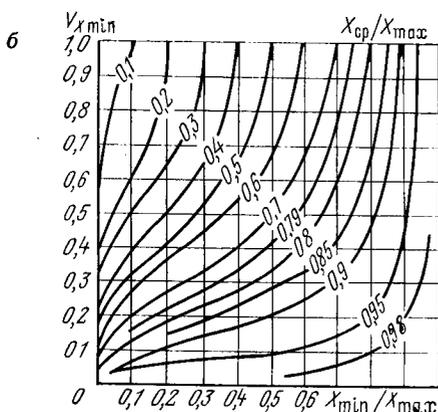
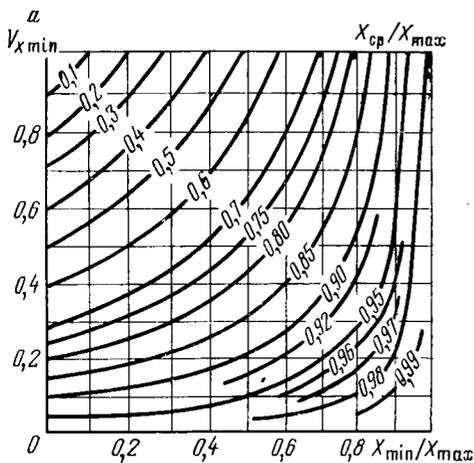


Рис. 20.8. Зависимости физического параметра двухкомпонентной породы от минерального состава:

а — для скалярного параметра; б — для тензорного параметра;  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$ ,  $X_{cp}$  — соответственно минимальное, максимальное значение параметров слагающих породу минералов и искомого среднего значения параметра породы;  $V_{x_{\min}}$  — относительное объемное содержание в породе минерала с минимальным значением физического параметра

удельного электрического сопротивления пород от содержания в них хорошо проводящего компонента. Так как электрическая проводимость пород особенно сильно зависит от их строения и влажности, с целью получения достоверных результатов пробы должны быть измельчены и высушены.

Магнитные методы основаны на зависимости магнитной проницаемости породы от содержания в ней ферромагнитных минералов. Эти методы могут быть использованы для контроля качества измельченной магнетитовой руды на конвейерной ленте и в пульповодах.

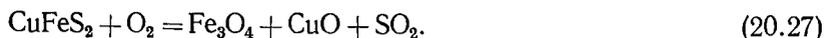
При сравнительных измерениях одним датчиком измеряют магнитную восприимчивость  $\Delta\chi_э$  эталона, другим —  $\Delta\chi_м$  пробы. Объемное содержание полезного компонента в пробе вычисляют по формуле

$$V_м = V_э \Delta\chi_м / \Delta\chi_э, \quad (20.26)$$

где  $V_э$  — объемное содержание полезного компонента в эталоне.

Предварительный обжиг некоторых руд приводит к появлению ферромагнитных компонентов. В этих случаях магнитные методы определения содержания полезного компонента можно применять и для руд, не имеющих минералов — ферромагнетиков в исходном составе.

Так, обжиг халькопирита при температуре 800—900 °С приводит к образованию магнетита согласно реакции



Содержание в руде магнетита полностью соответствует содержанию в ней халькопирита. Таким образом, магнитный метод с предварительным обжигом пробы позволяет определить содержание меди в сульфидной руде. А так как существуют корреляционные связи между содержанием в полиметаллической руде меди, цинка и других металлов, этот метод в конечном счете может дать полные сведения о содержании всех полезных компонентов в руде данного месторождения.

В плотностных методах используют различия минералов по плотности. Так, если анализируемую руду можно представить как двухкомпонентную, причем компоненты существенно различаются по своим объемным массам  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , то можно использовать метод определения объемной массы смеси  $\rho_{ср}$ , по которому вычисляют объемное содержание полезного компонента  $V$ :

$$V = (\rho_{ср} - \rho_2) / (\rho_1 - \rho_2). \quad (20.28)$$

Подобный метод контроля степени разубоживания руды нашел применение, например, на Иртышском полиметаллическом руднике, где средняя объемная масса пород  $\rho_n$  составляет  $2,7 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а руд —  $\rho_p = 3,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Объемное разубоживание руды  $R_{об}$  (%) определяют по формуле

$$R_{об} = [\rho_p - M_b k_p / (V_b k_3)] 100 / (\rho_p - \rho_n), \quad (20.29)$$

где  $M_b$  — масса руды в вагоне;  $k_p$  и  $k_3$  — коэффициенты соответственно разрыхления руды в вагоне и заполнения вагона (значения их определяют как средние по шахте);  $V_b$  — вместимость вагона.

Значения  $\rho_p$  и  $\rho_n$  регулярно уточняют для конкретных участков, по отношению к которым определяется  $R_{об}$ .

Опыт применения такого метода в течение нескольких лет показал, что по сравнению с химическим анализом проб ошибки определения содержания меди не превышают 5 %, содержания свинца и цинка — 8 %.

Термографический метод основан на аномальных изменениях температуры нагреваемых минералов. Кривая изменения температуры большинства минералов при их нагреве носит нелинейный характер, имеет ряд областей резкого повышения или понижения. Эти эффекты связаны с экзо- или эндотермическими фазовыми превращениями минералов. Температурные аномалии для каждого минерала строго определены и постоянны (рис. 20.9). Лишь незначительное число минералов не имеет аномальных изменений температуры (термоинертны), например полевые шпаты, измененный нефелин и др. Поэтому по характерным аномалиям на термограммах можно судить о наличии тех или иных минералов в породе.

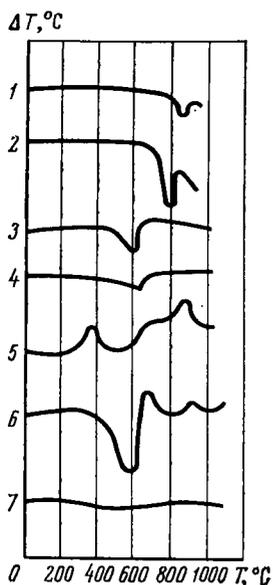


Рис. 20.9. Термограммы некоторых минералов:

1 — галит; 2 — сильвинит;  
3 — кварц; 4 — гематит; 5 —  
магнетит; 6 — сидерит; 7 —  
ортоклаз;  $\Delta T$  — прирост  
температуры пробы по  
сравнению с температурой  
нагревателя  $T$

## 20.7. КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ

Оценка влажности пород в настоящее время наиболее часто осуществляется прямым методом — сушкой породы и последующим взвешиванием ее с целью установления массы содержащейся в породе воды.

Более перспективные физические методы оценки влажности, основанные на известных зависимостях свойств пород от влажности.

Весовой метод основан на законе Архимеда. Если породу взвесить в воздухе  $G$ , а затем взвесить ее в воде  $G_1$ , то

при постоянном удельном весе породы  $\gamma_0$  можно определить влажность  $w$ :

$$w = [\gamma_0 - G / (G - G_1)] / (\gamma_0 - 1). \quad (20.30)$$

Тепловой метод. Нагрев влажной пробы сопровождается парообразованием. Давление пара возрастает и стабилизируется через 1 мин после начала сушки. Величина этого давления является функцией влажности породы.

К этому методу близок термоакустический метод контроля влажности, при котором фиксируют не давление пара, а степень изменения частоты собственных колебаний  $f_0$  некоторой гидрофильной мембраны, расположенной в области действия паров. Частота  $f_0$  зависит от влажности пород.

Метод теплопроводности основан на зависимости величины коэффициента теплопроводности от влажности пород.

Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Если в магнитное поле мощного постоянного магнита внести воду и одновременно воздействовать на нее высокочастотным магнитным полем, то протоны воды придут в колебательное движение.

При определенной частоте переменного поля протоны переходят в состояние резонанса. Этому моменту соответствует наибольшее поглощение водой энергии магнитного поля. Если в поле магнита внести влажную породу и достичь состояния магнитного резонанса, то величина этого резонанса будет прямо пропорциональна числу протонов воды, т. е. влажности образца.

Нейтронный метод основан на явлении поглощения потока нейтронов атомами водорода.

Для случая, когда источником быстрых нейтронов служит полоний-бериллиевый генератор интенсивностью около  $2,5 \times 10^6$  част., установлена следующая зависимость между интенсивностью медленных нейтронов  $I$  (скоростью счета) и влажностью  $w$  (%):

$$I = 1225 + 4w + 1219w^2 - 1,53w^3 + 0,1w^4. \quad (20.31)$$

Емкостные методы основаны на зависимости  $\epsilon_r$  горных пород от их влажности. В этих методах в качестве датчика применяют плоских или цилиндрический конденсатор. Непосредственное соприкосновение датчика с породой не обязательно.

Так как при контроле влажности в качестве основной выступает зависимость свойств пород от содержания в них воды, зависимость этих свойств от минерального состава становится помехой и должна быть максимально уменьшена или исключена. При этом можно использовать различное влияние влажности на диэлектрическую проницаемость пород, установленную при высоких и низких частотах электромагнитного поля (см. разд. 7.3).

Например, определяется диэлектрическая проницаемость породы при высокой частоте, что соответствует значению  $\epsilon_{r_1}$  данной практически сухой горной породы. Затем определяется диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{r_2}$  при низкой частоте электрического поля.

Отношение  $\epsilon_{r_2} / \epsilon_{r_1}$  связано с влажностью породы.

Кондуктометрические влагомеры принципиально не отличаются от подобных датчиков состава горных пород (см. разд. 20.6).

Очень существенна зависимость показаний прибора от состояния поверхности контролируемой породы, гранулометрического состава ее и надежности контакта с электродами.

Измеряя электрическую проводимость образцов пород, можно установить параметр непрерывности токопроводящих каналов  $K_{н.к}$ :

$$K_{н.к} = \sigma_{э.в} / \sigma_{э.т}, \quad (20.32)$$

где  $\sigma_{э.в}$  — замеренная удельная электрическая проводимость влажной породы;  $\sigma_{э.т}$  — удельная электрическая проводимость породы, полученная расчетным путем по известным проводимостям слагающих породу минералов и процентному содержанию хорошо проводящих включений из условия, что включения располагаются изолированно друг от друга.

Величина  $K_{н.к}$  связана с влажностью пород и их проницаемостью. Этим же методом можно определить открытую пористость пород.

## 20.8. ПРОЦЕССЫ КОНТРОЛЯ ЗА ОТДЕЛЬНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОПЕРАЦИЯМИ

**Контроль за режимом работы добычных комбайнов.** Установлено, что минимальным удельным энергозатратам при добыче угля соответствует работа комбайна при постоянном отношении скорости его подачи  $v_n$  к скорости резания  $v_{рз}$ :

$$v_n / v_{рз} = \text{const}. \quad (20.33)$$

Таким образом, при работе добычного комбайна необходимо поддерживать постоянное отношение  $v_n / v_{рз}$ . Скорость резания зависит от физических свойств углей, конструкции исполнительного органа и мощности электродвигателя комбайна. С изменением свойств углей происходит изменение и момента сил резания исполнительным органом. Так, при встрече зубков комбайна с породным прослойком момент сил  $M_n$  возрастает по следующему закону:

$$M_n = M_y [(1 - n_n / n_o) + f_n n_n / (f_y n_y)], \quad (20.34)$$

где  $M_y$  — момент сил резания по углю;  $n_n$ ,  $n_o$  и  $n_y$  — число линий резания соответственно по породному прослойку, общее и

по углю;  $f_n$  и  $f_y$  — коэффициенты крепости соответственно породного прослойка и угля.

В настоящее время в качестве параметра, пропорционального прочности породы, принимают усилия, возникающие в исполнительном органе, которые можно определять, например, тензодатчиками.

При добыче угля необходимо осуществлять автоматизацию направления движения комбайна. Чтобы устранить внедрение комбайна в почву или кровлю пласта и обеспечить оставление предохранительной пачки угля заданной толщины, применяют датчики, реагирующие на границу раздела двух сред — угля и породы.

В качестве таких датчиков можно применять устройства, фиксирующие различия в электрической проводимости, скорости распространения упругих волн, скорости распространения электромагнитных колебаний, поглощения  $\gamma$ -лучей в углях и вмещающих породах.

По принципу отражения ультразвуковой волны работают, например, ультразвуковые датчики, которые по времени прохождения прямого и отраженного лучей от плоскости раздела уголь — порода позволяют определить расстояние от комбайна до границы между углем и вмещающей породой.

Примерно так же решается эта задача и с помощью гамма-излучения, и радиоволновыми методами.

**Контроль упрочнения горных пород** необходим для своевременного прекращения этого процесса, а также обнаружения зон, в которых по тем или иным причинам упрочнение не происходит. Для этих целей используют физические характеристики, легко фиксируемые в натуре и в то же время различающиеся у исходного и упрочненного массивов.

Так, для контроля за толщиной ледопородного цилиндра используют различие в скоростях распространения упругих волн в мерзлой и незамерзшей породах. С увеличением толщины промерзшего слоя пород скорость распространения упругих волн возрастает.

Для этих же целей применяют термокаротаж, так как коэффициент теплопроводности пород возрастает с увеличением степени их промерзания.

Оценить качество цементации, битумизации или силикатизации массивов пород можно посредством проведения контрольных измерений их электрической проводимости. Упрочнение пород указанными методами приводит к росту их электрического сопротивления, причем величина его прямо пропорциональна толщине упрочненного слоя.

**Контроль процесса дробления горных пород.** При дроблении горных пород в дробилках осуществляют контроль за степенью их загрузки и гранулометрическим составом продуктов дробления. Интересны методы регулирования загрузки мельниц по уровню шума в них. Разработаны различные схемы звукомет-

рических регуляторов, позволяющих быстро оценивать состояние мельницы. Уровень шума, кроме всего прочего, определяется прочностными и упругими параметрами дробимой руды.

Для определения гранулометрического состава ферромагнитных руд используют прибор, индукционный датчик которого устанавливается под лентой конвейера. Ферромагнитная руда, находящаяся над датчиком, замыкает его магнитную цепь. ЭДС импульса зависит от магнитной проницаемости  $\mu$  материала и размера его кусков. Большие куски руды наводят импульсы большей амплитуды и длительности. Если магнитная проницаемость руды примерно постоянна, то по сигналу можно судить о ее гранулометрическом составе.

**Контроль процесса обогащения горных пород.** В процессе обогащения необходимо следить за различными характеристиками обогащаемого продукта. С этой целью используют различные ранее установленные зависимости свойств пород от состава и строения. Широко применяют акустические методы, основанные на акустических свойствах пород.

Акустическим методом можно осуществить контроль концентрации суспензий. Наиболее рационально при этом использовать такую характеристику, как коэффициент поглощения ультразвука  $\theta$ . Очевидно, что для жидкой среды, содержащей частицы,

$$\theta = \theta_{\text{в}} + \theta_{\text{т}} + \theta_{\text{р}}, \quad (20.35)$$

где  $\theta_{\text{в}}$  и  $\theta_{\text{т}}$  — коэффициенты поглощения, обусловленные соответственно внутренним трением жидкости и ее теплопроводностью;  $\theta_{\text{р}}$  — коэффициент поглощения упругих колебаний в твердых частицах, взвешенных в жидкости.

Так как  $\theta_{\text{в}} + \theta_{\text{т}} = \text{const}$ , измерив значение  $\theta$ , можно определить  $\theta_{\text{р}}$ . Последняя величина прямо пропорциональна объемному содержанию твердых частиц в пульпе.

Установлены корреляционные зависимости скорости распространения  $v_{\text{р}}$  и коэффициента поглощения  $\theta$  ультразвука от плотности  $\rho_0$  хвостов угольного шлама:

$$v_{\text{р}} = 1460 - 0,13 \cdot 10^{-3} \rho_0; \quad (20.36)$$

$$\theta = 13 + 3 \cdot 10^{-4} \rho_0 \quad (20.37)$$

и от его зольности  $A_{\text{с}}$  (%):

$$v_{\text{р}} = 1440 + 0,13 A_{\text{с}}; \quad (20.38)$$

$$\theta = 65 + 0,7 A_{\text{с}}. \quad (20.39)$$

Эти зависимости можно использовать для анализа процесса флотации каменного угля.

**Радиосвязь в подземных горных выработках.** Обязательным условием полной автоматизации горного предприятия является немедленная передача необходимой информации в пределах

подземных горных выработок, а также с поверхности в горные выработки, и наоборот.

Наиболее подходящим способом передачи информации является радиосвязь. Однако при этом необходимо решить задачи распространения электромагнитных волн в пределах горных выработок и через массив горных пород. Дальность распространения электромагнитных волн даже по выработкам зависит от электрических свойств пород месторождения.

При распространении сантиметровых радиоволн в прямолинейной выработке мощность излучения, поступившего на приемную антенну от однократно отраженного луча, будет определяться коэффициентом отражения  $R$ . Например, для горизонтально поляризованных волн

$$R_{11} = (\sqrt{\epsilon_r} \cdot \sin \gamma - 1) / (\sqrt{\epsilon_r} \cdot \sin \gamma + 1), \quad (20.40)$$

где  $\epsilon_r$  — диэлектрическая проницаемость пород, слагающих выработку;  $\gamma$  — угол встречи электромагнитной волны со стенками выработок.

При радиосвязи через массив пород основное влияние на дальность приема оказывают два фактора — поглощение электромагнитных колебаний и эффективность излучателей.

С увеличением частоты, как известно, поглощение сильно возрастает, однако при этом улучшается излучающая способность антенн. Таким образом, для конкретных условий необходимо выбирать оптимальную частоту.

Оптимальная частота радиосвязи  $f_{\text{опт}}$  (кГц) зависит от удельного электрического сопротивления пород  $\rho_3$ :

$$f_{\text{опт}} = 3,8 \cdot 10^3 \rho_3 / r^2, \quad (20.41)$$

где  $r$  — дальность радиосвязи.

Дальности прямой связи через массив в зависимости от свойств пород составляют 100—1000 м, в частности в сульфидных рудах 100—150 м, в углях 150—200 м и в кварцитах 1000 м. При использовании металлических направляющих можно получить дальность распространения радиоволн, равную 5—7 км.

## Заключение

Как уже отмечалось, на любой стадии ведения горных работ необходимо знание значительного количества данных о физических параметрах пород и их состоянии. При этом на подготовительном этапе к проектированию и в период проектирования разработки месторождений полезных ископаемых свойства пород нужны для оконтуривания месторождения, подсчета запасов и оценки качества полезного ископаемого, оценки состояния разрабатываемых массивов пород, а также для выбора и расчета оптимальных схем вскрытия, систем разработки, водоотлива, проветривания, крепления, перемещения, складирования и отвалообразования, выбора соответствующих машин, механизмов, агрегатов.

В сфере непосредственного производства (ведение горных работ) свойства пород используются при нормировании труда горнорабочих, определении потребного количества и производительности машин и механизмов, при оперативном управлении горным производством и всеми его составляющими с целью обеспечения наивысшей производительности, безопасности ведения работ и высокого качества добываемого продукта.

В области научных исследований и конструирования машин знание физических свойств пород необходимо для изыскания и разработки методов и средств повышения производительности отдельных технологических процессов или всего цикла горных работ.

Отсюда вытекают те основные задачи, которые необходимо решать при изучении свойств горных пород:

установление причинной обусловленности физических свойств горных пород;

установление закономерностей изменения свойств пород от внешних воздействующих полей;

определение закономерностей изменения свойств пород с увеличением и уменьшением изучаемого объема (масштабный эффект);

определение закономерностей изменения свойств пород с увеличением степени их нарушенности вплоть до рыхлого состояния;

определение закономерностей пространственного распределения физических свойств горных пород;

установление закономерностей временного изменения физических свойств горных пород.

В итоге все практические исследования свойств горных пород направлены на разработку системы физико-технического обеспечения горного производства.

Именно такая система позволит существенно изменить качественные характеристики работы горного предприятия.

Система физико-технического обеспечения горного производства призвана оперативно обеспечивать любое горное предприятие следующими данными:

комплексом физико-технических и горно-технологических параметров пород, слагающих данное месторождение, в образце, массиве, разрыхленном состоянии с учетом средних значений этих параметров, пределов изменения, коэффициента вариации, доверительной вероятности;

пространственным распределением тех же свойств в разрабатываемом массиве;

полным набором зависимостей свойств разрабатываемых пород от температуры, давления, частоты и напряженности электромагнитного поля, влажности;

набором методик расчета технологических процессов на данном предприятии, использующем физико-технические параметры пород.

## Список литературы

---

1. *Арипова Ф. М.* Физико-механические свойства горных пород некоторых месторождений Средней Азии. Ташкент, Фан, 1977.
2. *Аренс В. Ж.* Геотехнологические методы добычи полезных ископаемых. М., Недра, 1975.
3. *Баклашов И. В., Картозия Б. А.* Механика горных пород. М., Недра, 1975.
4. *Байконуров О. А.* Методы контроля физико-технических параметров подземной разработки руд. Алма-Ата, Наука, 1979.
5. *Барон Л. И.* Горнотехнологическое породоведение: Предмет и способы исследований. М., Наука, 1977.
6. *Воларович М. П., Томашевская И. С., Будников В. А.* Механика горных пород при высоких давлениях. М., Наука, 1978.
7. *Воробьев А. А., Гонконогов М. П., Векслер Ю. А.* Теоретические вопросы физики горных пород. М., Недра, 1972.
8. *Дмитриев А. П., Гончаров С. А.* Термическое и комбинированное разрушение горных пород. М., Недра, 1978.
9. *Дмитриев А. П., Гончаров С. А.* Термодинамические процессы в горных породах. М., Недра, 1983.
10. *Инструкция* по применению сейсмического способа определения технической рыхлости горных массивов. М., изд. ИПКОН АН СССР, 1977.
11. *Исследование* физических свойств минерального вещества Земли при высоких термодинамических параметрах. Киев, Наукова думка, 1977.
12. *Куддусов Х. К.* Структурно-петрологические особенности и физико-механические свойства пород Акташского интрузива. Душанбе, Донш, 1978.
13. *Кузнецов В. В., Протасов Ю. И.* Разрушение горных пород инфракрасным излучением. М., Недра, 1979.
14. *Лунный грунт* из Моря изобилия. Под ред. А. П. Виноградова. М., Недра, 1974.
15. *Любимов Н. И., Носенко Л. И.* Справочник по физико-механическим параметрам горных пород рудных районов. М., Недра, 1978.
16. *Методика* и результаты комплексного определения тепловых свойств аналогов твердых лунных пород в условиях глубокого вакуума/ А. П. Дмитриев, Г. Я. Новик, Р. Г. Петровичев и др.—Межвузовский сб., 1975, вып. 2. Физические процессы горного производства, с. 16—18.
17. *Некрасов Л. Б.* Основы электротермомеханического разрушения мерзлых пород. Новосибирск, Наука, 1979.
18. *Новик Г. Я., Зильбершмидт М. Г.* Учет реального строения горной породы при объяснении некоторых эффектов при ее разрушении и теплообмене.—Научн. тр. МГИ, 1976. Физические и химические процессы горного производства, с. 15—17.
19. *Новик Г. Я.* К проблеме исследования физических свойств горных пород.—Научн. тр. МГИ, 1979. Физические и химические процессы горного производства, с. 150—156.
20. *Новик Г. Я.* Лабораторные работы по физике горных пород. М., изд. МГИ, 1983.
21. *Новик Г. Я., Кузьев Л. С.* Сборник задач и упражнений по основам физики горных пород. М., изд. МГИ, 1983.
22. *Норель Б. К.* Изменение механической прочности угольного пласта в массиве. М., Наука, 1983.
23. *Распределение* и корреляция показателей физических свойств горных пород /М. М. Протодьяконов, Р. И. Тедер, Е. И. Ильницкая и др. М., Недра, 1981.
24. *Ржевская С. В.* Рентгеновские методы исследования горных пород. М., изд. МГИ, 1978.

25. *Ржевский В. В.* Физико-технические параметры горных пород. М., Наука, 1975.
26. *Ржевский В. В.* Методические указания по расчетам давления горных пород по курсу «Основы физики горных пород». М., изд. МГИ, 1981.
27. *Ржевский В. В., Протасов Ю. И.* Электрическое разрушение горных пород. М., Недра, 1972.
28. *Руппенейт К. В.* Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. М., Недра, 1975.
29. *Руководство по применению электрометрического метода оценки нарушенности высокопроводящих пород.* Новосибирск, изд. ИГД СО АН СССР, 1979.
30. *Справочник (кадастр) физических свойств горных пород.* Под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодьяконова. М., Недра, 1975.
31. *Суханов А. Ф., Кутузов Б. Н.* Разрушение горных пород взрывом. М., Недра, 1983.
32. *Тарасов В. Г., Дырдин В. В.* Рудничная геоэлектрика. М., Недра, 1977.
33. *Тонконогов М. П.* Диэлектрическая релаксация, электрический пробой и разрушение горных пород. М., Недра, 1975.
34. *Тонконогов М. П., Векслер Ю. А.* Исследование электрических свойств вмещающих пород Карагандинского угольного бассейна. — Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых, 1976, № 5, с. 96—104.
35. *Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В.* Основы механики горных пород. Л., Недра, 1977.
36. *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика).* Справочник геофизика. Под ред. Н. Б. Дортман. М., Недра, 1976.
37. *Фролов А. Д.* Электрические и упругие свойства криогенных пород. М., Недра, 1976.
38. *Эгерер Ф., Тулак Л.* Зависимость диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь осадочных пород от содержания электролитов и нефти. — Геофизический сб. АН УССР, 1978, вып. 86, с. 22—26.
39. *Ямщиков В. С., Нисневич М. Л.* Контроль качества на предприятиях нерудных строительных материалов. М., Стройиздат, 1981.
40. *Ямщиков В. С.* Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. М., Недра, 1982.

# Приложения

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Средние значения механических базовых параметров минералов

Минералы	$\rho_0 \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	E, ГПа	$\nu$	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа
Альбит	2,64	75	0,32	110	10
Ангидрит	2,90	76	0,32	44	6
Апатит	3,29	78	0,26	55	3
Биотит	2,93	69	0,28	—	3
Галит	2,15	32,5	0,26	32	4
Гематит	5,10	212	0,14	60	6
Гипс	2,32	80	0,30	40	6
Диоксид	3,27	160	0,35	89	12
Доломит	2,97	80	0,38	90	11
Кальцит	2,78	83	0,30	16	4
Кварц	2,66	96	0,08	400	21
Корунд	4,03	440	0,22	500	20
Каолинит	2,60	5	0,45	1	2
Лабрадор	2,70	88	0,28	200	18
Магнетит	4,70	105	0,20	52	14
Магнезит	2,85	8	0,35	40	2
Микроклин	2,60	76	0,30	120	12
Нефелин	2,60	73	0,25	110	11
Оливин	3,20	210	0,24	220	14
Олигоклаз	2,67	75	0,30	130	14
Ортоклаз	2,54	63	0,29	—	—
Пирит	5,00	140	0,19	128	16
Роговая обманка	3,25	82	0,27	94	9
Серпентин	2,60	50	0,26	68	9
Сфалерит	3,70	80	0,17	20	12
Тальк	2,90	35	0,40	28	8
Флюорит	3,15	100	0,29	40	8
Халцедон	2,60	88	0,30	180	21
Хлорит	2,87	65	0,22	41	7
Хромит	4,70	120	0,20	104	11

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Средние значения базовых электрических и тепловых параметров минералов

Минералы	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/(кг·К)	$\alpha \cdot 10^8$ , 1/К	$\epsilon_r$	$\text{tg } \delta \cdot 10^3$	$\rho_{\text{э}}$ , Ом·м
Альбит	2,4	0,75	0,8	5,2	6	$10^{12}$
Ангидрит	4,6	0,50	1,8	6,7	18	$6 \cdot 10^{11}$
Апатит	1,4	0,70	1,7	8,5	30	$10^{10}$
Биотит	1,6	0,77	—	5,7	1	$10^{14}$
Галит	5,3	0,86	4,0	5,9	30	$10^{10}$
Гематит	11,2	0,63	0,8	25,0	200	10
Гипс	1,1	1,10	2,4	7,0	5	$10^{10}$
Диоксид	4,1	0,65	1,6	8,2	30	$10^{10}$

Минералы	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/(кг·К)	$\alpha \cdot 10^5$ , 1/К	$\epsilon_r$	$\text{tg } \delta \cdot 10^3$	$\rho_3 \cdot 10^{-3}$ Ом·м
Доломит	3,0	0,86	0,9	6,8	25	$10^8$
Кальцит	3,9	0,79	1,3	7,5	10	$10^{10}$
Кварц	7,0	0,85	1,3	5,1	9	$10^{17}$
Корунд	7,0	0,50	0,59	11,0	—	$10^8$
Каолинит	0,9	0,92	—	7,0	70	$10^4$
Лабрадор	—	0,83	—	6,5	40	$10^{11}$
Магнетит	4,7	0,60	1,6	58	200	$10^{-2}$
Магнезит	1,9	0,88	—	12	80	—
Микроклин	3,9	0,69	1,2	6,0	30	$4 \cdot 10^{10}$
Нефелин	2,6	0,79	1,0	6,9	56	$6 \cdot 10^7$
Оливин	4,0	0,75	0,8	11,0	40	$10^5$
Олигоклаз	2,2	0,79	0,9	6,8	30	$10^9$
Ортоклаз	4,1	0,62	0,2	5,7	130	$10^{11}$
Пирит	38,8	0,50	3,2	42,0	400	$10^{-3}$
Роговая обманка	3,0	0,67	0,9	6,5	30	$10^{12}$
Серпентин	2,9	0,65	4,0	9,0	100	$10^6$
Сфалерит	26,4	0,59	0,6	7,8	400	$10^{-3}$
Тальк	3,0	0,70	0,4	6,0	50	$2 \cdot 10^9$
Флюорит	4,0	0,78	1,96	7,5	0,8	$10^{14}$
Халцедон	1,8	0,90	1,36	5,1	10	$10^{13}$
Хлорит	2,87	0,60	0,8	6,5	40	$2 \cdot 10^{10}$
Хромит	4,2	0,62	1,2	9,8	60	$3 \cdot 10^8$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Упругие и акустические параметры минералов

Минералы	$G$ , ГПа	$K$ , ГПа	$v_s \cdot 10^{-3}$ , м/с	$v_p \cdot 10^{-3}$ , м/с
Авгит	58	95	4,28	7,33
Альбит	30	55	3,39	6,02
Биотит	28	51	3,00	5,36
Алмаз	96	145	4,78	8,73
Галит	15	25	2,50	4,32
Гематит	93	100	4,27	6,40
Диопсид	94	114	4,40	7,23
Кварц	44	37	4,03	6,05
Кальцит	33	72	3,50	6,32
Корунд	179	277	6,67	11,15
Лабрадор	35	79	3,59	6,49
Мусковит	32	33	3,41	5,88
Магнетит	92	161	4,22	6,82
Микроклин	29	56	3,38	6,13
Нефелин	31	51	3,45	5,90
Ортоклаз	24	52	3,09	5,68
Пирит	125	116	3,98	7,30
Роговая обманка	43	82	3,72	6,80
Флюорит	42	89	3,68	6,76
Флогопит	27	56	3,08	5,62
Эгирин	58	112	4,07	7,35

Усредненные механические параметры пород и углей

Порода, уголь	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$\nu$	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$\tau_{сдв}$ , МПа	Коэффициент крепости $f$	Угол внутреннего трения $\Phi$ , градус	Сцепление $C$ , МПа
<i>Кузнецкий бассейн</i>									
Алевролит	2540	30-70	0,20-0,28	70-77	8-12	23-26	6-8,3	27-32	23-26
Аргиллит	2540	45-50	0,30	52-80	5-7	17-23	2,6-5,8	30-32	5-17
Песчаник	2660	30-70	0,09-0,13	93-120	9-12	28-42	—	—	—
Уголь	1980	18-25	0,14-0,16	12-24	0,2-2	2-10	0,7-1,5	35-37	8-10
<i>Канско-Ачинский бассейн</i>									
Алевролит	2540	—	—	5-14	0,8-7	1-3	—	28-30	1-5
Песчаник	2650	—	—	2-8	0,3-1	0,4-1	—	32-36	0,8-3
Уголь	2000	—	—	5-18	0,8-2	1-2	1,4	29-32	1,7-7
<i>Ириша-Бородинский разрез</i>									
Песчаник с прослойками алевролита	2630	—	—	105	9	16	6,8	34	36
Сланец алевроитовый	3050	—	—	87	9	14	5,2	33	30
Уголь бурый	1220	18	0,43	11-15	0,8-1	1,5-2,5	1,7-2,4	25-36	4-6
<i>Соколовско-Сарбайский ГОК</i>									
Альбитофир	2650	73	0,28	90	12	18	9,7	29	30
Диорит-порфирит	3230	53	0,24	270	21	41	20	35	85
Известняк мраморизованный	2710	107	—	67	9	14	5	30	21

Порода, уголь	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$\nu$	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$T_{сдв}$ , МПа	Коэффициент крепости $f$	Угол внутреннего трения $\phi$ , градус	Сцепление $C$ , МПа
<b>Соколовско-Сарбайский ГОК</b>									
Известняк глинистый	2700	65	0,22	144	10	26	6,1	36	48
Магнетитовая руда богатая	3870	70	0,36	274	23	45	4,6	34	91
Магнетитовая руда бедная	3240	68	0,27	214	22	41	7,8	33	67
Маргит пористый	3380	53	0,18	73	2—6	2,4	9,2	34	22
Песчаник кварцевый	2660	45	0,21	166	15	30	6,5	33	50
Порфирит диабазовый	2880	89	0,23	47	21	37	19,5	31	56
Синит порфиритовый	2610	61	0,30	150	20	80	12,2	31	45
Скарн пироксен-эпидотовый	2780	90	0,41	94	12	18	18,7	32	29
Туф альбитофиритовый	2660	47	0,16	161	21	31	9,9	32	50
<b>Талнахское месторождение</b>									
Алеврит углистый	2670	—	0,30	143	16	27	—	33	40
Ангидрит	2780	—	—	130	12	24	—	35	40
Базальт	2730	33	0,23	90	9	17	7,3	34	27
Габбро-диабаз	2860	70	0,26	148	16	28	8,4	32	44
Долерит	2930	71	0,25	130	16	28	10	32	43
Известняк	2730	90	0,30	150	16	27	—	33	40
Песчаник ороговикованный	2560	53	0,28	166	21	31	13,8	32	45
Пиррогиновая руда	4580	45	0,31	100	8	31	4,9	36	31
Роговик	2680	60—84	0,22—0,27	243	31	50	14	31	84
Халькопиритовая руда	4010	—	0,31	100	8	31	4,9	36	31

Акустические параметры пород

Порода	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$v_p$ , м/с (в скобках $v_s$ )	$\alpha \cdot 10^{-8}$ , кг/(м <sup>3</sup> ·с)	$\theta$ , м <sup>-1</sup> при 1 МГц
Алевролит	2600	1610	42	—
Базальт	2860	5400	154	—
Глина	2000	2100	41	—
Габбро	2900	6250 (3380)	181	0,05 (0,08)
Гранит	2780	4350 (2260)	126	0,13 (0,22)
Диорит	2800	4580	128	—
Известняк	2650	4350	119	—
Кварцит железистый	3000	5600	168	—
Мрамор	2880	4950	142	—
Песок	1700	800	15	—
Песчаник	2500	2800 (2100)	71	0,264 (1,09)
Перидотит	2800	7000	196	—
Роговик	2800	3640	102	—
Сиенит	2710	4950	134	—
Скарн	3000	6100	183	—
Сланец	2600	2250	59	—
Серпентинит	2740	6400 (3760)	175	0,085 (0,088)
Уголь	1350	1950	25	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Проницаемость некоторых угольных пластов

Бассейн	Индекс пласта	Коэффициент проницаемости $k_{пр} \cdot 10^{12}$ , м <sup>2</sup>					
		вдоль слоистости			поперек слоистости		
		от	до	средний	от	до	средний
Карагандинский Донецкий	$k_{12}$	0,044	13,15	1,05	0,0015	1,06	0,42
	$l_6$	2,39	9,2	4,65	1,01	4,86	2,98
	$l_3^H$	2,65	9,93	6,01	0,75	6,93	3,32

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Гидравлические свойства пород

Порода	Коэффициент водоотдачи $\xi$ , %	Средний коэффициент фильтрации $k_f$ , м/сут
Известняки трещиноватые	1—5	5
Пески и супеси тонкозернистые	10—15	10
Пески мелкозернистые и глинистые	15—20	5
Пески среднезернистые	20—25	15
Пески крупнозернистые	25—35	30
Песчаники на глинистом цементе	2—3	3
Угли бурые	2—5	2

Тепловые параметры горных пород

Минералы и породы	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/(кг·К)	$\alpha \cdot 10^6$ , 1/К
Антрацит	0,4	0,96	—
Базальт	2,9—4,3	0,63—0,88	0,54
Габбро	2,0	0,17	—
Гнейс	1,6—3,4	0,17	—
Гранит	2,2—4,1	0,54—0,79	0,6—0,9
Диабаз	3,4	0,17	0,54
Известняк	1,0—2,3	0,67—1,04	0,5—0,89
Кварцит	6,3	0,21	1,1
Мрамор	1,3	0,42	0,3—1,5
Перидотит	3,2	0,67	0,45
Песчаник	1,3—4,2	0,81	0,5—1,2
Роговик маритовый	4,3—4,8	0,58—1,04	—
Сланец глинистый	1,5—2,2	0,75—0,81	0,9
Уголь каменный	0,5—0,9	1,30	—
Уголь бурый	0,24	1,13	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Температура термических превращений минералов

Минерал	Изменения	Температура, К
Арагонит	Диссоциация	1170
Арсенопирит	Возгонка	950
Боксит	Дегидратация	570
Глауконит	Дегидратация	830
Доломит	Диссоциация	1170
Кальцит	»	1170
Каолинит	Дегидратация	820
	Перестройка решетки	1230
Кварц	То же	846
Магнетит	Точка Кюри	850
	Разложение	1810
Магнезит	Диссоциация	820
Мусковит	Потеря конституционной воды	770
Пирротин	Разложение	970
Сопиолит	Потеря адсорбционной воды	400
	Потеря конституционной воды	1120
Сидерит	Диссоциация	670
Сера	Переход из ромбической в моноклинную	370
Халькозин	Перестройка решетки	380

Температура  $T_{пл}$  и теплота  $Q_{пл}$  плавления минералов

Минерал	$T_{пл}$ , К	$Q_{пл}$ , кДж/кг	Минерал	$T_{пл}$ , К	$Q_{пл}$ , кДж/кг
Ангидрит	1570	201	Куприт	1500	390
Аурипигмент	573	—	Лед	273	336
Анортит	1780	440	Магнетит	2100	—
Альбит	1380	203	Молибденит	1070	—
Амфибол	1330	—	Нефелин	1800	—
Барит	1853	174	Ортоклаз	1440	—
Берилл	1683	—	Оливин	1630	—
Галит	1800	530	Пирротин	1430	—
Галенит	1458	73	Рутил	1910	597
Графит	3813	—	Родонит	1595	—
Кальцит	1600	—	Реальгар	570	—
Киноварь	700	—	Сфалерит	1290	390
Корунд	2320	1070	Стибнит	820	123
Кварц	1710	—	Тенорит	1720	148
Карналлит	400	—	Халькозин	1370	—
Карборунд	2970	—	Флюорит	1665	220

Электрические свойства пород (частота поля не более  $10^5$  Гц)

Порода	$\rho_3$ , Ом·м	$\epsilon_r$	Порода	$\rho_3$ , Ом·м	$\epsilon_r$
Аргиллит	$10-10^2$	6—8	Роговик	$10^3-10^4$	11
Базальт	$10^2-10^6$	12	пироксеновый		
Глина	$10-10^6$	7—12	Уголь каменный	$10^2-10^3$	3—15
Гнейс	$10^2-10^7$	8—15	Известняк	$10^5$	7—11
Гранит	$10^2-10^7$	5—9	Кварцит	$10-10^6$	7
Габбро	$10^2-10^6$	18	Перидотит	$10^2-10^3$	9
Диорит	$10^2-10^6$	8—9	Мрамор	$10^2-10^6$	8
Известняк	$10^2-10^3$	8—15	Сланец серици- товый	$10^4$	11—12
Песчаник	$10-10^8$	9—11	Скарн нерудный	$10^8-10^9$	4—8
Руда маритовая	$10^4-10^6$	15—18	Серпентинит	$10^3-10^4$	11
Руда пиритовая	$10-10^3$	25—28	Сиенит	$10^2-10^6$	7—14
Руда магнетитовая	$10-10^5$	30—35			
Руда хромитовая	$10^3$	10—16			

Горно-технологические параметры пород

Порода	$\sigma_{сж}$ , МПа	$k_{жр}$	$k_{пл}$	$\rho_k$ , МПа	Дробимость $V_{таж}$ , см <sup>3</sup>
Апатит	142	0,29	2,1	1380	8,3
Габбро	185	0,25	2,7	2820	3,0
Гранит биотитовый	186	0,24	2,8	2030	2,8
Джеспилит	313	0,39	1,9	6240	2,0
Диорит-порфирит	256	0,25	2,4	2570	1,4
Известняк мраморизованный	163	0,23	3,0	1690	4,5
Известняк пелитоморфный	193	0,24	3,95	1340	3,9
Кварцит железистый (КМА)	280	0,38	2,5	6740	2,7
Лабрадорит	165	0,25	3,38	1580	6,9
Мартитовая руда	56	0,20	2,14	380	13,4
Мрамор белый	95	0,13	3,0	1115	5,9
Мрамор серый	100	0,19	2,88	725	9,2
Песчаник кварцитовый сла- босцементированный	170	0,34	2,14	1620	8,9
Песчаник (Донбасс)	190	0,23	2,66	1830	3,8
Скарн (Тырныауз)	290	0,37	2,0	4944	2,7
Уртит	170	0,27	2,7	1940	2,7

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

Абразивность некоторых горных пор (по методике Л. И. Барона)

Порода	Абразивность, мг	Порода	Абразивность, мг
Известняки, мраморы	1—5	Граниты	80—90
Аргиллиты, мягкие сланцы	5—10	Гранодиориты	55—75
Песчаники, диабазы	18—30	Порфириты	40—60
Диориты, пироксениты	45—65	Лабрадориты	30—70
Сиениты	65—90		

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

Абразивность горных пород (по методике Л. А. Шрейнера)

Порода	Коэффициент абразивности $k_{аб} \cdot 10^{15}$ , м·с <sup>2</sup> /кг
Известняки, доломиты	20—24
Полевешпатовые породы	35—40
Кварцевые породы	57—90

Технологические свойства углей различных марок

Бассейн	Марка угля	Усилие внедрения стержня диаметром 4,5 мм, Н	Сопrotивляемость резанию, Н/м
Донецкий	А	17 000	7500—28 000
	Т	7 100	29 000
	К	6 400	—
	Г	8 050	7400—32 000
	Д	7 550	7 800
	ОС	—	11 600
Подмосковный	Б	5 000	—
Кузнецкий	К	8 100	—
Кизеловский	Различные	17 900—23 100	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

Сравнение средних значений механических параметров углей и твердых включений

Наименование пород и углей	Твердость по Шору	Дробимость относительно кварца, %	Пределы прочности, МПа	
			$\sigma_{сж \perp}$	$\sigma_{сж \parallel}$
Угли гумитовые	26—36	7—13	12	7
Углистые сланцы	22—23	11	6	3
Глины	19—21	3	6	2
Колчедан	—	580	116	33
Сапропелиты	40—50	18—36	22	12
Гумиты	25—36	2—13	10	7
Угли кляреновые	35	13	12	6

ПРИЛОЖЕНИЕ 17

Влияние естественной трещиноватости на технологические процессы горного производства

Процесс	Объем породы, воспринимающей нагрузку $V$ , м <sup>3</sup>	$\sqrt[3]{V}$ , м	Степень влияния трещиноватости на процесс		
			I порядок	II порядок	III порядок
Бурение	$10^{-6}$ — $10^{-2}$	$10^{-2}$ — $10^{-1}$	СВ	В	НВ
Измельчение	$10^{-6}$ — $10^{-3}$	$10^{-2}$ — $10^{-1}$	СВ	В	НВ
Выемка полезных ископаемых:	$10^{-4}$ — $10^{-3}$	$10^{-1}$	комбайнами	В	СВ
			многочерпаковыми экскаваторами	В	СВ
			одноковшовыми экскаваторами	СВ	В
Механическое рыхление	$10^0$	$10^0$	НВ	СВ	В
Взрывание	$10$ — $10^3$	$10^0$ — $10$	НВ	СВ	В
Поддержание выработок	$10^3$ — $10^6$	$10$ — $10^2$	НВ	НВ	В

Примечание. В — основное влияние; СВ — слабое влияние; НВ — влияние практически отсутствует.

Коэффициент крепости  $f$  углей некоторых бассейнов и месторождений

Бассейн, месторождение	Среднее значение	Пределы изменения
Кузнецкий	1,0	0,4—2,6
Подмосковный	1,1	0,8—1,5
Экибастузское	1,6	1,3—1,8
Ирша-Бородинское	1,2	—
Итатское	2,1	0,7—4,7
Ткибульское	1,6	1,1—2,6

ПРИЛОЖЕНИЕ 19

Удельный расход ВВ (аммонита № 9)  
для зарядов нормального дробления

Породы	Удельный расход ВВ, кг/м <sup>3</sup>	Породы	Удельный расход ВВ, кг/м <sup>3</sup>
Глина тяжелая, гравий	0,3—0,45	Гранит, змеевик, базальт	0,7—0,75
Мергель, бурый уголь, гипс, туф, антрацит	0,35—0,55	Андезит, роговик	0,85
Ангидрит, глинистый сланец	0,45—0,6	Диорит, габбро	0,9
Гранит, гнейс, сиенит, известняк	0,6—0,7		

ПРИЛОЖЕНИЕ 20

Диа-, пара- и ферромагнитные минералы

Диамагнитные $\mu = 0,999836 - 1,0$	Парамагнитные $\mu \approx 1,0004$	Ферромагнитные $\mu = 1,0064 - 6,5$
Апатит	$\alpha$ -гематит	Виллемит
Арагонит	Воздух	$\gamma$ -гематит
Вода	Гиперстен	Кубанит
Галит	Доломит	Лимонит
Галенит	Ильменит	Магнетит
Гипс	Магnezит	Магнoмагнетит
Графит	Мусковит	Пирротин
Кальцит	Оливин	Титанoмагнетит
Ортоклаз	Пирролюзит	Франклинит
Плагноклаз	Сидерит	Якобит
Сильвин		
Сфалерит		
Уголь		

Классификация горных пород (по проф. М. М. Протодяконову)

Категория	Степень крепости пород	Породы	Коэффициент крепости $f$
I	В высшей степени крепкие	Наиболее крепкие, плотные кварциты, базальты, исключительно крепкие другие породы	20
II	Очень крепкие	Очень крепкие гранитовые породы, кварцевый порфир, очень крепкий гранит, кремнистый сланец, кварциты менее крепкие, самые крепкие песчаники и известняки	15
III	Крепкие	Граниты (плотные) и гранитовые породы, очень крепкие песчаники и известняки, крепкий конгломерат, очень крепкие железные руды	10
IIIa	Крепкие	Известняки (крепкие), некрепкий гранит, крепкие песчаники, крепкий мрамор, доломит, колчедан	8
IV	Довольно крепкие	Обыкновенный песчаник, железные руды	6
IVa	То же	Песчанистые сланцы, сланцевые песчаники	5
V	Средней крепости	Крепкий глинистый сланец, некрепкие песчаник и известняк, мягкий конгломерат	4
Va	То же	Разнообразные сланцы (некрепкие), плотный мергель	3
VI	Довольно мягкие	Мягкий сланец, очень мягкий известняк, мел, каменная соль, гипс, мерзлый грунт, антрацит, обыкновенный мергель, разрушенный песчаник, цементированная галька, каменистый грунт	2
VIa	То же	Щебенистый грунт, разрушенный сланец, слежавшаяся галька и щебень, крепкий каменный уголь, отвердевшая глина	1,5
VII	Мягкие	Глина (плотная), мягкий каменный уголь, крепкие наносы	1,0
VIIa	»	Легкая песчанистая глина, лёсс, гравий	0,8
VIII	Землистые	Растительная земля, торф, легкий суглинок, сырой песок	0,6
IX	Сыпучие	Песок, осыпи, мелкий гравий, насыпная земля, добытый уголь	0,5
X	Плывучие	Плывуны, болотистый грунт, разжиженный лёсс и другие разжиженные грунты	0,3

Классификация пород по трудности разрушения

Класс	Категория	Породы
1. Полускальные, плотные и мягкие легкоразрушаемые	1—2 2—3 3—4 4—5	Супеси, суглинки, аргиллит, глина, мергель, уголь бурый, алевролит Сланец песчанистый, уголь Пироксенит слабый, глинистый доломит, сидерит Известняк, ангидрит, песчаники слабые, мартит пористый
2. Скальные легкоразрушаемые	5—6 6—7 7—8 8—9 9—10	Песчаник серый, аргиллит тонкозернистый, порфирит диабазовый, доломит, апатито-нефелиновая руда Известняк, кварцит ожелезненный пористый, перидотит серпентинизированный, сиенит-порфир Порфирит эпидотизированный, базальт, фосфорит, гранит средне- и крупнозернистый, диабаз, пегматит Гнейс гранат-биотитовый, гранит-порфир, кварцит железистый, гранито-гнейс, мергель кремнистый, доломит оруденелый Магнетитовая руда, роговик оруденелый, гранитовый скарн, лабрадорит, гранат-магнетитовый скарн, песчаник окремелый
3. Скальные средней трудности разрушения	10—11 11—12 12—13 13—14 14—15	Гранит мелкозернистый, кварцит, диорит, долерит Габбро-диабаз, брекчия, гнейс, гранит мелкозернистый, пироксен-гранатовый скарн Габбро, гранит, кварцевый порфир, уртит, андезит, песчаник оруденелый Кварцит безрудный, сиенит-порфир, скарн Базальт лабрадоровый, кварцит
4. Скальные трудноразрушаемые	16—18	Скарн скаполитовый, диорит-порфирит, андезитовый порфирит, роговик, скарнированный пироксеном
5. Скальные весьма трудноразрушаемые	18—20 21—25	Песчаник плотный, диорит-порфирит Нефриты, микрокварциты очень плотные, скарны интенсивно окремелые, кварц, неизменные андезиты, базальты, джеспилиты, кремль

Классификация пород по трудности бурения

Класс	Категория	Породы
1. Легкобуримые	1—2	Глина сланцевая, галечно-щебенистые породы, мергель глинистый, угли мягкие, песок, супесь, торф
	2—3	Алевролиты и аргидлиты слабосцементированные, выветрелые доломиты, известняки оталькованные, сланцы углистые, гипс пористый, жирные глины
	3—4	Алевролиты плотные глинистые, гипс плотный, доломиты неизмененные, мартитовые и другие железные руды мягкие, известняки мягкие, глины отвердевшие, угли выше средней крепости
	4—5	Алевролиты песчано-глинистые, антрациты и другие крепкие угли, колчеданы зоны выщелачивания, свинцово-цинковые окисленные руды, совершенно выветрелые каолинизированные граниты
2. Средней трудности бурения	6—7	Гипсоангидрит, руды бурожелезняковые выветрелые, сильно выветрелые граниты, дуниты, амфиболиты, доломиты плотные, руды гематитовые и мартитовые, сульфидные свинцово-цинковые и медно-никелевые руды
	7—8	Кварцево-карбонатные породы, фосфориты пластовые, песчаники аркозовые, андезиты крупнозернистые выветрелые
	8—9	Габбро измененные, скарны выветрелые, андезиты среднезернистые выветрелые
	9—10	Крупнозернистые гнейсы, граниты, гранодиориты, диабазы, сиениты среднезернистые, змеевики плотные
3. Труднобуримые	11—12	Среднезернистые граниты и диориты, амфиболиты, альбитофиры неизмененные, мрамор, сланцы аспидные
	12—13	Доломиты окварцованные, песчаники мелкозернистые, альбитофиры кварцевые, габбро-амфиболиты
	13—15	Базальты пористые, габбро и гнейсы среднезернистые, песчаники кремнистые
4. Весьма труднобуримые	16—17	Базальты среднезернистые, гранодиориты, альбитофиры плотные кварцевые, грейзены среднезернистые
	18—20	Роговики железистые, диориты мелкозернистые, андезиты плотные, гнейсы биотитовые, базальты мелкозернистые, железистые руды мелкозернистые мегнетитогематитовые
5. Исключительно труднобуримые	21—22	Скарны окремненные, микрограниты, альбитофиры сильноокварцованные мелкозернистые, весьма плотные андезиты
	23—25	Кремень, кварц, микрокварциты очень плотные, скарны интенсивно окремненные, неизмененные андезиты

# Алфавитно-предметный указатель

## А

Абразивность 79  
Абсолютная магнитная проницаемость 112  
— диэлектрическая проницаемость 101  
Автоматизация направления движения комбайна 331  
Агрегация 230  
Адсорбционная способность 80  
Активные методы контроля 308  
Активный ток 110  
Акустическая эмиссия 311  
Акустические методы  
— изучения массивов 194, 204  
— контроля 311, 315, 319, 331, 332  
Акустические свойства горных пород 69, 186  
Акустический показатель трещиноватости 192  
Анизотропия  
— коэффициент 32  
— упругих свойств 49  
— прочностных свойств 67  
— тепловых свойств 91, 94  
— электрических свойств 103, 109;  
Антиферромагнетизм 152  
Антрацит 320  
Арифметическое средневзвешенное 26  
Атомная поляризация 98

## Б

Базовые физические параметры 19, 22  
Бактериальное выщелачивание 304  
Боковое электрическое зондирование 200  
Больцмана постоянная 60  
Бурение  
— взрывное 256  
— виброинтенсификация 256  
— гидравлическое 255  
— комбинированное 276  
— механическое 250  
— термическое 270  
Буримость 253  
Бурые угли 321

## В

Вариационные кривые 34  
Вертикальное электрическое зондирование 197  
Взаимосвязи свойств 154  
— между скалярными и тензорными параметрами 157  
— между тензорными параметрами на базе пористости 160  
— на основе внешних полей 165  
— на основе состава 157  
— на основе строения 160  
— области изменения 155  
— принципы существования 156  
Взрыв 256  
Взрываемость 258  
Взрывная доставка руды 270  
Взрывное уплотнение пород 247  
Взрывчатое вещество 256  
Влагоемкость 81  
— капиллярная 82  
— молекулярная 81  
— полная 82  
Влажность естественная 82  
Внедряющийся электрод 284  
Внезапный выброс угля и газа 216

Внешние факторы 18

Вода

— гравитационная 82  
— капиллярная 82  
— нагнетание в пласт 245, 295  
— свободная 82  
— физически связанная 80  
— химически связанная 80  
Водонасыщения коэффициент 82  
Водоотдача 83  
Водопритоки в выработку 240  
Возгонка 306  
Воздействующее поле 35  
Волновое сопротивление  
— акустическое 74  
— электромагнитное 189  
Волны  
— сейсмические 186  
— электромагнитные 187  
— упругие 69, 186  
Восстановление 306  
Вторичное дробление 264, 275, 282  
Выбросоопасность 216  
— прогноз 317  
Вызванной поляризации метод 196, 315  
Выплавка серы подземная 305  
Высокочастотная электромагнитная выплавка серы 306  
Высокочастотный нагрев 134, 279  
Выход летучих веществ 320  
Выщелачивание  
— бактериальное 304  
— с наложением физических полей 304  
— химическое 303  
Вязкость пород 78

## Г

Гамма каротаж 201  
Гамма-гамма каротаж 202  
Гамма—гамма каротаж плотностной 204  
Гамма лучи 115  
Газификация подземная угля 305  
Газоносность пластов 215  
Газообильность углей 215  
Гармоническое средневзвешенное 26  
Геометрический коэффициент преломления 187, 190  
Геотермический градиент 183  
Геофизические методы 192  
Гигроскопичность максимальная 81  
Гидравлический разрыв 295  
Гидродобыча скважинная 303  
Гистограмма 34  
Глубина внедрения долота 251  
— промерзания пород 243  
— проникновения электромагнитных волн 189  
Годографы  
— отраженных волн 195  
— преломленных волн 195  
— прямых волн 195  
Головная преломленная волна 195  
Горная масса 16  
Горная порода 9  
— массив 16  
— образец 16  
— в массиве 16  
Горное давление 182  
Горно-технологические параметры пород 18, 121  
Горный удар 217, 316

Гравитационная аномалия 192  
Гравитационные методы  
— изучения массивов 192  
— обогащения 298  
Граничная скорость упругих волн 186  
Гранулометрический состав 219  
Гриффитса теория хрупкого разрушения 58

## Д

Дарси 84  
Дебая характеристическая температура 147  
Дегазация 128  
Дегидратация 128  
Дезинтеграторы 267  
Декремент затухания 73  
Декрипитация 302  
Депрессионная воронка 240  
Деформация 43  
— запредельная 233  
— линейная продольная 44  
— линейная поперечная 44  
— пластическая 45, 52  
— ползучести 54  
— разрушающая 45  
— упругая 45  
Деформометры 310  
Диамантики 113  
Дилатансия 61  
Динамическая твердость 76  
Динамическое воздействие  
— воды 118  
— нагрузок 125  
Дипольная поляризация 98  
Диспергация 128  
Дисперсность 219  
Дислокация 57  
Диссоциация 128  
Дизлектрики 106  
Дизлектрическая проницаемость 101  
Дизлектрическая сепарация 300  
Дизлектрические методы контроля 313, 326, 329  
Дизлектрические потери 109  
Дизлектрический термический анализ 151  
Длина  
— диффузии нейтронов 117  
— замедления нейтронов 117  
— свободного пробега фононов 87  
Длительная прочность 60  
Доверительный интервал 33  
Дробимость 78  
Дробление  
— контроль 331  
— энергоемкость 265

## Е

Емкостные методы контроля  
— влажности 329  
— давления 313  
— состава 326  
Естественная влажность 82  
Естественная радиоактивность 115  
Естественные физические поля  
— гравитационное 182  
— магнитное 184  
— тепловое 183  
— электрическое 184

## Ж

Жидкости в массивах 181

## З

Задачи изучения свойств 5  
Закрытые трещины 178  
Замораживание пород 245  
Запредельное деформирование 233  
Запрещенная зона 107  
Знакопеременное тепловое воздействие 274

Зольность углей 15  
— контроль 323  
Зона трещинообразования 251, 257  
Зонд 200  
Зонная теория электропроводности 107  
Зоны  
— взрыва 256  
— внедрения бурового инструмента 251

## И

Измельчение пород 266  
Измерительное поле 35  
Имитация лабораторного эксперимента 202  
Индуктивные методы оценки состояния массива 199  
Интерференционный метод 199  
Инфракрасный метод разрушения пород 283  
Ионная поляризация 98  
Ионносорбционная способность 81

## К

Кавитация 127  
Кажущееся электрическое сопротивление  
— метод 196, 200  
Каменные угли 320  
Каротаж 200  
— акустический 200  
— гамма-гамма 202  
— гамма-гамма плотностной 204  
— нейтронный гамма 201  
— радиоактивный 201  
— термический 201  
— электрический 200  
Капиллярная влагоемкость 82  
Качество  
— полезного ископаемого 319  
— строительных материалов 321  
— углей 319  
Кинетическая теория прочности 59  
Кирпичева—Кика теория дробления 265  
Классификация горных пород  
— по составу 179  
— по физическим свойствам 36  
— рыхлых пород 218  
Классификация массивов пород 180  
Классификация трещин 178  
Классификация физико-технических параметров 18  
Коагуляция 128  
Коксумость 320  
Конвективная теплопроводность 231  
Кондуктометрические методы контроля 326, 330  
Контактная прочность 76  
Контактные электротермические методы разрушения пород 279  
Контроль  
— влажности 328  
— дробления горных пород 331  
— емкостной 313, 326, 329  
— магнитный 312, 315, 327, 329  
— метод по физическим свойствам 325  
— нарушенности 308  
— неоднородности и включений 314  
— нейтронный метод 329  
— обогащения полезных ископаемых 332  
— оптико-спектральный метод 324  
— полярографический метод 324  
— радиометрический метод 313  
— рентгеновский метод 324  
— сейсмоакустический метод 312, 319  
— тепловой метод 329  
— термографический метод 328  
— упрочнения горных пород 331  
— устойчивости пород 309  
— электрические методы 312, 315, 326, 330  
— ядерного магнитного резонанса метод 329

Корреляция множественная 166  
 Корреляционная зависимость 36, 154  
 Корреляционный метод преломленных волн 194  
 Корреляционная взаимосвязь 154  
 Короткозамедленное взрывание 260  
 Коэффициент  
   — абразивности 79  
   — анизотропии акустических свойств 72  
   — анизотропии прочности 67  
   — анизотропии тепловых свойств 91, 94  
   — анизотропии упругих свойств 49  
   — анизотропии электрических свойств  
 103, 109  
   — вариации 33  
   — внутреннего трения 64  
   — водонасыщения 82  
   — водопрочности 120  
   — деформации 47  
   — крепости динамический 75  
   — крепости по М. М. Протодяконову 74  
   — набухания 229  
   — неоднородности по размерам зерен 12  
   — неоднородности по форме зерен 12  
   — неоднородности по гранулометрическому составу 219  
   — объемного сжатия 47  
   — относительной слоистости 12  
   — отражения упругих волн 186  
   — отражения электромагнитных волн  
 190  
   — пластичности 75  
   — поглощения упругих волн 187  
   — поглощения электромагнитных волн  
 190  
   — поглощения гамма-лучей 116  
   — поляризуемости 105  
   — пористости 10  
   — преломления упругих волн 187  
   — преломления электромагнитных волн  
 190  
   — проницаемости 83  
   — Пуассона 47  
   — разрыхления 221  
   — структурного ослабления 210  
   — теплового расширения 89, 94  
   — теплоотдачи 88  
   — теплопроводности 86  
   — трения 262  
   — усадки 229  
   — фильтрации 84  
   — формы 12  
   — хрупкости 75  
 Коэрцитивная сила 114  
 Криогенная текстура 234  
 Крепость 74  
 Крип 54  
 Критерий эффективности высокочастотного нагрева 280  
 Критерий термобуримости 273  
 Круги напряжений Мора 63  
 Крупновзрывные породы 218

## Л

Лабораторные методы определения свойств 31  
 Линейное тепловое расширение 89, 94  
 Линейный модуль трещиноватости 191  
 Линия наименьшего сопротивления 259  
 Липкость 229  
 Логарифмический декремент затухания 73  
 Логарифмическое средневзвешенное 26  
 Локальные электрические поля 185

## М

Магнитная аномалия 193  
 Магнитная восприимчивость 112  
   — объемная 112  
   — удельная 112

Магнитная проницаемость 23  
   — абсолютная 112  
   — относительная 23, 112  
 Магнитное разрушение 283  
 Магнитное поле Земли 184  
 Магнитные методы  
   — изучения массивов 193  
   — контроля состава 327  
   — обогащения 299  
 Магнитные потери 114  
 Магнитные свойства 112  
 Магнитный момент 113  
 Магнитострикция 114  
 Макроскопические трещины 178  
 Массив горных пород 16  
   — классификация 180  
 Масштабный эффект 179  
 Массоперенос 232  
 Матричный тип строения 37  
 Мелковзрывные породы 218  
 Мерзлые породы 234  
 Механизированная разборка руды 298  
 Механическое бурение 250  
 Механическое разрушение 261  
 Миграционная поляризация 98  
 Микрокомпоненты углей 14  
 Минерал 9  
 Многофазность горных пород 17  
 Множественная корреляция 166  
 Метод  
   — активный акустический 312  
   — вертикального электрического зондирования 197  
   — внедряющегося электрода 284  
   — вызванной поляризации 196, 315  
   — естественного электрического поля 196  
   — интерференционный 199  
   — кажущихся электрических сопротивлений 196  
   — — кондуктометрический 326  
   — лабораторный 31  
   — магнитный 312, 327  
   — муаровых сеток 311  
   — натурные 202  
   — нейтронные 329  
   — оптико-спектральный 324  
   — отраженных волн 195  
   — пассивный акустический 311, 318  
   — плотностной 327  
   — полярографический 324  
   — пенетрационный 203  
   — по физическим свойствам 325  
   — преломленных волн 195  
   — радиационный 324  
   — радиоволнового просвечивания 199  
   — радиометрический 313  
   — разгрузки 310  
   — разрушения угля отрывом 263  
   — рентгеновский 324  
   — реперов 309  
   — сейсмоакустического контроля 312, 319  
   — тепловой 329  
   — термографический 328  
   — фотометрический 202  
   — электрометрического контроля 312, 315, 326, 330  
   — электропрофилирования 198  
   — ядерно-магнитного резонанса 329  
 Модуль  
   — деформации 52  
   — запредельной деформации 233  
   — запредельной упругости 233  
   — объемного сжатия 47  
   — одностороннего сжатия 228  
   — приведенный Юнга 96, 281  
   — пластичности 52  
   — пьезоэлектрический 100  
   — трещиноватости 191

— сдвига 46, 131  
— упругости 46, 124  
— Юнга 46, 130  
Морозостойкость  
— коэффициент 239  
Муаровых сеток метод 311  
Мягкие горные породы 179

## Н

Набухания коэффициент 229  
Нагнетание в пласт воды 245, 295  
Намагниченность 112  
— остаточная 113  
Напряжение электрическое пробивное 136  
Напряжения механические 42  
— в выработках 288  
— касательные 43  
— нормальные 43  
— объемные 42  
— одноосные 42  
— относительный показатель падения 56  
— релаксация 56  
— тектонические 183  
— тензор 53  
Напряженность электрическая пробивная 137  
Насыпная масса 226  
Натурные методы измерения свойств 202  
Негабарит 264  
Нейтронный гамма каротаж 202  
Нейтронный метод определения влажности 329  
Низкочастотные методы разрушения 279

## О

Обогащение полезных ископаемых  
— контроль 332  
— методы 297  
Обработка руд электромагнитная 287  
Образец горной породы 16  
Общая пористость 10  
Объемная влагоемкость 82  
Объемная масса 41  
Объемная теплоемкость 90  
Объемный вес 42  
Объемный модуль трещиноватости 191  
Окислительно-восстановительные реакции 185  
Определение скорости упругих волн  
— по годографу отраженных волн 204  
— по годографу преломленных волн 205  
Опико-спектральный метод контроля состава пород 324  
Оптимальная  
— частота вращения бура 255  
— длина лезвия 255  
— угол поворота 255  
— шаг в шарошках долота 254  
— частота радиосвязи 333  
Оптические свойства 190  
Оптическое разрушение 284  
Ослабление пород 243  
Остаточная прочность 233  
Отдельности разрушаемые 224  
Открытая пористость 11  
Открытые трещины 178  
Относительная  
— диэлектрическая проницаемость 101  
— магнитная проницаемость 112  
Относительной слоистости коэффициент 12  
Относительный показатель  
— трудности бурения 254  
— трудности разрушения 250  
— трудности экскавации 261, 263  
— падения напряжений 56  
Отражение полное внутреннее 187  
Оттаивание мерзлых пород 244

## П

Парамагнетики 113  
Параметр физический 17

— скалярный 19  
— тензорный 19  
Параметры выработок 290  
Параметры качества  
— углей 319  
— строительных материалов 321  
Параметры очистного пространства 291  
Паспорт прочности 63  
Паспортизация пород по физическим свойствам 170  
Пассивный акустический метод 311, 318  
Пенетрационные методы изучения пород 203  
Период релаксации 56  
Пироэлектричество 100  
Плавления  
— температура 129  
— теплота 129  
Плазменный бур 274  
Планка постоянная 86  
Пластичность 54  
— число 122  
— верхний предел 122  
— нижний предел 122  
Пластовая скорость упругих волн 186  
Пластичности коэффициент 75  
Плотность горных пород 40  
Плотностной метод контроля состава пород 327  
Плотные породы 179  
Поверхностная энергия удельная 266  
Поверхностные упругие волны 70  
Поверхностно-активные вещества 121  
Поглощение гамма лучей 115  
Поглощения коэффициенты  
— упругих волн 72  
— электромагнитных волн 188  
Подземная газификация угля 305  
Подземная перегонка сланцев 305  
Подземная выплавка серы 305  
Показатель относительной трудности разрушения 250  
Показатель сопротивляемости пород высокочастотному нагреву 280  
Показатель трудности транспортирования 268  
Ползучести деформация 54  
Ползучести ядро 54  
Ползучесть 54  
Полиморфные превращения 128  
Полная влагоемкость 82  
Полная работа разрушения пород 249  
Полное внутреннее отражение упругих волн 195  
Полный коэффициент поглощения гамма лучей 116  
Полупроводники 107  
Полускальные породы 179  
Поляризуемость коэффициент 105  
Поляризация  
— дипольная 98  
— ионная 98  
— миграционная 98  
— электронная 97  
— электрохимическая 104  
Полярографический метод контроля состава 324  
Поперечные упругие волны 70  
Пористости коэффициент 10  
Пористость  
— общая 10  
— открытая 11  
Породы  
— классификация 14, 36, 179, 218  
— рыхлые 14  
— скальные 14  
— связанные 14  
Потенциалы собственной поляризации 185, 196  
Практическое использование потенциальной энергии пласта 295  
Пределы пластичности 122

- Пределы прочности 22, 56  
 Предельная высота вертикального откоса 293  
 Предельная глубина карьера 294  
 Преломленных волн годограф 194  
 Преломленных волн метод 194  
 Приведенный модуль упругости 96, 281  
 Приведенный предел прочности целлика 291  
 Принципы существования взаимосвязей свойств 156  
 Пробное напряжение 136  
 Пробой  
 — электрический 137  
 — электротепловой 135  
 Проводники 106  
 Прогноз потенциальной  
 — выбросоопасности 317  
 — удароопасности 316  
 Продольные упругие волны 70  
 Прожилковатый тип строения 38  
 Проницаемости коэффициент 83  
 Проницаемость 83  
 — трещинная 85  
 — фазовая 83  
 Процессы физические  
 — горного производства 30  
 — в горных породах 27  
 Прочность 22, 56  
 — динамическая 126  
 — длительная 60  
 — остаточная 233  
 — предел длительной 60  
 — электрическая 137  
 Пьезоэлектрично 99  
 Пьезоэлектрический модуль 100
- Р**
- Работа  
 — разрушения пород 247  
 — термического разрушения 273  
 — удельная 248  
 — электротермического разрушения 282  
 Рабочее тело 276, 283  
 Радиационный метод контроля состава пород 324  
 Радиоактивность  
 — естественная 115  
 — удельная 115  
 Радиоволновое просвечивание 199  
 Радиометрические методы контроля устойчивости пород 313  
 Радиометрические методы изучения массивов пород 194  
 Радиосвязь в горных выработках 332  
 Разборка руды механизированная 298  
 Разгрузки метод 309  
 Раздробленные породы 219  
 Размер зерен  
 — неоднородность 12  
 — средний 12  
 Размер целликов 291  
 Разрушающая деформация 45  
 Разрушаемые массивы 224  
 Разрушаемые отделности 224  
 Разрушение горных пород 45, 56  
 — взрывное 256  
 — комбинированное 276, 284  
 — магнитное 283  
 — мерзлых пород 284  
 — механическое 261, 264, 265  
 — термическое 270, 275  
 — электродинамическое 278  
 — электротермическое 279  
 — электротермомеханическое 284  
 — оптическое 284  
 — отрывом 263  
 — уровни 57  
 Разрушения теории  
 — кинетическая 59  
 — Мора 62  
 — хрупкого 58
- Разрыхления коэффициент 221  
 Разрыхленные породы 219  
 Растворимость 118  
 Рассеяние гамма квантов 115  
 Расчетные методы оценки свойств массива пород 203, 209  
 Расширение тепловое 89  
 Реолит 173  
 Режим работы добычного комбайна  
 — контроль 300  
 Релаксации период 56  
 Релаксация напряжений 56  
 Рентгеновский метод контроля состава пород 324  
 Рыхлые породы 14  
 — классификация 218
- С**
- Самовозгораемость 216  
 Самоизмельчение 267  
 Сверхвысокочастотное электротермическое разрушение пород 279  
 Свободная вода 82  
 Свойства пород 40  
 — задачи изучения 5  
 Связно взорванные породы 218  
 Связные породы 14  
 Сдвигение пород 292  
 Сегнетоэлектричество 100  
 Сейсмические волны 186  
 Сейсмоакустический метод контроля 312, 319  
 Силикатизация 246  
 Скальные породы 179  
 Скалярные параметры 19  
 Скважинная гидродобыча 303  
 Скорость бурения пород  
 — механического 252  
 — термического 273  
 Скорость распространения  
 — упругих волн 70, 124, 186  
 — электромагнитных волн 188  
 Скорость упругих волн  
 — пластовая 186  
 — граничная 186  
 — средняя 186  
 Скорость трещинообразования 127  
 Скрытые трещины 178  
 Слоистый тип строения 38  
 Смачиваемость 80  
 Соляно-кислотная обработка 241  
 Сопротивление копанью 262  
 Спекаемость 320  
 Статистическая смесь 26  
 Строение пород 9, 12  
 Структура пород 11  
 Структурного ослабления коэффициент 210  
 Сцепление 64, 121  
 Сыпучие породы 180
- Т**
- Тампонаж 245  
 Тангенс угла диэлектрических потерь 110  
 Твердость пород 76  
 Твердые породы 14  
 Текстура пород 11  
 Тектонические напряжения 183  
 Теллурические поля 184  
 Температура  
 — Дебая 147  
 — вентиляционной струи 297  
 — плавления 129  
 — фазовых превращений 129  
 Температуропроводность 88, 93  
 Тензорные параметры 19  
 Тензор  
 — деформаций 44  
 — напряжений 43  
 — упругости 46  
 Теплового расширения коэффициент 89, 94  
 Тепловое воздействие  
 — на пласт 295

- при обогащении 302
- Тепловые потоки 183
- Тепловой метод контроля влажности 329
- Тепловыделения в горных породах 296
- Теплоемкость
  - объемная 90
  - удельная 86
- Тепло-массоперенос 232
- Теплоотдача
  - коэффициент 88
- Теплопередача 88
- Теплота
  - плавления 129
  - сгорания 130
- Теплопроводность 91
  - конвективная 231
  - коэффициент 86
  - уравнение 87
  - фононная 86
  - электронная 86
- Теория
  - дробления Кирпичева—Кика 265
  - измельчение Риттингера 265
  - прочности Мора 62
  - разрушения кинетическая 59
  - хрупкого разрушения 58
- Термический анализ 328
  - диэлектрический 151
- Термический каротаж 201
- Термические напряжения 95
- Термическое бурение 270
- Термическое разрушение 275
- Термобуримости критерий 273
- Термографический метод оценки состава пород 328
- Термомеханическое бурение 277
- Технологические меры борьбы с внезапными выбросами угля и газа 295
- Торпедирование 241
- Точность физических параметров 33
- Трибозлектричество 100
- Трещинная проницаемость 85
- Трещиноватость 17, 178
  - классификация пород 30
- Трещиноватости модуль 191
- Трещины
  - классификация 178

## У

- Угловое распределение 224
- Угол внутреннего трения 64
- Угол диэлектрических потерь 109
- Угол естественного откоса 226
- Угол сдвижения пород 293
- Ударные волны 256
- Удароопасность 217
  - оценка 316
- Удельная поверхностная энергия 266, 267
- Удельная поверхность 220
- Удельная работа
  - упругой деформации 247
  - разрушения 248
  - разрушения взрывом 258
  - термического разрушения 276
  - электротермического разрушения 282
- Удельная радиоактивность 115
- Удельная электрическая проводимость 106
- Удельное волновое сопротивление
  - акустическое 74
  - электромагнитное 189
- Удельное сопротивление копанью 262
- Удельное электрическое сопротивление 106
- Удельные усилия резания 262
- Удельный вес 42
- Удельный расход взрывчатого вещества 258
- Ультразвуковое облучение при флотации 301
- Упрочнение пород
  - контроль 331
  - методы 245
- Упругая деформация 45

- Упругие волны 69
  - поперечные 70
  - продольные 70
- Уравнение Гриффитса 59
- Уровни разрушения 57
- Усадки коэффициент 229
- Усилие подачи на долото 254

## Ф

- Физико-техническое обеспечение горного производства 334
- Физико-химическое воздействие 296
- Физическая проницаемость 83
- Физические методы борьбы с внезапными выбросами угля и газа 295
- Физические параметры пород 17
- Физические процессы горного производства 30
- Физические процессы в горных породах 27
- Физически связанная вода 80
- Физические свойства пород 17
  - классификация 20
- Фильтрации коэффициент 84
- Фильтрационные электрические потенциалы 185
- Флотационные методы обогащения 299

## Х

- Химическое укрепление 246
- Хрупкости коэффициент 75

## Ц

- Целик 290

## Ч

- Частота оптимальная радиосвязи 333
- Число пластичности 122

## Ш

- Ширина запрещенной зоны 107

## Э

- Электрическая поляризация 97
- Электрическая прочность 137
- Электрические локальные поля 185
- Электрические теллурические поля 184
- Электрические фильтрационные потенциалы 185
- Электрический пробой 137
- Электромагнитное волновое сопротивление 189
- Электрогидравлический эффект 278
- Электродинамическое разрушение 278
- Электромагнитная обработка руд 287
- Электромагнитное поле в породах 187

лектрометрические методы  
— определения влажности в породах 31  
— оценки нарушенности пород 312  
— определения опасных зон 330  
— определения состава пород 326  
— определения устойчивости пород 312  
Электронная поляризация 97  
Электроосмос 232, 242  
Электрооттаивание 243  
Электроплавление 247  
Электрострикция 99  
Электротепловой пробой 135  
Электротермические методы разрушения 279

Электротермомеханические методы разрушения 284  
Электрохимическая поляризация 104  
Электрохимическое закрепление пород 246  
Эмиссия акустическая 311  
Эффективные сечения поглощения нейтронов 116  
Эффективные сечения рассеяния нейтронов 116

Я  
Ядерно-магнитный резонанс 239  
Ядро ползуности 54

# Оглавление

	<i>Стр.</i>
Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
<b>Раздел I. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКИ ГОРНЫХ ПОРОД</b>	<b>9</b>
<b>1. Минералы и горные породы . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1. Строение и состав минералов и горных пород . . . . .	9
1.2. Горные породы как объект разработки. Массив. Горная масса. Образец . . . . .	15
<b>2. Общие понятия о физико-технических свойствах пород и физических процессах . . . . .</b>	<b>17</b>
2.1. Классификация физико-технических свойств пород. Базовые физико-технические параметры . . . . .	17
2.2. Влияние минерального состава и строения пород на их свойства . . . . .	24
2.3. Физические процессы в горных породах . . . . .	27
2.4. Воздействие внешних полей на свойства горных пород . . . . .	29
2.5. Физические процессы горного производства . . . . .	30
2.6. Экспериментальное определение физико-технических параметров пород . . . . .	31
2.7. Классификация пород по физическим свойствам . . . . .	36
<b>Раздел II. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРОЦЕССЫ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>3. Механические свойства образцов горных пород . . . . .</b>	<b>40</b>
3.1. Общие положения . . . . .	40
3.2. Плотность пород . . . . .	40
3.3. Напряжения и деформации в породах . . . . .	42
3.4. Упругие свойства пород . . . . .	45
3.5. Влияние состава и строения пород на их упругие свойства . . . . .	48
3.6. Пластические и реологические свойства пород . . . . .	52
3.7. Прочность образцов горных пород . . . . .	56
3.8. Влияние минерального состава и строения пород на их прочность . . . . .	65
3.9. Акустические свойства образцов горных пород . . . . .	69
<b>4. Обобщенные горно-технологические параметры пород . . . . .</b>	<b>74</b>
4.1. Крепость горных пород . . . . .	74
4.2. Хрупкость и пластичность пород . . . . .	75
4.3. Твердость горных пород . . . . .	76
4.4. Вязкость, дробимость и абразивность пород . . . . .	78
<b>5. Гидравлические свойства образцов горных пород . . . . .</b>	<b>80</b>
5.1. Содержание жидкостей и газов в породах . . . . .	80
5.2. Перемещение жидкостей и газов в породах . . . . .	83
<b>6. Тепловые свойства образцов горных пород . . . . .</b>	<b>85</b>
6.1. Распространение и накопление тепла . . . . .	85
6.2. Теплоемкость пород . . . . .	89
6.3. Теплопроводность и температуропроводность пород . . . . .	90
6.4. Тепловое расширение . . . . .	94
6.5. Термические напряжения в горных породах . . . . .	95
<b>7. Электромагнитные свойства образцов горных пород . . . . .</b>	<b>97</b>
7.1. Электрическая поляризация . . . . .	97
7.2. Особые случаи поляризации минералов и пород . . . . .	99

7.3. Диэлектрическая проницаемость . . . . .	101
7.4. Электрохимическая активность горных пород . . . . .	104
7.5. Электрическая проводимость . . . . .	106
7.6. Диэлектрические потери . . . . .	109
7.7. Магнитные свойства . . . . .	112
7.8. Радиационные свойства образцов горных пород . . . . .	115
<b>8. Воздействие внешних полей на механические свойства пород . . . . .</b>	<b>118</b>
8.1. Влияние влажности (вещественного поля) . . . . .	118
8.2. Влияние давления . . . . .	122
8.3. Воздействие упругих колебаний на горные породы . . . . .	127
8.4. Воздействие теплового поля . . . . .	128
8.5. Воздействие электрического и магнитного полей . . . . .	133
8.6. Воздействие излучений . . . . .	138
<b>9. Влияние внешних полей на тепловые и электромагнитные свойства пород . . . . .</b>	<b>139</b>
9.1. Влияние увлажнения . . . . .	139
9.2. Влияние давления . . . . .	142
9.3. Воздействие теплового поля . . . . .	144
<b>10. Взаимная связь свойств, паспортизация пород. Свойства пород Луны</b>	<b>154</b>
10.1. Общие сведения о взаимосвязи свойств . . . . .	154
10.2. Взаимосвязи свойств пород, обусловленные переменным минеральным составом . . . . .	157
10.3. Взаимосвязи свойств пород, обусловленные переменным строением . . . . .	160
10.4. Взаимосвязи свойств пород, обусловленные переменными внешними полями . . . . .	165
10.5. Множественная корреляция между физико-техническими параметрами пород . . . . .	166
10.6. О значении взаимосвязей свойств горных пород . . . . .	169
10.7. Паспортизация горных пород по физико-техническим параметрам . . . . .	170
10.8. Физические свойства пород Луны . . . . .	173

**Раздел III. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД И ПРОЦЕССЫ В МАССИВЕ И В РАЗРЫХЛЕННЫХ ПОРОДАХ . . . . . 178**

<b>11. Строение, состав и состояние породных массивов . . . . .</b>	<b>178</b>
11.1. Основные особенности строения и состава горных пород в массиве . . . . .	178
11.2. Физическое состояние горных пород в массиве . . . . .	181
11.3. Упругие колебания в массивах горных пород . . . . .	186
11.4. Распространение электромагнитных волн в массивах пород . . . . .	187
11.5. Методы изучения строения, состава и состояния массивов горных пород . . . . .	191
11.5.1. Методы полевой геофизики . . . . .	192
11.5.2. Скважинные методы исследования . . . . .	200
<b>12. Физико-технические параметры горных пород в массиве . . . . .</b>	<b>202</b>
12.1. Методы исследования физических свойств горных пород в массиве . . . . .	202
12.2. Анализ физико-технических параметров горных пород в массиве . . . . .	210
12.3. Особые явления в массивах горных пород при их разработке . . . . .	215
<b>13. Строение, состав и состояние разрыхленных горных пород . . . . .</b>	<b>218</b>
13.1. Классификация рыхлых пород . . . . .	218
13.2. Геометрические параметры строения рыхлых пород . . . . .	219
13.3. Факторы, обуславливающие характер разрыхления пород . . . . .	224
<b>14. Физико-технические параметры разрыхленных пород . . . . .</b>	<b>226</b>
14.1. Механические и горно-технологические параметры . . . . .	226
14.2. Тепловые и электромагнитные свойства рыхлых пород . . . . .	230

14.3. Свойства рыхлых пород в массивах . . . . .	232
14.4. О характеристиках запредельного деформирования и нагружения разрушенных пород . . . . .	233
14.5. Мерзлые горные породы . . . . .	234
14.6. Морозостойкость горных пород . . . . .	239
<b>Раздел IV. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b> . . . . .	<b>240</b>
<b>15. Процессы подготовки массива пород к выемке</b> . . . . .	<b>240</b>
15.1. Осушение массивов . . . . .	240
15.2. Разупрочнение пород . . . . .	242
15.3. Упрочнение пород . . . . .	245
<b>16. Механическое разрушение, дробление и перемещение горных пород</b> . . . . .	<b>247</b>
16.1. Работа разрушения горных пород . . . . .	247
16.2. Показатель трудности разрушения горных пород . . . . .	249
16.3. Механическое бурение пород и их буримость . . . . .	250
16.4. Взрывание горных пород, взрываемость . . . . .	256
16.5. Выемка, механическое отделение пород от массива, экскавируемость . . . . .	261
16.6. Процессы вторичного механического дробления пород в забое . . . . .	264
16.7. Процессы дробления и измельчения полезного ископаемого в дробилках и мельницах . . . . .	265
16.8. Процессы перемещения горных пород . . . . .	268
<b>17. Немеханические и комбинированные способы разрушения горных пород</b> . . . . .	<b>270</b>
17.1. Термические способы бурения горных пород . . . . .	270
17.2. Термические способы разрушения негабарита . . . . .	275
17.3. Комбинированное термомеханическое бурение пород . . . . .	276
17.4. Электромагнитные способы разрушения горных пород . . . . .	278
17.5. Комбинированные электротермомеханические способы разрушения пород . . . . .	284
<b>18. Процессы управления горным давлением и тепловым режимом</b> . . . . .	<b>287</b>
18.1. Поддержание подземных горных выработок . . . . .	287
18.2. Устойчивость бортов карьеров и отвалов . . . . .	293
18.3. Борьба с проявлением внезапных выбросов угля и газа . . . . .	295
18.4. Тепловой режим шахт и рудников . . . . .	296
<b>19. Обогащение полезных ископаемых и геотехнология</b> . . . . .	<b>297</b>
19.1. Процессы обогащения полезных ископаемых . . . . .	297
19.2. Сквжинные (геотехнологические) методы добывания полезных ископаемых . . . . .	302
<b>20. Физические процессы контроля состояния массива горных пород и технологических параметров при ведении горных работ</b> . . . . .	<b>307</b>
20.1. Свойства пород как источники информации . . . . .	307
20.2. Контроль напряженного состояния, устойчивости и нарушенности массивов и выработок . . . . .	308
20.3. Обнаружение включений и опасных зон в массивах пород . . . . .	314
20.4. Прогноз опасных динамических явлений в массивах горных пород . . . . .	316
20.5. Качество полезного ископаемого и его контроль . . . . .	319
20.6. Определение и контроль состава полезных ископаемых . . . . .	324
20.7. Контроль влажности . . . . .	328
20.8. Процессы контроля за отдельными технологическими операциями . . . . .	330
<b>Заключение</b> . . . . .	<b>333</b>
<b>Список литературы</b> . . . . .	<b>335</b>
<b>Приложения</b> . . . . .	<b>337</b>
<b>Алфавитно-предметный указатель</b> . . . . .	<b>350</b>

**Владимир Васильевич Ржевский**  
**Готфрид Янович Новик**

## **ОСНОВЫ ФИЗИКИ ГОРНЫХ ПОРОД**

---

**Редактор издательства О. И. Сорокина**

**Переплет художника Т. Н. Погореловой**

**Художественный редактор О. Н. Зайцева**

**Технические редакторы Л. Я. Голова,  
Н. В. Жидкова**

**Корректор В. Т. Юдович**

**ИБ № 5999**

---

Сдано в набор 24.04.84. Подписано в печать 02.11.84. Т-21623  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура  
«Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 22,5. Усл.  
кр.-отт. 22,5. Уч.-изд. л. 23,86. Тираж 7800 экз. Заказ  
1037/335—10. Цена 1 р. 10 к.

---

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633,  
Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного  
Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга»  
им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государ-  
ственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии  
и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая  
ул., 14.