

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**И.Ф. Марийчук, В.Л. Самойлов, В.Е. Нефедов**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ  
по дисциплине  
**«Физика горных пород»**  
для студентов образовательных учреждений  
высшего профессионального образования

Донецк, ДОННТУ, 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
КАФЕДРА «СТРОИТЕЛЬСТВО ЗДАНИЙ, ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ГЕОМЕХАНИКА»

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**  
**по дисциплине «Физика горных пород»**

для студентов уровня профессионального образования  
«специалист» по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело»  
всех форм обучения

РАССМОТРЕНО  
на заседании кафедры  
строительства зданий,  
подземных сооружений и  
геомеханики  
Протокол № 1 от 30.09.2021г.

Донецк-2021

УДК 622.02  
ББК 33.14-11

**Рецензент:**

**Купенко Иван Владимирович** - доцент, кандидат технических наук, профессор кафедры «Строительство зданий, подземных сооружений и геомеханика» ГОУВПО «ДОННТУ».

**Составители:**

Марийчук Иван Филиппович - доцент кафедры строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики ГОУВПО «ДОННТУ»;

Самойлов Вячеслав Лаврентьевич - профессор кафедры строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики ГОУВПО «ДОННТУ»;

Нефёдов Валентин Евгеньевич - ассистент кафедры строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики ГОУВПО «ДОННТУ».

**Конспект лекций по дисциплине «Физика горных пород»**  
[Электронный ресурс]: для студентов уровня профессионального образования «специалист» по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело» всех форм обучения / ГОУВПО «ДОННТУ», каф. Строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики: сост. И.Ф. Марийчук, В.Л. Самойлов, В.Е. Нефёдов. - 2-е изд. перераб. и дополн. - Электрон. Дан. (1 файл: 2,6 Мб). - Донецк: ДОННТУ, 2021. - Систем. требования: Acrobat Reader.

Конспект лекций будет полезным при изучении дисциплины «Физика горных пород» студентам специальности 21.05.04 «Горное дело» всех форм обучения, а также аспирантам-горнякам.

В нём изложены теоретический материал, необходимый для принятия решений по рассматриваемым вопросам, а также вопросы для контроля усвоения материала по всем темам конспекта.

УДК 622.02  
ББК 33.14-11

Марийчук И.Ф., Самойлов В.Л., Нефёдов В.Е.

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет, 2021.

## СОДЕРЖАНИЕ

ТЕМА 1	ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. БАЗОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ.....	7
1.1	Объект и метод исследования физики горных пород .....	8
1.2	Горные породы .....	9
1.3	Классификация физико-технических свойств пород .....	9
ТЕМА 2	ПОРИСТОСТЬ И ПЛОТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД.....	11
2.1	Основные параметры .....	11
2.2	Основные методы определения пористости образцов пород .....	14
2.3	Пористость осадочных пород.....	15
2.4	Пористость магматических и метаморфических пород.....	16
2.5	Пористость природных углей.....	17
2.6	Плотность горных пород .....	19
2.6.1	Основные параметры магматических и метаморфических пород..	19
2.6.2	Плотностные свойства рыхлых и разрыхлённых пород .....	21
2.6.3	Методы определения плотности минералов и горных пород.....	24
ТЕМА 3	ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД.....	27
3.1	Механические напряжения в горных породах.....	27
3.2	Понятие о напряжениях и деформациях.....	27
3.3	Теории прочности пород.....	34
ТЕМА 4	СТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД .....	45
4.1	Основные показатели механических свойств горных пород.....	45
4.2	Определение предела прочности при одноосном сжатии.....	48
4.3	Метод определения предела прочности при одноосном растяжении ..	51
4.4	Метод определения предела прочности при сдвиге.....	52
4.5	Метод определения предела прочности при изгибе.....	54
4.6	Метод определения предела прочности при объёмном сжатии .....	55
4.7	Нестандартные методы определения прочностных параметров скальных пород .....	56
4.8	Испытание глинистых пород.....	59

4.8.1	Метод определения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии.....	59
4.8.2	Испытание глинистых пород при растяжении .....	62
ТЕМА 5 ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД.....		64
5.1	Деформации в горных породах .....	64
5.2	Упругие свойства горных пород .....	66
5.3	Пластические и реологические свойства горных пород .....	68
5.4	Понятие о теории наследственной ползучести.....	79
ТЕМА 6 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРНЫХ ПОРОД .....		86
6.1	Крепость.....	86
6.2	Контактная прочность.....	89
6.3	Абразивность .....	90
6.4	Дробимость.....	92
6.5	Сопrotивляемость резанию .....	93
6.6	Буримость .....	95
6.7	Взрываемость .....	96
6.8	Липкость и сопротивление копанью рыхлых и разрыхлённых пород.....	97
6.9	Использование горно-технологических свойств в горной практике.....	98
ТЕМА 7 АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД .....		100
7.1	Акустические волны в породах .....	100
7.2	Параметры акустических свойств горных пород .....	101
7.3	Определение акустических параметров пород в лабораторных условиях.....	104
7.4	Использования акустических свойств горных пород в горном деле..	105
ТЕМА 8 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД.....		109
8.1	Общие сведения о температурном поле в горных породах .....	109
8.2	Основные тепловые параметры горных пород.....	109
8.3	Определение параметров термодинамических свойств пород в лабораторных условиях .....	111
8.4	Использование тепловых свойств и явлений в горном деле.....	113
ТЕМА 9 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД.....		115
9.1	Общие сведения о воде в горных породах.....	115

9.2	Параметры гидравлических свойств горных пород .....	117
9.3	Воздействие жидкости на горные породы .....	122
9.4	Определение гидравлических параметров горных пород.....	123
9.5	Использование гидравлических свойств горных пород для дегазации угольных пластов, ослабления и упрочнения пород.....	124
ТЕМА 10 ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД .....		127
ТЕМА 11 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД .....		135
11.1	Базовые параметры электромагнитных свойств пород.....	135
11.2	Использование электрических магнитных свойств горных пород для горного производства .....	138
11.3	Базовые параметры радиационных свойств горных пород и методы их определения.....	140
11.4	Использование радиационных свойств пород в горной практике....	143
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....		145

## **ТЕМА 1 ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. БАЗОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Первые обобщающие труды по теоретическим и экспериментальным исследованиям горных пород, на основании которых сформировалось основное содержание физики горных пород, появились только лишь во второй половине двадцатого столетия.

Большой вклад в развитие и становление физики горных пород как самостоятельной науки внесли В.В. Ржевский, Н.В. Мельников, В.Н. Кобранова, А.И. Заборовский, В.Н. Дахнов, В.М. Добрынин, Э.И. Пархоменко, М.П. Воларович, М.М. Протодьяконов, П.М. Цымбаревич, Ю.А. Векслер, П.А. Ребиндер, А.С. Семенов, А.Г. Иванов, Б.Н. Кутузов, А.А. Воробьев, Г.Я. Новик, Ф. Берч, Ф. Гассман, Н. Кристенсен и многие другие учёные.

Научные и практические задачи физики горных пород, сформулированные во второй половине прошлого века академиком В.В. Ржевским, являются актуальными и на современном этапе развития горного производства. Без определения значений физико-технических параметров пород, закономерностей изменения их свойств в условиях внешних воздействий принципиально невозможна разработка новых эффективных методов разрушения пород и управления этими методами, новых технологий производства горных работ, создания систем контроля состава, состояния и особенностей поведения пород в процессе ведения горных работ.

Среди горных наук физика горных пород занимает особое место, являясь не только самостоятельной, но, пожалуй, и единственной фундаментальной наукой, обогатившей мировые знания целым рядом научных открытий.

Базовыми дисциплинами являются общая геология, минералогия, кристаллография, петрография, физика, математика, химия и сопротивление материалов.

В программе подготовки специалиста горного профиля одной из основных учебных дисциплин является физика горных пород, изучающая физические свойства пород, закономерности изменения установленных свойств, протекающие физические процессы и происходящие при этом физические явления.

Комплекс полученных знаний используют при разработке новых методов воздействия на породы, конструировании машин и разработке новых технологий производства горных работ и т.д.

Физика горных пород не только даёт знания о тех или иных физических особенностях пород, но и предлагает наиболее эффективные пути решения технологических задач, поставленных горным производством.

Механика горных пород – часть физики горных пород, изучающая прочность, устойчивость и деформируемость дискретных объёмов горных пород и массивов горных пород и горнотехнологических объектов в поле природных и вызванных влиянием горных работ сил горного давления.

Интересно отметить, что исторически, как и общая физика, физика горных пород развивалась с формированием и развитием механики в XIX в. и оформилась в самостоятельную науку в 60 годы XX в. после развития основных положений механики горных пород.

### **1.1 Объект и метод исследования физики горных пород**

**Объектом исследования** физики горных пород является горная порода вообще и горный массив в частности, а именно физико-технологические свойства массива и процессы, возникающие в нем, до воздействия на него горными работами и процессы изменения этих свойств после возникновения в нем закреплённых и незакреплённых горных выработок.

Горная порода и процессы, происходящие в массиве горных пород на различных стадиях разработки месторождения, представляют из себя очень сложную среду, свойства которой зависят от состава и строения горных пород, наличия в них дефектов, жидкостей и газов, возникновения и перераспределения аномалий напряжённо-деформированного состояния массива пород, методов проведения и крепления горных выработок и т.п.

Учитывая вышеизложенное, **метод исследования** в физике горных пород обычно комплексный и включает в себя: изучение свойств образцов горных пород в лабораторных условиях, натурные наблюдения, моделирование (физическое и математическое) механических процессов в лабораторных условиях и аналитические методы описания физических процессов на основе общих закономерностей теории упругости, пластичности и предельного равновесия.

Успешное решение технологических задач и вопросов повышения производительности труда в горном производстве невозможно представить без знания физико-химических процессов, протекающих в горных породах, явлений и закономерностей, характеризующих изменение свойств пород в результате воздействия на них различными физическими полями.

Наиболее ярким примером связи физики горных пород с проблемами горного дела является тесный союз этой науки с главными технологическими элементами процессов проведения выработок и выемки полезных



ископаемых: разрушением, дроблением, поддержанием выработок, транспортированием горной массы, обогащением полезных ископаемых.

Однако не стоит считать, что связь физики горных пород ограничивается только кругом технологических проблем, возникающих при добыче полезных ископаемых. Параллельно решаются вопросы охраны окружающей среды, безопасности труда и многие другие практические и научные задачи, представляющие в целом интерес для цикла геологических дисциплин и физических наук.

## 1.2 Горные породы

**Горные породы** – природные образования, слагающие разнообразные геологические тела, из которых построена земная кора. Они представляют собой закономерные сочетания или механические смеси различных по составу кристаллических минеральных зёрен, наряду с которыми могут присутствовать аморфное вещество и органические остатки; к горным породам относятся встречающиеся в земной коре смеси жидких минеральных веществ (неорганических и органических). Термин "**горные породы**" впервые был введён в обиход российским академиком В.М. Севергиным в XIX ст.

**Минерал** – природное, как правило, твёрдое тело, относительно однородное по химическому составу и физическим свойствам, возникшее как продукт физико-химических процессов, протекающих на поверхности и в глубинах Земли. По происхождению горные породы делят на три группы:

– **магматические**, образованные из застывшей в недрах или на поверхности Земли магмы;

– **осадочные**, образованные в результате накопления и преобразования продуктов разрушения, ранее возникших горных пород на поверхности Земли при обычных температурах и нормальном давлении;

– **метаморфические** – за счёт изменения осадочных и магматических пород в результате действия высоких давлений, температур, естественного электрического поля, газообразных веществ, выделяющихся из магмы и т.д.

Все горные породы характеризуются определёнными особенностями строения и физическими свойствами, которые отражают условия их образования и изменения. Это плотностные, упругие, прочностные, тепловые, электрические и магнитные свойства.

## 1.3 Классификация физико-технических свойств пород

**Физическое свойство** горной породы – это ответная реакция на воздействие тех или иных физических полей или веществ.

Каждое свойство может быть количественно оценено одним или несколькими параметрами. Совокупность всех параметров называется **физико-техническими характеристиками**.

**Параметр** физического свойства горной породы – размерное или безразмерное скалярное или векторное число; количественная мера свойства.

В настоящее время известно и используется более 100 параметров горных пород, из которых 12 отнесены к базовым или обязательным к определению (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Базовые параметры горных пород

№	Класс	Группа	Наименование	Обозначение	Единица СИ
1	Плотностные	-	объёмная масса	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>
2			пористость	P	%
3	Механические	Прочностные	предел прочности на одноосное сжатие	$\sigma_{сж}$	Па
4			предел прочности на одноосное растяжение	$\sigma_p$	Па
5		Деформационные	модуль упругости	E	Па
6			коэффициент Пуассона	$\nu$	ед.
7	Тепловые		коэффициент теплопроводности	$\lambda$	Вт/м·К
8			удельная теплоёмкость	C	Дж/кг·°C
9			коэффициент линейного теплового расширения	$\alpha$	1/°K
10	Электромагнитные	Электрические свойства	удельное электрическое сопротивление	$\rho_э$	Ом·м
11			относительная диэлектрическая проницаемость	$\epsilon_n$	ед.
12		Магнитные свойства	относительная магнитная проницаемость	$\mu$	ед.

### Контрольные вопросы

1. Какова роль ФГП в подготовке горного инженера?
2. Что является объектом исследования ГП?
3. Перечислите методы исследования, применяемые в ФГП.
4. Какие вещества называют горной породой. В чем заключается отличие горной породы от минерала?
5. На какие группы делятся горные породы по происхождению?
6. Что характеризует физическое свойство горной породы?
7. Что такое параметр физического свойства горной породы?
8. Какие свойства горных пород относятся к базовым?

## ТЕМА 2 ПОРИСТОСТЬ И ПЛОТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

### 2.1 Основные параметры

В строении горных пород отмечается твёрдая, жидкая и газовая фазы. Твёрдая фаза слагает минеральный скелет, а жидкая и газовая заполняют пустоты, имеющиеся как между минеральными зёрнами, так и внутри минералов. Эти пустоты, в которых заключается газовой-жидкая фаза, называются поровым пространством породы.

Среди пористости различают: пористость общую (абсолютную, физическую полную), т.е. суммарный объем всех пустот независимо от формы, величины и взаимного расположения; пористость закрытую (отрицательную, замкнутую) – совокупность замкнутых, не имеющих между собой сообщения пор; пористость открытую (насыщенную, эффективную) – совокупность сообщающихся между собой пор и пустот, т.е. объем той пористости, в пределах которой возможно движение жидкости и газов при определённых давлениях и температурах.

В строении горных пород отмечается твёрдая, жидкая и газовая фазы. Твёрдая фаза слагает минеральный скелет, а жидкая и газовая заполняют пустоты, имеющиеся как между минеральными зёрнами, так и внутри минералов. Эти пустоты, в которых заключается газовой-жидкая фаза, называются поровым пространством породы.

Среди пористости различают: пористость общую (абсолютную, физическую полную), т.е. суммарный объем всех пустот независимо от формы, величины и взаимного расположения; пористость закрытую (отрицательную, замкнутую) – совокупность замкнутых, не имеющих между собой сообщения пор; пористость открытую (насыщенную, эффективную) – совокупность сообщающихся между собой пор и пустот, т.е. объем той пористости, в пределах которой возможно движение жидкости и газов при определённых давлениях и температурах.

Горную породу можно рассматривать как естественную пористую среду с жёстким минеральным каркасом. Количественно объем всех видов пор в породах оценивается коэффициентами соответствующих пористостей.

Так количественно общую пористость рассчитывают по соотношению плотностей сухой породы и минеральных зёрен:

$$k_{\Pi} = (V_c - V_{\text{ТВ}}) / V_c = 1 - \rho_c / \rho_{\text{ТВ}},$$

где  $V_c$  и  $\rho_c$  – соответственно объем и плотность сухой породы;

$V_{\text{ТВ}}$  и  $\rho_{\text{ТВ}}$  – соответственно объем и плотность твёрдой фазы в породе;

$k_{п}$  – коэффициент общей пористости образцов горных пород (используется при лабораторном способе Мельчера путём взвешивания сухого парафинированного образца и того же раздробленного образца в пикнометре).

Объем пор, сообщающихся между собой в породе и с окружающей средой, оценивается коэффициентом открытой пористости:  $k_{п.о.}$

$$k_{п.о.} = V_{к} / V_{с},$$

где  $V_{к}$  – объем пор, заполненных керосином. Открытая пористость определяется по методу Преображенского путём взвешивания сухих и насыщенных керосином образцов пород с последующим нахождением объёма парафинированных образцов взвешиванием их в керосине.

Открытую пористость оценивают также и коэффициентом эффективной пористости  $k_{п.эф.}$ :

$$k_{п.эф.} = (V_{к} - V_{в.св.}) / V_{с} = k_{п.о.} (1 - k_{вн}),$$

где  $k_{вн}$  – коэффициент водонасыщения, определяющий содержание связанной воды в единице объёма пор;  $V_{в.св.}$  – объем связанной воды.

Коэффициент эффективной пористости характеризует полезную ёмкость породы для нефти или газа. Представляет собой объем открытых пор за исключением объёма, заполненного физически связанной и капиллярно-удержанной пластовой водой. От точности определения величины  $k_{вн}$  будет зависеть степень достоверности величины  $k_{п.эф.}$  при геофизических исследованиях.

Коэффициент динамической пористости  $k_{п.д.}$  определяют с целью установления той части объёма породы при заданном градиенте давления, в которой может наблюдаться движение жидкости или газа:

$$k_{п.д.} = (V_{п.эф.} - V_{н.о.}) / V_{с},$$

где  $V_{в.св.}$  – объем эффективных пор;  $V_{к} - V_{в.св.}$  – объем пор, в которых остался керосин после его вытеснения из породы воздухом или азотом. Величина  $k_{п.д.}$  зависит не только от свойств породы, но и от величины приложенного градиента давления и времени вытеснения керосина воздухом или азотом.

По численному значению коэффициенты пористости, определённые на одном образце, подчиняются следующей закономерности:

$$k_{п} > k_{п.о.} > k_{п.эф.} > k_{п.д.}$$

По происхождению поры делятся на **первичные**, сформировавшиеся в

процессе образования горной породы, и **вторичные**, которые возникли после образования породы. Пример пород с первичными порами – пески, песчаники, глины и вторичными – трещинные, трещиннокавернозные, доломиты. Большинство физических свойств горных пород зависят от пористости, конфигурации или вида полостей. По форме первичные поры могут быть ромбоидальными у хорошо отсортированных рыхлых и окатанных песков, тетраэдрическими у сильно уплотнённых песков, щелевидными у глин, слюд, графита и других минералов с пластинчатой структурой, в виде каналов расширяющейся или сужающейся формы, в ненарушенных магматических породах – пузырчатymi.

Вторичные поры могут быть трещиноватыми (характерно для скальных метаморфических и магматических пород), в виде каверн (гипсы, карбонатные разности), каналов (лессы), ячеек (у известняковых и кремнистых туфов).

Взаимодействие твёрдой поверхности с насыщающей поры пластовой водой положено в основу классификации пор по размерам:

**Сверхкапиллярные** – диаметр  $d_{эф.} > 10^{-4}$  м ( $d_{эф.}$  – эффективный диаметр – диаметр круга с площадью, равной площади изучаемой поры). Пластовая вода в этих порах может перемещаться под действием силы тяжести, т.к. сила адсорбции с твёрдой фазой и капиллярные силы сравнительно невелики. Сверхкапиллярные поры характерны для слабосцементированных галечников, гравия, крупно-, среднезернистых песков и др. В зонах выщелачивания карбонатных пород могут достигать больших размеров – каверны, карсты.

**Капиллярные** – диаметр  $d_{эф.} > 10^{-7} \cdot 10^{-4}$  м. Вода в этих порах удерживается капиллярными силами, препятствующими движению воды под действием силы тяжести. Эти поры характерны для сцементированных песчаников, обломочных и кристаллических известняков, доломитов. Сверхкапиллярные и капиллярные поры являются основной ёмкостью гранулярных коллекторов.

**Субкапиллярные** – диаметр  $d_{эф.} = 2 \cdot (10^{-9} - 10^{-7})$  м. Здесь велика доля воды, на которую действуют адсорбционные силы со стороны поверхности зёрен породы. Поры заполнены рыхло- и прочносвязанной водой, которая практически не способна перемещаться ни в поле силы тяжести, ни под влиянием сил поверхностного натяжения. Эти поры свойственны глинам и другим тонкозернистым породам.

**Микропоры** –  $d_{эф.} < 2 \cdot 10^{-9}$  м. Диаметр микропор соизмерим с толщиной слоя прочносвязанной воды. Пластовая вода при температурах, не

превышающих 340 К практически неподвижна. Микропоры были установлены у некоторых природных цеолитов.

## 2.2 Основные методы определения пористости образцов пород

Характер распределения пор по размерам называют структурой порового пространства. Структуру порового пространства горной породы чаще всего изучают на шлифах с использованием оптических микроскопов или электронной микроскопии. Особенность методов заключается в том, что исследования распределения пор проводят на плоской поверхности. Поэтому для установления характера распределения пор и представления об изменении их в объёме необходимы многократные исследования на параллельных плоскостях.

Наиболее эффективными косвенными методами исследования структуры порового пространства в объёме являются капиллярные. С помощью их производятся расчёты размеров, осуществляются измерения объёма пор, устанавливается характер их распределения в объёме, определяются объёмная (кажущаяся) плотность и удельная поверхность. К капиллярным методам исследования относятся метод ртутной порометрии, капиллярной пропитки и полупроницаемой мембраны.

*Метод ртутной порометрии* основан на свойстве ртути под давлением проникать в пористый материал. Учитывая, что размер пор обратно пропорционален приложенному давлению, а также то, что ртуть практически не смачивает большинство минералов (краевой угол  $\Theta$  обычно лежит в диапазоне от  $110^\circ$  до  $160^\circ$ , для кварца  $\Theta=140^\circ$ ), диаметр и объём пор могут быть найдены из соотношения равновесного давления, при котором ртуть проникла в поры определённого диаметра, и объёма проникшей ртути. Диаметр пор вычисляют в соответствии с уравнением Уашберна:

$$D = \frac{4\gamma \cos \Theta}{P},$$

где  $P$  – давление, Па;  $\gamma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  $\Theta$  – краевой угол;  $D$  – диаметр пор, м.

Диапазон изучаемых пор при работе этим методом расширяется до  $(0,001-1000) \cdot 10^{-6}$  м. Таким образом, изучаются параметры сверхкапиллярных и субкапиллярных пор. В современных приборах все измерения с ртутным порометром автоматизированы, включая и вычисления характеристик распределения пор в породе.

К недостаткам этого метода можно отнести слабую изученность зависимости краевого угла  $\Theta$  от влажности и литологии пород в целом, а

также невозможность использования образцов для последующих исследований.

**Метод полупроницаемой мембраны** включает насыщение водой исследуемого образца горной породы, установку его на водонасыщенную искусственную мембрану с размером пор  $2 \cdot 10^{-6}$  м и вытеснением воды азотом. Строят зависимость величины водонасыщенности образца от величины капиллярного давления. Эффективные диаметры пор находят путём вычислений, а по изменению водонасыщенности вычисляют относительное содержание этих пор в объёме исследуемого образца породы. Результаты вычислений представляют в виде графика распределения пор в образце по их размерам. Из условия абсолютной смачиваемости водой кварцевого капилляра краевой угол смачивания принимают равным нулю, а величину поверхностного натяжения принимают равной величине, соответствующей для границ раздела воды с воздухом при данной температуре. Недостатком этого метода является то, что длительность одного опыта при исследовании образца достигает 30 суток, в то время как метод ртутной порометрии занимает всего несколько часов.

**Метод капиллярной пропитки** состоит в смачивании люминесцирующей в УФ свете жидкостью, которая под воздействием капиллярных сил впитывается образцом породы. Изменение окраски верхнего торца образца под влиянием впитываемой жидкости наблюдают с помощью автоматической фотометрической установки. Этот метод пока не имеет широкого распространения.

### 2.3 Пористость осадочных пород

Пористость осадочных пород изменяется в широких пределах и её значение, например, для обломочных, карбонатных и глинистых пород определяется многими факторами: содержанием глинистых минералов, глубиной залегания, возрастом пород и температурой. Так, для сланцев средняя пористость составляет 8%, известняков – (5-10)%, песчаников – 15%. Сильная зависимость пористости наблюдается при увеличении глубины залегания горной породы. Хорошо видно, что с увеличением глубины открытая пористость уменьшается. Установлено, что пористость уменьшается, главным образом в результате необратимых деформаций, в связи, с чем изменения ее можно наблюдать, изучая керны пород, извлечённые с различных глубин.

Плотность породообразующих минералов с глубиной мало изменяется, а поэтому изменение объёма породы может происходить только за счёт уменьшения порового пространства.

## 2.4 Пористость магматических и метаморфических пород

Из табл. 2.1 видно, что кварцевый песок, являющийся первичным осадком, по мере уплотнения превращается в песчаник – осадочную породу, а затем в кварцит – метаморфическую. Соответственно глинистый ил, являющийся также первичным осадком, сначала превращается в глину и аргиллит – осадочную породу, и далее в глинистый сланец – метаморфическую породу.

В метаморфических породах отмечается низкая пористость, сланцеватость, потеря большого количества межслоевой и кристаллизационной воды. Большинство метаморфических пород обладают низкой первичной пористостью. Общая пористость этих пород увеличивается при выходе их на поверхность за счёт развития процессов вторичного порообразования. Наиболее высокая пористость наблюдается в породах, содержащих карбонатные минералы –  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  и др.

Воздействие фильтрующимися гидротермальными водами создают условия для образования высокопористых разновидностей метаморфических пород. Кроме этого, под влиянием тектонических движений метаморфические породы приобретают трещиноватость, что наряду с высокой пористостью создаёт условия для активного минерального массопереноса в толще метаморфические породы, ведущего к образованию новых минералов и скоплений полезных ископаемых.

Как известно в результате остывания и затвердевания магмы или природных силикатных расплавов, возникающих в глубинных зонах земной коры, образуются магматические породы. Остывание магмы на глубине происходит медленнее, а поэтому интрузивные породы обладают хорошо выраженной кристаллической структурой. Из-за небольшого времени остывания эффузивные породы в основном содержат кристаллы в виде микролитов, аморфное вулканическое стекло, а также вулканические туфы.

Продолжительное нахождение пород на поверхности Земли и связанные с этим процессы выветривания определяют их пористость. Установлено, что общая пористость ультраосновных пород (дунит, перидотит, пироксен, серпентинит) и основных (габбро, эклогит, лабрадорит, анортозит) интрузивных пород не превышает 2%, средних (диорит, сиенит) и кислых (гранит, аляскит) – 3%. Для интрузивных пород характерна в целом низкая общая пористость, а открытая, как правило, весьма мала или отсутствует вообще, при этом поры слабо сообщаются между собой.

Базальты, диабазы (основные) и порфирит (средние эффузивные породы) имеют небольшую первичную пористость, не превышающую 3%. Однако пористость этих пород может достигать 20-40% в связи с развитием процессов выветривания.

Туфы занимают промежуточное положение между осадочными и эффузивными породами, их общая первичная пористость может составлять (40-60)% и иметь значительную открытую пористость.

Железисто-магнетитовая, скарновая, полиметаллическая и медная



руды, образовавшиеся из магматических пород, имеют первичную общую пористость до 5%, а общая пористость выветренных разновидностей этих же пород – 20%.

Таблица 2.1 – Пределы изменения общей пористости и плотности сухих образцов первичных осадков (ПО), осадочных (О), метаморфических (М) пород и некоторых руд

Тип пород	Первичный осадок или порода	Общая пористость, $k_p$	Плотность $\rho_c \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>
Песчаные	Песок (ПО) и (О)	4-50	1,3-2,2 1,3-2,2
	Песчаник (О)	0,5-40	1,3-3,6
	Кварцит (М) и железистый кварцит	0,2-20	2,2-4,4
Глинистые	Глинистый ил (ПО)	50-60	0,8-1,8
	Глина (ПО) и (О)	4-75	1,2-3,18
	Аргиллит (О)	1-30	1,6-3,35
	Филлит(М)	0,5-0,6	2,4-2,76
	Сланец глинистый (М)	1-25	1,3-3,2
Известковые	Известковый ил (ПО)	65-87	–
	Мел (О)	10-55	1,85-2,6
	Известняк(О)	0,5-48	1,3-3,5
	Мрамор (М)	0,1-2,2	2,3-3,0
Руды	Боксит	0-44	1,3-3,4
	Железистый латерит	29-56	–
	Мартит и бурый железняк	0,2-28	3,8-4,3
Угли	Каменный уголь	3-12	1,2-1,35
	Антрацит	1-2	1,4-1,8

## 2.5 Пористость природных углей

Уголь проходит сложный путь развития, обуславливающий его химическую структуру, микропористость и сорбционные свойства. В результате региональных изменений в угольных пластах развивалась трещиноватость, связанная с изменениями коллоидной структуры и с тектоническими движениями.

Пустоты, которые встречаются в углях, с точки зрения генезиса и морфологии делятся на трещины и стереопоры, образуемые кристаллитами и мицеллами.

В основу классификации пор положено различие в видах движения газа через поры в зависимости от их размеров.

Поры диаметром менее  $10^{-9}$  м названы молекулярными, т.к. их размер

соизмерим с диаметром молекул газов, насыщающих угли.

Поры с диаметром от  $10^{-9}$  до  $10^{-8}$  м названы **микropopами**. Перенос газа в таких порах осуществляется путём поверхностной двумерной диффузии. Эти поры авторы называют также фольмеровскими (названы в честь Макса Фольмера).

Поры с диаметром от  $10^{-8}$  до  $10^{-7}$  м называют **кнудсеновскими** (по имени Кнудсена). По определению А.Д. Алексеева (1981) эти поры выделяются в особую группу, так как характерный размер пор сравним с длиной свободного пробега молекул адсорбируемого газа. Движение газа в этих порах является молекулярным течением.

Поры с диаметром от  $10^{-7}$  до  $10^{-6}$  м относят к классу **броуновских** (по имени Роберта Броуна).

Поры с размерами  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  м называют **субмакропорами** или **пуазейлевскими** (течение газа в этих порах описывается уравнением Пуайзеля).

**Макропорами** называют поры с размером более  $10^{-5}$  м.

Общий объем пор в ископаемых углях разной стадии метаморфизма колеблется в широких пределах: от 0,058 до 0,176 м<sup>3</sup>/т. Внутренняя поверхность пор для углей разных марок различна и составляет от  $4 \cdot 10^7$  до  $2 \cdot 10^8$  м<sup>2</sup>/т.

Микропоры, соизмеримые с межмолекулярными расстояниями, являются отличными сорбентами и определяют в связи с этим возможные запасы газа в каменном угле. Поры размером более  $10^{-7}$  м и трещины образуют в угле систему фильтрующего объёма. Однако в целом трещиноватость в большой степени определяет прочностные свойства угля, его устойчивость к горному давлению. Что касается пор, то в условиях объёмного сжатия, благодаря своей форме, они являются устойчивыми в отношении действия внешних сил, а трещины – плоскостями ослабления угля, по которым происходят его разрушение при изменениях напряжённого состояния пласта.

Рассматривая вопрос об изменении газоёмкости, которая определяется сорбционным объёмом угля, в зависимости от стадии метаморфизма, следует принимать на кривой распределения пор минимум в области углей средних марок, а исследуя газопроницаемость угля, зависящую от фильтрационного объёма, – кривую распределения пор по размерам с максимумом в той же области.

## 2.6 Плотность горных пород

### 2.6.1 Основные параметры магматических и метаморфических пород

Плотность является одним из важнейших свойств минералов и горных пород, характеризующих соотношение между массой и объёмом. Согласно современному представлению, плотностью называется масса  $m$  единицы объёма  $V$  вещества, т.е. отношение массы однородного вещества к его объёму при давлении  $1,0 \cdot 10^5$  Па и температуре 293К.

$$\rho_0 = m/V. \quad (2.1)$$

В Международной системе единиц СИ плотность измеряется в  $\text{кг}/\text{м}^3$ , или в граммах на кубический сантиметр –  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Объём, занимаемый породой  $V$ , может состоять из объёма твёрдой фазы  $V_{\text{ТВ}}$  и пор  $V_{\text{П}}$ . Твёрдая фаза состоит из различных минералов, а поры могут быть заполнены водой  $V_{\text{В}}$  и газом  $V_{\text{Г}}$ . Плотность такой породы в общем виде находят по формуле

$$\rho_{\text{П}} = \rho_{\text{ТВ}} \cdot V_{\text{ТВ}}/V + \rho_{\text{В}} \cdot V_{\text{В}}/V + \rho_{\text{Г}} \cdot V_{\text{Г}}/V \quad (2.2)$$

где  $\rho_{\text{ТВ}}$ ,  $\rho_{\text{В}}$ ,  $\rho_{\text{Г}}$  – плотность соответственно твёрдой, жидкой и газовой фаз. С учётом коэффициентов водонасыщенности  $k_{\text{В}}$  и газонасыщенности  $k_{\text{Г}}$  плотность можно определить следующим образом

$$\rho_{\text{П}} = (1 - k_{\text{П}})\rho_{\text{ТВ}} + k_{\text{П}} \cdot (k_{\text{В}}\rho_{\text{В}} + k_{\text{Г}}\rho_{\text{Г}}), \quad (2.3)$$

Из уравнения (2.3) видно, что плотность горных пород существенно зависит от коэффициента общей пористости. Для большинства пород магматических и метаморфических с первичной пористостью от 0 до (2-5)% величина плотности будет определяться главным образом плотностью минерального состава. Отсюда следует, что при  $k_{\text{П}} \rightarrow 0$   $\rho_{\text{П}} \rightarrow \rho_{\text{ТВ}}$ .

Для водонасыщенных пород в уравнении (2.3) можно принять  $k_{\text{В}} = 1$ ,  $k_{\text{Г}} = 0$ , тогда

$$\rho_{\text{П}} = (1 - k_{\text{П}})\rho_{\text{ТВ}} + k_{\text{П}}\rho_{\text{В}}, \quad (2.4)$$

Для сухих образцов пород  $\rho_{\text{В}} = 0$  и  $\rho_{\text{Г}} = 0$ , тогда

$$\rho_{\text{П}} = (1 - k_{\text{П}})\rho_{\text{ТВ}}, \quad (2.5)$$

В формуле (2.5) принимается допущение, что  $\rho_{\text{Г}} = 0$ .

Что касается плотности природных пластовых вод, то величина ее

изменяется в зависимости от содержания растворенных солей в пределах от  $1,0 \cdot 10^3$  (пресные воды) до  $1,24 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (при полном насыщении солями).

Плотность осадочных пород в естественном залегании зависит как от плотности твёрдой фазы и пористости, так и от плотности насыщающих флюидов и их соотношения. Как уже сказано выше, плотность флюидов (газ, вода или другая жидкость, например, нефть) определяется их составом и минерализацией воды. В лабораторных условиях обычно определяют плотность сухих образцов методом гидростатического взвешивания. Используя уравнения (2.2) - (2.4), производят пересчёт на конкретные пластовые условия. Плотность сухих пород зависит от плотности минерального скелета и общей пористости (2.4). Плотность минерального скелета при наличии состава минералов, входя в породу, рассчитывают по уравнению (2.5).

Важнейшие осадочные породы можно разделить по плотности (в кг/м<sup>3</sup>): каменная соль, гипс  $(2-2,3) \cdot 10^3$ , алевролиты  $(2,1-2,5) \cdot 10^3$ , глины и аргиллиты  $(2,2-2,5) \cdot 10^3$ , известняки  $(2,4-2,6) \cdot 10^3$ , доломиты  $(2,5-2,6) \cdot 10^3$ , ангидриты  $(2,8-2,9) \cdot 10^3$ .

**Плотность породы  $\rho_0$**  отличается от массы единицы породы в естественном залегании, поскольку плотность  $\rho_0$  – масса единицы объёма минерального скелета, а в естественном залегании учитывается пористость. На практике наряду с плотностью используют понятие объёмной массы  $\rho$ . **Объёмной массой** называют массу единицы объёма сухой породы при данной пористости в ее естественном состоянии. Поэтому плотность пород всегда больше их объёмной массы. Зная коэффициент пористости  $k_n$  и плотность, легко найти объёмную массу

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 - \left( k_n / (1 + k_n) \right) \cdot 100 \right] \quad (2.6)$$

или

$$\rho_0 = \rho (1 + k_n) \quad (2.7)$$

Объёмная масса малопористых пород зависит в основном от минерального состава. При увеличении железисто-магнезиальных минералов – оливинов, пироксенов, роговой обманки и др. – слагающих магматические породы объёмная масса увеличивается. Объёмная масса большинства пород составляет  $(1,5-3,5) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Такие руды как гематит, магнетит, сидерит, содержащие в составе железо, обладают большой объёмной массой.

На практике определяют также **удельный вес** породы  $\gamma_v$ , т.е. вес единицы объёма твёрдой фазы кристаллического скелета породы. Вес сухой породы в ее естественном сложении, заключённой в единице объёма называют объёмным весом  $\gamma_{об}$ . Удельный вес всегда больше объёмного,

однако, при отсутствии пор незначительной пористости численное значение объёмного веса может приближаться к величине удельного веса.

Удельный вес – вес единицы объёма твёрдой фазы (минерального скелета) породы

$$\gamma_0 = \frac{G_m}{V_m} \quad (2.8)$$

Плотностные параметры взаимосвязаны между собой следующими зависимостями

$$\rho = \rho_0(1 - P) \quad \rho = \frac{\rho_0}{1 + K_n} \quad (2.9)$$

$$P = \frac{K_n}{1 + K_n} \quad P = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} \cdot 100\%$$

## 2.6.2 Плотностные свойства рыхлых и разрыхлённых пород

Основные *параметры плотностных свойств* рыхлых и разрыхлённых горных пород следующие: насыпная масса,  $\rho_n$ , кг/м<sup>3</sup>; насыпной вес,  $\gamma_n$ , Н/м<sup>3</sup>; коэффициент разрыхления,  $K_p$ , ед.; пустотность,  $M$ , ед. или %.

Структурной особенностью этого типа пород является беспорядочное расположение кусков и частиц породы и значительные просветы между точками опоры.

Основной структурной характеристикой рыхлых пород является *гранулометрический состав* – процентное весовое, массовое или объёмное содержание в рыхлой породе различных по величине классов (фракций).

Выражается гранулометрический состав в виде таблицы, графика, числа или формулы.

В виде числа – чаще всего через *средневзвешенный диаметр куска*

$$d_{cp} = \frac{\sum d_i m_i}{\sum m_i}$$

где  $d_i$  – средний диаметр класса;  $m_i$  – масса  $i$ -го класса.

В виде графика – чаще всего через *график кумулятивной крупности* породы,  $\Pi_i = f(d_i/D_{max})$ . В данном случае  $\Pi_i$  – процентное массовое содержание в данном объёме породы кусков с размерами от 0 до  $d_i$ , а  $D_{max}$  – максимальный размер кусков в данном объёме породы.

В виде формулы – чаще всего *формулы оптимального гранулометрического состава*, обеспечивающего минимальную пустотность данной массы породы, например, формула Фуллера

$$\Pi_i = 100 \left( \frac{d_i}{D_{\max}} \right)^n \%,$$

где  $n$  – экспонента кривой ( $n = 0,4 - 0,5$  для шаровидных зёрен и  $n = 0,3$  для острогранных).

*Насыпная масса* – масса единицы объёма разрушенной горной породы в ее естественном (насыпном) состоянии

$$\rho_n = \frac{m_p}{V_p}$$

Насыпной вес – вес единицы объёма разрушенной горной породы в ее естественном (насыпном) состоянии

$$\gamma_n = \frac{G_p}{V_p}$$

*Коэффициент разрыхления* – отношение объёма разрушенной породы к ее объёму в массиве.

$$K_p = \frac{V_p}{V}$$

*Пустотность* – отношение объёма пустот к объёму разрыхлённой породы

$$M = \frac{V_{\text{пуст}}}{V_p} \quad \text{или} \quad M = \frac{V_{\text{пуст}}}{V_p} \cdot 100 \% \quad (2.10)$$

Пределы изменения плотностных параметров рыхлых и разрыхлённых пород следующие:

–  $\rho_n$  зависит от гранулометрического состава, влажности и условий образования и состояния разрыхлённой породы и изменяется от 1500 до 4000 кг/м<sup>3</sup>. Влажность, например, в пределах от 0 до 8-11% играет роль своеобразного «клея» в разрыхлённой породе, не позволяя ей компактно заполнить данный объем и, тем самым, уменьшая  $\rho_n$ . Дальнейшее увлажнение породы наоборот уменьшает силы молекулярного сцепления между частицами породы и в конечном итоге увеличивает  $\rho_n$ . Вибрация

вызывает эффект уплотнения, а значит и увеличения  $\rho_i$ , что мы и наблюдаем в шахтах, когда вагонетки, полностью наполненные в месте погрузки, выезжают на поверхность с меньшим объемом породы. В зависимости от параметров вибрации объем разрыхлённой породы может уменьшиться на величину от 5 до 35%.

–  $K_p$  зависит от тех же факторов и может иметь значения от 1,05 до 2,5. Например, бутовая полоса, возведённая вручную, имеет коэффициент разрыхления породы 1,5, а коэффициент разрыхления породы в выработанном пространстве лавы – 1,7.

–  $M$  зависит от величины коэффициента разрыхления и может иметь значения от 4 до 60%.

Плотностные параметры рыхлых и разрыхлённых пород взаимосвязаны между собой и с параметрами скальных и связных пород следующими зависимостями

$$K_p = \frac{\rho}{\rho_n} \quad M = 1 - \frac{\rho_n}{\rho} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

Плотностные параметры рыхлых и разрыхлённых горных пород определяют следующими методами.

Для определения насыпной массы используют ГОСТированные мерные сосуды (табл. 2.2), в которые засыпают породу, убирают излишек и затем взвешивают. Зная объем и массу породы, вычисляют насыпную массу.

Коэффициент разрыхления и пустотности обычно вычисляют по формулам 2.11.

Гранулометрический состав определяют по-разному в зависимости от крупности кусков: для частиц крупностью  $d > 0,1$  мм используют ситовый анализ с использованием сит с разными размерами ячеек.

Таблица 2.2 – Мерные сосуды для определения насыпной массы рыхлых и разрыхлённых горных пород

Максимальный размер кусков породы, $D_{max}$ , мм	Объем сосуда, л	Форма сосуда	Размеры сосуда, мм
< 10	10	цилиндрическая, $d = h$	234
< 20	20	то же	294
< 40	50	то же	400
$\geq 40$	100	кубическая	465

Знания о плотностных свойствах горных пород широко используются в горном деле: гравитационная разведка месторождений; расчёты параметров транспортных установок; расчёты горного давления; расчёты технологических свойств горных пород; расчёты акустических параметров горных пород; расчёты процессов обогащения.

### 2.6.3 Методы определения плотности минералов и горных пород

В данном разделе рассмотрим следующие основные методы определения плотности: пикнометрический, объёмометрический, по данным рентгенографического и химического анализов.

Пикнометрический метод является одним из наиболее точных и широко применяемых на практике. Суть этого метода состоит в определении объёма точно взвешенной пробы породы или минерала в тщательно откалиброванном сосуде, называемом пикнометром, и расчёте числового значения плотности по соответствующей формуле.

Массу, объем пробы и плотность определяют следующим образом. В течение 30-40 минут, при температуре (90-100)°С, высушивают пикнометр, а затем взвешивают его. Эти операции повторяют несколько раз до тех пор, пока расхождение в измерениях будет не более  $2 \cdot 10^{-4}$  г. Среднее значение массы пикнометра записывают и эта величина является константой. Массу воды в пикнометре определяют, как разность между массой пикнометра с водой  $m_2$  и массой  $m_1$ .

Массу образца определяют, как разность между массой  $m_3$  пикнометра с образцом и массой  $m_1$ . Образец вносят в пикнометр после просушивания и контрольного взвешивания. Далее определяют массу пикнометра с образцом и водой, при этом для удаления воздуха из пор и трещин образца, а также из воды пикнометр вакуумируют, после этого нагревают, время от времени погружая в горячую воду образец. Разность  $(m_4 - m_3)$  даёт массу воды в объёме пикнометра.

Плотность вычисляют по формуле:

$$\rho = \frac{(m_3 - m_1)\rho_v}{(m_2 - m_1)(m_4 - m_3)}, \quad (2.12)$$

где  $\rho_v$  – плотность воды при температуре взвешивания, г/см<sup>3</sup>.

**Объёмометрический метод.** Широко применяется в минералогических лабораториях. Объем образца определяют в барометрической трубе, у которой с высокой точностью определена площадь поперечного сечения, по изменению высоты столба жидкости при погружении в неё образца породы или минерала. Исследуемый материал



следует взвешивать с высокой точностью, поэтому используют аналитические весы. Плотность рассчитывают по формуле

$$\rho = 4 \cdot m / \pi \cdot D \cdot k \cdot n, \quad (2.13)$$

где  $D$  – внутренний диаметр капилляра;  $k$  – цена деления лимба окулярмикрометра;  $n$  – число делений лимба;  $m$  – масса минерала или горной породы.

**Определение плотности минералов по данным рентгенографического и химического анализов.** В данном методе используется связь значения плотности минерала с атомными массами составляющих его химических элементов и объёмом, которые они занимают. В формуле для определения плотности учитывается объём элементарной ячейки и ее элементарная масса:

$$\rho = Z \cdot M \cdot m_{\text{H}} / V \quad (2.14)$$

где  $Z$  – число молекул (или атомов для одноатомных минералов) в элементарной ячейке;  $M$  – молекулярная масса минерала (масса структурной единицы);  $m_{\text{H}}$  – атомная (углеродная) единица массы, равная  $1,6603 \cdot 10^{-27}$  кг;  $V$  – объём элементарной ячейки минерала,  $\text{м}^3$ .

### Контрольные вопросы

1. Что такое пористость горной породы?
2. Какие виды пор Вы знаете?
3. Как определяется коэффициент общей пористости?
4. Как определяется коэффициент открытой пористости?
5. Как определяется коэффициент динамической пористости?
6. Что такое коэффициент водонасыщения?
7. Как делятся поры горных пород по их размерам?
8. Перечислите методы изучения структуры порового пространства.
9. От каких факторов зависит пористость горной породы?
10. Как делятся поры углей по их размерам?
11. Что такое плотность горной породы?
12. Что такое объёмная масса горной породы?
13. Что такое удельный вес горной породы?
14. Назовите параметры, характеризующие свойства разрыхлённых горных пород.
15. Дайте определение насыпной массы разрыхлённой горной породы.
16. Дайте определение насыпного веса разрыхлённой горной породы.

17. Дайте определение коэффициента разрыхления горной породы.
18. Как определяется гранулометрический состав разрыхлённой горной породы?
19. В чем суть пикнометрического метода определения плотности горной породы?

## ТЕМА 3 ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

### 3.1 Механические напряжения в горных породах

Прочность и устойчивость сооружений, возводимых на породах или непосредственно в их толще, определяются напряжённым состоянием, возникающим как результат действия внешних сил (нагрузок). Без определения величины напряжений и области их распространения невозможно рассчитать осадку сооружений, оценить устойчивость склонов и откосов, а также безопасность эксплуатации подземных выработок. В строительной механике и сопротивлении материалов, теории упругости рассматривается среда, которая обладает свойствами сплошности и однородности, т.е. среда называется сплошной. Реальные породы с их сложным строением на макро- и микроуровне заменяются некоторой моделью сплошной, однородной, изотропной, упругой среды.

Под *упругостью* понимают свойство материала восстанавливать свои первоначальные размеры и форму после снятия нагрузки. Кроме того, предполагают, что деформации пропорциональны напряжениям (закон Гука).

В механике горных пород при расчёте горных пород используют положения теории упругости, которые могут быть применены для любых линейно-деформируемых тел. Горные породы при определённых давлениях деформируются по закону, близкому линейному. Следовательно, при определении напряжений в породах можно применять модель линейно-деформируемой среды. В породах часто зоны пластических деформаций либо отсутствуют, либо имеют незначительную область развития.

Теория упругости используется для определения напряжений при условии стабилизации деформаций под действием внешней нагрузки. Следовательно, при расчёте напряжений горные породы рассматриваются как линейно-деформированные тела, процесс деформирования которых под нагрузкой закончился. При таких допущениях величина конечных напряжений в горной породе от действия внешних сил будет определена с достаточной точностью.

### 3.2 Понятие о напряжениях и деформациях

Рассмотрим на простейшем виде деформации – разбежные – элементарные внутренние усилия и перемещения, возникающие при действии на брус продольной силы  $F$  (рис. 3.1).

Разрезаем мысленно брус сечением на две части, действие одной части на другую заменяем усилием  $N$  (продольная сила).

Эта продольная сила определяется из уравнения статики

$$\sum Z = 0, N = F$$

Продольная сила является равнодействующей элементарных сил, определяющих взаимодействие между частицами тела. При растяжении естественно предположить, что элементарные силы равномерно распределяются по площади сечения и называются напряжением.

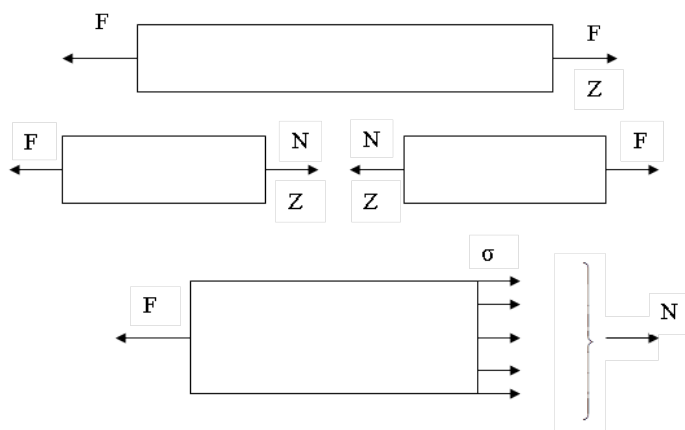


Рисунок 3.1 – К расчёту бруса при растяжении.

**Напряжения** – мера интенсивности внутренних сил. При растяжении возникают нормальные напряжения (перпендикулярно к сечению)  $\sigma$ , которые определяются по формуле

$$\sigma = \frac{N}{S}, \text{ Па}, \quad (3.1)$$

где  $N$  – продольная сила, Н;  $S$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ .

Обычно принимают следующее правило знаков:

- если нормальное напряжение (сила) направлено от сечения, оно вызывает растяжение и считается положительным;
- если нормальное напряжение (сила) направлена к сечению, то оно вызывает сжатие и считается отрицательным.

Между этими видами деформаций сохраняется единство при анализе внутренних сил, но и обнаруживаются качественные отличия, например, при изучении процессов разрушения материалов или при исследовании поведения длинных и тонких стержней, для которых сжатие сопровождается изгибом.

Условие прочности: напряжение, возникающее в опасной точке конструкции, среды, должны быть меньше или, по крайней мере, равны допускаемым напряжениям

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \quad (3.2)$$

Допускаемые напряжения определяют по зависимости

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{n}, \quad (3.3)$$

где  $\sigma_{\text{пред}}$  – предельное напряжение, определяемое в результате испытаний образцов при различных условиях нарушения;  $n$  – коэффициент запаса прочности,  $n > 1$ .

Под действием приложенных сил брус изменяет свои размеры (рис. 3.2). До деформации длина его была  $\ell$  после деформации  $\ell_1 = \ell + \Delta\ell$ . Величина  $\Delta\ell$  называется абсолютным удлинением бруса.

Отношение

$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell} \quad (3.4)$$

называют относительным удлинением бруса. Но правильное название – *линейная деформация*, иногда продольная деформация.

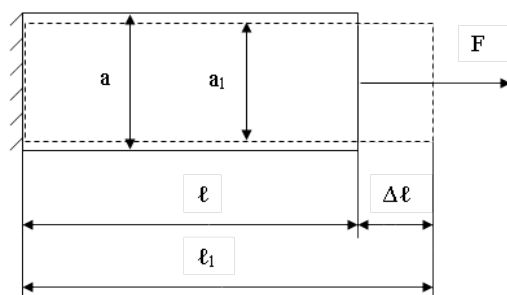


Рисунок 3.2 – Изменение размеров бруса.

В поперечном направлении произошло уменьшение поперечного размера и *поперечная деформация* равна

$$\varepsilon^1 = \frac{a_1 - a}{a}$$

Между поперечной и продольной деформацией существует зависимость. Отношение поперечной деформации к продольной носит

название *коэффициента Пуассона* и является механической характеристикой материала и определяется экспериментальным путём.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon^1}{\varepsilon} \right| \quad (3.5)$$

В пределах малых удлинений для подавляющего большинства материалов, в том числе и для горных пород, справедлив *закон Гука*, который устанавливает пропорциональную зависимость между напряжениями и деформациями:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (3.6)$$

где  $E$  – модуль упругости первого рода или *модуль упругости*, МПа.

Эта величина является физической константой материала и определяется экспериментально.

Определим напряжения, возникающие в бруске при растяжении в некотором сечении, нормаль к которому расположена под углом  $\alpha$  к оси бруса (рис. 3.3, а).

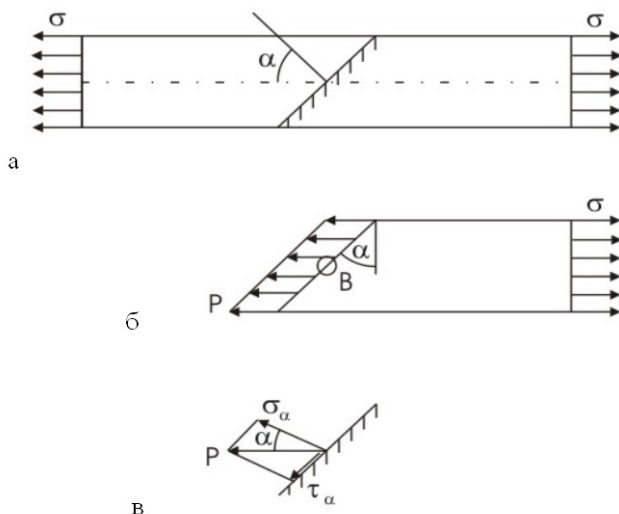


Рисунок 3.3 – Напряжения в наклонных площадках.

Напряжения  $p$  равномерно распределены по наклонному сечению и их можно определить из условия равновесия правой части бруса

$$\Sigma Z = 0 \quad p A_\alpha = \sigma A,$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения бруса;  $A_\alpha$  – площадь наклонного сечения бруса.

Таким образом, напряжение в наклонном сечении

$$p = \sigma \cos \alpha .$$

Обычно это напряжение раскладывали на два направления: по нормали к сечению, нормальное напряжение  $\sigma_\alpha$  и вдоль площадки – касательное напряжение  $\tau_\alpha$  (рис. 3.3, в) и они равны

$$\sigma_\alpha = p \cos \alpha = \sigma \cos^2 \alpha , \quad (3.7)$$

$$\tau_{\alpha=p} \sin \alpha = (\sigma_{\alpha}) \sin 2 \alpha$$

Как видно из уравнений, в зависимости от ориентации сечения получаем разные по величине и направлению нормальные и касательные напряжения.

В сечениях при  $\alpha = 0$ ,  $\sigma_\alpha = \sigma$ ,  $\tau_\alpha = 0$ ; в сечениях  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\sigma_\alpha = 0$ ,  $\tau_\alpha = 0$ ; в сечениях при  $\alpha = 45^\circ$ , возникают наибольшие касательные напряжения

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma}{2} .$$

Через данную точку в конструкции, в массиве горных пород, можно провести бесчисленное множество сечений, в которых действуют различные по величине и по направлению нормальные и касательные напряжения, которые отражают взаимодействие бесконечного множества частиц на данную точку.

Напряжения, действующие по любым трём взаимно перпендикулярным площадкам, определяют *напряжённое состояние в точке*. Условно напряжённое состояние в точке представляют следующим образом: вокруг точки вырезаем элемент бесконечно малого размера в форме параллелепипеда (рис. 3.4, а).

При уменьшении сторон, в пределе ( $d_x, d_y, d_z \rightarrow 0$ ) этот параллелепипед стягивается в точку, через которую проходят три взаимно перпендикулярные площадки. По граням элемента могут действовать напряжения  $P_x, P_y, P_z$  (рис. 3.4, а).

Раскладываем эти напряжения на составляющие, проецируем их на оси  $x, y, z$ , получаем нормальные напряжения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  и касательные напряжения  $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xz}$ .

Индекс нормального напряжения соответствует нормали к площадке, на которой они действуют. Касательные напряжения имеют два индекса: первый – направление оси, параллельной напряжению, второй – направлению оси, перпендикулярной к площадке. Таким образом, на гранях элементарного параллелепипеда действуют девять компонент

напряжений, которые представляют собой *тензор напряжений*, записываемый в виде

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \tau_{yx} \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \sigma_y \tau_{zy} \\ \tau_{xz} \tau_{yz} \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

где в строках расположены составляющие напряжений соответственно на площадках, перпендикулярных осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

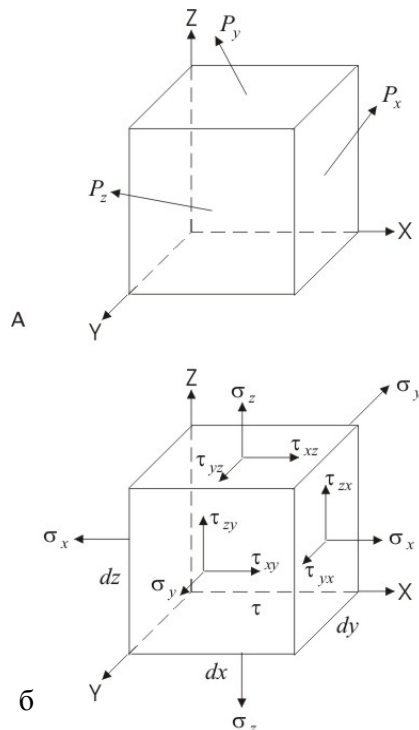


Рисунок 3.4 – Напряжённое состояние в точке.

Система сил, приложенных к элементу, должна удовлетворять условиям равновесия. Поскольку на противоположных гранях возникают противоположные по направлению силы, то первые три условия равновесия – для пространственной системы сил. Из условия равновесия суммы моментов относительно оси  $x$ , получаем

$$\tau_{yz} d_x d_y d_z = \tau_{zy} d_x d_z d_y,$$

аналогично можно записывать остальные уравнения.



Тогда получаем

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}; \tau_{zx} = \tau_{xz}; \tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (3.9)$$

Таким образом, на двух взаимно перпендикулярных площадках составляющие касательных напряжений, перпендикулярные к общему ребру, равны и направлены обе либо к ребру, либо от ребра. Это есть закон парности касательных напряжений. Следовательно, на гранях выделенного элемента имеем не девять, а шесть независимых компонент напряжений, поскольку касательные напряжения попарно равны. Тензор напряжений (3.8) является симметричным.

Анализ напряжённого состояния в точке начинается всегда с определения напряжений на гранях выделенного в окрестности точки элемента. Через точку проводится три взаимно перпендикулярные плоскости, ориентация которых может быть произвольной и часто определяется более простым расчётом компонент напряжений.

Например, напряжение в толще горной породы определяем следующим образом. Выбираем некоторую точку, положение которой определяем с помощью прямоугольной системы координат, началом которой считают точку на границе действия внешних сил и горной породы. Ось z направлена вниз, ось y – слева направо, ось x – перпендикулярно к оси y (рис. 3.5, а).

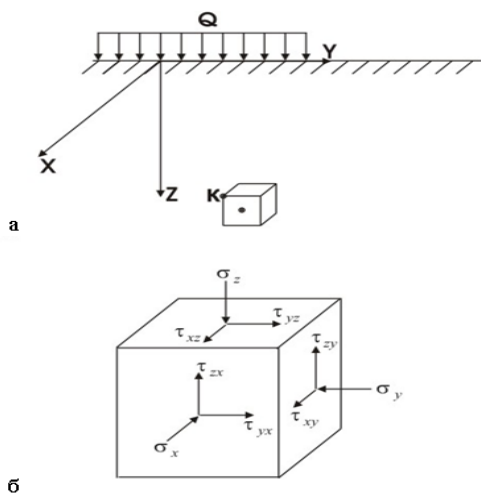


Рисунок 3.5 – Напряжённое состояние: а) - в точке к; б - в толще горной породы.

Для оценки сжимаемости горной породы под действием внешней нагрузки обычно рассматривают горизонтальные и вертикальные площадки. В таком случае решение задачи о сжатии горной породы в некоторой точке

сводится к решению о сжатии заменяющего эту точку элементарного параллелепипеда, стороны которого параллельны оси координат, что допустимо в силу его малости.

Напряжения в породах могут создаваться не только действием внешних нагрузок, но и другими физическими полями. Например, термические напряжения вызываются неоднородным нагревом пород.

При изменении ориентации граней выделенного элемента или, иначе, при проведении различных площадок через данную точку изменяются напряжения, действующие по этим граням. Среди бесчисленного множества площадок, проходящих через данную точку, имеется три взаимно перпендикулярных площадки, на которых касательные напряжения равны нулю. Такие площадки называются *главными площадками*, а нормальные напряжения на этих площадках – *главными напряжениями*. Главные напряжения обозначаются  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  в порядке убывания в алгебраическом смысле, т.е.  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .

Если по всем трём граням параллелепипеда действует три напряжения, то напряжённое состояние называется объёмным или трёхосным (рис. 3.6, а).

Если на гранях элемента действуют два напряжения  $\sigma_1, \sigma_2$ , то напряжённое состояние называется плоским или двухосным (рис. 3.6, б).

Если на гранях элемента действуют напряжения  $\sigma_1$ , то напряжённое состояние называется линейным или одноосным (рис. 3.6, в).

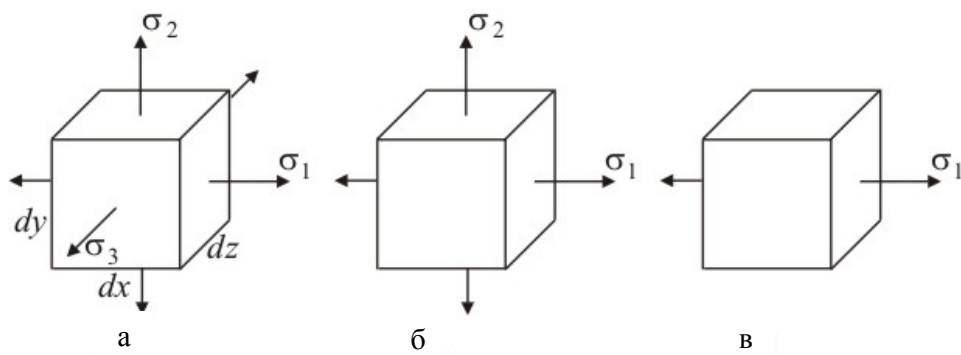


Рисунок 3.6 – Виды напряжённых состояний.

В дальнейшем при исследовании напряжённого состояния в точке необходимо определять главные напряжения, потому что расчёты на прочность построены на основании главных напряжений.

### 3.3 Теории прочности пород

Прочность породы определяется величиной критических напряжений, при которых происходит ее разрушение. Эти напряжения различны для

разных пород и разных способов приложения нагрузки. Они называются *пределы прочности (временное сопротивление)*. Различают пределы прочности пород при сжатии  $\sigma_{вс}$ , растяжении  $\sigma_{вр}$ , сдвиге  $\tau_{сдв}$ .

Разрушение – это разрыв связей между атомами в кристаллической решётке.

Как показывают расчёты, предел прочности при растяжении должен быть равен  $10^4$  МПа.

Однако в связи с тем, что реальные тела обладают множеством дефектов, значения предела прочности в сотни тысяч раз меньше теоретического значения.

Дефекты могут быть различные. В кристалле – это точечные (вакансии) и линейные (дислокации) искажение кристаллической решётки. В породе – границы зёрен (плоскостные) и поры (объёмные искажения) и нарушения строения породы.

В зависимости от масштаба разрушения породы преобладают те или иные дефекты.

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

Более мелкие трещины, поры, контакты между агрегатами зёрен предопределяет разрушение *макроскопическое* – выемочными агрегатами (экскаваторами, комбайнами), буровыми инструментами.

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

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

Мелкие трещины, поры, неоднородности, плоскости ослабления предопределяют преобладающий хрупкий характер разрушения горных пород, поэтому механизм их разрушения может быть описан посредством *теории хрупкого разрушения*, согласно которой решающее значение для начала разрушения имеют критические трещины в объёме твёрдого тела.

На краях трещины обычно возникают напряжения, значительно превышающие средние напряжения  $\sigma$ . Это явление называется

концентрацией напряжений. Так, при длине трещины и радиусе ее закрепления на конце  $r$  (рис. 3.7) напряжения на краю трещины равны

$$\sigma^1 = 2\sigma \cdot \sqrt{\frac{\ell}{r}}$$

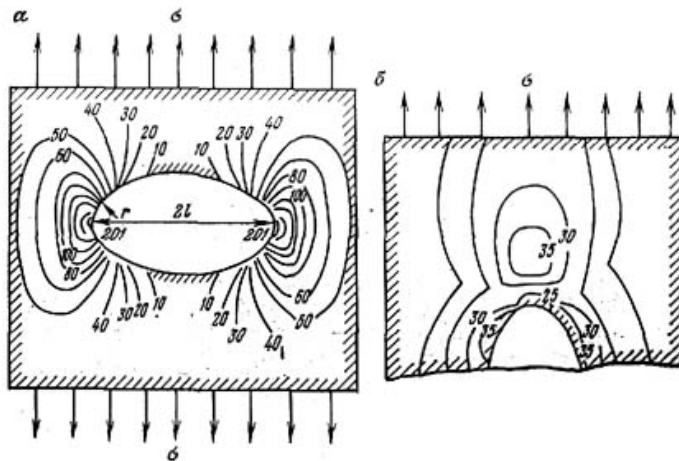


Рисунок 3.7 – Концентрация напряжений на краях трещины длиной  $2\ell$  и с радиусом закругления  $r$  (числа указывают кратность превышения напряжений  $\sigma^1$  над  $\sigma$ ): а – при нагружении перпендикулярно трещине; б – при нагружении параллельно ей.

Как только напряжение  $\sigma^1$  достигнет определённого значения, трещина начнёт развиваться, преодолевая при этом молекулярные силы сцепления (производя работу  $W_s$ , пропорциональную удельной поверхностной энергии  $e_s$  данного тела)

$$W_s = \phi l \cdot e_s,$$

где  $\phi l$  – площадь двух поверхностей трещины, приходящаяся на единицу поперечного размера породы.

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

$$W_E = \sigma^2 \pi \ell^2 / E, \quad (3.10)$$

Трещина будет расти, если

$$\frac{dW_E}{d\ell} \geq \frac{dW_s}{d\ell}. \quad (3.11)$$

Отсюда предел прочности при растяжении

$$\sigma_{вр} = \sqrt{2El_s / \pi l}. \quad (3.12)$$

При действии сжимающей нагрузки трещины смыкаются и на их поверхности появляются силы трения. В том случае предел прочности на сжатие больше предела прочности при растяжении  $\sigma_{вс} > \sigma_{вр}$  и их отношение подчиняется уравнению

$$\frac{\sigma_{вс}}{\sigma_{вр}} = \frac{4}{\sqrt{1 + tq^2 \varphi - tq\varphi}}, \quad (3.13)$$

где  $tq\varphi$  – коэффициент внутреннего трения ( $tq\varphi = 0,2-2$ ).

Например, для гранита  $\sigma_{вс} = 141$  МПа,  $\sigma_{вр} = 11$  МПа,  $\frac{\sigma_{вс}}{\sigma_{вр}} = 13$ ,

песчаника кварцевого  $\sigma_{вс} = 164$  МПа,  $\sigma_{вр} = 6,6$  МПа,  $\frac{\sigma_{вс}}{\sigma_{вр}} = 26$ .

На основании теории хрупкого разрушения получаем  $\frac{\sigma_{вс}}{\sigma_{вр}} = 5-17$ , что в ряде случаев близко к значениям, полученным экспериментально.

**Кинетическая (термофлуктуационная) теория разрушения** твёрдых тел, разработанная академиком С.Н. Журковым построена на том, что разрушение в некоторой зоне не является каким-то критическим состоянием тела. В соответствии с этой теорией в твёрдых телах непрерывно идёт процесс накопления повреждений, которое приводит к полному разрушению тел. Время существования тела при действии нагрузки в не разрушенном состоянии определяется по следующей формуле

$$t = t_0 \exp \cdot \frac{(U_0 - \sigma V)}{kT} \quad (3.14)$$

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  $U_0 \approx 5,8 \cdot 10^{-19}$  Дж);  $V$  – активационный объем, зависящий от структуры тела и составляющий  $10^3-10^4$  атомных объёмов (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;  $k$  – постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/к;  $T$  – абсолютная температура тела.

Предел прочности при растяжении равен

$$\sigma_{вр} = \frac{(U_0 - kT \ell n t / t_0)}{V}, \quad (3.15)$$

т.е. предел прочности зависит от параметров  $U_0$  и  $V$ , температуры тела и длительности действия на него нагрузки.

Эксперименты, проведённые на породах, подтверждают снижение прочности с увеличением длительности действия нагрузки (рис. 3.8).

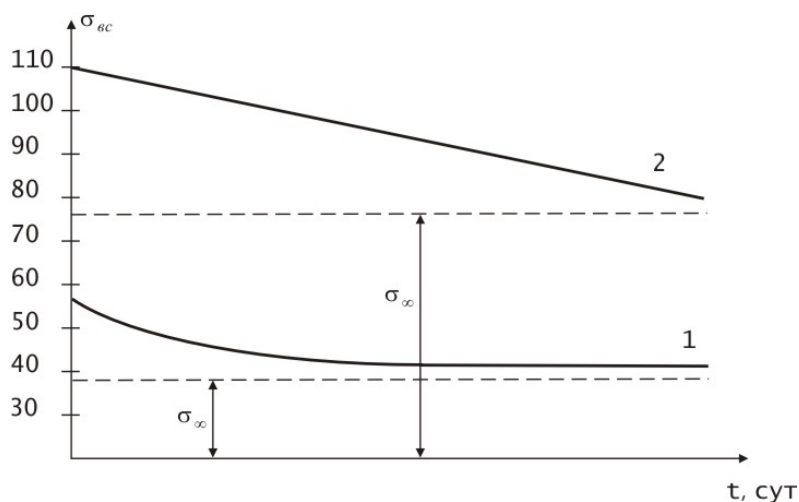


Рисунок 3.8 – Кривые длительной прочности песчанистого сланца Донбасса (1) и известняка (2).

Прочность пород, соответствующая той или иной длительности действия нагрузки, называется их *длительной прочностью*  $\sigma_{дл}$ . С увеличением времени действия нагрузки величина длительной прочности  $\sigma_{дл}$  падает по кривой, асимметрически приближаясь к некоторому предельному значению, называемому *пределом длительной прочности*  $\sigma_{\infty}$ . Предел длительной прочности для многих пород равен  $\sigma_{\infty} = (0,7-0,8) \sigma_{вс}$ .

Для оценки прочности горных пород в случае сложного напряжённого состояния используют критерии, позволяющие заменить сложное напряжённое состояние одноосным напряжённым состоянием, для которого пределы прочности могут быть определены путём теоретических исследований, либо путём эксперимента.

Горные породы в подавляющем большинстве можно отнести к хрупким, поэтому при расчётах можно использовать теорию Сен-Венана (2 теория прочности) – *теорию наибольших линейных деформаций*. Если

наибольшая линейная деформация достигла предельного значения, то напряжённое состояние считается опасным.

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{II}} = \sigma_1 - \mu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{\text{вр}}, \quad (3.16)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Для оценки разрушения пластичных можно применять *теорию наибольших касательных напряжений* (теория Кулона; третья теория прочности).

Напряжённое состояние считается опасным, если наибольшие касательные напряжения достигли предельного значения.

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{III}} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_{\text{вр}} \quad (3.17)$$

Экспериментальная проверка этой гипотезы показала, что для пластичных материалов она приводит, в общем, к удовлетворительным результатам. Переход от упругого состояния к пластическому действительно с достаточной точностью определяется разностью между наибольшим и наименьшим из главных напряжений и слабо зависит от промежуточного главного напряжения  $\sigma_2$ . Наложение всестороннего давления на любое напряжённое состояние не меняет величины наибольших касательных напряжений  $\tau_{\text{max}}$  и, следовательно, не оказывает влияние на возникновение пластических деформаций. В частности, при всестороннем гидростатическом давлении  $\tau_{\text{max}}$  обращается в нуль, следовательно, в материале не возникают пластические деформации. Наложение всестороннего давления влияет не на условие пластичности, а на условия разрушения. Граница разрушения отодвигается, и материал приобретает способность пластически деформироваться без разрушения, что объясняет поведение горных пород при определённых условиях.

Рассмотрим *энергетическую теорию прочности (4 теория прочности)* Представим напряжённое состояние в виде двух напряжённых состояний: всестороннее растяжение, где  $\sigma_o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$  и во втором напряжённом состоянии, где по граням элемента действуют напряжения  $\sigma_1 - \sigma_o, \sigma_2 - \sigma_o, \sigma_3 - \sigma_o$ .

Первое напряжённое состояние вызывает изменение объёма элемента без изменения формы (куб до деформации остаётся кубом и после деформации), второе напряжённое состояние вызывает изменение формы элемента (куб превращается в параллелепипед) без изменения объёма.

Напряжённое состояние считается опасным, если удельная потенциальная энергия изменения формы достигла предельного значения.

Эквивалентные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{IV}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_{\text{вр}} \quad (3.18)$$

Эта теория хорошо согласуется с экспериментом. Кроме того, перестановка местами индексов напряжений 1, 2, 3 в выражении не меняет величины эквивалентных напряжений.

К вопросу прочности, согласно *теории прочности Мора*, можно подойти и с других позиций – с позиций упрощённой систематизации экспериментальных данных.

Для хрупких тел, к которым относятся стекло, бетон, горные породы, критерий разрушения может быть сформулирован в принципе так же, как и критерий пластичности, в виде некоторого соотношения между компонентами тензора напряжений

$$R \cdot (\sigma \cdot i \cdot j) = 0. \quad (3.19)$$

Если  $R \cdot (\sigma \cdot i \cdot j) < 0$ , то материал не разрушается. При выполнении условия (3.19) хотя бы в одной точке – происходит локальное разрушение. Под локальным разрушением понимают либо разрыв, разрушение и срез некоторых структурных элементов, либо появление зародышевой трещины или слияние с трещинами, возникшими в соседних точках, где выполняется условие (3.19). Область локального разрушения служит источником концентрации напряжений, поэтому вероятно использование новых очагов разрушения по соседству с уже возникшими.

Условие Мора: разрушение происходит тогда, когда на некоторой площадке величина касательного напряжения достигает критического значения, зависимо от действующего на этой площадке нормального напряжения

$$\tau_n = f \cdot (\sigma_n). \quad (3.20)$$

Это условие (3.20) необходимо записать в зависимости от главных напряжений. Для этого воспользуемся геометрическим представлением напряжённого состояния в виде круговой диаграммы Мора. При объёмном напряжённом состоянии, с учётом принятых обозначений, можно построить три окружности Мора (рис. 3.9).

Точка, соответствующая определённому напряжённому состоянию, с координатами  $\sigma_n, \tau_n$  лежит в заштрихованной области, т.е. не может выйти за



пределы большого круга, построенного на напряжениях  $\sigma_2$  и  $\sigma_1$ .

Предположим, что мы располагаем испытательной машиной, на которой в образце можно создавать любые напряжённые состояния с пропорциональным изменением всех компонент. Выберем некоторое напряжённое состояние и будем одновременно увеличивать все компоненты. При некоторых значениях напряжений напряжённое состояние станет предельным. Образец либо разрушится, либо в нем возникнут пластические деформации. Начертим один из наибольших кругов Мора для этого напряжённого состояния (круг 1, рис. 3.10).

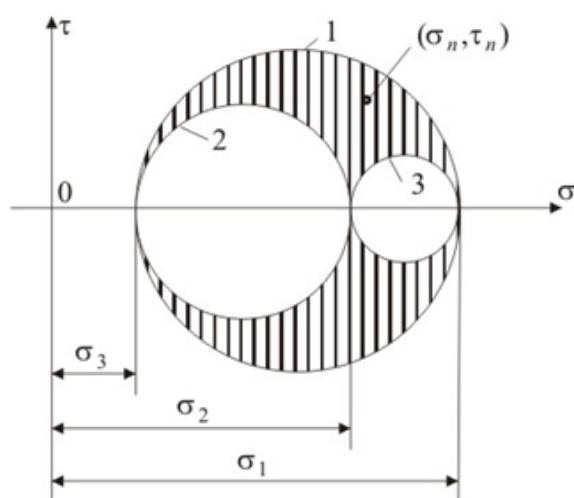


Рисунок 3.9 – Круговая диаграмма для объёмного напряжённого состояния.

На образце из того же материала проводим испытание при другом напряжённом состоянии, добиваемся, что напряжённое состояние становится предельным (круг 2, рис. 3.10).

В результате испытаний получаем семейство кругов Мора для различных предельных состояний. Вычеркиваем их общую огибающую кривую. Эта огибающая кривая является единственной, независимо от главных напряжений  $\sigma_2$ . Это основное допущение в этой теории прочности.

Форма огибающей предельных кругов Мора зависит от свойств материала и является механической характеристикой материала. Проверка прочности проводится достаточно просто. Если окружность большого круга Мора не касается предельной кривой, разрушение не произойдёт. Если круг Мора коснётся огибающей кривой, то происходит локальное разрушение.

Часто проводят испытания на растяжение, сжатие, строят аппроксимирующую предельную огибающую в виде касательной к двум окружностям и тогда условие прочности принимает вид

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_{вр}}{\sigma_{вс}} \cdot \sigma_3 = \sigma_{вр}, \quad (3.21)$$

где  $\sigma_{вр}$  – временное сопротивление (предел прочности) при растяжении;

$\sigma_{вс}$  – временное сопротивление (предел прочности) при сжатии.

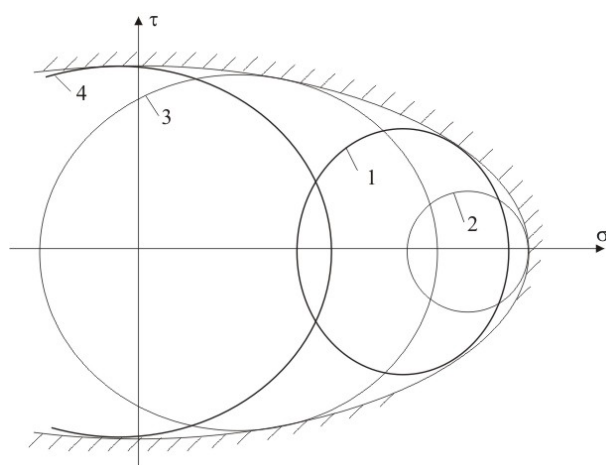


Рисунок 3.10 – Огибающая кривая.

В настоящее время паспортом прочности горных пород называют кривую, огибающая все круги напряжений для предельных состояний (рис. 3.11). При исследовании напряжённого состояния в горном массиве сжимающие напряжения считают положительными.

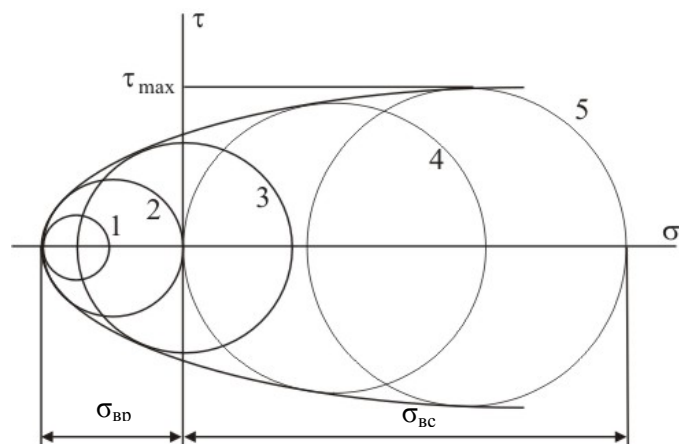


Рисунок 3.11 – Огибающая кривая предельных напряжённых состояний: 1 – всестороннее неравномерное растяжение; 2 – одноосное растяжение; 3 – чистый сдвиг; 4 – одноосное сжатие; 5 – всестороннее неравномерное сжатие;  $\sigma_{vc}$  – всестороннее равномерное сжатие;  $\sigma_{vp}$  – всестороннее равномерное растяжение.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение упругости горной породы.
2. Дайте определение напряжения.
3. Запишите формулу, по которой определяются напряжения при сжатии и растяжении.
4. Запишите формулу, по которой определяются линейные деформации при растяжении.
5. Запишите формулу, по которой определяются поперечные деформации при растяжении.
6. Дайте определение коэффициента Пуассона. Запишите формулу, по которой определяется коэффициент Пуассона.
7. Как формулируется закон Гука при растяжении? Запишите формулу.
8. Запишите формулу, по которой определяются нормальные напряжения в наклонном сечении бруса при растяжении.
9. Запишите формулу, по которой определяются касательные напряжения в наклонном сечении бруса при растяжении.
10. Что представляет собой тензор напряжений?
11. В чем заключается закон парности касательных напряжений?
12. Виды напряжённых состояний.
13. Назовите уровни разрушения горных пород. Чем они характеризуются?

14. Назовите теории разрушения горных пород.
15. В чем суть теории прочности Мора?
16. Что такое круговая диаграмма напряжённого состояния?
17. Дайте определение длительной прочности горных пород. Приведите график длительной прочности горных пород.
18. Что называют главными напряжениями?
19. Круговая диаграмма напряжённого состояния при объёмном напряжённом состоянии.

## **ТЕМА 4 СТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД**

### **4.1 Основные показатели механических свойств горных пород**

Механические свойства горных пород определяют их поведение под влиянием внешних нагрузок – усилий. Они проявляются и непосредственно оцениваются прочностью и деформируемостью горных пород.

Прочность – свойство горных пород (материалов) сопротивляться разрушению и образованию больших деформаций, т.е. не разрушаться под действием определённой нагрузки.

Деформация – свойство материала под действием нагрузки изменять свою форму и объем.

Прочность материала может изменяться под влиянием различных факторов в широких пределах: они могут быть очень прочными, прочными, средней прочности, малой прочности и очень малой прочности. Разрушение горных пород может происходить сразу, без образования больших деформаций, т.е. происходит хрупкое разрушение, в том случае говорят о условно-мгновенной прочности или стандартной и длительной прочности.

Деформации и напряжения в горных породах, как и для других материалов, связаны между собой определёнными соотношениями.

Одним из свойств материала, горной породы является свойство упругости. Упругость – это свойство материала восстанавливать первоначальные размеры после снятия нагрузки.

Скальные породы обладают высокой прочностью, упругостью и малыми деформациями и перемещениями, слабой водопроницаемостью. Разрушаются они хрупко, мгновенно, с потерей сплошности. Деформации, развивающиеся во времени, т.е. упруговязкие или упругопластичные для них нехарактерны. Для этих пород определяется так называемая мгновенная прочность.

Полускальные породы отличаются от скальных меньшей прочностью и устойчивостью, большей деформируемостью, значительной водопроницаемостью. Они имеют хрупкопластический или пластический характер разрушения. Для них характерно развитие деформаций во времени, т.е. явление ползучести. Для таких пород необходимо учитывать не только мгновенную, но и длительную прочность, учитывать реологические свойства. Для обеспечения устойчивости сооружений, как в строительной, так и в горной практике требуются сложные инженерные мероприятия.

Породы рыхлые несвязные и мягкие связные по сравнению с предыдущими характеризуются значительно меньшей прочностью и

устойчивостью и большей деформируемостью, сильной водопроницаемостью.

Для понимания природы свойств крупнообломочных, песчаных и особенно глинистых пород важно учитывать не только их геолого-петрографические особенности, но и свойства, обусловленные дисперсностью, так как эти породы – многофазные системы, состоящие из минеральных частиц, воды и воздуха или других газов.

При изучении и оценке прочности, устойчивости, деформируемости и водопроницаемости горных пород важно учитывать их анизотропию, обусловленную поверхностями и зонами ослабления, уменьшением напряжений при разгрузке, сопровождающейся образованием зон разгрузки, трещин упругого отпора. Поэтому перечисленные свойства горных пород важно охарактеризовать не только средними показателями, но и дирекционными, определяемыми по характерным направлениям. Эти показатели могут использоваться в качестве расчётных.

Повышенное содержание тонкодисперсных частиц в породах определяют в значительной степени их глинистые свойства и принципиальные отличия по свойствам глинистых пород от песчаных и других обломочных.

Образец, применяемый при испытании, имеет более однородную структуру, меньшее количество дефектов, поэтому прочность образца выше, чем прочность породы, в этом случае необходимо учитывать масштабный фактор. Но при испытании образца нужно учитывать расположение слоёв, наличие внешних дефектов, поверхностей ослабления, иногда при испытании получаем заниженную прочность.

Если порода будет служить естественным основанием для какого-либо сооружения или средой для него, ее свойства должны изучаться при естественном сложении и влажности (на монолитах). Если она будет использоваться как строительный материал для отсыпки насыпей, дамб, земляных плотин, ее свойства нужно изучать на образцах нарушенного сложения, при влажности близкой естественной.

При решении различных инженерно-геологических задач, связанных с проектированием и строительством сооружений необходимо иметь следующие характеристики: вещественный состав, особенности строения, физические свойства, водные свойства, механические свойства, показатели специального назначения.

К механическим свойствам горных пород относятся прочность при сжатии и растяжении, сопротивление скалыванию и сдвигу, общая деформируемость, сжимаемость и просадочность, ползучесть и длительная

прочность. Прочность горных пород обычно характеризуется пределами прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ , сдвиг, изгиб  $\sigma_{из}$  и растяжении  $\sigma_p$ .

Горные породы в условиях одноосного сжатия, изгиба и растяжения обычно обладают высокой прочностью на сжатие и незначительной прочностью на растяжение, изгиб, сдвиг.

При этом, как правило, во всех твёрдых породах  $\sigma_{сж} > \sigma_{из} > \sigma_p$ .

Например, для гранита предел прочности при растяжении составляет 0,02-0,04 предела прочности на сжатие, на сдвиг – 0,08, на изгиб – 0,09. Слоистые горные породы дают различные значения прочности при сжатии и растяжении их параллельно и перпендикулярно слоистости и, как правило, сжатие перпендикулярно слоистости даёт более высокие показатели прочности, а при растяжении – наоборот.

Испытания горных пород в условиях всестороннего равномерного сжатия показали, что при достаточно однородном и сплошном строении породы разрушение ее не происходит даже при очень больших давлениях.

Хрупкость – свойство горной породы сравнительно легко разрушаться при статической нагрузке без заметной остаточной деформации.

Почти все горные породы при существующих способах разрушения и скоростях приложения нагрузки разрушаются хрупко. Для этих пород предел текучести равен пределу прочности.

Для скальных пород характерны упругие свойства, а полускальные являются только частично упругими.

В рыхлых обломочных несвязных и глинистых мягких связных породах упругие свойства имеют подчинённое значение.

Для изучения полускальных пород кроме показателей упругих свойств большое значение имеют показатели, характеризующие их способность сопротивляться общим деформациям: обратимым (упругим) и необратимым (остаточным).

Различные группы горных пород имеют неодинаковый характер разрушения, поэтому для оценки их прочности применяют различные виды испытаний. Для скальных, полускальных и связных глинистых пород основными показателями прочности являются временное сопротивление сжатию (предел прочности при сжатии) породах, временное сопротивление растяжению (предел прочности при растяжении)  $\sigma_{вр}$ , сопротивление скалыванию. Для мягких связных и рыхлых несвязных пород – показатели сопротивления сдвигу: угол внутреннего трения, общее сцепление и в некоторых случаях коэффициент сдвига.

#### 4.2 Определение предела прочности при одноосном сжатии

Определение предела прочности при одноосном сжатии на пробах, отделённых от массива проводится следующими методами:

– одноосное сжатие образца правильной формы плоскими плитами (породы с пределом прочности при одноосном сжатии не менее 5 МПа);

– разрушение образцов – плиток плоскими соосными пуансонами (породы с пределом прочности при одноосном сжатии от 10 до 150 МПа).

**Метод одноосного сжатия образцов правильной формы плоскими плитами** предназначен для оценки прочности при исследованиях и сравнительной оценки прочности.

Сущность метода заключается в измерении максимальной разрушающей силы, приложенной к торцам образца правильной формы через стальные плоские плиты. При испытании образцов на сжатие используются обычные испытательные машины универсального типа или прессы. Максимальные усилия, которые они могут создать, должны на 20-30% превышать предельную нагрузку на образец.

Для испытания на сжатие изготавливают образцы цилиндрические или призматические с квадратным поперечным сечением. При испытании образцы должны помещаться между плоскими плитами толщиной не менее 0,3 диаметра или стороны квадрата образца и диаметром, превышающем размеры образца с твёрдостью поверхности HRC 55-60. Эти плиты применяют в качестве прокладок между образцами и опорными плитами испытательной машины, в случае, если машина оснащена верхней подвесной сферической плитой.

Образцы сложной текстуры должны быть двух комплектов: для испытания при действии нагрузки вдоль слоёв и перпендикулярно им. Размеры образцов должны соответствовать значениям, указанным в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Размеры образцов

Параметр образца	Размеры, мм, при		
	исследовательских испытаниях		сравнительных испытаниях
	предпочтительные	допустимые	
Диаметр $d$ (сторона квадрата)	$42 \pm 2$	30...60	$42 \pm 2$
$m=h/d(l)$	1,0...2,0	0,7...1,0	$2 \pm 0,05$



Измерение размеров образца производится штангенциркулем в трёх местах по высоте и в двух взаимно перпендикулярных направлениях. За расчётный диаметр принимается среднеарифметическая величина. Высоту определяют по центру образца. Мощность изготовления образцов контролируется индикаторами часового типа и поверочным угольником. Количество образцов при исследовательских испытаниях должно быть не менее 6, при сравнительных испытаниях не менее 10 штук.

Образец помещают либо между стальными плитами, либо в установочном устройстве (рис. 4.1), совмещают ось образца с центром нижней опорной плиты испытательной машины и нагружают до разрушения с равномерной скоростью 1-5 МПа/с.

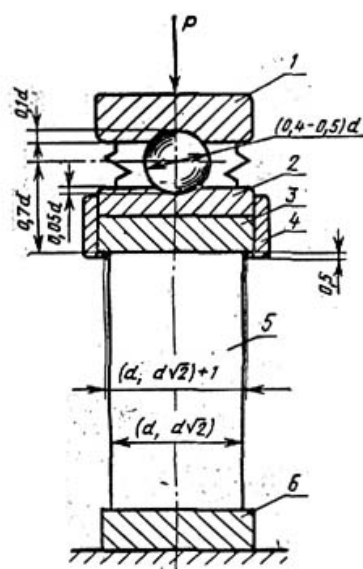


Рисунок 4.1 – Схема приспособления для испытания на сжатие:  
 1 – накладная пята; 2 – подкладная пята; 3 – верхняя плита; 4 – обойма;  
 5 – образец; 6 – нижняя плита.

Определяют величину разрушающей силы  $P$ , зафиксированную силоизмерителем машины. При необходимости определяют влажность пробы.

Предел прочности при сжатии определяют по формуле в Па

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S} \cdot K_B \quad (4.1)$$

где  $P$  – сила, разрушающая образец, Н;

$S$  – площадь поперечного сечения,  $m^2$ ;

$K_b$  – коэффициент, учитывающий отклонение высоты образца от стандартного значения равного  $2d$ .

Коэффициент  $K_b$  определяется по таблице 4.2 в зависимости от отношения  $m = h/d$ .

Таблица 4.2 – Величина коэффициента  $K_b$

<b>m</b>	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
<b><math>K_b</math></b>	0,68	0,72	0,76	0,8	0,86	0,9	0,94	0,97	1

**Метод разрушения образцов – плиток соосными пуансонами** предназначен для исследовательских испытаний и заключается в измерении максимальной разрушающей силы, приложенной к торцам образца через стальные плоские соосно направленные пуансоны.

Образцы выполняются в виде дисков диаметром – от 30 до 100 мм, высотой – от 10 до 12 мм.

Допускается применять образцы – плитки неправильного очертания при условии, что контуры их торцов и боковых поверхностей позволяют вписать диск необходимого размера. Торцевые поверхности образцов должны быть плоскими и параллельными друг другу. Количество образцов должно быть не менее 6.

Значение площади  $S_y$  выбирается из таблицы 4.3.

Таблица 4.3 – Значение площади образца

Диаметр образца (диска), мм	30	40	50	60	70	80	90	100
$S_y, cm^2$	1,52	1,79	2,03	2,26	2,50	2,72	2,94	3,16

Перед испытанием производится измерение образца с помощью штангенциркуля.

Для проведения испытания применяют устройство нагрузочное БУ-11 (рис. 4.2), которое устанавливается на опорную плиту испытательной машины. Образец помещают между пуансонами нагрузочного устройства, скорость нагружения образца (0,1-0,5) кН/с.

Предел прочности определяют по формуле

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S_y} \quad (4.2)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, кН;

$S_y$  – условная площадь поперечного сечения,  $m^2$ .

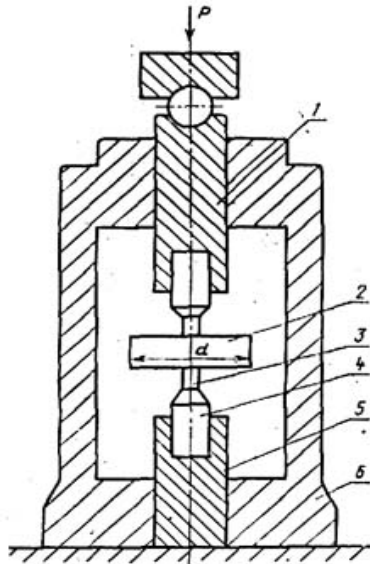


Рисунок 4.2 – Схема установки для испытания образцов с помощью соосных пуансонов: 1 – верхний шток; 2 – образец; 3 – пуансон; 4 – вкладыш; 5 – нижний шток; 6 – корпус.

### 4.3 Метод определения предела прочности при одноосном растяжении

Определение предела прочности при растяжении осуществляется косвенным методом. Сущность метода заключается в определении максимальной разрушающей силы, приложенной перпендикулярно к оси образца породы цилиндрической формы, в результате чего в образце возникают растягивающие напряжения, приводящие к его разрушению в плоскости предельного сечения.

Образец цилиндрической формы, диаметром 40...50 мм устанавливают так, что ось его параллельна плоскостям прессы (рис. 4.3) и прикладывают силу  $P$ . После разрушения образца измеряют размеры поверхности разрушения в двух направлениях: вдоль образующей  $h$  и диаметра  $d$ .

Предел прочности при растяжении определяется по формуле

$$\sigma_p = 0,64 \cdot \frac{P_{\max}}{hd}, \quad (4.3)$$

где  $d$  – диаметр образца, м;

$h$  – высота образца, м;

$P_{\max}$  – разрушающая сила, Н.

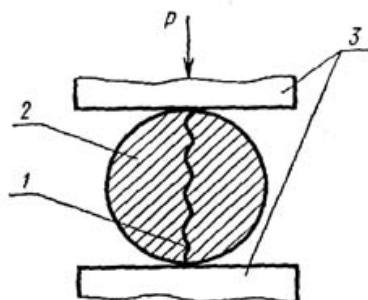


Рисунок 4.3 – Испытание на растяжение: 1 – линия плоскости разрушения, 2 – образец, 3 – плиты пресса.

Результаты испытания применяются при построении паспорта прочности.

#### 4.4 Метод определения предела прочности при сдвиге

Сущность метода заключается в определении максимального разрушающего касательного напряжения при действии на образец пород сдвигающих и нормальных сжимающих нагрузок в матрицах испытательного устройства.

Заготовки для образцов получают выбуриванием из проб керна диаметром 44 мм или обтачиванием на токарном станке до нужного диаметра. Образцы должны быть с явно выраженной слоистостью или упорядоченной трещиноватостью. Высота образца равна диаметру. Торцевые и боковые поверхности тщательно шлифуются специальным порошком.

Образец 1 помещается в специальное устройство, состоящее из трёх пар сменных матриц 2 с углом наклона  $\alpha = 30^\circ$ ;  $45^\circ$  и  $60^\circ$ , пара бронзовых разрезных цилиндрических обжимов – вкладышей 3 с внутренним диаметром 44 мм, две плиты 4 и ролики 5 (рис. 4.4).

Боковую поверхность образца оборачивают медной фольгой, устанавливают образец во вкладыши, устанавливают верхнюю матрицу, затем роликовую опору, располагая оси роликов параллельно срезающей кромке матриц. Устанавливают устройство между плитами пресса и нагружают силой до разрушения образца.

Нормальное давление на плоскость сдвига

$$\sigma_i = \frac{P_{\max} \sin \alpha}{hd}, \quad (4.4)$$

где  $P_{\max}$  – вертикальная разрушающая нагрузка, Н;

$\alpha$  – угол между плоскостью сдвига и направлением действия силы;

$d$  – диаметр образца, м;

$h$  – высота образца, м.

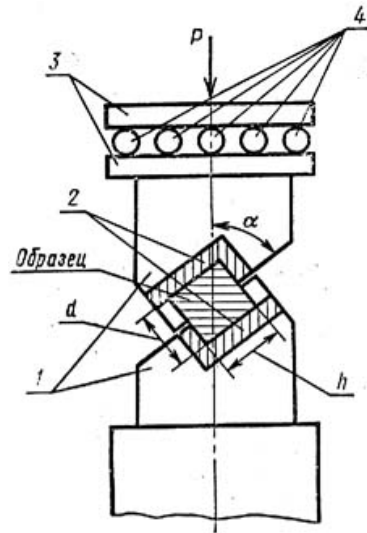


Рисунок 4.4 – Приспособление для испытания на сдвиг.

Предел прочности при сдвиге, соответствующий определённому нормальному давлению

$$\tau_i = \frac{P_{\max} \cos \alpha}{hd} \quad (4.5)$$

По результатам строят предельную кривую прочности горных пород при сдвиге в зависимости от нормального давления, действующего на плоскость сдвига, в координатах  $\sigma$  и  $\tau$  (рис. 4.5). По оси абсцисс откладывают для каждого из углов наклона матриц  $\alpha$  значения нормальных давлений, а по оси ординат соответствующие им значения пределов прочности породы при сдвиге. Кривая представлена на рисунке, где  $\tau_0$  – предел прочности при чистом сдвиге.

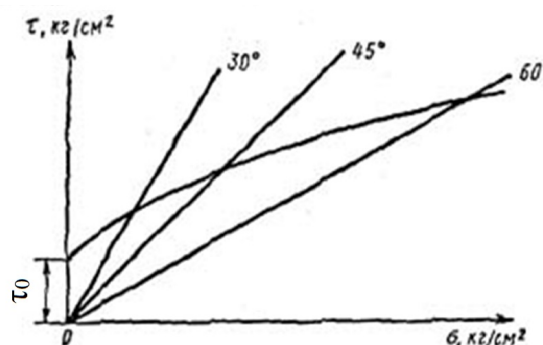


Рисунок 4.5 – Предельная кривая прочности горных пород при сдвиге.

#### 4.5 Метод определения предела прочности при изгибе

Образцы получают из проб керна, диаметром 90-100 мм. От полученных заготовок отрезают с помощью камнерезной машины диски толщиной  $10 \pm 1$  мм.

Образец 1 устанавливают на опорное кольцо 2, а сверху ставят на него кольцевой пуансон 3 (рис. 4.6), прикладывают силу и определяют разрушающую нагрузку.

Предел прочности при изгибе определяют по формуле

$$\sigma_{\text{и}} = 75 \cdot \frac{P_{\text{max}}}{h}, \text{ Па}, \quad (4.6)$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальная разрушающая сила, Н;  
 $h$  – толщина образца, м.

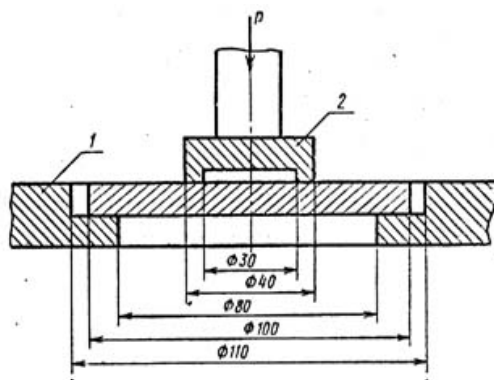


Рисунок 4.6 – Схема установки для испытания на изгиб.

#### 4.6 Метод определения предела прочности при объёмном сжатии

Сущность метода заключается в измерении разрушающей сжимающей силы, приложенной к торцам образца через плоские стальные плиты при боковом сжатии гидростатическим давлением.

Для испытания изготавливают цилиндрические или призматические образцы квадратного поперечного сечения.

В камеру объёмного сжатия (рис. 4.7) устанавливают образец 10, который изолируют от рабочей жидкости. Герметизируют рабочую полость камеры, подают в камеру рабочую жидкость и доводят давление ее до значения, заданного условиями решаемой задачи. При заданном давлении в камере образец нагружают осевой сжимающей силой и доводят его до разрушения.

Предел прочности образца при объёмном сжатии определяют по формуле

$$\sigma_{сж}^0 = \frac{P}{S}, \quad (4.7)$$

где  $P$  – разрушающая осевая сила, Н;  
 $S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

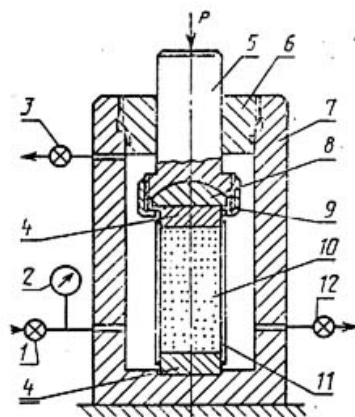


Рисунок 4.7 – Установка для испытания образца горной породы при объёмном сжатии: 1 – впускной вентиль; 2 – манометр; 3 – вентиль выпуска воздуха; 4 – стальные плиты; 5 – шток; 6 – крышка; 7 – корпус; 8 – сферическая пята; 9 – накидная гайка; 10 – образец; 11 – изоляция; 12 – выпускной вентиль.

#### 4.7 Нестандартные методы определения прочностных параметров скальных пород

Определение механических характеристик углей и горных пород на образцах правильной формы связано с большими трудностями при их изготовлении. Кроме того, механическая обработка стандартного образца при его изготовлении может вносить искажения, вызванные изменением поверхностных свойств образца.

В связи с этим получили распространение методы определения механических характеристик горных пород и углей на образцах неправильной формы. К этим методам относятся испытания образцов на сдвиг, разрыв и сжатие.

Методика испытания образцов неправильной формы на сдвиг со сжатием и разрыв заключается в следующем. Испытуемые куски породы или угля, ориентированные нужным образом (по простиранию, по падению или по напластованию), укрепляют в бетонных блоках размером 200x200x200 мм (рис. 4.37, а), зазор  $\Delta$  между ними во время заливки сохраняют с помощью картонных прокладок.

Минимальное значение зазора  $\Delta$  определяется размерами структурного элемента. Если зазор  $\Delta$  значительно меньше величины элемента, сказывается влияние масштабного фактора, так как разрушение происходит по элементам.

После снятия картонных прокладок образцы подвергают соответствующему напряжению – на сдвиг со сжатием или разрыв (рис. 4.8, б, в).

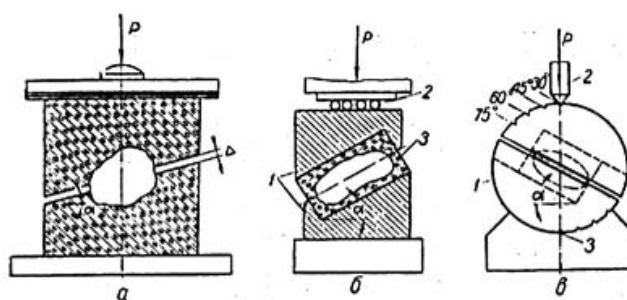


Рисунок 4.8 – Определение механических характеристик горных пород на образцах неправильной формы: а – схема испытаний по ВУГИ; б – схема прибора Фисенко: 1 – матрицы; 2 – ролики; 3 – образец; в – схема прибора Ильницкой: 1 – матрицы; 2 – стержень; 3 – вкладыш.



Во время испытаний фиксируют усилие, при котором произошло разрушение (сдвиг или разрыв)  $P_p$ , а затем с помощью планиметрирования определяется площадь поверхности разрушения  $S$ .

Нормальные предельные напряжения в плоскости разрушения

$$\sigma_{np} = \frac{P_p \cos \alpha}{S_{yc}}, \quad (4.8)$$

предельные касательные напряжения в плоскости разрушения

$$\tau_{np} = \frac{P_p \sin \alpha}{S_{yc}}, \quad (4.9)$$

где  $P_p$  – разрушающее усилие, Н;  $S_{yc}$  – проекция площади поверхности разрушения на плоскость разъёма цементных блоков, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол наклона плоскости разъёма.

При испытаниях на сдвиг (рис. 4.8) угол плоскости разъёма блоков  $\alpha$  может изменяться в широких пределах, что обеспечивает возможность проведения испытания при различных соотношениях нормальных и касательных напряжений, возникающих в полости разрушения.

При испытании образцов на разрыв угол наклона плоскости разъёма блоков  $\alpha$  принимается равным нулю, разрушение происходит в вертикальной плоскости и нарушения разрыва определяются по формуле

$$\sigma_{раз} = \frac{P_p}{S}, \quad (4.10)$$

где  $S$  – площадь поверхности разрыва, замеренная планиметрированием.

Для определения прочностных показателей горных пород  $\sigma_{np}$  и  $\tau_{np}$  при испытании образцов неправильной формы на сдвиг со сжатием могут быть использованы приборы (рис. 4.8, б, в), предложенные Г.Л. Фисенко и Е.И. Ильницкой для определения аналогичных показателей на образцах правильной формы.

В приборе (рис. 4.8, б) угол сдвига  $\alpha$  определяется углом матрицы, а в приборе (рис. 4.8, в) – перестановкой вкладыша 3 и упорного стержня 2. При испытаниях на этих приборах изготавливается нужных (стандартных) размеров формочка из двух половин. Любая половина формочки заливается раствором цемента высокой марки, и в неё вкладывается образец породы произвольной формы, так, чтобы заданная ориентированная плоскость сдвига совпала с поверхностью цементного раствора в полуформе. После того как

цемент схватился, на его поверхность накладывают слой тонкой бумаги с вырезом для пропуска выступающей части образца.

Затем вторая полуформа заливается также цементом и накладывается на первую, так чтобы края их совпадали, а выступающая часть образца погрузилась в цемент, заполняющий вторую полуформу. Изготовленные таким образом образцы 3 выдерживаются до тех пор, пока раствор приобретает установленную для него прочность, и затем подвергаются испытанию на сдвиг со сжатием обычным способом. Показатели  $\sigma_{пр}$  и  $\tau_{пр}$  определяются по вышеприведенным формулам; площадь сдвига определяется планиметрированием.

Методика определения временного сопротивления сжатию (раздавливанию) на образцах неправильной формы (рис. 4.9) аналогична методике определения временного сопротивления раздавливанию на образцах правильной формы.

Для этих испытаний берут (15-20) образцов неправильной округлой формы так, чтобы 3 взаимно перпендикулярные размеры не отличались более, чем в 1,5 раза. Рекомендуемый объем образца –  $100 \pm 2 \text{ см}^3$ .

Предел прочности при одноосном сжатии вычисляют по формуле

$$\sigma_{сж} = 52,6 \frac{P_{ср}}{\sqrt[3]{V_{ср}}}, \text{ МПа}, \quad (4.11)$$

где  $P_{ср}$  – среднеарифметическое усилие раздавливания образцов, кН;  
 $V_{ср}$  – среднеарифметический объем образцов,  $\text{см}^3$

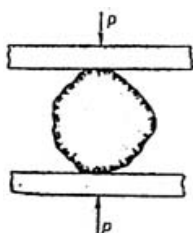


Рисунок 4.9 – Определение временного сопротивления раздавливанию горных пород на образцах неправильной формы.

Применяются также методы удара ручным и пружинным шариковыми молотками и вдавливания стального шарика с помощью пружинного пистолета.

## 4.8 Испытание глинистых пород

### 4.8.1 Метод определения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии

Для определения механических свойств глинистых пород при инженерно-геологических работах применяется испытание при одноосном сжатии. При испытании определяются предел прочности пород, модуль упругой и общей деформации, тип деформационного поведения и построение диаграммы сжатия.

Испытания проводят с помощью прибора одноосного сжатия ИПП-10 или П-12М или пресса.

Образцы цилиндрической формы выбирают из монолита или керна режущим кольцом с помощью винтового пресса. Образец должен иметь однородную структуру.

Образец помещают между плитами пресса и нагружают сжимающей силой. При испытании по сокращённой программе определяют величину разгружающей силы, при испытании по полной программе для определения модуля упругости образец нагружают до напряжения  $\sigma_E$ , равного примерно половине разрушающего напряжения, с последующей разгрузкой до 0, после чего образец нагружают до разрушения.

Предел прочности определяют по формулам:

$$\sigma_{сж} = \sigma_R = \frac{P_R}{S_0} \text{ (при } \varepsilon_R \leq 0,1 \text{);}$$

$$\sigma_{сж} = \sigma_R = \frac{P_R}{S} \text{ (при } \varepsilon_R > 0,1 \text{),}$$

где  $P_R$  – сила, при которой происходит разрушение, Н;  $S_0$  – первоначальная площадь поперечного сечения,  $m^2$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения при испытании,  $m^2$ ;  $\varepsilon_R$  – продольная деформация в момент разрушения.

Образцы до и после испытания представлены на рис. 4.10.

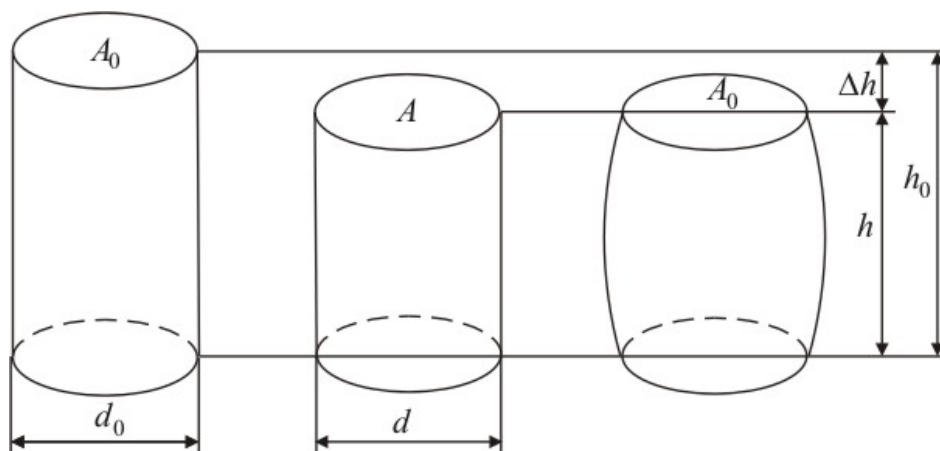


Рисунок 4.10 – Образцы до испытания и после испытания.

Площадь образца  $S$  определяют при измерении диаметра штангенциркулем, либо по продольной деформации  $\epsilon$  в предположении о несжимаемости породы по формулам:

в случае сохранения цилиндрической формы образца

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{1 - \epsilon};$$

в случае, когда образец после испытания приобретает бочкообразную форму

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{4} \cdot \left( 3 \sqrt{\frac{1}{1 - \epsilon}} - 1 \right)^2$$

Модуль упругой деформации  $E$  в МПа определяют по формуле

$$E = \frac{\sigma_e}{\epsilon^{II} - \epsilon^I},$$

где  $\sigma_e$  – напряжение, с которого начинается разгрузка образца, МПа;  
 $\epsilon^{II}, \epsilon^I$  – продольная деформация в начале и конце разгрузки (рис. 4.11).

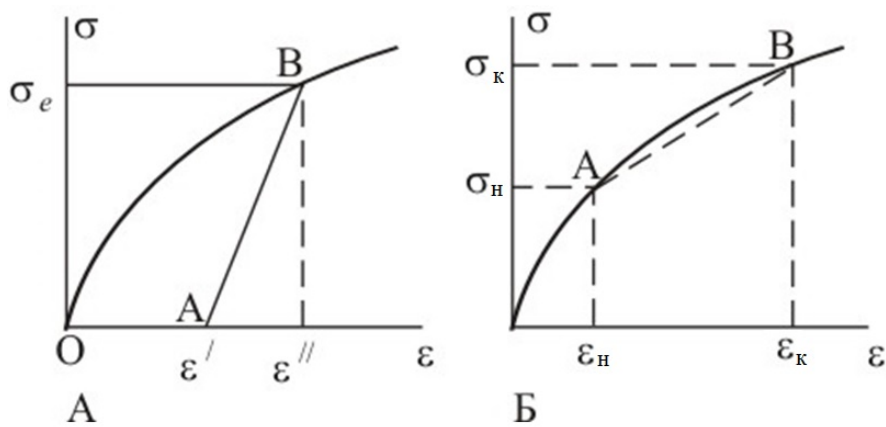


Рисунок 4.11 – Определение модуля упругости (а) и модуля общей деформации (б).

Модуль общей деформации  $E_o$  определяют по формуле

$$E_o = \frac{\sigma_K - \sigma_H}{\epsilon_K - \epsilon_H}, \quad (4.12)$$

где  $\sigma_K$  и  $\sigma_H$  – напряжения в конце и в начале выбранного участка кривой;  $\epsilon_K, \epsilon_H$  – продольные деформации в конце и в начале того же участка кривой. Образец может по-разному деформироваться и тип деформирования устанавливают по виду диаграммы сжатия: хрупкий (рис. 4.12, а), хрупко-пластический (рисунок 4.12, б), пластический (рисунок 4.12, в).

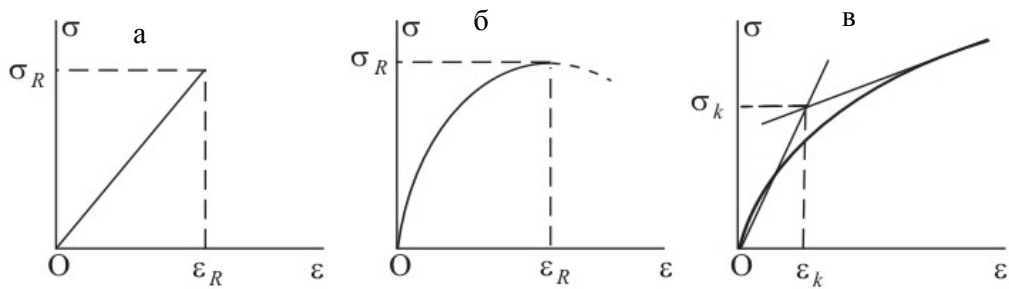


Рисунок 4.12 – Типы деформационного поведения глинистых пород при одноосном сжатии.

#### 4.8.2 Испытание глинистых пород при растяжении

На результат испытания на растяжение кроме петрографических особенностей пород большое влияние оказывает форма образцов. Наиболее рациональная форма – в виде трапецеидальной восьмёрки или усечённых конусов, сложенных вершинами. Изготовление таких образцов связано с большими трудностями. Часто используют образцы цилиндрической формы (керн) или призматической формы; иногда для мягких глинистых пород изготавливают фасонные образцы, но и для этих пород допустимо применение образцов цилиндрической и кубической форм.

Одним из простейших приборов для определения сопротивления глинистых пород разрыву является прибор Н.А. Цытовича (рис. 4.13). Испытание проводится для образцов, имеющих форму трапецевидной восьмёрки. Образец должен иметь длину 76 мм, ширину 20 мм, высоту 25 мм. Длина разрывной части (25...30) мм, площадь сечения 5 см<sup>2</sup>.

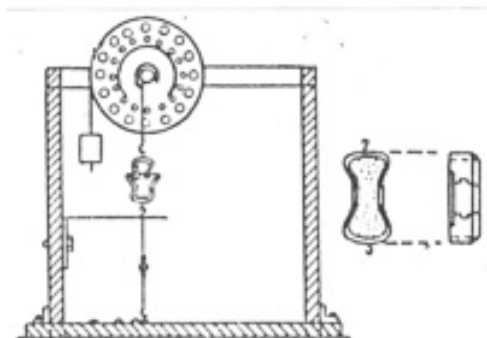


Рисунок 4.13 – Прибор Н.А. Цытовича для определения прочности глинистых пород на растяжение.

Разрыв образца производится с помощью специального привода, имеющего двухступенчатый шкив с отношением диаметров шкивов 1:10. В качестве груза при испытаниях может быть использована вода или дробь.

Предел прочности при одноосном растяжении равен

$$\sigma_p = \frac{P_{\max}}{S_0},$$

где  $P_{\max}$  – разрушающая нагрузка, Н;

$S_0$  – первоначальная площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

Применяется также метод испытания глинистых пород на сдвиг.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение прочности горной породы.
2. Дайте определение деформации горной породы.
3. Какие свойства горных пород относятся к механическим?
4. Дайте определение хрупкости горной породы.
5. Какие показатели характеризуют прочность горных пород?
6. Как определяется предел прочности горной породы при одноосном сжатии плоскими плитами?
7. Как определяют прочность горных пород методом соосных пуансонов?
8. Как определяется предел прочности при растяжении?
9. В чем заключается метод определения прочности горных пород на разрыв методом раскалывания?
10. Как определяется предел прочности при сдвиге?
11. Как определяется предел прочности при изгибе?
12. Опишите устройство стабилметров и их назначение.
13. Каким образом определяются прочностные показатели на образцах неправильной формы?
14. Как определяется модуль упругой деформации (модуль Юнга)?
15. Как определяется модуль общей деформации?
16. Какие виды деформаций известны?

## ТЕМА 5 ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД

### 5.1 Деформации в горных породах

Горные породы под действием внешних сил меняют свою форму и размеры, т.е. деформируются.

Изменение относительного положения частичек породы, вызывающее изменение объёма и формы пород, называется деформацией.

Деформации могут быть неразрушающими и разрушающими.

Неразрушающие деформации изменяют размеры, форму и объём породы без нарушения ее сплошности; разрушающие – приводят к разделению породы на отдельные части.

Если после всестороннего длительного сжатия образец горной породы в некоторый момент времени разгрузить, то часть деформаций, приобретённых под нагрузкой, с течением времени может восстановиться. Такие деформации носят название деформаций генетического возврата (от слова «генезис» – происхождение осадочного массива).

Деформацию, появляющуюся в момент приложения нагрузки, называют упруго-мгновенной, а деформацию, которая развивается с течением времени – деформацией ползучести.

При увеличении нагрузок можно наблюдать три области деформации породы: упругую, пластическую и разрушающую. В зависимости от соотношения вида деформаций при сжатии, горные породы подразделяются на упругие или хрупкие (пластическая зона практически не наблюдается), упруго-пластичные (разрушающей деформации предшествует зона пластической деформации) и пластичные (упругая деформация незначительна).

На рис. 5.1 представлены типичные графики деформаций пород.

Нормальные напряжения в образцах горных пород вызывают изменение их линейных размеров. Деформации в этом случае называются линейными.

Относительное изменение линейных размеров составляет

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (5.1)$$

где  $l$  – длина ребра деформированного образца, мм;  $l_0$  – длина ребра образца горной породы до деформирования, мм.



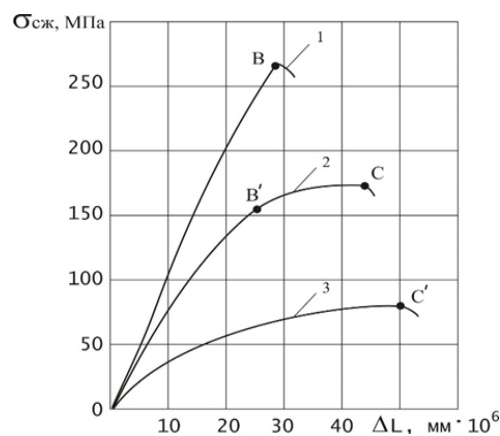


Рисунок 5.1 – Типичные графики деформаций пород: 1 – упругой (кварцит); 2 – упругопластической (осадочные породы); 3 – пластичной (мрамор):  $OB$  и  $OB'$  – зона упругих деформаций;  $B'C$  и  $OC'$  — зона пластических деформаций; точки  $B$ ,  $C$ ,  $C'$  — моменты разрушения пород.

Касательные напряжения вызывают сдвиговые деформации, определяемые величиной угла сдвига грани образца.

Деформационные характеристики горных пород определяют обычно в лабораторных условиях при приложении к образцам нагрузок. Для этих целей используют «мягкие» и «жесткие» испытательные машины, на которых выполняются механические испытания горных пород.

В «мягких» испытательных машинах, в процессе деформирования накапливается большое количество упругой энергии, которая превращается в кинетическую в момент разрушения образца и поэтому разрушение приобретает взрывной характер (например, внезапный выброс породы, горный удар). В «жестких» испытательных машинах, наоборот, это количество энергии невелико и имеется возможность изучать характер деформирования породы за пределом максимальной сопротивляемости (например, процессы деформирования, растянутые во времени).

Для более полного представления о деформационных свойствах горных пород, в качестве примера рассмотрим полную диаграмму деформирования образца горной породы при сжатии (рис. 5.2).

На диаграмме следует различать:

о-а – участок, характеризующий закрытие пор, трещин (т.е. дефектов породы);

а-в – участок, характеризующий область упругих деформаций (наблюдается линейная зависимость);

в-с – участок, характеризующий область начала возникновения трещин

и пластической деформации. Если в точке **c** снять нагрузку, то процесс остановится и микротрещины закроются;

**c-d** – участок, характеризующий процесс развития образовавшихся трещин. Процесс неустойчивый, лавинообразный характер. Точка **d** соответствует максимальной сопротивляемости образца разрушению.

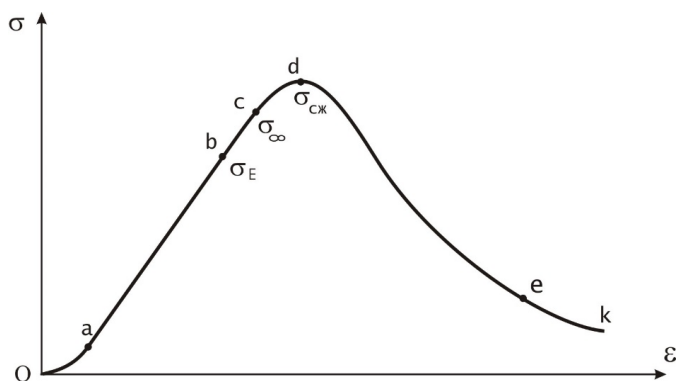


Рисунок 5.2 – Полная диаграмма деформирования образца горной породы.

**d-e** – участок, характеризующий уменьшение несущей способности образца. На этом участке наблюдают процесс дилатансии, т.е. увеличение объёма образца.

**e-k** – участок, характеризующий разрушение испытываемого образца.

Таким образом, горные породы не являются идеально упругими или идеально пластическими телами, в результате при их нагружении всегда наблюдается наряду с упругой деформацией, в той или иной степени, пластическая деформация.

## 5.2 Упругие свойства горных пород

Горные породы могут деформироваться в пределах упругости.

**Упругость** – свойство горной породы изменять форму и объем под влиянием силовых воздействий и полностью восстанавливать первоначальное состояние после устранения этих воздействий.

Упругие свойства горных пород проявляются только при кратковременном внешнем воздействии.

Для каждого вида приложенных нагрузок существует свой коэффициент пропорциональности между напряжениями и упругими деформациями: он является параметром породы, оценивающим ее упругие свойства.

К параметрам, характеризующим упругие свойства горных пород, следует относить:

- предел упругости  $\sigma_E$ , Па;
- модуль упругости (модуль Юнга)  $E$ , Па;
- модуль сдвига  $G$ , Па;
- модуль всестороннего сжатия  $K$ , Па;
- коэффициент Пуассона  $\nu$ , ед.

В лабораторных условиях упругие параметры горной породы можно установить при нагружении образцов на гидравлических прессах. Для этого исследуемые образцы должны иметь соотношение высоты ( $h$ ) к диаметру ( $d$ )

–  $\frac{h}{d} \geq 2$ . Такое требование позволяет обеспечить равномерное одноосное напряжённое состояние в средней части образца при его сжатии.

В начале испытаний, определяют предел прочности образца на одноосное сжатие ( $\sigma_{сж}$ ). Запись деформаций осуществляют с помощью проволочных тензометров, индуктивных датчиков часового типа и т.п. Обычно датчики располагают с 4-х сторон образца, а их показания усредняют. Испытания проводят в режиме многократного нагружения и разгрузки.

Типичный график деформирования горной породы для определения упругих параметров представлен на рис. 5.3

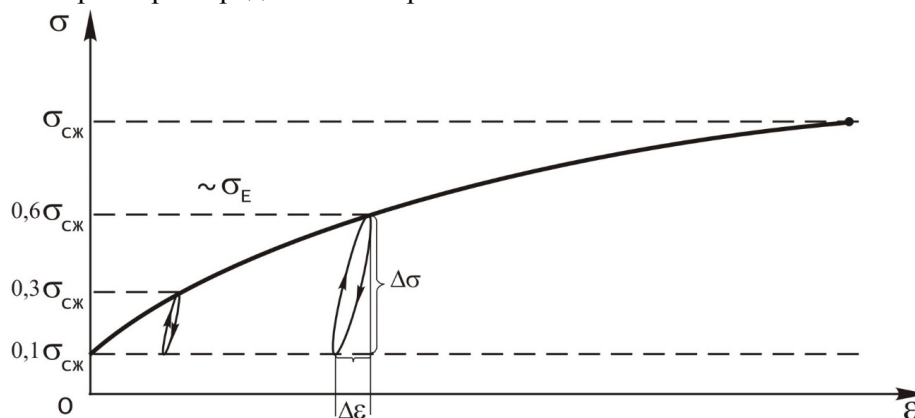


Рисунок 5.3 – Типичный график деформирования образца горной породы.

С помощью графика можно установить величины  $\Delta\sigma$  и  $\Delta\varepsilon$ , а по выражению

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (5.2)$$

определить модуль упругости.

По относительным изменениям линейных размеров в направлениях перпендикулярном и параллельном приложению нагрузки на образец определяют коэффициент Пуассона.

Таким образом, определив экспериментально на образцах пород характеристики  $E$  и  $\nu$ , можно расчётным путём определить значения остальных параметров.

Модуль сдвига, модуль упругости и коэффициент Пуассона связаны между собой зависимостью:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (5.3)$$

Модуль всестороннего сжатия определяется по формуле:

$$K = \frac{E}{3(1 + 2\nu)}. \quad (5.4)$$

Упругие свойства пород зависят от величины и рода прилагаемой нагрузки. С увеличением нагрузки при растяжении породы модуль упругости уменьшается, при сжатии – увеличивается. При сжатии порода уплотняется, увеличивается площадь контактов зёрен, соответственно уменьшается способность породы к дальнейшей деформации и, следовательно, возрастает модуль упругости.

Коэффициенты поперечных деформаций  $\nu$  горных пород теоретически могут изменяться в пределах от 0 до 0,5. Для большинства пород они колеблются в интервале значений от 0,14 до 0,35. Минимальные значения  $\nu$  имеют некоторые биотитовые и известковые сланцы, опал, гнейсы (0,01 - 0,08), максимальные – некоторые дуниты, амфиболиты (0,4 - 0,46).

Для горных пород Донбасса значения коэффициента Пуассона находятся в следующих пределах: алевролит – 0,1 - 0,49; аргиллит – 0,08 - 0,44; песчаник – 0,1 - 0,37; известняк – 0,13 - 0,44

### 5.3 Пластические и реологические свойства горных пород

Горные породы, так же, как и другие материалы, деформируются по-разному при мгновенном и при длительном приложении нагрузки, в результате чего проявляются их различные свойства.

**Пластичность** – явление роста деформаций при некотором возрастании напряжения сверх предела упругости без нарушения сплошности породы.

Пластическая деформация в породах обусловлена внутри- и межзёрненным скольжением. Внутризёрненное скольжение обусловлено дислокациями – сдвигами одной части кристалла относительно другой.

К параметрам, характеризующим пластические свойства горной породы, следует относить *модуль пластичности* ( $E_{пл}$ , Па), который представляет собой отношение прироста напряжений в пластической зоне до момента разрушения породы к полной пластической деформации

$$E_{пл.} = \operatorname{tg}\alpha_3 = \frac{\sigma_{сж} - \sigma_E}{\varepsilon_p - \varepsilon_E} \quad (5.5)$$

Параметры  $\sigma_{сж}$ ,  $\sigma_E$ ,  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_E$  можно определить из графика, представленного на рис. 5.4.

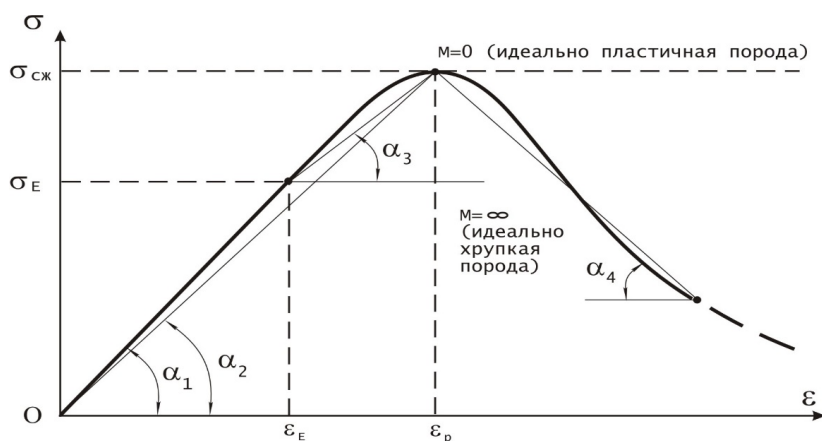


Рисунок 5.4 – График к расчёту модуля пластичности образца горной породы.

На графике  $\operatorname{tg}\alpha_1$  равен модулю упругости  $E$ ;  $\operatorname{tg}\alpha_2$  – модулю полных деформаций перед разрушением  $E_{деф}$ ;  $\operatorname{tg}\alpha_3$  – модулю пластичности  $E_{пл}$ ;  $\operatorname{tg}\alpha_4$  – модулю спада  $M$  несущей способности породы, который характеризует степень хрупкости процесса разрушения породы (поэтому его иначе называют – модуль хрупкости).

По величине модуля пластичности можно сравнить относительную пластичность горных пород. Обычно с увеличением предела прочности одноосному сжатию коэффициент пластичности уменьшается.

Пластичность зависит от минерального состава горных пород. Наличие жёстких кварцевых зёрен и полевого шпата в породе уменьшает её пластичность. Пластичность углей зависит от содержания в них углерода.

Модуль упругости более пластичных пород обычно ниже, чем пород менее пластичных. С увеличением числа пластичности глин возрастает их сжимаемость и водонепроницаемость.

Пластичность скальных пород увеличивается с повышением температуры и всестороннего давления. Породы, ведущие себя как хрупкие в обычных условиях, при повышенных давлениях и температурах приобретают явно выраженные пластические свойства. Температура ускоряет (интенсифицирует) процесс пластического течения. Пластические деформации при больших всесторонних давлениях объясняются тем, что в этих условиях более легко могут проявиться внутризёрненные движения и смещения, не приводящие к нарушению сплошности и к возникновению трещиноватости, т.е. к разрушающим деформациям.

**Реологические** свойства горных пород – свойства, которые характеризуют изменение деформаций и напряжений в горных породах при длительном действии нагрузок.

Механические характеристики горных пород определяют обычно при кратковременном приложении нагрузок. Элементы же систем разработки, горные выработки, крепи воспринимают нагрузки в течение многих лет.

Вопросами поведения материалов, в т.ч. и горных пород, в условиях длительных силовых воздействий занимается **реология – наука о течении вещества**.

В зависимости от внешних условий, изменение напряжённо-деформированного состояния твёрдого тела во времени может идти двумя путями. Например, нагрузим образец горной породы, имеющий форму цилиндра, некоторой постоянной неразрушающей нагрузкой, создающей практически мгновенно вполне определённую относительную деформацию, величина которой зависит от модуля упругости материала и величины приложенной нагрузки. В последующие моменты времени, несмотря на то, что напряжения не меняются, деформация не будет оставаться постоянной, как это следует из закона Гука. Величина ее будет монотонно возрастать.

Реологическое явление, заключающееся в том, что с течением времени при постоянном напряжении наблюдается рост деформаций, носит название **ползучести**.

В другом случае сдавим образец между двумя плитами пресса таким образом, чтобы в течение всего опыта расстояние между ними было строго фиксированным, т.е. не изменяющимся во времени. Станем измерять давление на плиты пресса со стороны образца и убедимся, что со временем величина его будет падать. Это реологическое явление носит название **релаксации напряжений**.

Задачей реологии является описание напряжённо-деформированного состояния горных пород и иных материалов с учётом их склонности к ползучести и релаксации. Эта задача сводится к составлению так называемых уравнений состояния, т.е. таких уравнений, которые связывают в единые соотношения компоненты напряжений, деформаций и их производных по времени.

Во всех имеющихся исследованиях полагается, что уравнения состояния достаточно точно описывают изменения напряжённо-деформированного состояния материалов в том случае, если внешние условия таковы, что ни деформации, ни напряжения нельзя считать постоянными.

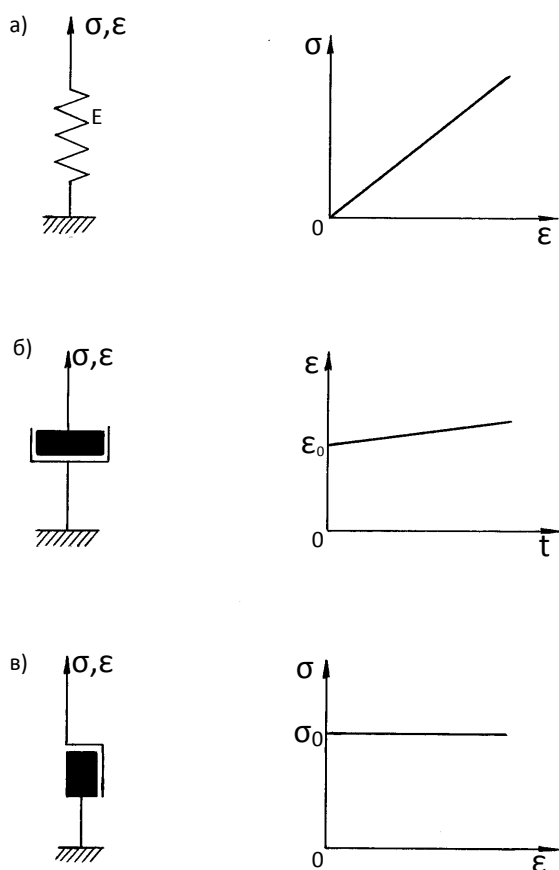


Рисунок 5.5 – Элементарные реологические модели: а) Гука; б) Ньютона; в) Сен-Венана.

Для наглядности представления реологических процессов обычно используют метод структурных моделей. Этот метод состоит в том, что свойства тела описываются при помощи особым образом подобранной механической модели. Модель должна состоять из элементов, идеально отражающих основные – фундаментальные – качества исходного материала. Так, например, при определённом уровне нагрузок и достаточно быстром их приложении все твёрдые и связные горные породы ведут себя как упругие тела, подчиняющиеся закону Гука. Это свойство твёрдых тел моделируется

пружиной, жёсткость которой пропорциональна модулю упругости (элемент Гука) (рис. 5.5, а).

Упругие свойства твёрдых тел не зависят от времени:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \rightarrow t = 0$$

Специальными исследованиями установлено, что границы зёрен в поликристаллических материалах, к которым относятся и горные породы, ведут себя как вязкая жидкость. Это обстоятельство приводит к тому, что температура существенным образом изменяет внутреннее трение в таких телах, их деформационные и прочностные характеристики. В условиях достаточно длительных внешних нагрузок поликристаллические материалы ведут себя в целом, как очень вязкая жидкость. Вязкие свойства материалов моделирует элемент Ньютона (рис. 5.5, б), который представляет собой демпфер - цилиндр с отверстиями, погруженный в вязкую жидкость. Скорость деформирования в этом случае пропорциональна действующему напряжению

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\xi} \sigma, \quad (5.6)$$

где  $\xi$  – коэффициент вязкости,  $\frac{1}{\xi}$  – коэффициент текучести.

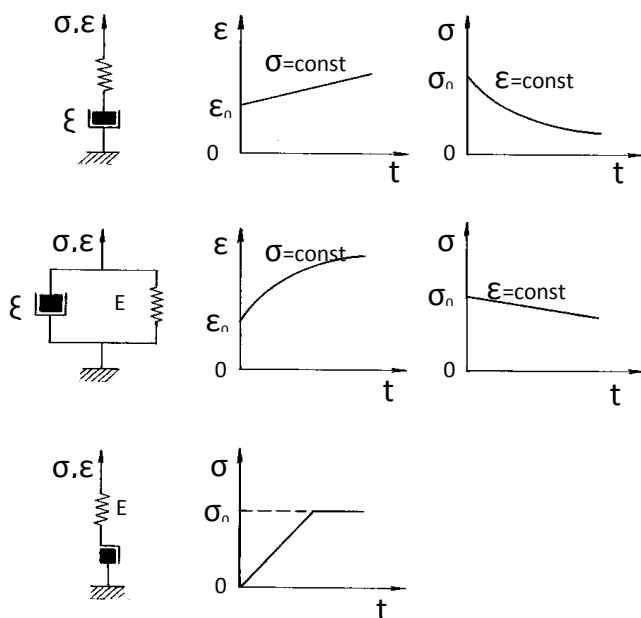


Рисунок 5.6 – Реологические модели: а) Максвелла; б) Кельвина-Фойгта; в) Сен-Ванана.

При заданном постоянном напряжении полная деформация к моменту времени  $t$  составит  $\varepsilon = \frac{1}{\xi} \sigma_0 t$ , а при изменяющихся во времени напряжениях

$$\varepsilon = \frac{1}{\xi} \int_0^t \sigma(t) dt$$

При достаточно больших нагрузках в горных породах начинается



разрушение внутренних структурных связей, что приводит к образованию необратимых (пластических) деформаций. Это свойство реальных твёрдых тел отражает элемент Сен-Венана. Он представляет собой элемент сухого трения: брусок, лежащий на жёсткой поверхности (рис. 5.5, в). При нагрузке, меньшей некоторой критической величины  $S$ , деформация равна нулю, при большей – деформация неопределённа: система приходит в движение и брусок остаётся там, где прекратилось действие силы.

Таким образом, рассмотренные выше элементарные механические модели имеют вполне определённую физическую основу. Соединяя структурные элементы друг с другом тем или иным образом, создают более сложные модели, в большой степени отражающие реальные свойства конкретных материалов. Схемы соединения этих элементов определены лишь феноменологически, т.е. по формальному соответствию свойств составленной модели свойствам реальных тел. Одна из первых простых структурных механических моделей твёрдого тела была предложена Максвеллом. Она представляет собой соединённые последовательно вязкий и упругий элементы (рис. 5.6, а).

Нагрузка, приложенная к системе, вызывает мгновенную упругую деформацию пружины, соответствующую закону Гука. В дальнейшем деформация системы растёт во времени с постоянной скоростью за счёт вязкого элемента. При снятии нагрузки модель получит обратную деформацию, равную начальной упругой, вязкая составляющая деформации необратима.

Если модели задать постоянную деформацию, то поршень будет двигаться вверх до тех пор, пока натяжение пружины не станет равным нулю и вся упругая деформация перейдёт в вязкую. Это явление соответствует релаксации напряжений.

Уравнение состояния для среды Максвелла можно получить из следующих соображений. Скорость деформации  $\varepsilon'$  очевидно должна складываться из скорости упругой деформации  $\varepsilon'_{yn} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt}$  и скорости вязкой деформации  $\varepsilon'_v = \frac{\sigma}{Et_0}$ , где  $\frac{1}{Et_0} = \frac{1}{\xi}$  – коэффициент пропорциональности. Таким образом,

$$\varepsilon' = \frac{1}{E} \sigma' + \frac{\sigma}{Et_0}. \quad (5.7)$$

Здесь  $t_0$  – некоторая постоянная, имеющая размерность времени.

Из уравнения (5.7) получим

$$E \cdot \varepsilon' = \sigma' + \frac{\sigma}{t_0}, \text{ или } E \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{t_0}. \quad (5.8)$$

Выражение (5.8) и есть дифференциальное уравнение состояния среды Максвелла. После интегрирования, при  $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ , это уравнение приводится к выражению

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left( 1 + \frac{t}{t_0} \right), \text{ или } \varepsilon = \varepsilon_0 \left( 1 + \frac{t}{t_0} \right), \quad (5.9)$$

где произвольная постоянная интегрирования  $\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E}$  есть упругая деформация при  $t = 0$ .

При  $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$  получим

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right). \quad (5.10)$$

Таким образом, ползучесть деформаций в среде Максвелла характеризуется линейным законом, релаксация напряжений – экспоненциальным. Постоянная величина  $t_0$  называется **периодом релаксации** и, как следует из формулы (5.10), она численно равна времени, за которое напряжения падают в  $e$  раз, где  $e$  – основание натуральных логарифмов.

Эта схема только качественно отражает свойства реальных тел, количественные же результаты плохо согласуются с опытом.

Структурная модель среды Кельвина-Фойгта представляет собой параллельное соединение вязкого и упругого элементов (рис. 5.6, б). Приложение нагрузки в такой среде не вызывает мгновенных упругих деформаций. Деформации растут от нуля при  $t=0$  до какой-то величины, определяемой силой  $P$  и упругостью пружины.

При разгрузке деформация не падает до нуля. Релаксации напряжений в такой среде не наблюдается. Уравнение состояния получим, суммируя упругую часть напряжения, пропорциональную деформации, и вязкую часть, пропорциональную скорости деформации:

$$\sigma = a\varepsilon + b \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (5.11)$$

При  $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$  получим

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{a}{b}\varepsilon = \frac{1}{b}\sigma_0. \quad (5.12)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{b} + c \exp\left(-\frac{a}{b}t\right), \quad (5.13)$$

а при  $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$  получим

$$\sigma = a\varepsilon_0. \quad (5.14)$$

Очевидное несоответствие двух описанных выше моделей свойствам реальных сред побудило Пойтинга и Томпсона предложить модель так называемой стандартной линейной среды (рис. 5.7). Она представляет собой модель Максвелла, параллельно которой помещён ещё один упругий элемент. Нагрузка, приложенная к такой модели, вызовет прежде всего мгновенную упругую деформацию обеих пружин.

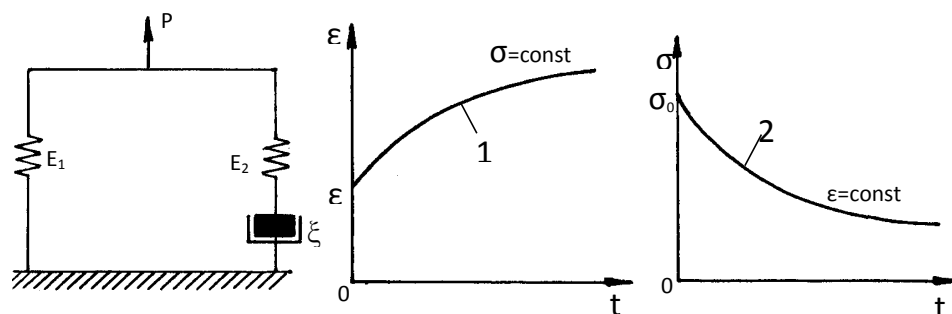


Рисунок 5.7 – Модель среды Пойтинга-Томпсона: 1 – кривая ползучести; 2 – кривая релаксации напряжений.

В дальнейшем деформация будет расти за счёт растяжения пружин, но она имеет предел, определяемый величиной силы  $P$  и упругостью пружины 1.

При снятии нагрузки деформация мгновенно уменьшается на некоторую величину, зависящую от степени растяжения пружины 2, а затем постепенно падает до нуля. В такой модели наблюдается частичная релаксация напряжений. Если зафиксировать деформацию, поршень будет двигаться до тех пор, пока напряжение в пружине 2 не упадёт до нуля. Напряжение же в пружине 1 останется неизменным.

Дифференциальное уравнение состояния среды имеет вид

$$\sigma + a \frac{d\sigma}{dt} = b\varepsilon + c \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (5.15)$$

При  $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$  имеем

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{b}{c} \varepsilon = \frac{1}{c} \sigma_0. \quad (5.16)$$

Интеграл этого уравнения равен

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{b} + \left( \varepsilon_0 - \frac{\sigma_0}{b} \right) \exp\left( -\frac{b}{c} t \right). \quad (5.17)$$

При  $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$  получим уравнение

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{a} \sigma = \frac{b}{a} \varepsilon_0, \quad (5.18)$$

решение которого имеет вид

$$\sigma = b\varepsilon_0 + (\sigma_0 - b\varepsilon_0) \exp\left( -\frac{t}{a} \right). \quad (5.19)$$

Данные экспериментов свидетельствуют о том, что во всех случаях при достаточно высоких нагрузках деформация после снятия нагрузки мгновенно уменьшается на некоторую величину, а затем постепенно уменьшается до некоторой отличной от нуля величины. В модели Максвелла при разгрузке деформация не изменяется вовсе, а моделях Кельвина-Фойгта и Пойтинга-Томпсона при  $t \rightarrow \infty$  деформация уменьшается до нуля.

Таким образом, эти модели, удовлетворительно описывая поведение реальной среды при нагрузке, становятся непригодными для описания разгрузки.

Для более полного описания поведения реальной среды под нагрузкой механическая модель должна содержать ещё один структурный элемент, учитывающий возникновение пластических деформаций.

Простейшая модель такой упруго-пластической среды была предложена Сен-Венаном. Она представляет собой элемент сухого трения, соединённый последовательно с упругим элементом Гука (рис. 5.6, в). В этой модели деформация тела состоит из двух частей: обратимой упругой и необратимой пластической. Реологических явлений в модели не происходит.

Условие возникновения пластических деформаций записывается в виде  $\tau_{\max} = S$ .

где  $S$  – некоторая механическая константа моделируемой среды: предел прочности на одноосное сжатие, растяжение, угол внутреннего трения и т.п.

При последовательном соединении модели Сен-Венана и элемента вязкого трения можно получить модель Бингама (рис. 5.8). При нагрузке, превышающей предел текучести, возникает течение. При постоянной нагрузке скорость деформации также постоянна. После снятия нагрузки упругая деформация исчезает, вязкопластическая остаётся. Релаксация напряжений не наблюдается.

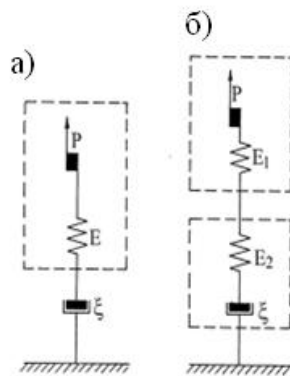


Рисунок 5.8 – Модель среды: Бингама (а) и Шведова (б).

Уравнение состояния получим, суммируя пластическую часть напряжений, равную предельному напряжению сдвига

$$\sigma_{nl} = \tau_s \sqrt{3}, \quad (5.20)$$

где  $\tau_s$  – предел прочности на сдвиг, и вязкую часть, пропорциональную скорости деформаций

$$\sigma_v = a \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (5.21)$$

Таким образом, имеем

$$\sigma = \tau_s \sqrt{3} + a \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (5.22)$$

При  $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$  получим

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\sigma_0 - \tau_s \sqrt{3}}{a} t. \quad (5.23)$$

При  $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$

$$\sigma_s = \tau_s \sqrt{3}.$$

Шведовым была предложена модель, представляющая собой последовательное соединение моделей среды Сен-Венана и Максвелла. Эта среда при нагрузке, не превосходящей предела текучести, ведёт себя как упругая. При большей нагрузке среда начинает течь, причём напряжение в ней зависит от скорости деформации.

При разгрузке часть упругой деформации, соответствующая пружине 1 исчезает мгновенно, а часть упругих деформаций, соответствующая пружине 2, переходит в вязкую. При постоянной деформации часть напряжения, соответствующая пружине 1, не релаксирует.

Уравнение состояния среды Шведова имеет вид

$$\sigma + b \frac{d\sigma}{dt} = \tau_s \sqrt{3} + a \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (5.24)$$

При  $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$  решение уравнения (5.24) имеет вид

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\sigma_0 - \tau_s \sqrt{3}}{a} t, \quad (5.25)$$

при  $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$

$$\sigma_s = \tau_s \sqrt{3} + c \exp\left(-\frac{t}{b}\right). \quad (5.26)$$

Сравнивая среды Бингама и Шведова, можно отметить их существенную общность. Часто в литературе их объединяют одним названием Бингама-Шведова, имея в виду модель Бингама.

Общее уравнение всех рассмотренных выше сред имеет вид:

$$a_1 + a_2 \varepsilon + a_3 \frac{d\varepsilon}{dt} = a_4 \sigma + a_5 \frac{d\sigma}{dt}. \quad (5.27)$$

В самом деле, при  $a_1 = a_2 = 0$  получим уравнение среды Максвелла; при  $a_1 = a_5 = 0$  – среды Фойгта; при  $a_1 = 0$  – среды Пойтинга-Томпсона; при

$a_2 = a_3 = a_5 = 0$  – среды Сен-Венана; при  $a_2 = a_5 = 0$  – среды Бингама; при  $a_2 = 0$  – среды Шведова.

С точки зрения релаксации все среды можно разделить на релаксирующие и нерелаксирующие. К первым относится среда Максвелла, Пойтинга-Томпсона, Шведова, ко вторым – Кельвина-Фойгта, Сен-Венана, Бингама.

Существуют модели более приближенные к реальной среде. К ним относится модель Бюргерса, или компаунд-модель (рис. 5.9). Она учитывает наиболее важные, имеющие практическое значение, составляющие процесса деформирования породы: мгновенные деформации, деформации запаздывающей упругости и деформации вязкой текучести.

Следует отметить, что чем сложнее модель, тем хуже она поддается математическому описанию. Поэтому при выборе реологических моделей руководствуются принципом разумной достаточности.

Лабораторные исследования реологических свойств горных пород ведутся в ограниченных размерах, что связано с рядом определённых трудностей. Чаще всего изучают ползучесть деформаций и значительно реже – релаксацию напряжений.

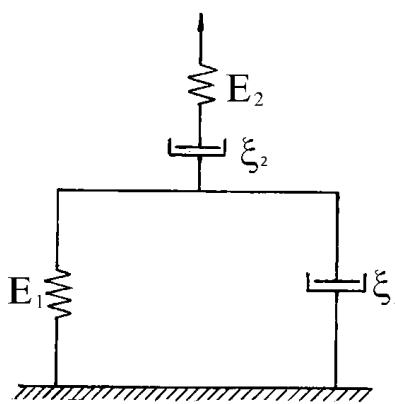


Рисунок 5.9 – Модель Бюргерса или компаунд-модель.

Исследования связаны с длительными экспериментами, которые продолжаются месяцы и годы. В связи с этим в качестве нагрузочных устройств используют пружинные или рычажные устройства. С их помощью получают кривые при разных нагрузках (от 30 до 80% от разрушающей). Особенностью кривых ползучести является то, что в первые часы нагружения развивается основная часть упруго-вязких деформаций, а в дальнейшем рост их существенно замедляется и кривые асимптотически стремятся к некоторому пределу, зависящему от величины заданной нагрузки. Несколько иначе протекает процесс релаксации напряжений. Форма кривых зависит от генезиса, состава и строения горной породы.

#### 5.4. Понятие о теории наследственной ползучести

Согласно современным представлениям, напряжения, возникающие в реальных телах, состоят из двух частей: первое слагаемое зависит от деформации в данный момент времени  $t$ , второе – от деформаций,

существовавших в теле в течение времени, предшествовавшего настоящему моменту времени – (рис. 5.10). Время изменяет структуру.

Теория, позволяющая определять деформации в среде с учётом истории ее нагружения, называется **теорией наследственной ползучести**.

Теория наследственного изменения внутренних факторов с учётом «памяти» материала о всех временных структурных изменениях, возникающих в процессе нагружения, и предполагающая линейную зависимость между напряжениями и деформациями в любой момент времени, получила название **теории линейной наследственной ползучести**.

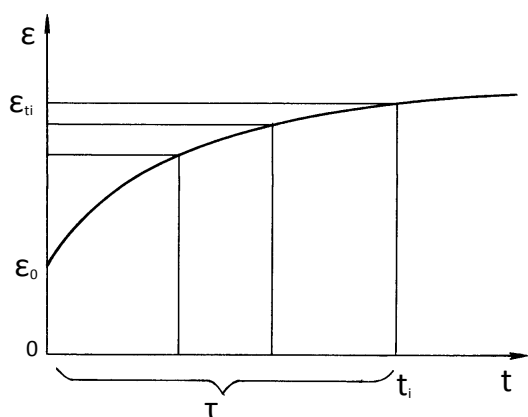


Рисунок 5.10 – Процесс деформирования твёрдого тела, имеющего предысторию нагружения.

Теория линейной наследственности была предложена Л. Больцманом с использованием математического аппарата интегральных уравнений В. Вольтера.

В соответствии с этой теорией, деформации среды под действием внешних сил продолжают и после их приложения (наследственность), при этом деформации в каждый момент времени прямо

пропорциональны действовавшим в разные моменты времени напряжениям (линейность) и суммируются, растут во времени (принцип суперпозиции).

Проиллюстрируем изложенное выше на следующем примере. Построим кривые ползучести  $\varepsilon=f(t,\sigma)$  при разных уровнях напряжения (рис. 5.11, а). Затем в координатах « $\sigma$ - $\varepsilon$ » построим графики в моменты времени  $t_i$  ( $i=1, 2, 3...$ ) (рис. 5.11, б). Если получившиеся при этом изохронные зависимости являются прямыми линиями (или близкими к ним), то мы имеем дело с линейной наследственной средой.

Ползучесть материалов в теории линейной наследственности описывается интегральным уравнением Вольтера второго рода

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t L(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \quad (5.28)$$

где  $\sigma(t)$  и  $\varepsilon(t)$  – напряжения и деформации в настоящий момент времени  $t$ ,



$\tau$  – время, предшествующее моменту времени  $t$ ;

$L(t)$  – некоторая функция, учитывающая влияние времени на деформации и напряжения в теле.

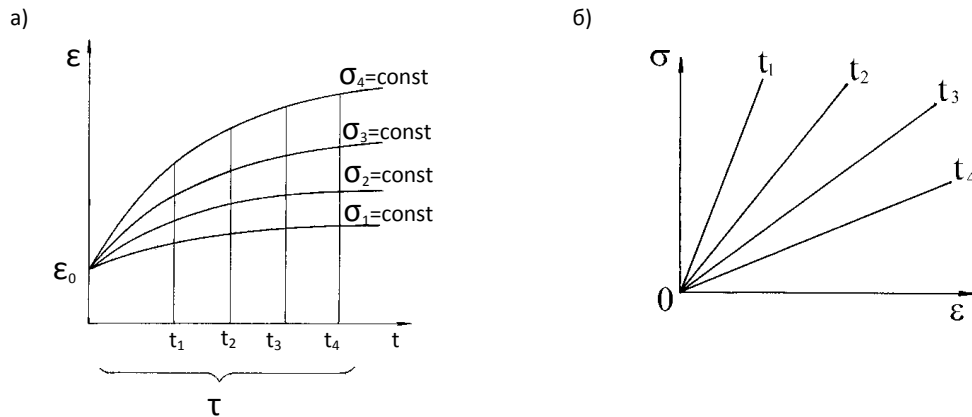


Рисунок 5.11 – Деформирование во времени наследственной среды.

При  $\sigma(t) = \sigma_0 = \text{const}$  из соотношения (5.28) получим уравнение ползучести деформаций

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left( 1 + \int_0^t L(\tau) d\tau \right). \quad (5.29)$$

Дифференцируя обе части уравнения (5.29) по времени, получим выражение:

$$L(t) = \frac{E}{\sigma_0} \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (5.30)$$

из которого следует, что  $L(t)$  представляет собой функцию скорости ползучести. Функцию же  $L(t-\tau)$  называют **ядром интегрального уравнения Вольтера** (5.28). Решая его относительно  $\sigma(t)$ , получим,

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 - \int_0^t K(t-\tau)\varepsilon(\tau) d\tau. \quad (5.31)$$

При  $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 = \text{const}$ , получим из (5.31) уравнение релаксации напряжений

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 \left( 1 - \int_0^t K(\tau) d\tau \right). \quad (5.32)$$

Дифференцируя обе части уравнение (5.32) по  $t$ , получим выражение для  $K(t)$

$$K(t) = -\frac{1}{E\varepsilon_0} \frac{d\sigma(t)}{dt}. \quad (5.33)$$

Функции  $K(t)$  и  $L(t)$  взаимосвязаны и это позволяет по одной из них найти другую. Функция  $K(t)$  называется **резольвентой интегрального уравнения Вольтера** (5.29).

Уравнение ползучести (5.29) можно записать в виде

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E}, \quad (5.34)$$

где  $\bar{E}$  – временной оператор, определяемый в результате обработки экспериментальных данных. Ю.Н. Работнов показал, что задачу линейной наследственности можно формально рассматривать, как задачу теории упругости, в которой вместо упругих постоянных  $E$  и  $\nu$  необходимо использовать их временные аналоги (интегральные операторы) –  $\bar{E}$  и  $\bar{\nu}$ . Ж.С. Ержанов установил, что деформирование ряда горных пород до определённого уровня нагружения соответствует уравнению (5.29) с ядром ползучести в виде степенной функции (ядро типа Абеля):

$$L(t, \tau) = \delta(t - \tau)^{-\alpha}, \quad (5.35)$$

где  $\delta$  и  $\alpha$  – реологические характеристики, получаемые экспериментально.

Интегральное уравнение ползучести с ядром Абеля имеет следующее решение

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left( 1 + \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right) = \frac{\sigma_0}{E}. \quad (5.36)$$

Сложность решения задач методами теории наследственной ползучести заключается в расшифровке временных операторов.

Часто при постоянстве граничных условий для решения задач геомеханики используют метод переменных модулей, который заключается в

том, что вместо интегральных операторов  $\bar{E}$  и  $\bar{\nu}$  используют временные функции  $E(t)$  и  $\nu(t)$ .

Из выражения (5.36) следует, что временная функция модуля деформации имеет вид

$$E(t) = \frac{E}{1 + \Phi}, \quad (5.37)$$

где  $\Phi$  - функция ползучести, равная

$$\Phi = \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha}. \quad (5.38)$$

Временная функция для коэффициента Пуассона определяется выражением

$$\nu(t) = 0,5 - \frac{0,5 - \nu}{1 + \Phi}. \quad (5.39)$$

Следует отметить, что использование теории наследственной ползучести оправдано только в том случае, когда действующие напряжения не превышают длительной прочности массива.

Реологические процессы в горных породах обычно описывают с помощью условно выделенных реологических явлений: ползучесть и релаксация напряжений.

Характер проявления ползучести и релаксации в горных породах во времени  $t$  изображён на рис. 5.7.

**Ползучесть** – явление постепенного роста деформаций породы во времени при постоянном напряжении, не превышающем предела упругости.

Скорость развития деформаций ползучести на основании теории наследственности часто описывают следующим уравнением

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \sigma_{\tau} \delta(t - \tau)^{-\alpha}, \quad (5.40)$$

где  $\sigma_{\tau}$  – напряжения в породе в момент времени  $\tau$ ;  $t$  – другой, больший, чем  $\tau$  момент времени;  $\alpha$  и  $\delta$  – коэффициенты ядра ползучести для данной породы.

Они и являются параметрами данного свойства породы; для пород  $\alpha \approx 0,7$  и  $\delta = (2-5)10^{-3}$ .

**Релаксация напряжений** – явление постепенного снижения напряжений в породе при постоянной её деформации.

Релаксацию можно представить следующим образом. Если образец горной породы зажать между двумя плоскостями и создать условия, где  $\varepsilon = \text{const}$ , то давление на плоскости со стороны образца в начальный момент будет равно  $\sigma$ , а со временем станет уменьшаться, стремясь к определённой величине.

Уравнения кривой релаксации обычно приводят в следующем виде

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{t_0}}, \quad (5.41)$$

где  $t_0$  – *период релаксации* (параметр данного свойства породы), т.е. отрезок времени, за который напряжение снижается в  $e$  раз (для горных пород несколько сотен лет, для стекла, например, около 100 лет, а для воды –  $10^{11}$  с).

Рассмотрение ползучести и релаксации пород показывает, что существует общая закономерность изменения свойств пород со временем действия нагрузки, – чем более длительно воздействие на породу нагрузки, тем слабее становятся упругие свойства пород, уменьшается предел упругости и тем сильнее проявляются её пластические свойства.

В лабораторных условиях реологические параметры горных пород можно определить поперечным изгибом образцов-балочек (рис. 5.12). Для этих целей используют образцы призматической формы, поперечные размеры которых в 6-10 раз меньше его длины. Образцы нагружают постоянной нагрузкой, создающей усилие  $F$ .

С учётом величин  $F$  и  $t$  устанавливают величину прогиба  $y_t$ , а реологические параметры  $\alpha$  и  $\delta$  определяют из выражения

$$\frac{y_t - y_0}{y_0} = \frac{\delta}{1 - \alpha} \cdot t^{1-\alpha}, \quad (5.42)$$

где  $y_0$  – величина мгновенного, упругого прогиба, мм.

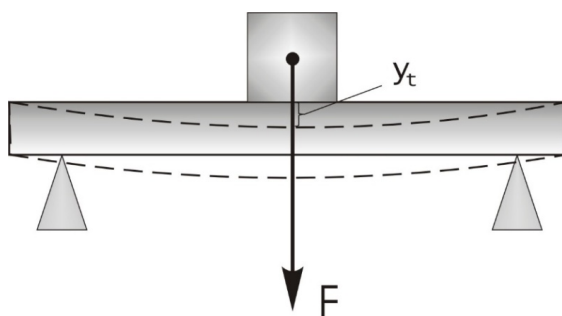


Рисунок 5.12 – Метод испытания «поперечный изгиб образцов-балочек».

$$y_0 = \frac{\kappa \cdot F}{E}, \quad (5.43)$$

$\kappa$  – коэффициент влияния касательных напряжений.

$$\kappa = \frac{b^3}{4ah^3} \left( 1 + 2.95 \frac{h^2}{b^2} - 0.02 \frac{h}{b} \right), \quad (5.44)$$

где  $h$ ,  $a$ ,  $b$  – соответственно толщина, ширина и длина образца, мм.

Обычно измеряют во времени несколько раз величину прогиба ( $y_t$ ) и получают несколько уравнений, которые затем решают как систему линейных уравнений, относительно параметров  $\alpha$  и  $\delta$ . Параллельно испытывают 4-5 образцов.

Весьма характерной чертой реологических процессов, в частности ползучести, является зависимость деформации наблюдаемой в данный момент от характера всего процесса нагружения горной породы, или, другими словами, от всей предыдущей истории его деформирования. Это свойство горных пород называют наследственностью.

### Контрольные вопросы

1. Какие виды деформаций Вам известны? Приведите соответствующие графики.
2. Приведите полную диаграмму деформирования образца горной породы, объясните ее.
3. Что называется упругостью горной породы?
5. Какие параметры характеризуют упругие свойства горной породы?
6. Приведите график деформирования горной породы и формулу для определения модуля упругости (модуля Юнга).
7. Что такое пластичность горной породы?
8. Приведите график для определения пластичности горной породы.
9. Какие свойства горных пород называются реологическими?
10. Что называется явлением ползучести и релаксации?
11. Назовите основные принципы составления реологических моделей.
12. Приведите примеры моделей, характеризующих упругие, пластические (вязкие) и необратимые (разрушающие) деформации.

## ТЕМА 6 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРНЫХ ПОРОД

*Специальные горно-технологические параметры* – это комплексные показатели свойств пород, установленные эмпирическим путём и характеризующие поведение пород при воздействии на них конкретным инструментом, механизмом или технологическим процессом.

Эти параметры подразделяются на группы по принципу принадлежности к определённым процессам технологического воздействия:

– параметры, характеризующие общую разрушаемость пород механическим способом (твёрдость, крепость, вязкость, дробимость);

– параметры, характеризующие разрушаемость пород определёнными механизмами (буримость, взрываемость, сопротивляемость пород резанию и т.д.);

– параметры, оценивающие воздействие породы на инструмент (абразивность);

– параметры, оценивающие качество полезного ископаемого (для углей – коксуюемость; для строительных материалов – термостойкость и морозостойкость);

– параметры, устанавливающие производительность или эффективность различных процессов воздействия на горные породы (обогатимость, флотуруемость, устойчивость в отвалах и т.д.);

– параметры, определяющие особое поведение пород при разработке месторождений полезных ископаемых (выбросоопасность, метаноносность, самовозгораемость и т.д.).

К основным горно-технологическим параметрам пород относятся: крепость, контактная прочность, абразивность, дробимость, сопротивляемость пород резанию, буримость, взрываемость, липкость, размокаемость, набухание и сопротивление копанию.

### 6.1 Крепость

Для сравнения различных пород по разрушаемости, а также для разработки нормативов производительности машин и приближённой экономической оценке разрушения пород в 1912 году проф. М.М. Протодяконовым (старшим) было предложено понятие крепости. Крепость рассматривалась как сопротивление пород разрушению, независимо от рода применяемых машин или механизмов. Мерой этого свойства является коэффициент крепости  $f$ . Для его определения проф. М.М. Протодяконов (старший) испытывал на одноосное сжатие образцы

пород кубической формы с размером ребра 5 см. Пределы изменения прочности на одноосное сжатие образцов составили от 3 до 200 МПа. Тогда коэффициент крепости определялся из выражения:

$$f = \sigma_{сж} / 10 \quad (6.1)$$

где  $\sigma_{сж}$  – порочность на сжатие испытанного образца, МПа; 10 – предел прочности на сжатие эталонного образца, МПа.

Проф. М.М. Протоdjяконов разделил все породы по величине коэффициента крепости на 10 категорий (табл. 6.1).

Таблица 6.1 – Шкала крепости пород по М.М. Протоdjяконову

Категория крепости	Степень крепости	Коэффициент крепости, $f$
I	Высшей степени крепкие	20
II	Очень крепкие	15
III	Крепкие	10
IIIa	Крепкие	8
IV	Довольно крепкие	6
IVa	Довольно крепкие	5
V	Средней крепости	4
Va	Средней крепости	3
VI	Довольно мягкие	2
VIa	Довольно мягкие	1,5
VII	Мягкие	1,0
VIIa	Мягкие	0,8
VIII	Землистые	0,6
IX	Сыпучие	0,5
X	Плывучие	0,3

Предлагая формулу для определения коэффициента крепости, проф. М.М. Протоdjяконов имел сравнительно небольшое количество данных о результатах испытаний пород на сжатие. Кроме того, из-за невысокого уровня развития испытательной техники того времени, средняя величина коэффициента крепости была занижена. Поэтому в 1958 году проф. Л.И. Барон по результатам испытаний цилиндрических образцов на сжатие предложил следующую формулу для определения коэффициента крепости

$$f_B = \sigma_{сж} / 300 + \sqrt{\sigma_{сж} / 30} \quad (6.2)$$

В 70-е годы была предложена формула для определения осреднённого коэффициента крепости породы

$$f_{\text{оср}} = (\sigma_{\text{сж}} + 10\sigma_{\text{р}}) / 60 + \sqrt{(\sigma_{\text{сж}} + 10\sigma_{\text{р}}) / 12} \quad (6.3)$$

где  $\sigma_{\text{р}}$  – предел прочности породы на одноосное растяжение, МПа.

В настоящее время известно более пятидесяти методов определения коэффициента крепости породы, в том числе – по производительности труда бурильщика в смену; по количеству взрывчатого вещества, расходуемого на разрушение породы взрывом и т.д. В соответствии с Государственным стандартом Украины коэффициент крепости породы определяется методом толчения породы с помощью прибора ПОК.

Прибор ПОК (рис. 6.1.) состоит из стакана 1, вставленного в него трубчатого копра 2, внутри которого свободно помещается гиря 3, массой  $2,4 \pm 0,01$  кг с ручкой 4, привязанной к гире шнуром. Трубчатый копёр имеет в верхней части отверстия, в которые вставляют штифты 5, ограничивающие подъём гири. В комплект прибора входят: объёмометр, состоящий из стакана 6 и плунжера 7 со шкалой измерений с диапазоном показаний от 0 до 150 мм вдоль его продольной оси; сито с сеткой №05 ( $d = 0,55$  мм) для отсева порций после дробления.

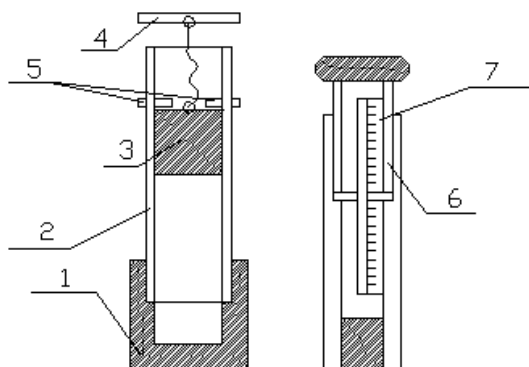


Рисунок 6.1 – Прибор для определения крепости (ПОК).

Отобранную пробу горной породы раскалывают молотком на твёрдом основании до получения кусков размером 20-40 мм. Из измельчённого материала пробы отбирают 20 навесок массой 40-60 грамм каждая. Число сбрасывания гири на каждую навеску устанавливают при дроблении первых пяти навесок. Каждую навеску дробят в стакане гирей, падающей с высоты 0,6 м. Число сбрасывания гири принимают в зависимости от ожидаемой крепости породы от 5 до 15 сбрасывания на каждую навеску.



Оставшиеся 15 навесок дробят в приборе последовательно в установленном режиме испытания при постоянном числе сбрасывания гири.

После дробления каждых пяти навесок их материал просеивают в сите; подрешётный продукт сита ссыпают в объёмометр, измеряют плунжером высоту столбика мелочи  $h$ .

Коэффициент крепости породы для каждой серии испытаний пяти навесок определяют по формуле

$$f = 20n / h \quad (6.4)$$

где 20 – эмпирический числовой коэффициент;  $n$  – число сбрасывания гири при испытании одной навески;  $h$  – высота столбика мелочи после испытания 5 навесок, мм.

Окончательный результат испытаний определяется как среднее арифметическое.

## 6.2 Контактная прочность

Контактная прочность характеризует сопротивление породы разрушению при внедрении в её поверхность твёрдого тела.

Для большинства пород используется метод определения контактной прочности, разработанный в ИГД им. А.А. Скочинского.

Согласно этого метода, вдавливание цилиндрического штампа с плоским основанием производится в не шлифованную поверхность породного образца. В связи с тем, что получаемые результаты существенно отличаются от значения твёрдости при вдавливании штампа, этот показатель назвали контактной прочностью.

Образец породы объёмом 150-200 кубических сантиметров и толщиной не менее 100-120 мм (в противном случае возможно раскалывание породы при вдавливании штампа) должен иметь примерно параллельные грани. При необходимости поверхность образца подвергается обдирке на абразивном круге или грубой околке. Замеряется площадь  $S$  вдавливаемой в породу части штампа. Образец помещается под пресс, с помощью которого производится вдавливание штампа.

Нагружение образца производится в один приём со скоростью 3415 мм/мин до появления лунки выкола. По шкале силоизмерителя прессы определяется усилие вдавливания  $P$ , необходимое для образования лунки выкола. Нагружение образца производится на разных участках одной поверхности не менее 25-30 раз.

Показатель контактной прочности определяется в кгс/мм по формуле

$$P_k = \sum \frac{P_i}{nS}, \quad (6.5)$$

где  $P_i$  – разрушающее усилие для образования лунки выкола для  $i$ -го испытания, кгс;  $n$  – количество испытаний;  $S$  – сечение рабочей поверхности штампа, мм.

По величине показателя контактной прочности все породы разделены на 12 классов. Например, I класс пород называется «слабые» и имеет  $P_k < 30$  кгс/мм<sup>2</sup>, а XII класс, «крепчайшие» –  $P_k > 565$  кгс/мм<sup>2</sup>.

### 6.3 Абразивность

Абразивность характеризует способность породы изнашивать при трении о неё инструмент (горных машин или оборудования). От абразивности пород в большой степени зависит производительность буровых машин, добычных и проходческих комбайнов.

Абразивность оценивается по износу материала, контактирующего с горной породой. Различают абразивность пород в массиве и в разрушенном (раздробленном состоянии). Во втором случае величина абразивности существенно выше.

Известные методы определения абразивности можно разделить на две группы:

- лабораторные (основаны на измерении массового износа при истирании породного образца о наждачную шкурку или стального эталонного стержня, трущегося о породу);
- производственные (абразивность породы оценивается по изменению осевого усилия при сверлении породы с постоянным усилием подачи).

Сущность лабораторного метода измерения относительной износостойкости пород заключается в следующем. К вращающемуся полуму цилиндру, обтянутому наждачной шкуркой, с помощью специальных грузов прижимают образец горной породы. По результатам испытаний строят графики зависимости массового износа образца от времени при заданных усилиях прижатия образца к поверхности цилиндра и угловой скорости вращения. Затем, по ним определяют относительную износостойкость и абразивность. Такой метод испытаний часто применяется для оценки износостойкости различных строительных материалов.

Для горных пород, испытываемых на абразивность, чаще используется следующая методика, разработанная в ИГД им. А.А. Скочинского. Сущность метода заключается в истирании эталонного цилиндрического стержня из

термически необработанной стали (марка стали У8А) диаметром 8 мм об естественную поверхность породного образца на переоборудованном настольном сверлильном станке при осевом усилии 0,15 кН и скорости вращения 400 об/мин. За показатель абразивности породы (А), принята потеря массы эталонного стержня в мг за 10 мин испытаний. Перед испытанием эталонный стержень взвешивается с точностью до 0,1 мг ( $G_1$ ). После этого, образец породы массой от 0,1 до 4,0 кг зажимают между деревянными прокладками в станочных тисках, так, чтобы верхняя поверхность была горизонтальной. Затем шпиндель, с закреплённым в патроне эталонным стержнем длиной 50-70 мм опускают на образец и включают привод станка на 10 мин. По окончании опыта эталонный стержень взвешивают ( $G_2$ ). Показатель абразивности вычисляют по формуле

$$A = (G_1 - G_2) / 2 \quad (6.6)$$

По величине показателя абразивности все породы разделены на 8 классов (табл. 6.3).

Таблица 6.3 – Шкала абразивности горных пород

Класс абразивности	Наименование класса	Показатель абразивности, А, мг
I	Весьма малоабразивные	<5
II	Малоабразивные	5-10
III	Ниже средней абразивности	10-18
IV	Средней абразивности	18-30
V	Выше средней абразивности	30-45
VI	Повышенной абразивности	45-65
VII	Высокоабразивные	65-90
VIII	Высшей степени абразивности	>90

Для определения абразивности пород в производительных условиях применяют прибор ПТА.

Для разрыхлительных (рыхлых) горных пород выделяют 2 показателя, характеризующих абразивность: абразивность трения и ударную абразивность. Абразивность трения характеризует износ контактирующего с породой рабочего инструмента при его перемещении. Ударная же абразивность характеризует износ поверхности при ударах о них кусков породы.

## 6.4 Дробимость

Дробимость характеризует процесс объёмного разрушения породы с большой скоростью нагружения. В настоящее время известно много способов определения дробимости, как правило, основанных на измерении энергоёмкости процесса дробления или величины вновь образованных поверхностей после дробления.

Наибольшее распространение получил метод, разработанный в ИГД им. А.А. Скочинского, основанный на разрушении образцов породы произвольной формы с последующим ситовым анализом продуктов разрушения. Метод заключается в следующем: с высоты 0,5 м на образец породы однократно сбрасывается гиря массой 16 кг. Масса образца неправильной формы должна составлять около 0,07 кг с отклонением до 15%. Измельчённая порода просеивается через сито диаметром  $7 \cdot 10^{-3}$  м. На технических весах взвешивают породу, прошедшую через сито  $G$ , г. Показатель дробимости ( $K_{\text{дроб}}$ ) численно равен суммарному объёму фракций, прошедших через сито с диаметром 7 мм в кубических сантиметрах

$$K_{\text{дроб}} = G / \gamma, \quad (6.7)$$

где  $\gamma$  – объёмная масса породы, г/см<sup>3</sup>

По величине показателя дробимости все породы разделены на 6 классов (табл. 6.4).

Таблица 6.4 – Классификация пород по дробимости

Класс по дробимости	Характеристика класса	Величина показателя дробимости, см <sup>3</sup>
I	В высшей степени труднодробимые породы	<1,8
II	Весьма трудноразрушаемые породы	1,81-2,70
III	Трудноразрушаемые породы	2,71-4,0
IV	Среднедробимые породы	4,01-6,0
V	Легкодробимые породы	6,01-9,0
VI	Очень легкодробимые породы	>9,0

Дробимость пород – параметр, обратный вязкости. Для оценки дробимости пород, возможно использовать величину, обратную удельной работе разрушения.

## 6.5 Сопротивляемость резанию

Сопротивляемость резанию – это параметр, характеризующий приращение силы резания пород в массиве на 1 см толщины среза.

Для определения сопротивляемости пород резанию в настоящее время используется методика, разработанная в ИГД им. А.А. Скочинского. С её помощью определяется сопротивление углей резанию стандартным одиночным резцом, в условиях забоя, с замерами усилий прибором ДКС (динамометр крупного скола).

Прибор ДКС-2 (рис. 6.2) состоит из распорной стойки 1 с державкой 2, закрепленной в поворотной обойме 3 эталонного резца 4. Через сцепное устройство с датчиком 5, резец 4 поворачивается относительно стойки 1 лебёдкой 7. Усилия резания записываются регистрирующим гидравлическим манометром, который состоит из датчика 5, записывающего аппарата 8 с приводом 7.

Методика определения сопротивления угля резанию заключается в следующем: после зачистки забоя на глубину более 0,4 м, производят обработку забоя поворотом державки с резцом вокруг стойки. Для сбора разрушенного угля на почве пласта вплотную к забою расстилают брезент. Выдвигают резец из державки для получения среза нужной толщины  $h$  (от 2 до 15 см), регулируя т.о., чтобы максимальное усилие на динамометре не превышало 4500 кгс. Не меняя высоту установки резца, от почвы пласта делают не менее 4 срезов. Затем смещают резец по вертикали не менее, чем на 5 ширин и повторяют эксперимент. При каждом эксперименте фиксируют: усилие резания, высоту оси среза от почвы пласта, длину пути резания, массу угля от ширины среза, ширину бокового развала. После этого, строят по данным опытов графики усилий резания  $Z_{cp}$ , как функцию от толщины среза  $h$ .

Тогда, сопротивляемость углей резанию представляет собой приращение усилий резания на 1 см толщины среза

$$\bar{A} = Z_{cp} / h, \quad (6.8)$$

где  $Z_{cp}$  – усилие резания, кгс;  $h$  – толщина среза, см.

По величине сопротивляемости резанию, угли разделяются на 8 категорий (I категория – до 60 кгс/см, а VIII категория – свыше 420 кгс/см).

Существуют и другие методики определения сопротивляемости пород резанию, разработанные в ИГД им. А.А. Скочинского, ДонУГИ и Донгипромуглемаше.

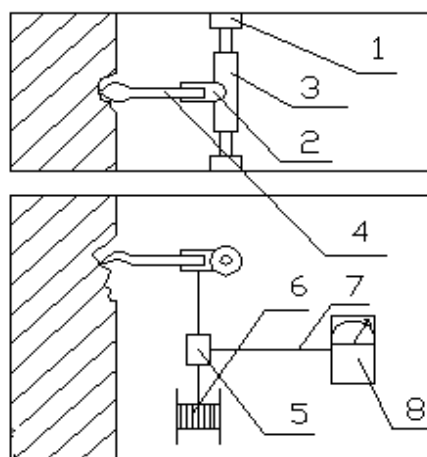


Рисунок 6.2 – Прибор ДКС-2.

Так ИГД им. А.А. Скочинского разработал методику определения сопротивляемости угля резанию динамометрическим сверлом СДМ-1, сущность, которой заключается в разбурировании заранее пробуренного шпура диаметром 42 мм коронкой СДМ, диаметром 62 мм с записью момента сопротивления резанию.

Сконструированы приборы ПОР-3 (ДонУГИ) и ПР-5 (Донгипроуглемаш), позволяющие определить сопротивляемость резанию, принцип работы которых основан на притягивании резца вдоль предварительно пробуренного шпура диаметром 42 мм с замером усилий резания. Сопротивляемость резанию для пород изменяется в широком диапазоне. Некоторые справочные данные для пород Донбасса приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5 – Значение сопротивляемости резанию для пород Донбасса

Наименование пород	Значение сопротивляемости резанию, кгс/см
Уголь	20-400
Углистый сланец	70-250
Глинистый сланец	120-350
Песчаный сланец	200-500
Песчаник	380-1000
Известняк	300-600
Твёрдые включения	500-2000

## 6.6 Буримость

Под буримостью понимают способность горных пород оказывать сопротивление проникновению в них бурового инструмента в процессе бурения. Буримость оценивают длиной шпура, пробуренного за единицу времени в стандартных условиях или чистым временем бурения  $T_6$  1 м шпура в стандартных условиях.

Под стандартными условиями понимают применение при бурении определённого инструмента, армированного стандартными сплавами, постоянный диаметр шпура, постоянный режим бурения (энергия удара, скорость вращения, осевое давление, давление сжатого воздуха в магистрали и т.д.). Определяется буримость методом обуривания забоев на основании хронометража чистого времени бурения. В настоящее время существуют несколько классификаций (шкал) горных пород по буримости, однако все они связаны между собой и с коэффициентом крепости пород по шкале М.М. Протодыяконова. Классификация пород, вошедшая в строительные нормы и правила (СНиП) представлена в табл. 6.6.

В качестве показателя буримости в некоторых случаях можно принимать энергоёмкость бурения единицы длины шпура. Так, для вращательного бурения она определяется из выражения

$$\mathcal{E}_{\text{бур}} = W / V, \quad (6.9)$$

где  $W$  – средняя нагрузка на двигатель сверла;  $V$  – средняя скорость бурения.

При разведочном бурении показатель буримости устанавливают по скорости бурения.

По величине показателя трудности бурения  $\Pi_B$  все горные породы разделены на 5 классов по 5 категорий в каждом классе. К первому классу отнесены легкобуримые породы ( $\Pi_B = 1-5$ ); ко второму – породы средней трудности бурения ( $\Pi_B = 6-10$ ); к третьему – труднобуримые ( $\Pi_B = 11-15$ ); к четвёртому – весьма труднобуримые ( $\Pi_B = 16-20$ ); к пятому – исключительно труднобуримые породы ( $\Pi_B = 21-25$ ).

Таблица 6.6 – Классификация пород по СНИП

Категория пород по крепости и способу разработки	Коэффициент крепости, $f$ , ед.	Категория крепости пород по СНИП	$T_6$ , мин для перфоратора ПР-24 Л
Внекатегорийная (разрабатывается взрывным способом (БВР))	19-20 15-18	XI X	9,85
I (разрабатывается БВР)	10-14	IX	8-9,5
II (разрабатывается БВР)	7-9	VIII	6,6-6,95
III (разрабатывается БВР)	5-6 4-5	VII VII-VI	4,5-6,55
IV (разрабатывается БВР и отбойными молотками (ОМ))	3-2	V	3,8-4,45
V (разрабатывается ОМ)	1,5-2 1,5	IV III-II	2,6-3,75
VI (разрабатывается ОМ)	1-1,5	III-II	< 2,6
VII (разрабатывается вручную)	0,9 0,6 0,4	III-II I I	- - -

### 6.7 Взрываемость

Взрываемость характеризует сопротивляемость горной породы разрушению взрывом. Взрываемость пород оценивается расходом взрывчатого вещества (ВВ) или шпуров на 1 м породы в массиве. Эти показатели называются *удельный расход ВВ* и *удельный расход бурения* соответственно. Удельный расход ВВ –  $q$  в кг ВВ/м<sup>3</sup> породы определяется через эталонный удельный расход ВВ –  $q_0$ , зависящий от коэффициента крепости пород по шкале М.М. Протоdjяконова ( $f$ )

$$q_0 = 0,065 \cdot f \quad (6.10)$$

Эталонный удельный расход ВВ для пород составляет от 50 до 1000 г/м<sup>3</sup>. С учётом поправочного коэффициента, учитывающего свойства ВВ, схему взрывания и размеры шпура ( $K$ ), формула для определения удельного расхода ВВ запишется в виде

$$q = q_0 K \quad (6.11)$$



Взрываемость горных пород можно определить также по максимальной линии наименьшего сопротивления (л.н.с.), представляющей собой зону, где взрыв заряда эталонного ВВ производит отрыв породы от массива при постоянной длине заряда, диаметре и глубине шпура. Тогда взрываемость выразится отношением максимальной л.н.с. к глубине шпура и объёму ВВ в шпуре.

Различают лёгкую, среднюю, трудную и весьма трудную взрываемость пород.

### **6.8 Липкость и сопротивление копанию рыхлых и разрыхлённых пород**

Рыхлые и разрыхлённые породы, при изменении влажности приобретают ряд специфических свойств, которые необходимо учитывать в процессах горного производства.

Так, изменение свойств грунтов при увлажнении оценивают липкостью. *Липкость* – это способность рыхлых и разрыхлённых горных пород при определённом содержании влаги в них прилипать к поверхности инструмента и оборудования (ковш экскаватора). Физический смысл прилипания заключается в том, что при определённой влажности, толщина плёнок воды, обволакивающих частицы породы (физически связанная вода) становится такой, что они с равной силой воздействуют как с минеральными частицами породы, так и с поверхностью соприкасающихся с ними инструментов. Наибольшая липкость соответствует влажности пород близкой к молекулярной влагоёмкости. При дальнейшем повышении влажности и увеличении толщины плёнки происходит резкое снижение липкости.

Липкость пород оценивается напряжениями, необходимыми для отрыва прилипшего тела от грунта. Липкость пород изменяется от 2 кПа до 50 кПа. Она зависит от свойств пород, а также от свойств материала, из которого изготавливается инструмент, и характера поверхности контактирующего тела.

Сопротивляемость пород при их выемке экскаваторами принято оценивать величиной *удельного сопротивления копанию*  $K_F$ :

$$K_F = F_K / S, \quad (6.12)$$

где  $F_K$  – касательная сила сопротивления породы копанию, Н;  $S$  – площадь поверхности отрыва,  $m^2$ .

Площадь поверхности отрыва находится как произведение ширины ковша на глубину внедрения ковша в породу при копании.

Удельное сопротивление копанию зависит от прочности параметров, плотности породы, сцепления пород и их влажности.

При выемке механической лопатой рыхлых песков  $K_F = (0,16-0,25) \cdot 10^5$  Па, у тяжёлых влажных глин  $K_F = (2-3) \cdot 10^5$  Па. У полускальных пород в пределах одного структурного блока  $K_F$  достигает 1 МПа.

В зависимости от величины  $K_F$  различают лёгкие условия копания ( $K_F < 1,2 \cdot 10^5$  Па) и тяжёлые условия копания ( $K_F > 2,8 \cdot 10^5$  Па).

Величина  $K_F$  определяет также относительную продолжительность рабочего цикла экскаваторов.

Иногда для получения ориентировочных параметров горно-технологических свойств используют следующие эмпирические формулы

$$\sigma_{сж} = 10f, \text{ МПа}; \quad P_k = 1,59f^{1,67}, \text{ кгс / мм}^2;$$

$$\sigma_{сж} = 6,3P_k^{0,6}, \text{ МПа}; \quad K_d = \frac{67}{f} - 1,7, \text{ см}^3;$$

$$\sigma_{сж} = 1000 / K_d^{1,45}, \text{ МПа}; \quad \bar{A} = 11\sigma_{сж} + 40, \text{ кгс / см}.$$

## 6.9 Использование горно-технологических свойств в горной практике

Свойства, относящиеся к этой группе, наиболее широко используются в горной практике. Они положены в основу целого ряда специальных классификаций пород, вошедших в различные нормативные документы, отраслевые инструкции и т. д. Зная величины параметров из этой группы свойств, можно легко определить прочностные, акустические, плотностные, тепловые и другие параметры пород.

Так коэффициент крепости породы используется для оценки её общей способности сопротивляться разрушению, при выборе практически любого горно-шахтного оборудования, при оценке устойчивости крепи и различных объектов, расчётах крепи, расчётах оборудования для разрушения пород, расчётах паспортов БВР.

Коэффициент крепости пород положен в основу классификации пород по СНИП, от которой зависят все нормы выработки, времени и расценки на любые горные породы, оговорённые в ЕНиР, ЕНВ, УКНВ, ЕРЕР и т.д.

Контактная прочность пород почвы предопределяет выбор механизированной крепи для очистного забоя, тип искусственного сооружения для охраны выработок со стороны очистного забоя.

Абразивность пород используется для оценки потребности в режущем инструменте при бурении, выемке пород и углей добычными и проходческими комбайнами.

Дробимость пород используется в различных расчётах по энергоёмкости разрушения в процессе обогащения полезного ископаемого.

Сопrotивляемость угля резанию предопределяет выбор технологии разрушения угля в очистном забое (комбайновая или струговая), позволяет оптимизировать параметры резания, определить производительность оборудования при этом.

Буримость позволяет рассчитывать трудоёмкость процессов, связанных с бурением шпуров, скважин и т. д., в том числе при проведении выработок по технологии БВР.

Взрываемость позволяет разрабатывать паспорта БВР при открытой и подземной разработке полезных ископаемых. Сопrotивление пород копанию позволяет обоснованно выбирать тип экскаватора для выемки пород, рассчитывать его производительность.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие параметры относятся к основным горно-технологическим?
2. Как определяется коэффициент крепости по М.М. Протодяконову?
3. На сколько категорий разделены горные породы по крепости?
4. В чём сущность метода толчения для определения крепости?
5. Что называется контактной прочностью породы? Каков порядок определения контактной прочности по методике ИГД им. А.А. Скочинского?
6. Что называется абразивностью породы? В чём сущность метода определения абразивности по методике ИГД им. А.А. Скочинского?
7. На сколько классов разделены породы по абразивности?
8. Что характеризует дробимость породы? В чём сущность метода определения дробимости по методике ИГД им. А.А. Скочинского?
9. Что такое сопротивляемость резанию? Как определяется сопротивляемость резанию прибором ДСК?
10. Что понимают под буримостью породы? Чем оценивается буримость пород?
11. Что такое взрываемость пород и чем она характеризуется?
12. Что понимают под размокаемостью, набуханием породы?
13. От чего зависит сопротивление копанию рыхлых пород?

## ТЕМА 7 АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

*Акустические свойства* горных пород – свойства, характеризующие закономерности распространения в породах упругих знакопеременных деформаций (упругих колебаний)

### 7.1 Акустические волны в породах

Источники звука в горных породах: естественные (микро- и макросдвиги в горном массиве) и искусственные (взрывы, работа механизмов, специальные излучатели)

По *частоте* звуковые волны подразделяют на:

- сейсмические (частота  $f < 3$  Гц);
- микросейсмические (частота  $3 < f < 30$  Гц);
- сейсмоакустические (частота  $30 < f < 300$  Гц);
- акустические (звуковые), которые подразделяются на:
  - инфразвуковые (частота  $f < 20$  Гц);
  - звуковые (частота  $20 \text{ Гц} < f < 20 \text{ кГц}$ );
  - ультразвуковые (частота  $20 \text{ кГц} < f < 10^7 \text{ кГц}$ );
  - гиперзвуковые (частота  $f > 10^7 \text{ кГц}$ ).

По характеру *деформирования среды* акустические волны подразделяют на:

– продольные волны ( $V_p$ ) – деформации объёмного попеременного сжатия и растяжения. Распространяются в любой среде: газы, жидкости, твёрдые тела;

– поперечные волны ( $V_s$ ) – упругие деформации сдвига. Распространяются только в твёрдых телах, т.к. жидкости не имеют сопротивления сдвигу.

– поверхностные волны ( $V_R$ ). Частицы на поверхности твёрдого тела и на границе раздела сред с существенно разными акустическими свойствами имеют различное сопротивление перемещению в стороны, перпендикулярные границе раздела. Это приводит к тому, что часть энергии трансформируется в т.н. поверхностные волны. В поверхностной волне частицы тела, расположенные на границе раздела, колеблются в плоскости, совпадающей с границами раздела (волны Лява) и в плоскости, перпендикулярной границе раздела (волны Рэлея).

По *виду фронтальной поверхности* (т.е. геометрическому месту точек среды, имеющих в один и тот же момент одно и то же значение фазы волны) различают: плоские волны, сферические и цилиндрические.

## 7.2 Параметры акустических свойств горных пород

Скорости распространения упругих волн зависят в первую очередь от упругих параметров горной породы и от характера деформирования среды.

$$\text{Если } \frac{d}{2\lambda} < 0,2 \div 0,3 \quad (7.1)$$

где  $d$  – поперечный размер образца горной породы и  $\lambda$  – длина волны) – в породе распространяются только продольные волны (случай «идеального стержня»). В этом случае скорость продольной волны

$$V_p^{ст} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}}, \quad (7.2)$$

где  $E_d$  – модуль упругости Юнга, измеренный динамическим методом, Па;  
 $\rho$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>.

$$\text{Если } \frac{d}{2\lambda} > 0,8 \div 1 \quad (7.3)$$

– в породах распространяются только продольные и поперечные волны (случай «массива»). Тогда

$$V_p^м = \sqrt{\frac{E_d(1 - \nu_d)}{\rho(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}}, \quad (7.4)$$

где  $\nu_d$  – коэффициент Пуассона, измеренный динамическим методом, ед.;

$$V_s = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1 + \nu_d)}}, \quad (7.5)$$

где  $G_d$  – модуль всестороннего сжатия, измеренный динамическим методом, Па;

$$\text{Если } \frac{d}{2\lambda} = 0,3 \div 0,8 \quad (7.6)$$

– в породах распространяются продольные, поперечные и поверхностные волны, причём при небольших удалениях от источника колебаний – продольные «стержневые», а с удалением – они исчезают и формируются продольные «массива». В этом случае скорость поверхностной волны Рэлея имеет вид

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12\nu_d}{1 + \nu_d} \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} = \frac{0,87 + 1,12\nu_d}{1 + \nu_d} \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1 + \nu_d)}} \quad (7.7)$$

При  $v_d = 0,25$   $V_p^M = 1,1V_p^{CT}$ ,  $V_s = 0,63V_p^{CT}$  и  $V_R = 0,58V_p^{CT}$ , т.е. можем констатировать, что

$$V_p^M > V_p^{CT} > V_s > V_R.$$

На величину скорости распространения волн влияют: пористость и трещиноватость породы (с увеличением пористости скорости уменьшаются), температура (у сухих пород с ростом температуры скорость монотонно возрастает, а у влажных пород при замерзании воды скорость резко возрастает), слоистость (скорость распространения волн вдоль слоистости на 10-30% больше, чем перпендикулярно слоистости).

Приведём значения скорости продольных волн, м/с для некоторых веществ и пород: вода – 1485, воздух – 331, лёд – 3200-3300, известняк –  $\cong 5000$ , песчаник – 2000-3500, сланцы –  $\cong 2000$ , масло трансформаторное – 1420.

Акустическое сопротивление среды

$$z = \rho \cdot V, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} \quad (7.8)$$

определяет способность горных пород отражать и преломлять упругие волны и является произведением плотности среды  $\rho$  с мгновенной скоростью колебания частиц  $V$ .

*Коэффициент поглощения.* Амплитуда колебаний частиц в горной породе по мере удаления от источника акустических волн уменьшается по причине поглощения энергии на трение частиц, рассеивание энергии на порах, трещинах и других неоднородностях породы.

$$A_i = A_0 e^{-\Theta r_i}, \quad (7.9)$$

где  $A_i$  и  $A_0$  соответственно амплитуда волны на удалении  $r_i$  от источника;  $\Theta$  – коэффициент поглощения.

Для однородных тел поглощение акустических волн определяется вязкостью и теплопроводностью тел. Как и для жидкостей, в этом случае зависимость коэффициента поглощения  $\Theta$  упругой продольной волны от частоты  $\omega = 2 \pi f$

$$\Theta = \frac{2}{3} \frac{\omega^2 \eta}{v^3 \rho}, \quad (7.10)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости (внутреннее трение породы), Па·с.

Коэффициент поглощения всегда больше в тех породах, в которых скорость упругих колебаний меньше.

Вообще для горных пород  $\Theta = (0,05 - 0,3) 1/\text{м}$ , т.е. на расстоянии  $3 \div 20$  м от источника амплитуда (энергия) волны уменьшается в  $e = 2,7$  раз.

*Коэффициент отражения.* Коэффициентом отражения  $K_3$  называют отношение амплитуды (энергии) отражённой волны  $A_0$  к амплитуде (энергии) падающей волны  $A_n$  на границе раздела двух сред.

$$K_3 = \frac{A_0}{A_n} = \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2 < 1 \quad (7.11)$$

Например, на границе раздела воздух – порода теряется 99,98% энергии волны; вода – порода – 68%; порода – порода – около 14%.

На рисунке 7.1 представлены различные случаи преломления и отражения упругих волн на границе раздела двух сред.

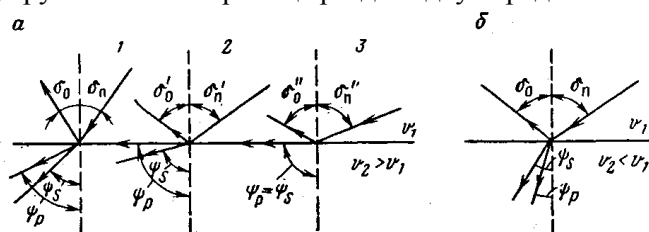


Рисунок 7.1 – Преломление и отражение упругой волны на границе двух сред: а – при условии  $V_2 > V_1$ ; 1 – общий случай; 2 – момент внутреннего отражения продольной волны; 3 – момент внутреннего отражения поперечной волны; б – при условии  $V_2 < V_1$ .

Угол падения  $\delta_n$  и угол преломления  $\psi$  упругой волны, проникшей в горную породу подчиняются закону Снеллиуса, согласно которому эти углы находятся в определённом соотношении со скоростью упругой волны в первой  $V_1$  и второй  $V_2$  средах

$$\frac{\sin \delta_n}{\sin \psi} = \frac{V_1}{V_2} \quad (7.12)$$

Отношение  $V_1/V_2 = n$  называется *коэффициентом преломления* упругой волны.

Так как скорости различных типов волн различны, в результате прохождения упругой волны в породе происходит ее разделение по направлениям на продольные и поперечные.

Если упругая волна падает на границу раздела перпендикулярно, происходит только отражение. При угле падения  $\delta_n > 0$  происходит как отражение, так и преломление упругой волны. Постепенно увеличивая угол  $\delta_n$ , можно добиться такого момента, когда произойдёт полное внутреннее отражение сначала продольной, а затем и поперечной волны.

### 7.3 Определение акустических параметров пород в лабораторных условиях

Обычно целью лабораторных исследований является определение упругих динамических параметров горных пород  $E_d$  и  $v_d$ , которые определяются значительно проще, чем при механических испытаниях. При этом следует иметь в виду, что величины  $E_d$  и  $v_d$  на 10-30% больше, чем получаемые при механических испытаниях.

Опыты проводят на образцах правильной формы с использованием различных приборов, например, УК-10П, с излучателями и датчиками ультразвуковых волн. При этом возможно применение нескольких методик.

*Метод прямого прозвучивания* образцов (см. рисунок 7.2, а) заключается в том, что определяют скорость продольной волны для отрезков керна горной породы разной длины при разных частотах излучения. Затем, используя критерии 7.1 7.3, выявляют величины  $V_p^m$  и  $V_p^{ст}$ . После этого вычисляют  $E_d$  из выражения 7.2 и  $v_d$  из выражения 7.4.

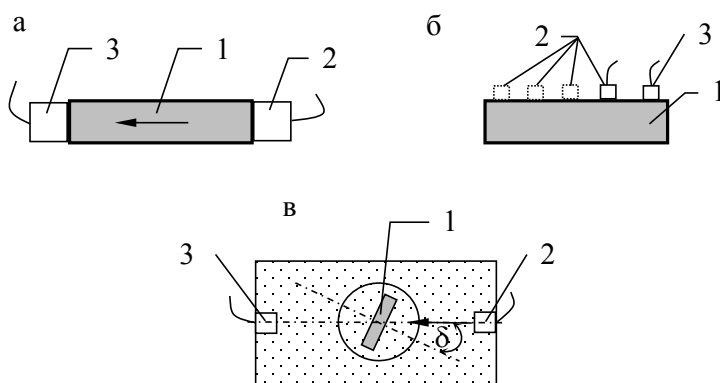


Рисунок 7.2 – Схемы лабораторных экспериментов для определения упругих динамических параметров горных пород: а – прямое прозвучивание; б – продольное профилирование; в – метод критических углов; 1 – образец породы; 2 – излучатель; 3 – приёмник.



При использовании *метода продольного профилирования* определяют скорости поперечных волн  $V_s$ , продольных волн в массиве  $V_p^M$  и поверхностных волн  $V_R$ . После этого вычисляют  $v_d$  и  $E_d$ , используя следующие выражения

$$v_d = \frac{\left(V_p^M\right)^2 - 2V_s^2}{2\left[\left(V_p^M\right)^2 - 2V_s^2\right]} \quad (7.13)$$

$$E_d = \frac{\left(V_p^M\right)^2 \rho(1 + v_d)(1 - 2v_d)}{(1 - v_d)} \quad (7.14)$$

$$E_d = \frac{V_s^2 \rho \left[ 3\left(V_p^M\right)^2 - 4V_s^2 \right]}{\left(V_p^M\right)^2 - V_s^2} \quad (7.15)$$

*Метод критических углов* реализуют так, что образец породы помещают в масляную ванну, прозвучивают его, добиваясь полного внутреннего отражения сначала продольных, а потом и поперечных волн в образце. Результат эксперимента – соответствующие величины критических углов  $\delta_p$  и  $\delta_s$ . Зная, что в масле скорость падающей продольной волны  $V_{II} = 1420$  м/с и что при полном отражении волны угол преломления  $\psi = 90^\circ$  вычисляют  $V_s$  и  $V_p$

$$V_p = \frac{V_{II}}{\sin \delta_p} \text{ и } V_s = \frac{V_{II}}{\sin \delta_s} \quad (7.16)$$

#### 7.4 Использование акустических свойств горных пород в горном деле

Акустические свойства горных пород широко используются геологами и геофизиками при разведке и доразведке месторождений полезных ископаемых.

На этапе эксплуатации угольных шахт в широких масштабах применяется *сейсмоакустический метод прогноза* состояния горного

массива для выявления зон, опасных по выбросам угля, породы и газа или по горным ударам.

Этот метод, по сути, представляет собой обратную задачу геофизики, когда по параметрам акустической волны (форма волнового фронта; частота, на которой расположен максимум волновой группы; величина и характер дисперсии волн; скорость распространения волновой группы и т.д.) находят параметры среды, в которой эта волна распространяется.

Обратные задачи геофизики значительно сложнее прямых задач, они имеют удовлетворительное решение только в ограниченном количестве сравнительно простых случаев. Поэтому подавляющее число известных методов диагностики горного массива носит качественный характер, а сама диагностика представляет собой, как правило, сравнение текущего значения измеряемого параметра методами статистики с самим собой, но измеренным при других (образцовых) обстоятельствах. Неизбежная неоднозначность подобных методов диагностики устраняется только с помощью комплексных наблюдений – дополнения основного метода диагностики вспомогательными наблюдениями физико-технических параметров, не связанных прямо с основным.

Для прогноза *горных ударов* на шахтах и в рудниках применяют практически полную аналогию современной сейсмологической аппаратуры и методы обработки сигналов, заимствованные у сейсмологов, адаптированные для наблюдений в пределах шахтного поля. Деятельность службы прогноза горных ударов заключается в многоканальной регистрации сейсмоакустических событий, происходящих в диапазоне частот от нескольких герц до нескольких десятков герц. Указанный диапазон частот, во-первых, соответствует достаточно протяжённым разрывам (длиной до нескольких десятков метров) в массиве горных пород и, во-вторых, акустические колебания этого диапазона имеют относительно небольшое затухание и распространяются на расстояния, сравнимые с размерами шахтного поля. Зарегистрированные несколькими каналами сейсмоакустические события позволяют решить уравнение локации и определить области, в которых эти события располагаются наиболее плотно. Именно области сгущения событий считают опасными по горным ударам. В зависимости от конкретных горнотехнических обстоятельств принимают решение о закрытии таких выработок или о проведении мероприятий, направленных на разгрузку критической области от действующих напряжений.

Суть сейсмоакустического метода *прогноза* зон, потенциально опасных по внезапным *выбросам* угля и газа, заключается в том, что состояние

каждого добычного или проходческого забоя прогнозируется отдельно, а для регистрации акустической эмиссии применяют датчики вибрации, которые размещают в верхней и нижней частях лавы или вблизи от забоя подготовительной выработки. Датчик вибрации конструктивно совмещён с предварительным усилителем и заключён в прочный корпус, предохраняющий его от повреждения силами горного давления. Сигналы передатчика поступают по двухпроводной телефонной линии связи на поверхность, где обрабатываются и регистрируются автоматически. Одновременно эти сигналы прослушивают специально обученные операторы прогноза, которые выделяют из потока информации и регистрируют сигналы акустической эмиссии и дают прогноз.

Весьма перспективным является прогноз напряжённого состояния выбросоопасного массива по спектрам сигналов оборудования, работающего по углю.

Суть метода заключается в следующем: Работы по углю возбуждают в массиве широкий спектр колебаний различных типов. Экспериментально доказано, что спектральный состав (форма огибающей спектра) изменяется в зависимости от напряжённого состояния массива. Таким образом, обратная задача геофизики решается методом сопоставления спектра при заведомо безопасном состоянии массива (спектра-эталона безопасной ситуации) с текущим спектром. При значительном отклонении текущего спектра от эталона, состояние забоя прогнозируют, как опасное. Известно несколько вариантов интерпретации результатов, однако, в качестве нормативного прогноза используют метод, в котором интерпретация спектра упрощена и сводится к сравнению двух составляющих спектра: на частотах 300 Гц и 2500-3000 Гц. Обширными экспериментами установлена статистическая связь между отношением уровней сигналов на указанных частотах и состоянием выбросоопасного массива.

Сотрудниками кафедры горной геомеханики ДонНТУ создана и широко применяется на шахтах Донбасса аппаратура ЗУА-98 (см. рисунок 7.3.), предназначенная для ведения вышеописанных методов прогноза на практике.



Рисунок 7.3 – Общий вид аппаратуры ЗУА-98.

### Контрольные вопросы

1. Как подразделяют акустические (звуковые) волны по частоте?
2. Какие скорости распространения звуковых волн Вы знаете?
3. Какие факторы влияют на скорость распространения звуковых волн?
4. В каких средах распространяются продольные, поперечные и поверхностные волны?
5. Что такое акустическое сопротивление?
6. Что такое коэффициент поглощения?
7. Что называют коэффициентом преломления?
8. Где в горном деле используют акустические свойства горных пород?

## ТЕМА 8 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

*Термодинамические свойства* характеризуют способность породы накапливать и передавать тепло и определяют ее поведение в температурном поле.

### 8.1 Общие сведения о температурном поле в горных породах

Источниками тепла для Земли являются: радиоактивные (тепло получается при распаде радиоактивных элементов, которые залегают на глубинах до 200 км.; Солнце; тектонические и химические процессы внутри Земли. От Солнца Земля (горные породы) получает количество тепла порядка  $10^{21}$ - $10^{22}$  Дж в год, от радиоактивного распада в 10 раз меньше, но энергия Солнца проникает вглубь земли всего на 20 м, поэтому главный источник тепла для горных пород – радиоактивный распад.

Температурное поле земли по своему характеру очень сложно, т.к. радиоактивные элементы в коре Земли распространены очень неравномерно, но, в общем, с глубиной температура пород увеличивается.

Температурное поле массива горных пород в данном районе характеризуется следующими параметрами: *глубиной* и *температурой* пород в *нейтральной зоне*, а также величиной *геотермической ступени*.

Нейтральная зона – зона, где температура неизменна в течение года. Для Донбасса ее глубина 20 м и температура  $8,5^{\circ}\text{C}$ .

Геотермическая ступень – глубина, на которой температура пород увеличивается на  $1^{\circ}\text{C}$ . Для Донбасса это  $\sim 30$  м, для Кривого Рога – 55 м, для Камчатки – 2,5 м, а для Японии – 1,5 м.

### 8.2 Основные тепловые параметры горных пород

Базовыми параметрами тепловых свойств горных пород являются:

1. Удельная теплоёмкость –  $c$ , кДж/кг град.
2. Коэффициент теплопроводности –  $\lambda$ , Вт/м град, кДж/м с град.
3. Коэффициент линейного температурного расширения –  $\alpha$ , 1/град.

Кроме того, известны другие, часто применяемые в горных расчётах, параметры тепловых свойств пород:

1. Коэффициент температуропроводности —  $a$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ .
2. Коэффициент объёмного теплового расширения –  $\gamma_t$ , 1/град
3. Коэффициент теплопередачи –  $K$ , кДж/ $\text{м}^2$  с град.
4. Удельная теплота плавления –  $L$ , Дж/кг.
5. Температурный интервал плавления –  $(T_1 - T_2)$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Для углей, кроме того, различают: теплотворная способность, термохимическая стойкость, коксуюемость, спекаемость и выход летучих.

Рассмотрим некоторые параметры, указанные выше, подробнее.

*Удельная теплоёмкость* – количество тепла, необходимого для нагревания 1 кг породы на 1 градус.

$$dQ=c \cdot m dT \quad (8.1)$$

Для горных пород дельная теплоёмкость изменяется в пределах от 0,4 до 2 кДж/кг град. Например: для каменного угля  $c = 1,3$  кДж/кг град; для антрацита 0,93; для известняка 0,67-1,04; для песчаника 0,81; для сланца 0,75.

Теплоёмкость горных пород не зависит: от состояния, в котором находится порода (нормальном или расплавленном); от зернистости породы; от слоистости, т.к. передача тепла в горных породах фотонная, представляющая собой особый вид колебания кристаллической решётки.

Теплоёмкость зависит только от пористости горной породы

$$c \cdot \rho \approx c_0 \rho_0 (1 - \rho) \quad (8.2)$$

где  $c_0$  и  $\rho_0$  – теплоёмкость и плотность минералов, слагающих горную породу.

*Коэффициент теплопроводности* – количество тепла, проходящего через породу за 1 ед. времени через 1 ед. площади при градиенте температуры равном 1 ед.

Это вытекает из закона Фурье

$$d^2 Q = -\lambda \text{grad} T dS d\tau, \quad (8.3)$$

Знак «минус» указывает на то, что поток тепла направлен навстречу градиенту (в направлении уменьшения температуры).

Для горных пород  $\lambda = 0,1-7$  Вт/м град. Например: для угля 0,5-0,9, для антрацита 0,4; для известняка 1,0-2,3; для песчаника 1,3-4,2; для сланца 1,5-2,2.

Величина коэффициента теплопроводности зависит: от пористости породы (у песка он в 6-7 раз меньше, чем у песчаника); от формы пор и трещин (если удлинённые поры или трещины перпендикулярны тепловому потоку, то  $\lambda$  уменьшается); от размеров зёрен (с уменьшением зёрен уменьшается и коэффициент теплопроводности).

*Коэффициент температуропроводности* характеризует скорость распространения изотермической поверхности в породе. Эта скорость

зависит не только от теплопроводности, но и от теплоёмкости и его величину обычно получают расчётным путём

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (8.4)$$

Для горных пород величина коэффициента температуропроводности изменяется от  $10^{-6}$  до  $10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с.

*Коэффициент теплопередачи* характеризует способность пород передавать тепло из одной породы в другую.

На границе перехода из одной породы в другую закономерность передачи тепла следующая

$$\Delta Q = K \Delta T \Delta S \Delta t \quad (8.5)$$

*Коэффициенты объёмного и линейного температурного расширения пород* характеризуют связь между повышением температуры пород и увеличением их линейных размеров или объёма.

$$\Delta l = \alpha l \Delta T; \quad \Delta V = \gamma_T V \Delta T; \quad \gamma_T = 3\alpha \quad (8.6)$$

Для горных пород величина коэффициента линейного температурного расширения изменяется в пределах от  $2 \cdot 10^{-6}$  до  $10 \cdot 10^{-4}$  1/град. Например: для песчаника  $\alpha = (0,5-2) \cdot 10^{-5}$  1/град; для известняка  $(0,5-0,89) \cdot 10^{-5}$  1/град; для сланца  $\alpha \sim 0,9 \cdot 10^{-5}$  1/град.

Величины коэффициентов  $\alpha$  и  $\gamma_T$  зависят от размеров зёрен, слагающих горную породу (увеличиваются с увеличением зёрен) и от пористости породы (увеличиваются с увеличением пористости).

### 8.3 Определение параметров термодинамических свойств пород в лабораторных условиях

Обычно для целей горного производства в лабораторных условиях определяют следующие тепловые параметры горных пород: удельная теплоёмкость; коэффициент теплопроводности и коэффициент температуропроводности.

Для этого используют различные лабораторные установки, на которых реализуют *метод постоянного* или *мгновенного источника тепла*.

На кафедре горной геомеханики ДонНТУ создан и успешно применяется уникальный прибор для определения вышеприведённых тепловых параметров горных пород методом мгновенного источника тепла (рис. 8.1 и 8.2).

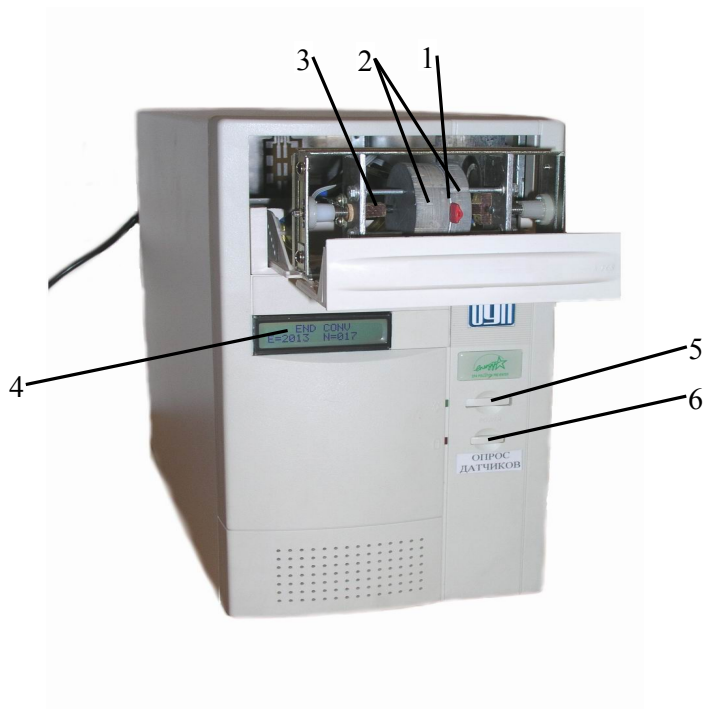


Рисунок 8.1 – Общий вид прибора ДонНТУ для определения тепловых свойств горных пород: 1 – нагреватель, 2 – образец породы, 3 – датчик тепла, 4 – дисплей, 5 – кнопка включения прибора, 6 – кнопка опроса датчиков.

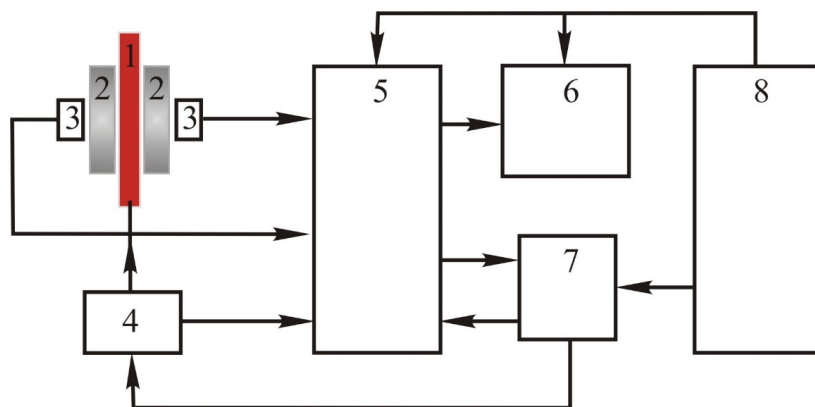


Рисунок 8.2 – Структурная схема прибора ДонНТУ для определения тепловых свойств горных пород: 1 – нагреватель, 2 – образец породы, 3 – датчик тепла, 4 – блок управления током нагревателя, 5 – процессор, 6 – дисплей, 7 – вторичный источник питания, 8 – первичный источник питания.



В качестве образцов используются диски со шлифованными поверхностями, изготовленные из кернов горных пород.

В процессе опыта, зная геометрические размеры образцов и их плотность, измеряют: длительность и величину теплового импульса; время, за которое температура «холодной» поверхности образца достигла максимума; максимальную температуру «холодной» поверхности образца.

#### 8.4 Использование тепловых свойств и явлений в горном деле

Для бурения скважин по весьма прочным породам применяют метод *огневого бурения* с использованием чаще всего бензовоздушных горелок в качестве термобуров.

Скорость такого бурения зависит от тепловых свойств горной породы, которые отражаются в виде критерия термобуримости породы ( $\Pi_{ТБ}$ ), соответствующему объёму породы, разрушенной при воздействии на неё 1 Дж тепла.

$$\Pi_{ТБ} = \frac{\alpha E}{c \rho \sigma_p (1 - 2\nu)} \quad (8.7)$$

Для горных пород вообще  $\Pi_{ТБ} = 2 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$ . Чем меньше величина  $\Pi_{ТБ}$ , тем хуже порода поддаётся термобурению.

Большое значение имеет знание тепловых свойств горных пород в расчётах *тепловых режимов шахт*. Например, установлено, что коэффициент теплопередачи, характеризующий процесс передачи тепла из горного массива в горную выработку может быть рассчитан для незакреплённой выработки по формуле

$$K = 2\varepsilon_{ш} G^{0,8} \Pi^{0,2} / S, \quad (8.8)$$

где  $\varepsilon_{ш} = 1-3$  – коэффициент, учитывающий шероховатости породного обнажения;  $G$  – расход воздуха в выработке;  $\Pi$  – периметр выработки;  $S$ , – площадь поперечного сечения выработки.

Для закреплённой выработки

$$K' = \frac{1}{(1/K + \delta_k / \lambda_k)}, \quad (8.9)$$

где  $\delta_k$  – толщина крепи;  $\lambda_k$  – коэффициент теплопроводности крепи.

*Глубина промерзания* рыхлых и связных пород зависит от времени и коэффициент температуропроводности породы

$$h = 2\sqrt{at} \quad (8.10)$$

При *подземной выплавке серы* количество тепла для выплавления серы из единицы объёма руды зависит от температуры плавления серы ( $T_c = 119^\circ\text{C}$ ), удельной теплоты плавления серы ( $L \approx 49$  кДж/кг), удельной теплоёмкости серы ( $c_c = 0,67-1,86$  кДж/кг град) и рассчитывается по формуле

$$Q = L\gamma_c + c_c\gamma_c(T_c - T_0), \quad (8.11)$$

где  $\gamma_c$  – объёмный вес серы;  $T_0$  – температура массива.

При *подземной газификации угля* для создания канала горения между скважинами используют явление теплового электрического пробоя. Для этого в скважины опускают электроды и создают между ними электрическое напряжение. Величина этого напряжения зависит от коэффициента теплопроводности угля.

Кроме того, тепловые свойства горных пород необходимы для расчетов процессов сушки горной массы, термообработки брикетов, агломерации, обжига руд и т.п.

### Контрольные вопросы

1. Какова величина геотермической ступени для Донбасса?
2. Перечислите и дайте определения базовым параметрам тепловых свойств горных пород.
3. Какие методы применяют для определения параметров тепловых свойств горных пород в лабораторных условиях?
4. Укажите процессы горного дела, которые зависят от параметров тепловых свойств горных пород.

## ТЕМА 9 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД

### 9.1 Общие сведения о воде в горных породах

Гидравлические свойства горных пород характеризуют содержание, характер движения и взаимодействие с минеральным скелетом породы шахтных вод.

Причины, обуславливающие поступление воды в горные выработки, очень разнообразны, но все же в основном водообильность месторождения определяется литологическим составом и условиями залегания горных пород. Горные породы, слагающие верхнюю оболочку земли, все без исключения обладают той или иной степенью пористости.

Наличие пор и трещин в породах предопределяет возможность их заполнения различными жидкостями и газами. В результате порода становится многофазной средой и свойства ее начинают зависеть от всего комплекса входящих в неё компонентов и от их взаимодействия.

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 решётки минералов. Удаление такой воды приводит к разрушению минерала, превращению его в другое - безводное соединение.

Если вода в кристаллической решётке находится в виде молекул, то такая вода называется кристаллизационной. Она характерна, например, для гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), опала ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), карналлита ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) и многих других минералов. Кристаллизационная вода, как правило, удаляется из породы при температуре 200-600°C.

Вода, образующаяся при нагреве не входящих в кристаллическую решётку гидроксильных ионов ( $\text{OH}^-$  и  $\text{H}^+$ ), называется *конституционной*. Она характерна для таких минералов, как тальк ( $\text{Mg}_3(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$ ), малахит ( $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ), и каолинит ( $\text{Al}_2(\text{OH})_4 \cdot \text{Si}_2\text{O}_5$ ). Температура выделения конституционной воды достигает 1300°C.

Наличие в породе химически связанной воды проявляется только при ее нагревании. Она обуславливает изменение свойств породы при высоких температурах. Благодаря нарушению кристаллической решётки минералов при выделении из них химически связанной воды происходит ослабление и разрушение пород, а в ряде случаев их упрочнение (например, глины).

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

*Смачиваемость* – это способность горной породы покрываться плёнкой жидкости. Величина смачивания твёрдой поверхности жидкостью характеризуется краевым углом  $\alpha$  между плоскостью твёрдого тела и касательной к поверхности капли, проведённой из точки касания капли с телом.

Смачиваемость пород зависит от их *адсорбционной* способности, т.е. способности концентрировать (адсорбировать) на своей поверхности молекулы жидкости за счёт электростатического притяжения. Большинство пород относится к хорошо смачиваемым водой (гидрофильным). Частично или полностью не смачиваемы (гидрофобии) – сера, угли, битуминозные песчаники и некоторые другие породы.

Адсорбционная способность пород возрастает при наличии в них растворимых солей, глинистых минералов (особенно с раздвижной кристаллической решёткой – монтмориллонитов), а также с увеличением удельной поверхности твёрдой фазы. В связи с последним наблюдается увеличение адсорбционной способности с уменьшением размеров частиц рыхлой породы и увеличением их угловатости.

*Физически (прочно) связанная вода* не перемещается в породах, имеет высокую плотность (до  $1,74 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), низкую температуру замерзания ( $-78^\circ\text{C}$ ), малые значения теплоёмкости, диэлектрической проницаемости, электропроводности, не является растворителем. Она удаляется из породы только нагреванием до  $105-110^\circ\text{C}$ .

*Свободная вода* в породах может находиться в виде капиллярной воды, удерживаемой в мелких порах силами капиллярного поднятия, и в виде гравитационной воды, заполняющей крупные поры и передвигающейся в породах под действием сил тяжести или давления.

Количество капиллярной воды оценивается параметром капиллярной влагоёмкости. Последняя зависит от среднего размера поровых каналов, перпендикулярных к зеркалу грунтовых вод в изучаемом объёме.

В зависимости от минерального, гранулометрического состава пород и формы частиц соотношение количества различных видов воды в породах может быть разным. Так, пески содержат в основном гравитационную воду, а глины, лёсс и суглинки – молекулярную и капиллярную. Относительное содержание последней в глинах достигает 18-50%.

## 9.2 Параметры гидравлических свойств горных пород

Количество физически связанной воды в породах оценивается показателями максимальной гигроскопичности и максимальной молекулярной влагоёмкости.

Максимальная *гигроскопичность*,  $w_g$  – наибольшее количество влаги, которое способна адсорбировать на своей поверхности горная порода из воздуха с относительной влажностью 94%. Максимальная гигроскопичность характеризует адсорбционную способность пород и поэтому зависит от тех же факторов, что и последняя.

Молекулярная, или плёночная *влагоёмкость*,  $w_m$  – количество воды, удерживаемой силами молекулярного притяжения на поверхности частиц породы:

$$w_m = \frac{m_m - m_c}{m_c} \quad (9.1)$$

где  $m_m$  – масса влажного образца породы;  $m_c$  – масса образца породы, высушенного при температуре 105-110°C.

За счёт наличия в породе слабо связанной плёночной воды  $w_m > w_g$ , отличием которой от физически (прочно) связанной воды является способность передвигаться под действием молекулярных сил.

Для кварцевых частиц размером 0,1-0,05 мм  $w_m$  составляет 0,02%, размером менее 0,001 мм – 0,86%. Однако основную роль играет минеральный состав пород. При том же размере частиц (меньше 1 мк)  $w_m$  альбита равна 8,1%, лимонита – 23% и биотита – 48%.

В связи с этим кварцевые пески, например, содержат наименьшее количество связанной воды – 0,24%, в то время как лёссы – 5,2%, глины – 10-30%.

Влажные породы обладают способностью избирательно адсорбировать наряду с водой ионы из насыщающего породу раствора, т.е. *полносорбционной* способностью. Это явление важно при изучении электрохимических реакций в породах, электропроводности и электрических полей в массивах.

Максимальное количество связанной, капиллярной и гравитационной воды, которое способна вместить порода, характеризуется ее полной влагоёмкостью (массовой и объёмной).

*Массовая полная влагоёмкость*

$$w_n = \frac{m_n - m_c}{m_c} \quad (9.2)$$

*Объёмная полная влагоёмкость*

$$w_{n.об} = \frac{V_{ж}}{V}, \quad (9.3)$$

где  $m_n$  – масса породы, максимально насыщенной водой;  $V_{ж}$  – объем воды, заполняющей породу ( $V_{ж} = \frac{m_n - m_c}{\rho_{ж}}$ );  $V$  – объем породы.

Объёмная влагоёмкость связана с массовой посредством следующей формулы

$$w_{n.об} = w_n \cdot \frac{\rho_{ж}}{\rho}, \quad (9.4)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность воды;  $\rho$  – объёмная масса породы.

По величине объёмная полная влагоёмкость примерно равна пористости породы. Если поры в породах не имеют свободного сообщения друг с другом, то в них может остаться некоторое количество защемлённых газов или воздуха даже при полном насыщении пород водой. Тогда  $w_{n.об} < P$ .

Иногда вода способна проникнуть между пакетами кристаллических решёток некоторых минералов (монтмориллонит, вермикулит, галлуазит). Тогда наблюдается  $w_{n.об} > P$ .

Для характеристики породы в естественном состоянии пользуются параметром *естественной влажности*  $w_e$ , равным относительному количеству воды, содержащейся в породах в природных условиях, и *коэффициентом водонасыщения*  $k_{вн}$ , указывающим на степень насыщения породы водой

$$k_{вн} = \frac{w_e}{w_n}, \quad (9.5)$$

Если  $w_e$  заменить  $w_{n.об}$ , а  $w_n$  пористостью  $P$ , то коэффициент водонасыщения будет характеризовать степень максимально возможного заполнения порового пространства водой.

Извлечь всю воду из увлажнённой породы механическими средствами невозможно. При любом механическом воздействии в породе остаётся физически связанная вода. Весьма трудно отдают воду лёссы, глины, очень мелкие пески (пльвуны), так как именно в них имеется большой процент физически связанной, воды. Способность породы отдавать воду под

механическим воздействием и под действием сил гравитации характеризуется *водоотдачей*  $\xi$

$$\xi = w_{\text{п}} - w_{\text{м}} \quad (9.6)$$

Таким образом, чем больше молекулярная влагоёмкость пород, тем меньше их коэффициент водоотдачи.

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 природе кроме воды в породах 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 электрическом сопротивлении.

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

$$\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{п}}} + \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{п}}} + \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{п}}} = 1 \quad (9.7)$$

Отношения  $V_{\text{н}}/V_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{г}}/V_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{в}}/V_{\text{п}}$  называются относительными коэффициентами соответственно нефтенасыщения  $k_{\text{н}}$  газонасыщения  $k_{\text{г}}$  и водонасыщения  $k_{\text{в}}$ .

До сих пор рассматривалось только содержание флюидов в породах. Однако 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 (эффективная).

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

Численно величина проницаемости описывается *коэффициентом проницаемости*  $k_{\text{пр}}$ , выводимым из уравнения Дарси, согласно которому

количество жидкости  $Q$ , прошедшей через образец породы, выражается следующим образом

$$Q = \frac{\Delta P S t}{\Delta l \eta} \cdot k_{np}, \quad (9.8)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения образца,  $m^2$ ;

$t$  – время фильтрации, с;

$\Delta P$  – перепад давлений на пути фильтрации  $\Delta l$ ; Па;  $\eta$  – вязкость жидкости, Па·с.

Из формулы (9.8) имеем

$$k_{np} = \frac{Q \Delta l}{\Delta P t} \cdot \eta, \quad (9.9)$$

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

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

$$k_{\phi} = \frac{Q}{tS}. \quad (9.10)$$

Коэффициент фильтрации  $k_{\phi}$  не учитывает влияние напора пластовых вод и их вязкости на изменение количества фильтрующейся воды. Сравнение  $k_{\phi}$  и  $k_p$  показывает, что между ними в случае фильтрации воды существует следующее соотношение:

$$1 \text{ Д} = 1 \text{ см/с} = 864 \text{ м/сут.}$$

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

Коэффициент трещинной проницаемости  $k_{np,т}$  может быть рассчитан по формуле

$$k_{np,т} = 8,45 \cdot 10^{-4} \cdot b^2 \cdot P_T, \quad (9.11)$$

где  $b$  – величина раскрытия трещин, м;



$P_m$  – трещинная пористость. Так как раскрытие трещин обычно бывает порядка  $(14-15) \cdot 10^{-6}$  м, то  $k_{пр.т} = 1,66 \cdot 10^{-13} P_m$ .

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 скатанных. 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.

Коэффициенты проницаемости и фильтрации определяют, как в лабораторных условиях на образцах, так и в натуральных условиях. Как правило,  $k_{ф}$ , определённый на образце в лабораторных условиях, может на несколько порядков отличаться от действительного коэффициента  $k_{ф}$  массива, поэтому чаще всего для расчётов используют величину  $k_{ф}$ , установленную в полевых условиях путём опытной откачки воды из какой-либо центральной скважины, около которой пробурены наблюдательные скважины.

При этом для безнапорных вод

$$k_{ф} = \frac{2A}{2H - S_1 - S_2}, \quad (9.12)$$

для напорных вод

$$k_{ф} = \frac{A}{h}, \quad (9.13)$$

где

$$A = \frac{0,365 \cdot Q \cdot (\lg x_2 - \lg x_1)}{S_1 - S_2}, \quad (9.14)$$

$H$  – высота столба воды от почвы водоносного пласта до уровня ее в скважине до откачивания;  $S_1$  и  $S_2$  – понижение уровня воды соответственно в первой и второй скважине;  $h$  – мощность водоносного пласта;  $Q$  – расход воды при откачивании из центральной скважины;  $x_1$  и  $x_2$  – расстояние соответственно от первой и второй наблюдательной скважины до оси центральной скважины.

### 9.3 Воздействие жидкости на горные породы

Воздействие жидкости на горную породу может быть динамическим и статическим. *Динамическое* воздействие приводит к механическому разрушению и перемещению горных пород, *статическое* – к набуханию, размягчению и растворению пород.

*Набухание* – это способность породы увеличить свой объем при насыщении водой. Оно характеризуется *коэффициентом набухания*  $k_n$ , равным отношению объема набухшей породы  $V_n$  к ее первоначальному объёму  $V_0$ .

$$k_n = \frac{V_n}{V_0} \geq 1 \quad (9.15)$$

Набухание происходит в результате проникновения воды между пакетами кристаллических решёток минералов. Набухание горных пород отрицательно сказывается как в подземных, так и в открытых горных выработках: оно ведёт к их деформации, разрушению крепи и т.п.

Увлажнение пород снижает их прочность. Значительно снижается прочность горных пород при растворении в содержащейся в них воде адсорбирующихся поверхностно-активных веществ, так называемых *понижителей твёрдости*. Подвижность воды в этом случае возрастает, она проникает в самые мелкие трещины, возникающие при механическом воздействии на породу, вследствие чего трещины не могут полностью закрываться. В результате количество раскрытых трещин сильно увеличивается, а прочность породы – понижается.

Уменьшение прочности при водонасыщении характеризуется коэффициентом размокаемости  $\eta^p$ , выражающим отношение предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}^n$  водонасыщенной породы к пределу прочности ее  $\sigma_{сж}^0$  до насыщения водой

$$\eta^p = \frac{\sigma_{сж}^n}{\sigma_{сж}^0} \leq 1. \quad (9.16)$$

Коэффициент размокаемости слабоустойчивых пород составляет 0,75 и меньше. Наиболее подвержены размоканию осадочные породы.

Коэффициент размокаемости известняков находится в пределах 0,15-0,50, глинистых песчаников – до 0,45.

Наиболее сильно размокают угли и горные породы в движущемся потоке жидкости, поскольку он интенсивно вымывает и выносит мелкие

частички породы. Слабо размокают мелкопористые кварцевые песчаники и почти не размокают изверженные породы.

Вода может растворять некоторые горные породы, хотя обычно они мало растворимы или нерастворимы. Наибольшей растворимостью обладают лишь некоторые виды ангидрида и гипса. К малорастворимым породам относятся известняки и доломиты.

Магматические и метаморфические породы можно считать практически нерастворимыми. Как и размокаемость, растворимость горных пород протекает наиболее интенсивно в движущемся потоке жидкости, особенно в водных растворах различных кислот, поскольку при этом наряду с химическим происходит и физическое растворение путём вымывания частичек и обнажения новых поверхностей, контактирующих с раствором.

Гидравлические свойства горных пород также зависят от внешних факторов. Повышение температуры снижает вязкость жидкостей, а проницаемость пород при этом соответственно возрастает.

Степень набухания глинистых горных пород с повышением давления увеличивается, а с повышением температуры – понижается. С повышением температуры вода переходит в парообразное состояние, а с понижением – в твёрдое. Соответственно этому изменяются все физические свойства горной породы.

#### **9.4 Определение гидравлических параметров горных пород**

Исследование гидравлических свойств горных пород основано на сравнении масс образцов с различными степенями увлажнения. Водо- и газопроницаемость образцов горных пород определяют так. Через образец под давлением пропускают воду или газ. Измеряют расход воды (газа) и перепад давлений, а затем по формуле Дарси вычисляют проницаемость образца.

*Растворимость* горной породы определяют по потере массы образца, подвергнутого длительному воздействию воды или раствора. В природных условиях коэффициент фильтрации горных пород определяют по количеству воды, откачанной из скважин или горных выработок. Это позволяет установить водоприток в единицу времени. Зная площадь скважины, через которую поступает вода, и перепад давлений, определяют коэффициент фильтрации горной породы.

Влажность образца горной породы определяют по разности первоначальной массы образца и после высушивания его при температуре 100-110°C. Влажность горной породы определяют так: образец помещают в сушильный шкаф и высушивают при температуре 100-110°C, после чего

взвешивают. Затем в автоклаве под вакуумом его насыщают водой и опять взвешивают. По разности масс сухого и насыщенного водой образца определяют влагоёмкость горной породы.

### **9.5 Использование гидравлических свойств горных пород для дегазации угольных пластов, ослабления и упрочнения пород**

Наличие в породах жидкостей и газов, их способность перемещаться из одного места в другое оказывают большое влияние на многие технологические процессы горного производства при разработке месторождений, начиная с производительности буровых, добычных, погрузочных, транспортных механизмов и кончая состоянием и поддержанием выработок, очистного пространства, отвалов и т. д. В большинстве случаев сильная водонасыщенность горных пород приводит к снижению производительности труда (ухудшение условия работы, прилипание породы к механизмам) и затруднению поддержания выработок и отвалов.

Поэтому использование гидравлических и газодинамических свойств горных пород в расчётах совершенно необходимо. Расчёты по осушению месторождений и сооружению водоотлива, по устойчивости бортов карьера и откосов отвала основываются на естественной влажности пород, их коэффициентах фильтрации, водоотдачи, влагоёмкости. Большая молекулярная влагоёмкость и малая водоотдача горных пород требуют электрических методов осушения.

Газопроницаемость и газоотдача учитываются при разработке опасных по газу угольных месторождений для осуществления мероприятий по борьбе с газовойделением в шахтах с внезапными выбросами угля и газов. Газопроницаемость пород учитывается в исследованиях по взрываемости массивов.

Гидравлические и газодинамические свойства вмещающих пород приобретают решающую роль в том случае, когда извлекаемое полезное ископаемое находится в жидком или газообразном состоянии. Различия в гидравлических свойствах пород используются в процессах их селекции. Так, на различной смачиваемости минералов основан наиболее широко применяемый в настоящее время метод обогащения полезных ископаемых – флотация.

Вторая область использования гидравлических свойств горных пород – это применение гидравлического воздействия на породы с целью совершенствования технологии их добытия. Гидравлическое воздействие может привести к ослаблению, разрушению или упрочнению пород.

Динамическое воздействие воды на горные породы используется также для усиления эффекта разрушения пород взрыванием. В горном деле используется динамическое воздействие не только воды, но и газов. В качестве примера можно привести обычный взрыв, при котором газы разрыхляют уголь. Для разрыхления угля используется также сжатый воздух.

Довольно широко на шахтах применяют ослабление угля нагнетанием в пласт воды под давлением. При этом наряду с механическим воздействием воды усиливается влияние некоторых гидравлических свойств – водопроницаемости, смачиваемости, влагоёмкости, размокаемости углей. Подобный метод, основанный на размокании горных пород и, следовательно, снижении их прочности, часто применяют на открытых разработках.

Явления размокания, адсорбции, частичного растворения горных пород используют для ослабления последних при механическом бурении скважин. Обратный эффект – упрочнение пород гидравлическим способом – получают, нагнетая в них различные растворы: цемента, гидрогеля, кремниевой кислоты, битума и т.п. Частички этих веществ, адсорбируясь на внутренней поверхности трещин и пор горных пород, закупоривают их, цементируют зерна и повышают общую прочность породы, снижают ее водопроницаемость. Следовательно, упрочнение пород зависит от ее гидравлических свойств – водопроницаемости, ионсорбционной способности и т.д. Упрочнению подвергают обычно стенки выработок, откосы отвалов или карьеров.

Чтобы эффективно использовать геотехнические методы разработки месторождений, кроме растворимости горные породы должны обладать хорошей проницаемостью. Ее увеличивают различными способами: дроблением массива взрывами, образованием трещин методом гидравлического разрыва и т.д.

Для удаления газов в подземных условиях проводят дегазацию (предварительную откачку газа) пластов. Дегазация тем эффективнее, чем больше газопроницаемость пластов. Поэтому целесообразно увеличивать проницаемость пород нагнетанием в пласты угля воды с целью создания раскрытых трещин.

Химической обработкой поверхности частичек породы добиваются увеличения или уменьшения смачиваемости различных минералов.

### **Контрольные вопросы**

1. Что характеризуют гидравлические свойства горных пород?
2. Перечислите виды воды в горных породах.

3. Перечислите параметры, характеризующие различные виды воды.
4. Что такое максимальная гигроскопичность и молекулярная (плёночная) влагоёмкость?
5. Что показывает и как определяется коэффициент водонасыщения?
6. Что показывает и как определяется коэффициент водоотдачи? От чего он зависит?
7. Что такое физическая и фазовая проницаемость горных пород?
8. Что такое коэффициент фильтрации?
9. В чем проявляется статическое и динамическое воздействие воды на горные породы?
10. Что такое коэффициент размокаемости, как он определяется?
11. Где применяют знание гидравлических свойств в практике горного дела?

## ТЕМА 10 ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Свойства горных пород, которые характеризуют содержание, характер движения и взаимодействие с минеральным скелетом породы различных газов называются газодинамическими.

По генезису (происхождению) содержащиеся в осадочном горном массиве газы подразделяют на:

– органические, образовавшиеся в процессе формирования осадочных пород: диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), оксид углерода ( $\text{CO}$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ );

– воздушные: азот ( $\text{N}_2$ ), кислород ( $\text{O}_2$ );

– продукты распада радиоактивных минералов: гелий ( $\text{He}$ ), радон ( $\text{Rn}$ ), торон ( $\text{Tn}$ ), аргон ( $\text{Ar}$ );

– техногенные, порождённые производственной деятельностью человека, к ним относятся газы, выделяющиеся при работе в шахте двигателей внутреннего сгорания и проведении взрывов, а также связанные с заражением горного массива утечками промышленных продуктов, стоками, аварийными сбросами: наиболее распространённые: аммиак ( $\text{NH}_3$ ), пары угле- и нефтехимических производств.

Из-за многообразия условий проникновения газов горный массив насыщен ими неравномерно. Газовая зональность – закономерное распределение газов в угленосных отложениях, являющиеся результатом миграции метаморфических метановых газов из глубины к поверхности и атмосферных газов в обратном направлении. В зависимости от процентного содержания основных видов газов в угленосных отложениях верхние слои литосферы условно выделяют четыре зоны:

– азотно-углекислотная (азот – 65-75%, диоксид углерода – 25-5%), расположена на глубине 60-300 м;

– азотная (азот – 45-5%, диоксид углерода – 15-35%, метан – 0-20%), глубина расположения 120-800 м;

– азотно-метановая (азот – 25-40%, диоксид углерода – 5-15%, метан – 45-70%), располагается на глубинах 130-300 м;

– метановая (азот – 0-25%, диоксид углерода – 0-5%, метан – 30-100%), располагается под другими зонами.

Области техногенного заражения массивов имеют локальный характер, они могут образовываться под заводами, складами и отстойниками химических продуктов и отходов, транспортными магистралями (железные дороги, шоссе, трубопроводы).

Влияние содержащихся в угле и вмещающих породах газов на процессы горного производства велико. Наличие газов в углепородном массиве, как правило, осложняет ведение горных работ.

Из-за присутствия газа в угле и породах происходят, в определённых условиях, газодинамические явления (ГДЯ): интенсивное отделение от массива измельчённого угля или породы, сопровождающееся значительным выделением газа. Наиболее распространённым видом ГДЯ являются выбросы: газа, угля и газа, породы и газа, угля, породы и газа. Первый выброс произошёл во Франции в 1901 году (шахта «Курьер»; при выбросе погибли 1090 человек). В Донбассе первый выброс зарегистрирован в 1907 году при проходке ствола на Смолянке. При очистных работах выбросы начались в 1925 году в Горловке.

Смесь метана и воздуха может гореть и взрываться (нижний предел горючести – при содержании в воздухе более 4% метана, верхний – 20%). Наибольшая энергия взрыва, обусловленная полнотой реакции компонентов (стехиометрия) – при содержании метана – 6-9%). В 1942 году от взрыва метана в Манчжурии на шахте Хонкойко погибло 1549 человек.

Радиоактивные газы (радон, торон) оказывают негативное воздействие на организм человека. В горные выработки они поступают, мигрируя из недр, нередко растворенные в воде, просачивающейся через радиоактивные минералы (Западный Донбасс). Принудительная вентиляция горных выработок обеспечивает разбавление и удаление радиоактивных газов, эффективно обеспечивая безопасность горнорабочих.

Некоторые из выделяющихся из угля газов токсичны. В шахтах, где выделяется  $\text{CO}_2$  (CO) и  $\text{H}_2\text{S}$  известны случаи отравления людей газами. Воздух в действующих подземных выработках не должен содержать вредных газов больше предельно допустимых концентраций, указанных в табл. 10.1.

Таблица 10.1 – Допустимые концентрации газов

Вредные газы	Предельно допустимые концентрации газов в действующих выработках шахт	
	% по объёму	мг/м <sup>3</sup>
Оксид углерода (CO)	0,00170	20
Оксиды азота (в пересчёте на NO <sub>2</sub> )	0,00025	5
Диоксид азота (NO <sub>2</sub> )	0,00010	2
Сернистый ангидрид (SO <sub>2</sub> )	0,00038	10
Сероводород (H <sub>2</sub> S)	0,00071	10



Ведение горных работ в горных массивах, заражённых химическими веществами техногенного происхождения, может привести к отравлению и гибели горнорабочих. На горловской шахте «Александр-Запад» в 1988 году в результате поражения высокотоксичными парами химических веществ погибли 3 горнорабочих и получили отравления более 800 горноспасателей.

Основным способом борьбы с выделяющимися в горные выработки при добыче угля метаном или углекислым газом является разбавление подаваемым с поверхности воздухом. Весьма эффективной мерой является дегазация угольных пластов через пробуренные из горных выработок или с поверхности скважины.

В зависимости от количества газа (метана), выделяющегося в шахте на тонну суточной добычи (т.с.д.) различают 5 категорий шахт по относительной метанообильности (газоносности): негазовые шахты (в которых газ не выделяется):

I категория – до 5 м<sup>3</sup>/т.с.д; II категория – 5-10; III категория – 10-15; сверхкатегорные – более 15.

Газы в толще горных пород распределены неравномерно, фильтрационные свойства массивов также неоднородны, это сказывается на газообильности угольных шахт (табл. 10.2).

Таблица 10.2 – Распределение по категориям газообильности относительного числа шахт (%) в основных угольных бассейнах СНГ

Бассейн	Негазовые	Категория по метану			Сверхкатегорные
		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

Основные газодинамические параметры горных пород следующие.

При инженерных расчётах наиболее часто используют следующие газодинамические характеристики горных пород:

- газоносность,  $q, x, \text{м}^3/\text{т}$
- коэффициент газоотдачи,  $k_{\text{отд}}, \%$
- газоёмкость,  $\omega, \text{см}^3/\text{г}$
- газопроницаемость,  $k_{\text{пр}}, \text{Д}$ .

Газоносность характеризуется количеством газа, содержащемся в единице массы угля или породы (м<sup>3</sup>/т).

Различают газоносность:

$x_{п}$  – потенциальную (реально возможная газоносность породы в определённых термодинамических условиях);

$x$  – природную (газоносность пород в естественных условиях);

$x_o$  – остаточную (остаточная после частичной искусственной или естественной дегазации пород);

$q$  – относительную, на тонну суточной добычи;

Природная газоносность углей составляет 20-40 м<sup>3</sup>/т, в отдельных случаях – 70-100 м<sup>3</sup>/т. Остаточная газоносность составляет 5-10 м<sup>3</sup>/т.

Факторы, влияющие на величину газоносности углей и пород: сорбционная способность породы, ее пористость, влажность, давление газа следующие.

*Потенциальную газоносность* горных пород можно определить из следующего выражения:

$$x_{п} = \frac{a \cdot b \cdot p}{1 + bp} + \frac{pT \cdot P}{T_0 k} \cdot \frac{1}{1 + 0,31W}, \quad (10.1)$$

где  $a$ ,  $b$  – константы сорбции газа данным видом породы или угля, определяемые в лабораторных условиях;  $T$  – температура, К;  $T_0 = 273^0\text{K}$ ;  $P$  – пористость, м<sup>3</sup>/т;  $k$  – коэффициент сжимаемости газа;  $W$  – влажность, %.

*Коэффициент газоотдачи* характеризует способность породы отдавать часть содержащегося в ней газа после обнажения

$$K_{отд} = \frac{x - x_o}{x} \cdot 100\% \quad (10.2)$$

Примечание [Н1]:

В шахте непрерывно в атмосферу выработок поступает газ из массива горных пород и из выработанного пространства. Для обеспечения нормальных микроклиматических условий (для дыхания людей, работы механизмов, предотвращения возможности взрыва) в шахту необходимо подавать большое количество воздуха. При современных темпах добычи в очистной забой подаётся около 1500-2000 м<sup>3</sup>/мин воздуха.

*Газоёмкость* –  $\omega$ , см<sup>3</sup>/г – максимальное количество газа, которое при данной температуре и давлении в свободном и сорбированном состоянии может поглощать единица массы породы.

Сорбционной способностью горных пород называют их способность удерживать за счёт физических и химических связей молекулы газа у минерального скелета пород.

Различают: *абсорбцию* – поглощение газа за счёт его диффузии в массу сорбита, приводящее к образованию твёрдого раствора. Этот процесс

характеризуется малой скоростью и требует значительного времени для его завершения;

*адсорбцию* – размещение и уплотнение молекул газа на поверхности твёрдого тела. Как чисто поверхностное явление процесс характеризуется весьма большой скоростью (на гладкой поверхности процесс завершается практически мгновенно). Для пористых пород скорость зависит от темпов диффузии газа через узкие поры;

*хемосорбцию* – химическое взаимодействие газов с твёрдыми телами, сопровождается образованием неустойчивых химических соединений. Скорость процесса зависит от скорости химических реакций и от скорости диффузии газа к реагирующим поверхностям.

Для углей основной вид – адсорбция. Кроме сорбированного газа уголь содержит и свободный газ, который находится в порах и трещинах. Сорбционная способность углей зависит от следующих факторов: давление; температура; пористость; влажность; вид газа.

Количество сорбированного в горной породе газа возрастает с увеличением его давления над поверхностью (рис. 10.1), при увеличении температуры среды – сорбционная способность снижается (рис. 10.2). Это объясняется увеличением внутренней энергии молекул нагреваемого газа, что способствует преодолению ими сорбционных сил.

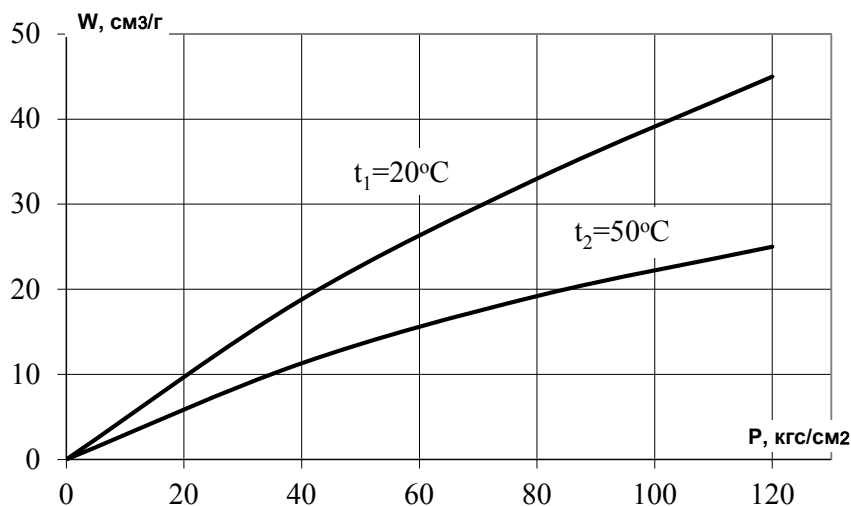


Рисунок 10.1 – Изотермы адсорбции метана в угле.

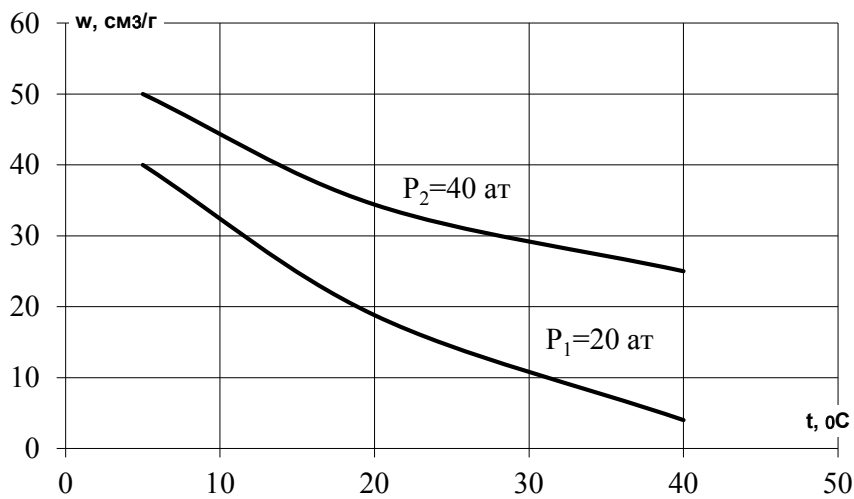


Рисунок 10.2 – Изобары адсорбции метана в угле.

Пористость косвенно характеризует поверхность пород, на которой сорбируются газы. Например, при наличии в угле пор диаметром один мм, площадь поверхности в одном кубическом сантиметре угля составит  $S_{\text{пор}} = 6 \text{ см}^2$ , при диаметре пор 0,01 мм –  $S_{\text{пор}} = 600 \text{ см}^2$ , при размере пор  $10^{-4}$  мм –  $S_{\text{пор}} = 600 \text{ м}^2$ .

Результаты лабораторных испытаний различных типов каменных углей показали, что в среднем  $S_{\text{пор}} = 150\text{-}200 \text{ м}^2/\text{г}$ . В шахтных условиях около 55-90% пор заполнены в угле метаном.

Если поры угля частично заполнены водой, то количество газа, находящегося в свободном состоянии, уменьшается. При заполнении всех пор водой газ будет содержаться только в растворенном состоянии в воде. Количество такого газа зависит от степени растворимости и обычно в 10-30 раз меньше, чем в сухой породе.

Особенности строения молекул газов определяет различие их сорбирования горными породами. Метан имеет в 3-6 раз худшую адсорбционную способность, чем диоксид углерода, азот и аргон – в 2-4 раза худшую, чем метан. Гелий – вообще не сорбируется углями.

Газопроницаемость – способность горной породы пропускать сквозь себя газ.

Под давлением газ перемещается по порам очень медленно, режим движения ламинарный. Коэффициент проницаемости,  $K_{\text{пр}}$ , выводится из уравнения Дарси.

Проницаемость углей Донбасса колеблется в широком диапазоне, она индивидуальна для каждого шахтопласта. Например для пласта  $l_6$  определены пределы изменения  $K_{пр} = (2,39-9,2) \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 \approx (2-9) \text{ Д}$ .

В шахтных условиях проницаемость угольных пластов зависит от нескольких основных факторов.

Наиболее существенным является горное давление. В зависимости от напряжённо-деформированного состояния пористость и трещиноватость пласта изменяются в значительных пределах. В зоне максимума опорного давления пористость минимальна, что определяет низкие значения газопроницаемости. В призабойной части, где происходит отжим угля, проницаемость резко возрастает (рис. 10.3).

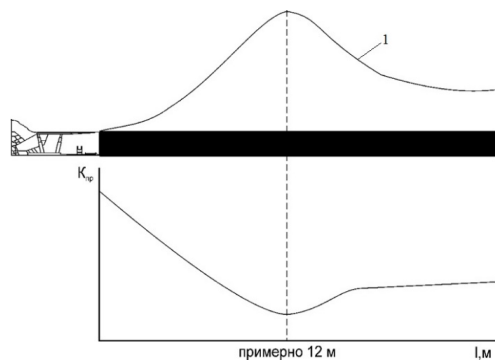


Рисунок 10.3 – Характер изменения газопроницаемости угольного пласта вблизи очистного забоя: 1 – эпюра опорного давления.

Газопроницаемость существенно зависит от типа породы. Угли отличаются большей газопроницаемостью, чем имеющие известковый цемент песчаники; породы, образованные на глинистой основе, отличаются наименьшей проницаемостью.

Для осадочных пород имеет важное значение анизотропия пористости. В направлении параллельном слоистости  $K_{пр}$  в 2-4 раза больше чем по нормали к ней.

Итак, в осадочных горных породах содержатся различные виды газов различного происхождения, как природные, так и техногенные. Они мигрируют из недр и с поверхности в виде газовых потоков, а также растворенными в воде.

Выделение газов в горные выработки из-за токсичного, удушающего и других видов воздействия на человеческий организм осложняет ведение горных работ.

Газодинамические свойства угольных пластов, слоёв горных пород и углепородного массива в целом определяют параметры технологических

процессов угольной шахты. Газоносность и коэффициент газоотдачи являются главными критериями, ограничивающими нагрузку на очистной забой. От них зависит тип схемы подготовки и система разработки шахтопласта, проветривание и дегазация горных выработок.

Газопроницаемость является важнейшим показателем при прогнозировании и профилактике осложняющих отработку пластов газодинамических явлений и эндогенных пожаров.

### **Контрольные вопросы**

1. Что характеризуют газодинамические свойства горных пород?
2. Как делятся газы, содержащиеся в горных породах, по генезису?
3. Как влияют содержащиеся в угле и горных породах газы на процессы горного производства?
4. Что такое внезапный выброс угля и газа (породы)?
5. При какой концентрации метана в газо-воздушной смеси может произойти внезапный выброс?
6. Назовите основные способы борьбы с метаном и внезапными выбросами.
7. Приведите деление шахт по категориям в зависимости от газовыделения.
8. Что такое газоносность? Дайте определение природной, остаточной и относительной газоносности.
9. Что характеризует и как определяется коэффициент газоотдачи?
10. Что такое газоёмкость и сорбционная способность?
11. Что такое абсорбция, адсорбция и хемосорбция горных пород?
12. Что такое газопроницаемость, как она изменяется вблизи очистного забоя?
13. От чего зависит газопроницаемость?

## ТЕМА 11 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

### 11.1 Базовые параметры электромагнитных свойств пород

Электромагнитные свойства горных пород – это свойства, характеризующие поведение горных пород в электрическом и магнитном поле.

Базовыми параметрами электромагнитных свойств горных пород являются:

#### *Удельное электрическое сопротивление ( $\rho_3$ ), Ом·м*

Это величина, обратная силе тока, проходящего через  $1 \text{ м}^2$  площади образца породы при напряжённости электрического поля  $1 \text{ В/м}$ .

По величине  $\rho_3$  породы делятся на:

- проводники  $\rho_3 = 10^{-3} - 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- полупроводники  $\rho_3 = 10^{-3} - 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- диэлектрики  $\rho_3 = 10^{12} - 10^{20} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Породы, слагающие угольную толщу Донбасса имеют следующую величину  $\rho_3$ :

- глинистый сланец –  $10^2 - 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- известняк –  $10^2 - 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- уголь –  $10^3 - 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- песчаник –  $10 - 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Таким образом, породы, слагающим угольную толщину Донбасса, относятся к проводникам или полупроводникам.

В лабораторных условиях определение удельного электрического сопротивления производится с помощью тераометров. При подключении образца к прибору в нем протекает ток, в результате чего на поверхности образца появляются неравновешенные заряды – токи смещения. Чтобы исключить влияние внешних факторов, измерения сопротивления образца проводят, изменяя направление тока, протекающего через образец.

Тогда сопротивление образца

$$R_0 = \frac{2R_+R_-}{R_+ + R_-} \quad (11.1)$$

где  $R_+$  – сопротивление образца при прямой полярности;  $R_-$  – сопротивление образца при обратной полярности.

Удельное электрическое сопротивление зависит от следующих факторов: пористости, трещиноватости, слоистости минерального состава горных пород, а также от температуры и влажности.

Относительная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon_r$ ) – это коэффициент, показывающий во сколько раз уменьшается напряжённость электрического поля при нахождении в нем породы (табл. 11.1)

$$\epsilon_r = \frac{E_{\epsilon_0}}{E_0}, \quad (11.2)$$

где  $E_{\epsilon_0}$  – напряжённость электрического поля в вакууме, В/м;  $E_0$  – суммарная напряжённость электрического поля в породе, В/м.

Таблица 11.1 – Показатели относительной диэлектрической проницаемости

Порода, вещество	Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_r$ , ед.
Воздух	~ 1
Вода	80
Глинистый сланец	6-20
Известняк	8-15
Песчаник	9-11
Уголь	3-15

Относительная диэлектрическая проницаемость горных пород зависит от следующих факторов: частота электрического поля (рис. 11.1), слоистость; пористость; трещиноватость; влажность; температура.

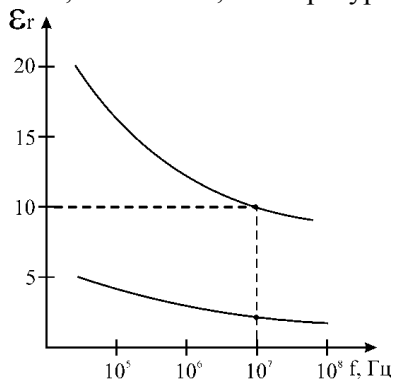


Рисунок 11.1 – Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от частоты электрического поля.

При частоте электрического поля  $f \geq 10^{14}$  Гц в породе возникает только электрическая поляризация; при  $f \leq 10^{12}$  Гц – в горной породе возникает ионная и электронная поляризация при  $f \leq 10^7$ - $10^{10}$  Гц – в породе возникает



дипольная, ионная и электронная поляризация, т.е. при возрастании  $f$  от 0 до  $\infty$  диэлектрическая проницаемость уменьшается.

Для оценки магнитных свойств горных пород используют показатель *относительной магнитной проницаемости* ( $\mu$ ) – это коэффициент, показывающий во сколько раз магнитная индукция поля в данном магнетике изменится при помещении образца в магнитном поле в вакууме.

Магнитное поле характеризуется двумя показателями: напряжённость  $H$  и индукцией  $B$ . Напряжённость магнитного поля  $H$  (А/м) определяет величину и направление действия магнитных сил  $F_M$  в вакууме на единицу магнитной массы  $m_M$ . Согласно закону Кулона, сила взаимодействия между двумя магнитными массами  $m_{M1}$  и  $m_{M2}$  на расстоянии  $r$  друг от друга равна

$$F_M = \pm \frac{1}{\mu_a} \frac{m_{M1} m_{M2}}{r^2}, \quad (11.3)$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость среды.

Магнитная индукция  $B$  – векторная величина, выражающая интенсивность магнитного поля. Между магнитной индукцией и напряжённостью магнитного поля в веществе существует прямо пропорциональная зависимость

$$\mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H} \quad (11.4)$$

В этой зависимости коэффициент пропорциональности  $\mu_a$  также равен абсолютной магнитной проницаемости вещества. В вакууме

$$\mu_a = \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м}$$

Эта константа ( $\mu_o$ ) называется магнитной постоянной.

Относительная магнитная проницаемость, равна отношению

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_o} \quad (11.5)$$

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.

Магнитные моменты атомов и молекул горной породы при отсутствии внешнего магнитного поля могут быть либо равны нулю, либо отличаться от нуля.

Так, если магнитные моменты всех электронов атома компенсируют друг друга, то при  $H = 0$  атом не намагничен.

Такие породы называются диамагнитными. Горные породы, атомы которых обладают магнитным моментом при отсутствии внешнего поля, называются парамагнитными. Горные породы, у которых целые объёмы обладают магнитными моментами при отсутствии внешнего поля, называются ферромагнитными (табл. 11.2).

Таблица 11.2 – Некоторые диа-, пара- и ферромагнитные минералы

Диамагнитные $\mu = 0,999836 - 1,0$	Парамагнитные $\mu = 1,0004$	Ферромагнитные $\mu = 1,0064 - 6,5$
Вода	Воздух	Магнетит
Гипс	Доломит	Пирротин
Графит	Мусковит	Франклинит
Кальций	Пироксен	Якобит
Кварц	Сидерит	Лимонит
Уголь	Хромит	$\gamma$ -гематит

Породы Донбасса относятся в основном и диа- и парамагнетикам.

### 11.2 Использование электрических магнитных свойств горных пород для горного производства

Все способы *разрушения пород* с применением электрической энергии подразделяется на электротермические, обусловленные тепловым пробоем или нагревом породы электрическим током, и электрические, основанные на электрическом пробое горной породы.

К первой группе относится *высокочастотный контактный метод разрушения* плохо проводящих пород. Электроэнергия частотой до 300 МГц проводится к породе по контактирующим с ней электродам. В зависимости от формы электродов и их взаимного расположения в породе возникает электрическое поле определённой конфигурации. Таким образом, можно создать направленное электрическое поле или концентрировать его на определённых участках породы. В результате этого процесса порода разогревается и откалывается в виде чешуек или кусков. При этом методе разрушения горных пород основную роль играют электрические свойства породы и слагающих ее минералов.

*Электрические методы* основаны на электрическом пробое пород. Для разрушения пород электрическим пробоем используют импульсные напряжения. Величина этих напряжений зависит от электрической прочности разрушаемых пород и их размеров. Электрические пробой можно применять для раскалывания кусков породы, бурения и отбойки от массива. Однако для

его осуществления требуются высокие напряжения, опасные для обслуживающего персонала.

**Оттаивание пород** осуществляется пропусканием электрического тока по разогреваемому участку на площади, подлежащей оттаиванию, бурят шпур, в которые помещают электроды, так, чтобы их концы находились в такой породе. При подключении напряжения образуется замкнутая электрическая цепь в такой породе, так как электропроводность такой породы во много раз выше, чем мёрзлой.

Слой, по которому протекает ток, нагревается и передаёт тепло вышележащему слою, который после оттаивания сам начинает проводить так. Постепенно процесс оттаивания достигает поверхности.

При **упрочнении пород** используют электрохимические закрепление и электроплавление.

**Электрохимическое закрепление** осуществляют путём пропускания постоянного электрического тока через влажные породы. В результате химических реакций калий и натрий замещаются водородом, алюминием или железом, и в породе образуются гидраты окиси металлов (например, боксит). При **электроплавлении** водоносные пески нагреваются пропусканием электрического тока до температуры 1700-1800°C, в результате чего песок расплавляется. Остывшая масса образует стекловидное вещество высокой прочности, водонепроницаемое и не разрушаемое.

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 движутся по различным траекториям и могут быть разделены.

Для **добычи серы** применяют высокочастотный электромагнитный нагрев серных руд. Под воздействием электромагнитного поля массив нагревается за счёт диэлектрических потерь независимо от его проницаемости, трещиноватости и теплопроводности. Скорость нагрева, таким образом, определяется только электрическими свойствами и теплоёмкостью нагреваемого объёма.

Для **разведки месторождений** полезных ископаемых широко применяются электромагнитные методы

**Магнитный метод.** Суть метода заключается в измерении величины напряжённости магнитного поля. Напряжённость магнитного поля в каждой точке поверхности Земли зависит от намагниченности находящихся под этой точкой геологических объектов. Этим методом можно исследовать породы,

залегаящие на глубине 10-20 м. По результатам этой съёмки можно судить о геолого-петрографических особенностях массива, трещиноватости пород, разломах и т.д.

Электрические свойства пород используются в *методах электроразведки*. Наиболее распространены следующие.

*Метод естественного электрического поля*, который заключается в последовательном замере потенциалов точек, расположенных на одной прямой линии относительно одной центральной точки. Выявленные аномалии потенциала обычно указывают на наличие какого-то источника локальных токов (соляные или каменноугольные месторождения).

Если хорошо проводящая залежь вскрыта хотя бы одной скважинной или горной выработкой, то ее контуры можно определить *методом заряженного тела*. Один из полюсов источника тока подсоединяют к залежи, другой – заземляют на расстоянии, превышающем размеры залежи в 10-20 раз и более. В результате залежь заряжается и создаёт вокруг себя электрическое поле. Залежь оконтуривают эквипотенциальные линии. Это даёт возможность, прослеживая их распределение на поверхности Земли, определить границы и конфигурацию изучаемого объекта.

Для шпурового *метода определения трещиноватости массива* вокруг горных выработок на кафедре горной геомеханики ДонНТУ был создан прибор радиоинтроскопии, состоящий из зонда, измерительного блока и досылочного устройства. Излучающая катушка зонда создаёт в породах вокруг шпура электромагнитное поле постоянной частоты 1МГц; величина тока в приёмной катушке зонда зависит от относительной диэлектрической проницаемости среды вокруг зонда. Последнее обстоятельство и позволяет обнаруживать в массиве трещины (заполненные, как правило, воздухом) и устанавливать их параметры: величину раскрытия, их местоположение по длине шпура и их угол наклона к оси шпура.

### **11.3 Базовые параметры радиационных свойств горных пород и методы их определения**

Радиоактивность горных пород предопределяется содержанием радиоактивных элементов (урана, актиноурана, тория и радиоактивного калия). Содержание в породах других радиоактивных элементов (технеция, полония, прометия, кальция, рубидия, циркония, олова, теллура, висмута, вольфрама, рения) практически не влияет на их общую радиоактивность, так как скорость их радиоактивного распада очень мала. Содержание высокордиоактивных элементов в земной коре незначительно. Так, среднее содержание урана (до глубины 16 км.) составляет  $3 \cdot 10^{-4}\%$ , а тория –  $8 \cdot 10^{-4}\%$ .

Радиоактивность горных пород характеризуется наличием в них радиоактивных минералов, большинство из которых могут адсорбировать радиоактивные изотопы и элементы из окружающей среды. Так, например, глина и глинистые сланцы в результате адсорбции радиоактивных элементов приобретают значительную радиоактивность.

При радиоактивном распаде, связанном с перестройкой ядер элементов, происходит излучение  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц, а также  $\gamma$ -лучей. Гамма-лучи представляют собой электромагнитные волны с длиной до  $10^{-10}$  м и энергией от  $8 \cdot 10^{-15}$  до  $4,8 \cdot 10^{-15}$  Дж. Они обладают наибольшей проникающей способностью.

В настоящее время известно около 250 радиоактивных минералов, содержащих уран и торий. В зависимости от преимущественного содержания радиоактивного урана или тория, радиоактивные минералы делят на урановые и ториевые.

Наиболее часто встречаются минералы главных типов магматических, метаморфических и осадочных пород по степени их радиоактивности делятся на три группы:

- слабордиоактивные – главные породообразующие минералы (кварц, плагиоклаз, нефелин, калиевые полевые шпаты);
- повышено-радиоактивные – главные акцессорные и рудные минералы (апатит, флюорит, магнетит, ильменит и др.);
- высокордиоактивные – акцессорные минералы (сфен, ортит, монацит, циркон, лопарит и др.).

Радиоактивность осадочных пород, обусловленная наличием в них радиоактивных минералов, близка радиоактивности магматическим образованиям. Содержание радиоактивных элементов в осадочных породах зависит от их происхождения. Так в коренных (массивных) породах, содержание урана и тория значительно меньше, чем в почвах.

Радиоактивность горных пород характеризуется количеством распадающихся за одну секунду атомов вещества. Этот параметр называется *удельной радиоактивностью*. Удельную радиоактивность впервые измерили искровым счётчиком Э. Резерфорд и Х. Гейгер. Так, например, удельная радиоактивность радия составляет  $3,7 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \text{ кг}^{-1}$ .

Проходя через породы, радиоактивные излучения частично поглощаются, за счёт превращения энергии излучения в другие виды энергии. Способность пород поглощать радиоактивные излучения оценивается *коэффициентом поглощения*, который характеризует степень превращения энергии излучения в другие виды энергии.

Между коэффициентом поглощения  $\Theta$  и длиной волны  $\lambda$ , существует следующая зависимость:

$$\Theta = \lambda^3 \gamma \quad (11.6)$$

Проходя через вещество, гамма-лучи сталкиваются с его частицами, вследствие чего их направление изменяется. Хаотическое изменение направления гамма-лучей характеризуется *рассеиванием*.

Для горных пород характерно давление рассеивания лучей, при этом поглощение энергии немного превышает 10% общих потерь энергии.

На практике применяют различные методы изучения радиоактивности пород. Так, радометрические методы позволяют обнаруживать очень незначительные количества радиоактивных веществ.

Абсолютные измерения активности альфа и бета излучений проводятся *методом 4 $\pi$ -счета*, согласно которому регистрируются частицы, испускаемые источником в любом направлении.

Для источников, обладающих значительной активностью, используют *калориметрический метод* измерения радиоактивности, который основан на измерении теплового эффекта. Радиоактивность можно измерить также *масс-спектрометрическим методом* или *методом эмиссионного спектрального анализа*.

На практике широко используются относительные методы измерения радиоактивности, в основу которых положено сравнение радиоактивности анализируемых источников и образцов.

Радиоактивность горных пород можно определить по интенсивности их излучения. Для этого применяют радиометры, сцинтиляционные анализаторы, полупроводниковые детекторы и т. п. Излучения бета- частиц регистрируют *ионизационными калямирами* и *газоразрядными счётчиками*. Для измерения радиоактивности бета-излучений с низкими энергиями применяют метод *жидкостного сцинтиляционного счёта*. При измерении интенсивности гамма-излучений часто применяют *сцинтилируемые пластмассы* в комплекте с *фотоэлектронным умножителем*.

Наиболее распространённым для измерения гамма-излучений является прибор СРП-2.

В качестве датчиков гамма-излучений используют газоразрядные счётчики, часто индикаторами нейтронов служат боровые пропорциональные счётчики.

Радиоактивность горной породы определяют как относительный параметр –  $\Gamma_{\text{акт}}$  (радиоактивность, приведённая к относительному содержанию урана):

$$\Gamma_{\text{акт}} = (\Pi_{\text{п}} \cdot T_{\text{э}} \cdot A) / (\Pi_{\text{э}} \cdot T_{\text{п}}), \quad (11.7)$$

где  $\Pi_{\text{п}}$  и  $\Pi_{\text{э}}$  – количество частиц, вылетающих за 1 мин. соответственно из образца породы и эталона, содержащего уран;

$T_{\text{э}}$  и  $T_{\text{п}}$  – массы эталона и образца;

$A$  – массовое содержание урана в эталоне.

Величина  $\Gamma_{\text{акт}}$  называется грамм-эквивалентом урана на 1г.

#### 11.4 Использование радиационных свойств пород в горной практике

Методы измерения естественной и искусственной радиоактивности широко используются для изучения физических свойств, вещественного состава и состояния горных пород. Они получили название *радиометрических*.

Для определения происхождения и радиологического возраста минералов используют конечные радиогенные продукты распада – стабильные изотопы (аргон, гелий, свинец и т. п.), которые фиксируются масс-спектрометрическим или изотопно-спектральным методом. По количеству и изотопному составу свинца можно точно определить возраст минералов.

Ядерно-физические методы, в которых используются процессы искусственной радиоактивности, применяются для определения элементарного состава пород, а также их физико-химических свойств (влажности, прочности и т.д).

Широкое распространение в наше время получили радиометрические методы поиска месторождений полезных ископаемых (эмациональный, радио-гидро-геологический).

Для изучения геологического разряда буровых скважин применяют *радиоактивный и эманиционный картаж*.

Зависимость поглощения рентгеновских лучей, прошедших через вещество от неординарности строения, минерального свойства и плотности положения в основу *дефектоскопии*.

Для выявления особенностей строения и минералогического состава пород широко используют *рентгеновский микроскоп*.

На горнодобывающих предприятиях, в местах с затруднённым присутствием людей (загрузка скипов в стволах; контроль уровня жидкостей

в ёмкостях, полезного ископаемого в бункерах и т.д.) используется контрольно-измерительная аппаратура, автоматические регулирующие устройства на основе радиоактивных изотопов.

### **Контрольные вопросы**

1. Что характеризуют электромагнитные свойства горных пород?
2. Как делятся горные породы по электрическому сопротивлению?
3. Что такое и как определяется относительная диэлектрическая проницаемость горных пород?
4. От каких факторов зависит относительная диэлектрическая проницаемость горных пород?
5. Что показывает коэффициент относительной магнитной проницаемости и как он определяется?
6. Что такое магнитная индукция?
7. Использование электромагнитных свойств горных пород в горном производстве.
8. Что такое и чем характеризуется радиоактивность горных пород?
9. Что такое коэффициент поглощения излучения и как он определяется?
10. Использование радиационных свойств горных пород в горном производстве.



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика горных пород [Электронный ресурс] : [учебник для вузов] / Соболев Валерий Викторович, Стариков Александр Петрович ; В.В. Соболев, А.П. Стариков ; ГБУЗ «Нац. горн. ун-т». - 12 Мб. - Донецк: Донбасс, 2012. – 1 файл. - Систем. требования: Просмотрщик djvu-файлов. **URL:** <http://ed.donntu.org/books/20/cd9685.djvu>

2. Конспект лекций по курсу «Физика горных пород» (для студентов направления подготовки 21.05.04 «Горное дело») / Сост. Марийчук И.Ф., Купенко И.В., Нефедов В.Е. - Донецк: ДонНТУ, 2019. - 297с. <http://ea.donntu.org/handle/123456789/34796>