

**Министерство образования и науки Украины
Донецкий национальный технический университет**

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

Рекомендовано Министерством образования и науки Украины в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных заведений направления
«Горное дело»
(Гриф № 14/18.2-1073 от 25.05.2004 г.)

Под общей редакцией академика АГН
Украины, профессора Гребёнкина С.С.
и профессора Гавриша Н.Н.

Донецк – 2004

УДК 622.831.3.02:539.2.8
М55

Механіка гірських порід. Т.1: Навч. посібник / Під загальн. ред.
С.С.Гребьонкіна і М.М.Гавриша. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – 169 с.

ISBN 966-7559-92-0

ISBN 966-7559-93-9(Т.1)

Проведено аналіз і систематизація сучасних нормативних і нестандартних методів вивчення фізичних властивостей гірських порід у зразках і в масиві.

Наведені раціональні методи комплексного вивчення властивостей гірських порід у лабораторних умовах з урахуванням недостатньої кількості вихідного матеріалу.

Викладені оптимальні сучасні методи вивчення властивостей і поведіння масивів гірських порід у натурних умовах, методи аналітичних і лабораторних досліджень.

Книга може бути корисною для студентів і аспірантів гірничих спеціальностей технічних вузів.

Рецензенти:

*Булат О.Ф., д.т.н., проф., академік НАН України, м. Дніпропетровськ,
Шашенко О.М., д.т.н., проф., проректор НГУ, м. Дніпропетровськ*

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (Гриф № 14/18.2-1073 от 25.05.2004 р.)

ISBN ISBN 966-7559-92-0

ISBN 966-7559-93-9(Т.1)

© Донецький національний технічний університет, 2004

ЕЕ ВЫСОЧЕСТВУ — «МЕХАНИКЕ ГОРНЫХ ПОРОД»

В строю очень древних и мудрых наук
Скандал, суета — даже паника
Расширив, веками их замкнутый круг,
Уверенно равною стала среди них
горных пород механика!

Принцесса горняцких, мужских дисциплин
Характер имеет строгий —
Из очень большого числа мужчин
К себе приближает не многих.

Но те, уж которых избрала она
Упорны, умны и душою красивы.
Звучит у них в сердце познания струна,
Им — управлять массивом.

Проф. Гребенкин С.С.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие соответствует программе фундаментальной нормативной дисциплины «Механика горных пород», изучаемой студентами направления подготовки 0903 «Горное дело» на Украине.

Учебнику присущи некоторые особенности. В него кратко включены разделы, которые наряду с механикой горных пород составляют более обширную научную дисциплину «Физика горных пород»: акустические, термодинамические, гидродинамические, газодинамические, электромагнитные свойства горных пород. По мнению коллектива авторов, работавших над учебником, необходимость такого подхода заключается в том, что, во-первых, знание этих свойств горных пород позволяет применять и разрабатывать методы контроля механических процессов в массиве горных пород и, во-вторых, существенно расширяют кругозор студентов с точки зрения естественного состояния горных массивов.

Авторы выражают уверенность, что использование данного учебника позволит приобрести студентами глубокие и современные знания о механике горных пород, позволяющие достаточно глубоко изучать последующие дисциплины, составляющие базу направления обучения «Горное дело».

Коллектив авторов с благодарностью примут критические замечания и предложения по улучшению содержания учебника.

ВВЕДЕНИЕ

Недра Украины содержат сравнительно достаточное количество полезных ископаемых для обеспечения развития промышленности и повышения благосостояния народа.

Интенсивное использование полезных ископаемых Украины на протяжении почти двух веков привели к тому, что в настоящее время полезные ископаемые добываются или на достаточно большой глубине, например, уголь или находятся в зоне шельфа Азовского и Черного морей. Такое положение приводит к необходимости вложения существенных затрат для добычи полезных ископаемых, что ложится значительным бременем на бюджет страны.

Снизить затраты на добычу полезных ископаемых возможно при применении высокоэффективных технологий и современной техники. Разработка такой техники и технологии должна базироваться на достижениях горной науки и, в частности, на глубоких знаниях о свойствах горных пород, горных массивов, в их естественном состоянии и после воздействия на них горными работами.

Изложению современных представлений о свойствах горных пород и массивов и об их возможном изменении в результате ведения горных работ посвящен этот учебник.

При написании учебника использованы труды известных ученых и специалистов, внесших весомый вклад в изучение свойств горных пород: М.М.Протодьяконов, П.М.Цымбаревич, Г.Н.Кузнецов, Н.А.Цытович, Л.И.Барон, И.А.Турчанинов, Ж.С.Ержанов, Ю.А.Векслер, И.В.Баклашов, С.В.Кузнецов, П.А.Ребиндер, К.В.Руппенейт, Л.А.Шрейнер, А.И.Берон, Б.Н.Кутузов, А.Н.Ханукаев, В.Н.Кобранова, В.В.Ржевский, Н.В.Мельников, Л.А.Насонов, М.А.Иофис, Э.В.Каспарьян.

Раздел 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ

1 ПРЕДМЕТ И МЕТОД МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД

1.1 Механика горных пород в системе горных наук

Теоретической основой горного дела являются горные науки, важнейшей из которых с точки зрения изучения свойств горных пород является физика горных пород и ее значительная часть — механика горных пород.

Физика горных пород — фундаментальное научное направление в системе горных наук, изучающая физико-технические свойства горных пород и массивов при их взаимодействии с естественными и искусственно создаваемыми физическими полями в процессах добычи полезных ископаемых и строительства подземных сооружений.

Механика горных пород — часть физики горных пород, изучающая прочность, устойчивость и деформируемость дискретных объемов горных пород и массивов горных пород и горнотехнических 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.

Механика горных пород опирается на достижения таких наук, как физика твердого тела, теория пластичности, реология, геологические науки.

Систематизируя свойства горных пород, разрабатывая методы количественной оценки свойств и состояния горных пород и массивов, механика горных пород является базой для создания инженерных методов расчета горной технологии.

Изучение студентами таких дисциплин, как «Механика подземных сооружений», «Разрушение горных пород», «Управление состоянием породных массивов», «Технология разработки месторождений полезных ископаемых» и др. базируется на глубоких знаниях механики горных пород.

1.2 Объект и метод механики горных пород

Объектом исследования механики горных пород является горная порода вообще и горный массив в частности, а именно механические свойства массива до воздействия на него горными работами и процессы изменения этих свойств после возникновения в нем закрепленных и не закрепленных 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 напряженно-деформированного состояния массива пород, методов проведения и крепления горных выработок и т. п.

Учитывая вышеизложенное, **метод исследования** в механике 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.

Объект исследования в механике горных пород более сложен и зависит от большого количества случайных факторов, чем, например, в физике твердого тела. По этой причине при обработке результатов испытаний свойств горных пород и натурных наблюдений широко используются методы теории вероятностей и математической статистики, широко используются эмпирические зависимости, физические процессы часто описываются феноменологически.

1.3 Задачи механики горных пород и ее практическое значение

Задачи механики горных пород определяются потребности горного производства и в настоящее время включают в себя несколько направлений.

Исследование физико-механических свойств горных пород на образцах и в натуральных условиях. Результатом таких исследований являются величины физико-технических параметров пород, которые в последующем используются для расчетов режимов работы и производи-

тельности существующих горных машин, а также для проектирования новой горной техники. Кроме того, знание свойств горных пород при изменении внешнего воздействия позволяет установить закономерности возможных изменений параметров свойств пород в необходимом для практики направлении.

Исследование физических процессов в горных породах. Результатом этих исследований являются новые методы воздействия на горные породы, новые технологии производства горных работ, новые методы контроля состояния и поведения горных пород в процессах горного производства.

Практическое значение механики горных пород в системе горных науки и для горного производства огромно.

На этапе проектирования горного предприятия свойства горных пород определяют все основные параметры технологической схемы предприятия (вскрытие, подготовка, система разработки, проветривание, водоотлив, транспорт), а также выбор горных машин, соответствующих своими эксплуатационными параметрами свойствам горных пород.

На этапе строительства и эксплуатации горного предприятия знания о процессах, происходящих в горном массиве, и о свойствах пород позволяют планировать мероприятия, позволяющие ликвидировать или значительно снизить вредный эффект таких опасных проявлений горного давления, как неожиданное обрушение пород, горные удары, внезапные выбросы угля, породы и газа, самовозгорание горных пород, загазирование горных выработок, вредная подработка объектов на поверхности и т.п.

На этапе ликвидации горных предприятий знания о состоянии горных пород и породных массивов, содержащих пустоты, созданных в результате деятельности человека, позволяет верно определить меры, снижающие вредные последствия закрытия горного предприятия. В основном эти мероприятия связаны с исключением неожиданных, самопроизвольных оседаний земной поверхности, регуляцией движения подземных и грунтовых вод и рекультивацией земель.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие между физикой и механикой горных пород?
2. Какие научные дисциплины являются базой для механики горных пород?
3. Что является объектом исследования в механике горных пород?
4. Какие методы исследований применяются в механике горных пород?
5. В чем заключаются задачи механики горных пород?
6. Каково практическое значение механики горных пород?

2 ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

2.1 Минералы, горные породы, массив горных пород, образец горной породы

Горная порода — устойчивые агрегаты одного или нескольких минералов, образующие самостоятельные геологические тела.

Минерал — природное, как правило, твердое тело, относительно однородное по химическому составу и физическим свойствам, возникшее как продукт физико-химических процессов, протекающих на поверхности и в глубинах Земли.

Известно около 3000 различных минералов, однако только около 20 являются основными породообразующими.

Породообразующие минералы можно условно разбить на несколько важнейших групп: кварцевые (халцедон, кремень, кварц и др.), силикатные (слюда, полевой шпат, пироксен и др.), карбонатные и глинистые гидрофильные (доломит, кальцит, каолинит и др.), легкорастворимые (сильвин, галит, гипс и др.).

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

Строение горных пород — размеры, форма, взаимное расположение, способ срастания слагающих их минералов, структура и текстура.

Структура горной породы — размеры, форма минеральных частиц, характер связей между ними и степень кристаллизации пород (полнокристаллические, неполнокристаллические, стекловатые, порфировые, обломочные структуры).

Текстура горной породы — взаимное расположение структурно однотипных частей породы в занимаемом ими пространстве.

Текстура породы может быть упорядоченной и неупорядоченной. По ориентации частиц породы и наличию пустот различают текстуры: *массовая*, с частицами породы плотно прилегающими друг к другу и ориентированными произвольно; *пористая*, с частицами прилегающими друг к другу неплотно и имеющими множество пор; *слоистая*, с чередованием частиц, образующих слои и напластования.

Горные породы по *генезису*, т.е. в зависимости от геологических процессов, в результате которых они образовались, подразделяют на три группы: магматические (изверженные), метаморфические и осадочные.

По характеру *связей между частицами* горные породы классифицируют следующим образом.

Твердые скальные — с жесткой связью между минеральными частицами и с прочностью при одноосном сжатии более 50 МПа.

Твердые полускальные обладают жесткой связью, а также пластической между минеральными частицами и имеют прочность при одноосном сжатии от 20 до 50 МПа.

Связные — с молекулярными связями в сухом состоянии и ионно-электростатическими в увлажненном состоянии, имеющие прочность при одноосном сжатии от 1 до 20 МПа.

Рыхлые и разрыхленные в результате деятельности человека (раздельно-зернистые, сыпучие) с молекулярными связями между частицами или с ничтожно малыми связями; простые механические смеси частиц минералов или обломков твердых пород.

Текущие — с минеральными частицами, разобращенными водой, способные перемещаться с насыщающей их водой.

Породный массив (сокращению «массив») — связный участок земной коры, вмещающей пласты или залежи полезного ископаемого, состоящий из совокупности горных пород, сформировавшихся в определенной геолого-структурной обстановке и характеризующийся присущими ему физическими и геологическими особенностями.

Для исследования в лабораторных условиях свойств горных пород, слагающих массив, из него извлекают образцы.

Образец горной породы — отдельная часть стальной, полускальной или связной породы или отдельный объем рыхлой или разрыхленной породы, извлеченные из массива в его естественном состоянии и предельно характеризующие свойства элементарного объема массива.

2.2 Классификация физико-технических свойств пород

Физическое свойство горной породы — внутренние, присущие данной породе особенности, обуславливающие ее различность или общность с другими породами, проявляющееся как ответная реакция породы на воздействие на нее внешних физических полей или сред.

Физическое свойство горной породы оценивается одним или несколькими параметрами.

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

Известно около 70 параметров физических свойств, из которых только 12 признаны базовыми, характеризующими 4 группы свойств пород (плотностные, механические, тепловые и электромагнитные).

Базовые параметры физических свойств горных пород (см. таблицу 2.1)— независимые физические параметры свойств горных пород, позволяющие при их наличии вычислить все остальные параметры.

Определения каждого из базовых параметров, а также и других параметров приведены в соответствующих, разделах данного учебника.

2.3 Отбор, хранение и подготовка к испытаниям образцов горных пород

Для последующего изготовления и испытания образцов горных пород в натуральных условиях в намеченных местах, исходя из решаемой исследовательской задачи, отбирают пробы горных пород.

Пробы *скальных или полускальных* горных пород, исходя из наличия скважин или горных выработок, могут быть представлены кернами или монолитами, отделяемыми от забоев, почвы, кровли или стенок выработок. Размеры и количество кернов или монолитов должны обеспечивать возможность изготовления необходимого числа образцов для всех предусмотренных видов испытаний.

Минимальный диаметр кернов, пригодных в качестве пробы — 43 мм, а длина — не менее 150 мм.

Минимальные размеры монолитов — 200x200x200 мм (предпочтительно 300x300x200). Отбор проб *связных, рыхлых, разрыхленных или текучих* производят в горных выработках с помощью ножа, лопаты и т.п. и в скважинах с помощью буровых наконечников или грунтососов. Для связных пород, не сохраняющих форму без жесткой тары, пробу отбирают с помощью режущего кольца диаметром 90 мм или 200 мм для крупнообломочной породы (частицы крупнее 10 мм составляют по массе более 50%).

Упаковка и консервация проб для сохранения их естественной влажности должна производиться по возможности немедленно. Если нет возможности произвести немедленную консервацию, проба должна быть временно, не более чем на 10 ч., помещена в полиэтиленовый пакет. Консервация проб (для связных вместе с тарой) осуществляется в следующем порядке: проба обильно смачивается расплавленным парафином (желательно с добавкой 10-15% битума), затем оборачивается в смоченную парафином бумагу и потом обертывается двумя слоями марли, смоченной в парафине. Пробы рыхлых, разрыхленных или текучих

пород укладывают в металлические коррозионностойкие или пластмассовые банки с герметически закрывающимися крышками.

Таблица 2.1 – Базовые параметры свойств горных пород

Свойства	Параметр	Обозначение	Размерность	Единицы измерения
Плотностные	Объемная масса	ρ	$L^{-3} \cdot M$	кг/м ³
	Пористость	P	–	%
Механические	Предел прочности при одноосном сжатии	$\sigma_{сж}$	$L^{-3} \cdot M \cdot T^{-2}$	Па
	Предел прочности при одноосном растяжении	σ_p	$L^{-3} \cdot M \cdot T^{-2}$	Па
	Модуль продольной упругости	E	$L^{-3} \cdot M \cdot T^{-2}$	Па
	Коэффициент поперечных деформаций	ν	–	–
Тепловые	Коэффициент теплопроводности	λ	$L \cdot M \cdot T \cdot \theta^{-1}$	Вт/(м · К)
	Удельная теплопроводность	c	$L^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1}$	Дж/(кг · К)
	Коэффициент линейного теплового расширения	α	θ^{-1}	1/К
Электромагнитные	Удельное электрическое сопротивление	$\rho_э$	$L^3 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}$	(Ом · м)
	Относительная диэлектрическая проницаемость	ϵ_r	–	–
	Относительная магнитная проницаемость	μ	–	–

Для транспортировки проб на значительные расстояния их следует укладывать в ящики на слои увлажненных опилок или стружек и затем засыпать этим же материалом.

Срок хранения проб до изготовления из них образцов горных пород и последующих испытаний не должен превышать: для рыхлых, разрыхленных и текучих пород — 2 суток, для остальных пород — 3 месяца.

Следующим этапом подготовки породы к испытаниям является изготовление образцов. Форма и геометрические размеры образцов, а также необходимое количество образцов регламентируется методикой испытаний и это будет изложено в последующих разделах. Различают образцы правильной формы (цилиндрические, кубические, диски, параллелепипеды), полуправильной формы с двумя параллельными плоскостями и образцы неправильной формы. Для изготовления образцов правильной и полуправильной формы из скальных и полускальных пород обычно используют камнерезные машины различных конструкций.

При проветривании комплексных испытаний физико-механических свойств данной породы часто возникает проблема проведения лабораторных экспериментов с минимальной трудоемкостью и на пробах минимальных размеров. По этой причине рациональная последовательность изготовления образцов и проведения испытаний может оказаться актуальной. На рисунке 2.1 приведена одна из возможных схем рациональной последовательности определения плотностных и механических свойств скальных горных пород при наличии проб в виде монолитов.

2.4 Обработка результатов определения свойств пород

Результаты, получаемые в результате определения величины того или иного параметра свойств горной породы строго говоря случайны, зависят от множества факторов и поэтому при их обработке применяют методы математической статистики в следующей последовательности.

Вычисляют *среднюю арифметическую* величину параметра

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.1)$$

где n — количество испытаний;

x_i — результат i — го испытания.

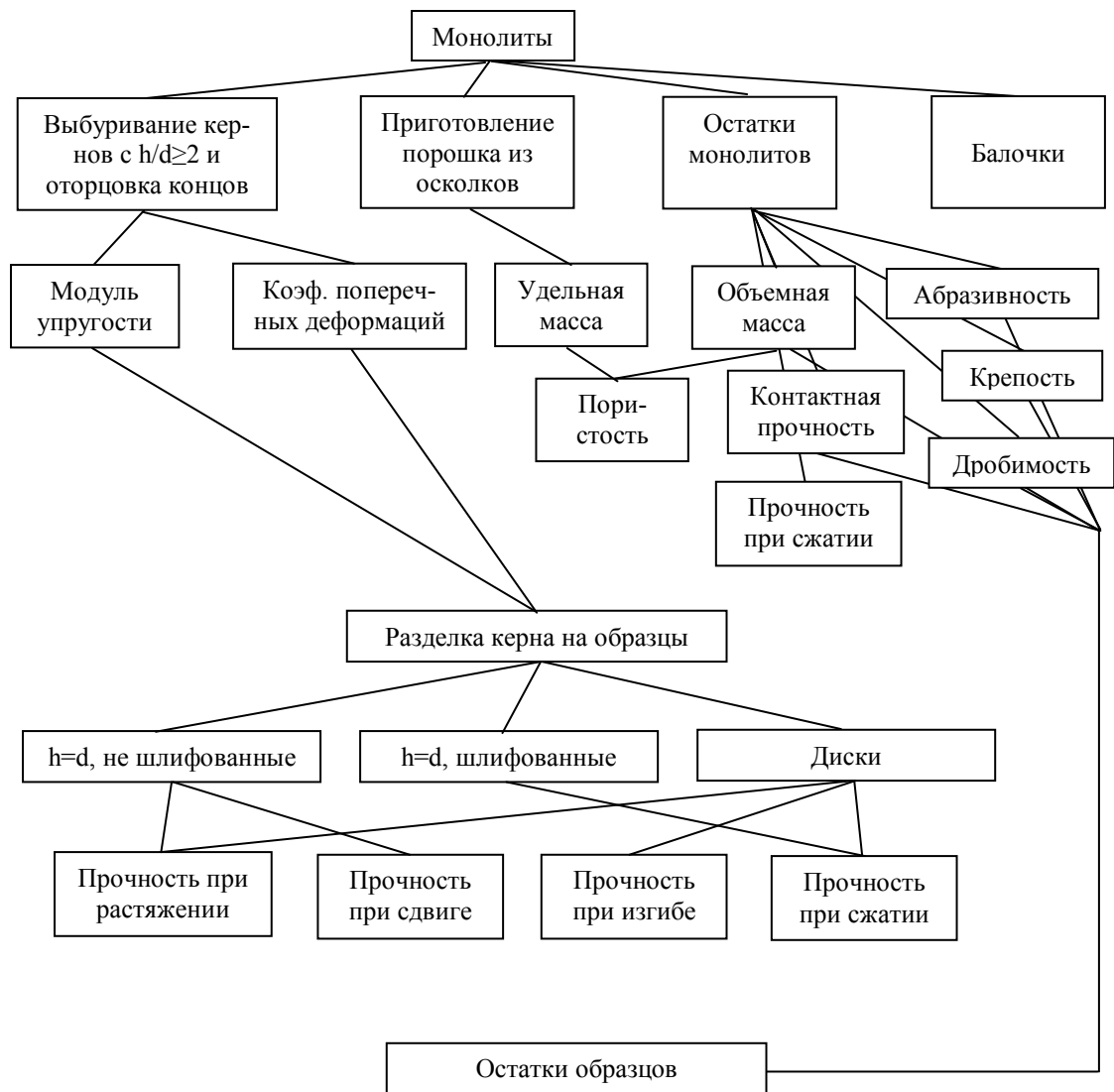


Рисунок 2.1 – Схема рациональной последовательности определения плотностных и механических свойств горной породы

Вычисляют величину среднего квадратического отклонения (ошибки) единичного результата

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} \quad (2.2)$$

На этом этапе возможна отбраковка, отбрасывание некоторых результатов испытаний, величина которых x_k существенно отличается от \bar{x} . Для этого вычисляют критерий

$$V_{\max} = \left| \frac{\bar{x} - x_k}{S} \right| \quad (2.3)$$

и, если $V_{\max} \geq 1,71$, значение x_k отбрасывают и заново вычисляют величины \bar{x} и S .

Далее вычисляют величину *коэффициента вариации*, т.е. среднее относительное отклонение полученных величин параметра от его средней арифметической величины

$$K_{\text{вар}} = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Окончательный результат представляют в виде

$$\bar{x} \pm t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{при } P=\alpha, \quad (2.5)$$

где $t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}}$ – доверительный интервал значений параметра;

t_{α} – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа испытаний n и принятой величины доверительной вероятности α (чаще всего принимают $=0,85; 0,9; 0,95$).

Например, результат испытания образцов для определения предела прочности при одноосном сжатии

$$\sigma_{\text{сж}} = 48 \pm 5,2 \text{ МПа} \quad \text{при } P=0,85$$

Количество испытаний n в стандартизованных методах испытаний, где оговорена техника испытаний, требования к образцам породы и приборной базе обычно уже определено и рекомендуется минимальная величина n .

В иных случаях исследователь должен определить необходимое число испытаний для принятой им величины доверительной вероятности и полученных в предварительной серии испытаний величины $K_{\text{вар}}$

для обеспечения ошибки измерения не более установленной им величины $\xi = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%$ по следующей формуле

$$n = \left(\frac{t_{\alpha} K_{\text{вар}}}{\xi} \right)^2 \quad (2.6)$$

Например, если в предварительной серии $K_{\text{вар}}=20\%$, установленная величина доверительной вероятности $\alpha=0,95$ (и значит $t_{\alpha}=1,96$) и желаемая ошибка измерения $\xi=15\%$.

$$n = \left(\frac{1,96 \cdot 20}{15} \right)^2 = 6,8, \text{ т.е. необходимое число испытаний равно } 7.$$

Контрольные вопросы

1. Чем горная порода отличается от минерала?
2. Какие типы горных пород по характеру связей между частицами Вы знаете?
3. Что означает термины «породный массив» и «образец горной породы»?
4. Чем отличаются понятия «свойство горной породы» и «параметр свойства горной породы»?
5. Чем отличается порядок отбора проб скальных и полускальных пород от других видов породы?
6. В каком виде следует представлять результаты определения параметра свойства горной породы?

Раздел 2 ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

3 ПЛОТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД

Плотностные свойства – свойства, обусловленные действием гравитационного поля Земли и особенностями строения горных пород.

3.1 Плотностные свойства скальных и связных пород

Основные *параметры плотностных свойств* скальных и связных горных пород следующие: удельная масса (плотность твердой фазы), ρ_0 , кг/м³; удельный вес, γ_0 , Н/м³; объемная масса (плотность), ρ , кг/м³; объемный вес, γ , Н/м³; пористость (общая), P , % или ед.; коэффициент пористости, $K_{п}$, ед.

Важнейшими признаками строения пород, влияющего на величину параметров их плотностных свойств, являются их структура, текстура, пористость и трещиноватость.

Структура – степень кристаллизации (полнокристаллические, неполнокристаллические, стекловатые, порфиоровые, обломочные), размеры, форма минеральных частиц и характер связей между ними.

Текстура (сложение) – взаимное расположение структурно однотипных частей породы в занимаемом ими пространстве (массивная, пористая, слоистая).

Пористость – совокупность всех пустот в горных породах, заключенных между минеральными частицами или их агрегатами.

Поры классифицируют: по происхождению (первичные, вторичные); по форме (межзеренные, пузырчатые, каналовидные, щелевидные, ветвистые и т.д.); по размерам (субкапиллярные < 0,2 мкм, капиллярные 0,2 – 100 мкм, сверхкапиллярные > 100 мкм); и по контакту с окружающей средой (открытые и закрытые).

Параметры пористости следующие.

Общая пористость – объем пор в единице объема породы

$$P = \frac{V_{\text{п}}}{V} \cdot 100 \% \text{ или } P = \frac{V_{\text{п}}}{V}, \quad (3.1)$$

где $V_{\text{п}}$ – объем пор в данной массе породы;
 V – объем породы данной массы.

Коэффициент пористости – отношение объема пор к объему твердой фазы горной породы

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{т}}} \quad (3.2)$$

Эффективная пористость – отношение объема открытых пор к объему породы

$$P_{\text{эф.}} = \frac{V_{\text{оп}}}{V} \cdot 100 \% \quad (3.3)$$

Трещиноватость – совокупность трещин в горной породе.

Трещина – плоский разрыв сплошности среды, величина которого на порядок и более превосходит межатомные расстояния в кристаллической решетке минералов ($\sim 10^{-10}$ м).

По происхождению различают трещины: первичные (эндогенные), которые образовались в период формирования породы; вторичные (тектонические, экзогенные); трещины выветривания и трещины, вызванные горным давлением и ведением горных работ.

Пределы изменения параметров трещиноватости: протяженность трещин (10^{-9} – 10^5 м); раскрытие трещин (10^{-9} – 1 м); расстояние между трещинами (10^{-9} – 1 м).

Кроме этого, в горной практике трещиноватость часто оценивают по отношению количества (длины или раскрытия) трещин к единице площади (длины или объема) горной породы.

Например, одним из геомеханических критериев состояния непосредственной кровли в призабойном пространстве лавы является *удельная трещиноватость кровли*

$$K_{\text{т}} = \frac{\sum l_{\text{тi}}}{S_0}, \text{ шт./м}, \quad (3.4)$$

где $l_{\text{тi}}$ – длина отдельной трещины на данном участке лавы, м;
 S_0 – площадь участка лавы, на котором наблюдается состояние кровли, м².

Важен также угол распространения трещин в пространстве и расстояние между трещинами.

Геологи, изучая извлеченные керны породы, оценивают трещиноватость горного массива параметром, который называется *трещинная пористость*.

$$n_T = \frac{b_{cp} \Sigma l}{2rh}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (3.5)$$

где b_{cp} – среднее раскрытие трещин, м;

Σl – суммарная длина трещин, измеренная по поверхности керна, м;

r и h – соответственно радиус и высота керна, м.

Удельная масса породы – масса единицы объема твердой фазы (минерального скелета) породы

$$\rho_0 = \frac{m_T}{V_T} \quad (3.6)$$

Удельный вес – вес единицы объема твердой фазы (минерального скелета) породы

$$\gamma_0 = \frac{G_T}{V_T} \quad (3.7)$$

Объемная масса – масса единицы объема породы в ее естественном состоянии.

В общем случае горная порода состоит из твердой, жидкой и газообразной фазы, тогда объемная масса

$$\rho = \frac{m_T + m_{ж} + m_{г}}{V_T + V_{ж} + V_{г}} \text{ или просто } \rho = \frac{m}{V} \quad (3.8)$$

Объемный вес – вес единицы объема породы в ее естественном состоянии.

$$\gamma = \frac{G_T + G_{ж} + G_{г}}{V_T + V_{ж} + V_{г}} \text{ или просто } \gamma = \frac{G}{V} \quad (3.9)$$

Пределы изменения плотностных параметров скальных и связных пород следующие:

– ρ_0 зависит от плотности слагающих минералов и изменяется от 2000 до 5100 кг/м³;

– ρ зависит от пористости и изменяется от 1000 до 4500 кг/м³ (для угольных месторождений, например, бурый уголь – 1060 ÷ 1410 кг/м³; каменный уголь – 1220 ÷ 1580 кг/м³; антрацит – 1420 ÷ 1880 кг/м³; вмещающие породы – 2400 ÷ 2890 кг/м³);

– P зависит от строения и изменяется от 0,01 до 90 % (для углей – $P=6\div 12\%$, для вмещающих пород – $P=4\div 30\%$); K_{II} от 0,0001 до 9.

Плотностные параметры взаимосвязаны между собой следующими зависимостями

$$\rho = \rho_0(1 - P) \qquad \rho = \frac{\rho_0}{1 + K_{II}} \qquad (3.10)$$

$$P = \frac{K_{II}}{1 + K_{II}} \qquad P = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} \cdot 100\%$$

Плотностные параметры скальных и связных пород определяют в лабораторных условиях. Обычно определяют плотность, используя метод гидростатического взвешивания образцов неправильной формы, и удельную массу (пикнометрическим методом), а остальные параметры вычисляют, используя вышеприведенные формулы.

3.2 Плотностные свойства рыхлых и разрыхленных горных пород.

Основные *параметры плотностных свойств* рыхлых и разрыхленных горных пород следующие: насыпная масса, ρ_n , кг/м³; насыпной вес, γ_n , Н/м³; 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 объемное 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*

$$d_{cp} = \frac{\sum d_i m_i}{\sum m_i}, \quad (3.11)$$

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 Π_i – процентное массовое содержание в данном объеме породы кусков с размерами от 0 до d_i , а D_{max} – максимальный размер кусков в данном объеме породы.

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

$$\Pi_i = 100 \left(\frac{d_i}{D_{max}} \right)^n \%, \quad (3.12)$$

где n —экспонента кривой ($n = 0,4 \div 0,5$ для шаровидных зерен и $n = 0,3$ для острогранных).

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

$$\rho_n = \frac{m_p}{V_p} \quad (3.13)$$

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

$$\gamma_n = \frac{G_p}{V_p} \quad (3.14)$$

Коэффициент разрыхления – отношение объема разрушенной породы к ее объему в массиве.

$$K_p = \frac{V_p}{V} \quad (3.15)$$

Пустотность – отношение объема пустот к объему разрыхленной породы

$$M = \frac{V_{\text{пуст}}}{V_p} \text{ или } M = \frac{V_{\text{пуст}}}{V_p} \cdot 100 \% \quad (3.16)$$

Пределы изменения плотностных параметров рыхлых и разрыхленных пород следующие:

– ρ_n зависит от гранулометрического состава, влажности и условий образования и состояния разрыхленной породы и изменяется от 1500 до 4000 кг/м³. Влажность, например, в пределах от 0 до 8÷11% играет роль своеобразного «клея» в разрыхленной породе, не позволяя ей компактно заполнить данный объем и, тем самым, уменьшая ρ_n . Дальнейшее увлажнение породы наоборот уменьшает силы молекулярного сцепления между частицами породы и в конечном итоге увеличивает ρ_n . Вибрация вызывает эффект уплотнения, а значит и увеличения ρ_n , 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 разрыхленной 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, возведенная 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 разрыхленных пород взаимосвязаны между собой и с параметрами скальных и связных пород следующими зависимостями

$$K_p = \frac{\rho}{\rho_n} \quad M = 1 - \frac{\rho_n}{\rho} \cdot 100 \% \quad (3.17)$$

Плотностные параметры рыхлых и разрыхленных горных пород определяют следующими методами.

Для определения насыпной массы используют гостированные мерные сосуды (см. таблицу 3.1), в которые засыпают породу, убирают излишек и затем взвешивают. Зная объем и массу породы, вычисляют насыпную массу.

Коэффициент разрыхления и пустотность обычно вычисляют по формулам 3.17.

Гранулометрический состав определяют по разному в зависимости от крупности кусков: для частиц крупностью $> 0,1$ мм используют ситовый анализ с использованием сит с разными размерами ячеек. Для более мелких частиц – седиментационный анализ, смысл которого заключается в измерении толщины слоя осадка в пульпе из воды и породы за данное время. На рудниках и карьерах часто применяют фотопланиметрический метод, когда разрыхленная порода в насыпном состоянии или в вагонетках фотографируется, на фотографию наносят масштабную сетку и подсчитывают процентное содержание кусков различной крупности.

Таблица 3.1 – Мерные сосуды для определения насыпной массы рыхлых и разрыхленных 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
≥ 40	100	кубическая	465

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

Контрольные вопросы

1. Перечислите параметры плотностных свойств скальных и связанных горных пород.
2. Перечислите параметры плотностных свойств рыхлых и разрыхленных горных пород.
3. Что больше по величине: удельная масса или плотность одной и той же горной породы?
4. Что больше по величине: плотность или насыпная масса одной и той же горной породы?
5. Какой метод Вы выберете для определения гранулометрического состава разрыхленной породы, если известно, что $D_{\max}=30$ мм?

4 ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД

4.1 Механические напряжения в горных породах

4.1.1 Основные представления о напряженном состоянии горных пород

Прочность и устойчивость сооружений, возводимых на породах или непосредственно в их толще, определяются напряженным состоянием, возникающем 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 расчете горных пород используют положения теории упругости, которые могут быть применены для любых линейно-деформируемых тел. Горные породы при определенных 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 расчете 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.

4.2.1 Понятие о напряжениях и деформациях

Рассмотрим на простейшем виде деформации – разбежные – элементарные внутренние усилия и перемещения, возникающие при действии на брус продольной силы F (рисунок 4.1).

Разрезаем мысленно брус сечением на две части, действие одной части на другую заменяем усилием N (продольная сила). Эта продольная сила определяется из уравнения статики

$$\sum Z = 0 \dots \dots N = F \quad (4.1)$$

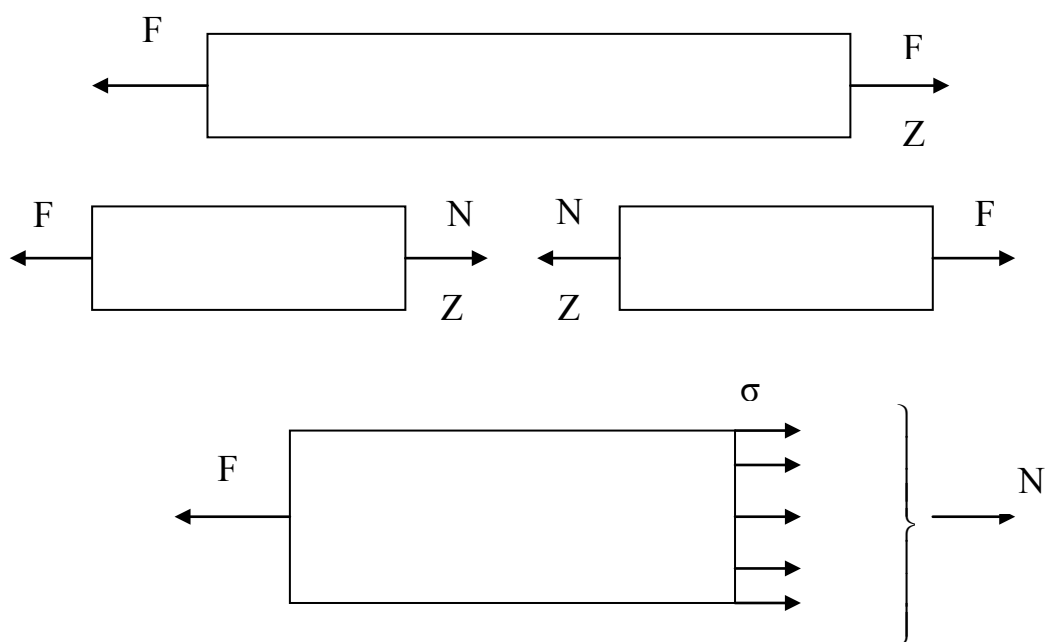


Рисунок 4.1 – К расчету бруса при растяжении

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.

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

$$\sigma = \frac{N}{S}, \text{ Па}, \quad (4.1)$$

где N – продольная сила, Н;
 S – площадь поперечного сечения, м².

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

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \quad (4.2)$$

Допускаемые напряжения определяют по зависимости

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{n}, \quad (4.3)$$

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 (рисунк 4.2). До деформации длина его была ℓ после деформации $\ell_1 = \ell + \Delta\ell$. Величина $\Delta\ell$ называется абсолютным удлинением бруса.

Отношение

$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell} \quad (4.4)$$

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

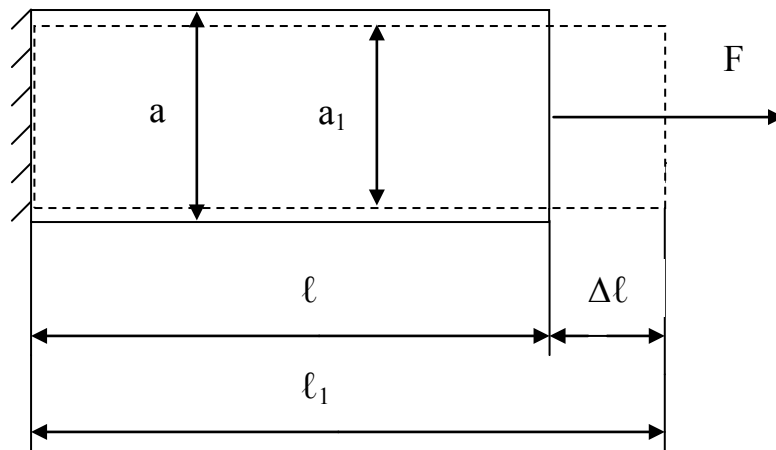


Рисунок 4.2 – Изменение размеров бруса

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 путем.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon^1}{\varepsilon} \right| \quad (4.5)$$

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:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (4.6)$$

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

Эта величина является физической константой материала и определяется экспериментально.

Определим напряжения, возникающие в брусе при растяжении в некотором сечении, нормаль к которому расположена под углом α к оси бруса (рисунок 4.3, а).

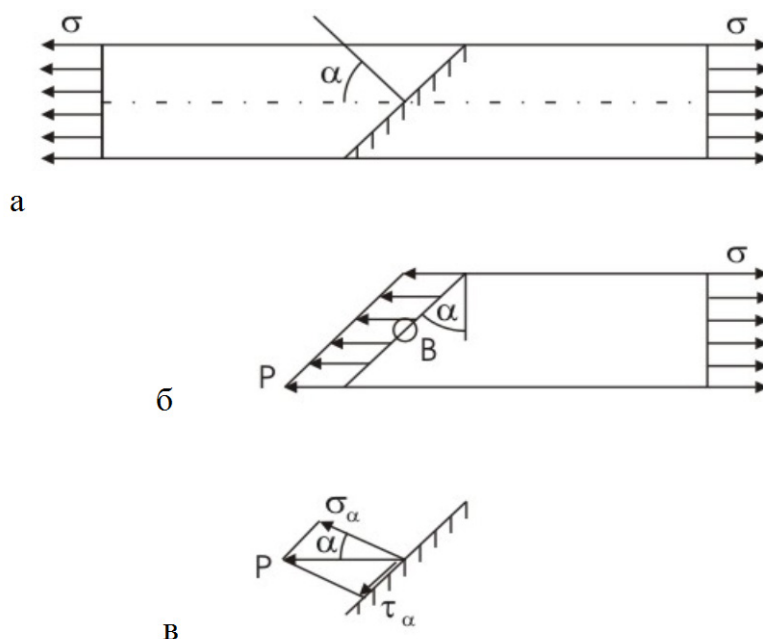


Рисунок 4.3 – Напряжения в наклонных площадках

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

$$\Sigma Z = 0 \quad pA_\alpha = \sigma A,$$

где A – площадь поперечного сечения бруса;

A_α – 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 σ_α и вдоль площадки – касательное напряжение τ_α (рисунок 4.3, в) и они равны

$$\sigma_\alpha = p \cos \alpha = \sigma \cos^2 \alpha, \quad (4.7)$$

$$\tau_\alpha = p \sin \alpha = \frac{\sigma}{\alpha} \sin 2\alpha$$

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

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

Как видно на примере растяжения бруса, напряжения в площадке (сечении) зависят от ее ориентации. 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 трем взаимно перпендикулярным площадкам определяют *напряженное состояние в точке*. Условно напряженное состояние в точке представляют следующим образом: вокруг точки вырезаем элемент бесконечно малого размера в форме параллелепипеда (рисунок 4.4, 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 (рисунок 4.4, 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

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{Bmatrix}, \quad (4.8)$$

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

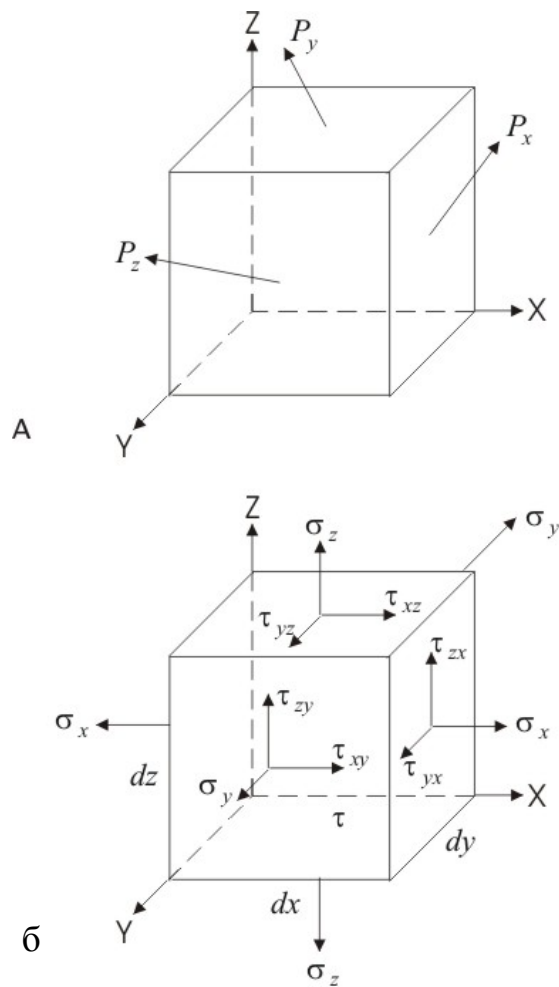


Рисунок 4.4 – Напряженное состояние в точке

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

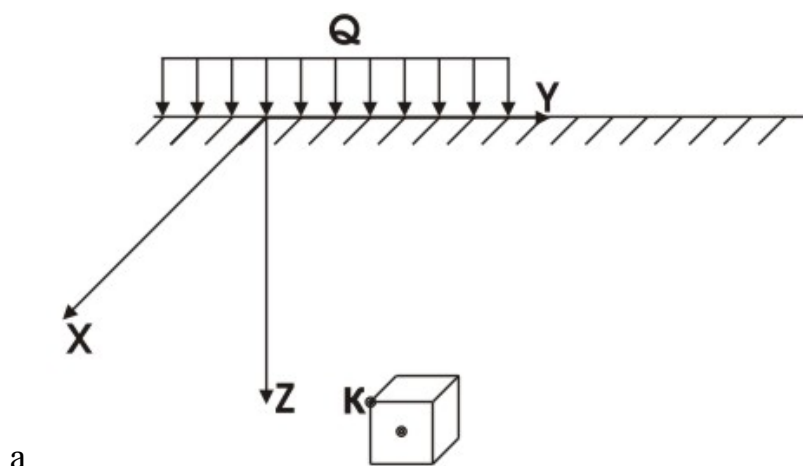
$$\tau_{yz} = \tau_{zy}; \tau_{zx} = \tau_{xz}; \tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (4.9)$$

Таким образом, на двух взаимно перпендикулярных площадках составляющие касательных напряжений, перпендикулярные к общему

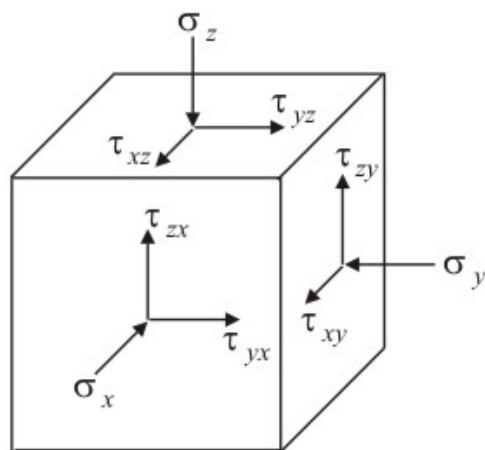
ребру, равны и направлены обе либо к ребру, либо от ребра. Это есть закон парности касательных напряжений. Следовательно, на гранях выделенного элемента имеем не девять, а шесть независимых компонент напряжений, поскольку касательные напряжения попарно равны. Тензор напряжений (4.8) является симметричным.

Анализ напряженного 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 расчетом 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 (рисунок 4.5, а).



а



б

Рисунок 4.5 – Напряженное состояние в точке б 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 трем граням параллелепипеда действует три напряжения, то напряженное состояние называется *объемным* или *трехосным* (рисунок 4.6, а).

Если на гранях элемента действуют два напряжения σ_1, σ_2 , то напряженное состояние называется *плоским* или *двухосным* (рис. 4.6, б).

Если на гранях элемента действуют напряжения σ_1 , то напряженное состояние называется *линейным* или *одноосным* (рис. 4.6, в).

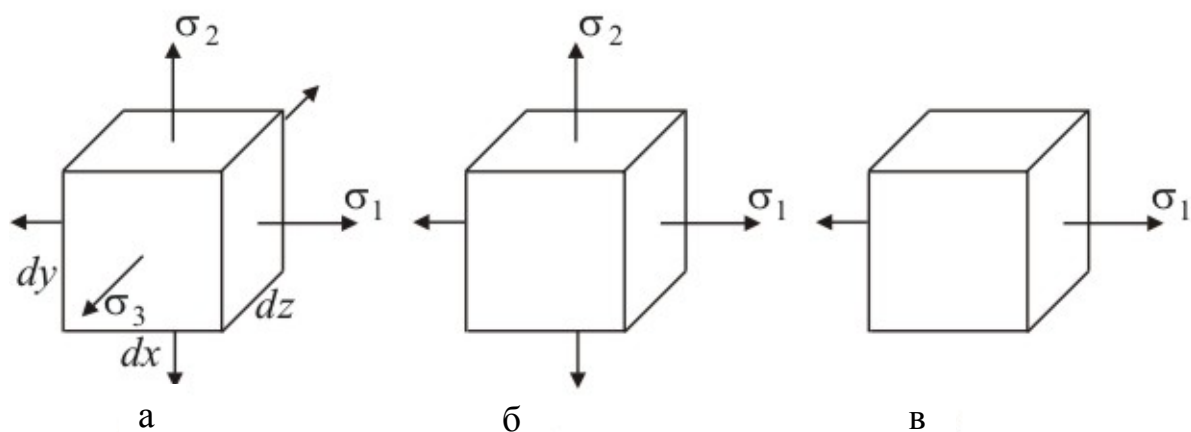


Рисунок 4.6 – Виды напряженных состояний

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

Рассмотрим напряжения, возникающие в наклонных площадках при плоском напряженном состоянии. По граням элемента действуют главные напряжения σ_1 и σ_2 . Определяем напряжения на площадке, нормаль к которой составляет угол α с горизонтальной осью (рисунок 4.7).

На рисунке 4.7 представлена проекция параллелепипеда. Применяем принцип независимости действия сил (принцип суперпозиций) и на основании формул (4.7) определяем нормальные и касательные напряжения.

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha,$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha.$$

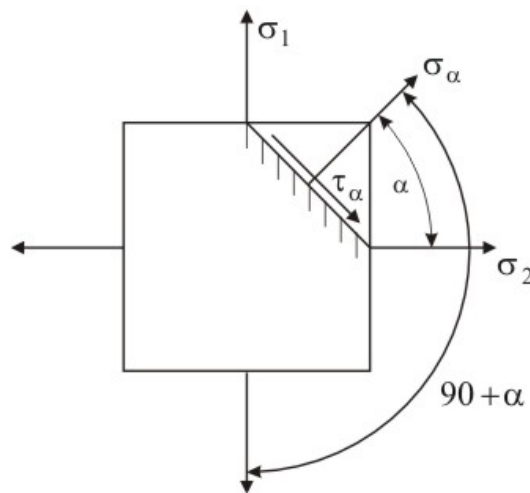


Рисунок 4.7 – Плоское напряженное состояние

окончательно получаем

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha \tag{4.10}$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha.$$

После преобразований можно записать

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha, \quad (4.10, a)$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha.$$

Эти зависимости представляют уравнение окружности в параметрической форме в системе координат σ и τ . Таким образом, напряженное состояние в точке можно представить графически в виде окружности, координаты точек которой определяют напряжения на соответствующей площадке, а угол α определяет ориентацию площадки. Центр окружности находится на расстоянии $\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$ от начала координат по оси σ . Радиус окружности равен $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$.

Эта окружность носит название круг Мора или круговой диаграммой напряженного состояния. Каждая площадка имеет координаты σ , τ . Точки, соответствующие двум взаимно перпендикулярным площадкам, на круге напряжений расположены диаметрально противоположно. Следовательно, зная напряжения на двух взаимно перпендикулярных площадках можно построить окружность. Координаты вертикальной площадки $(\sigma_1; 0)$, горизонтальной $(\sigma_2; 0)$.

В системе координат σ_1, τ точка В соответствует вертикальной площадке, точка С – горизонтальной площадке (рисунок 4.8).

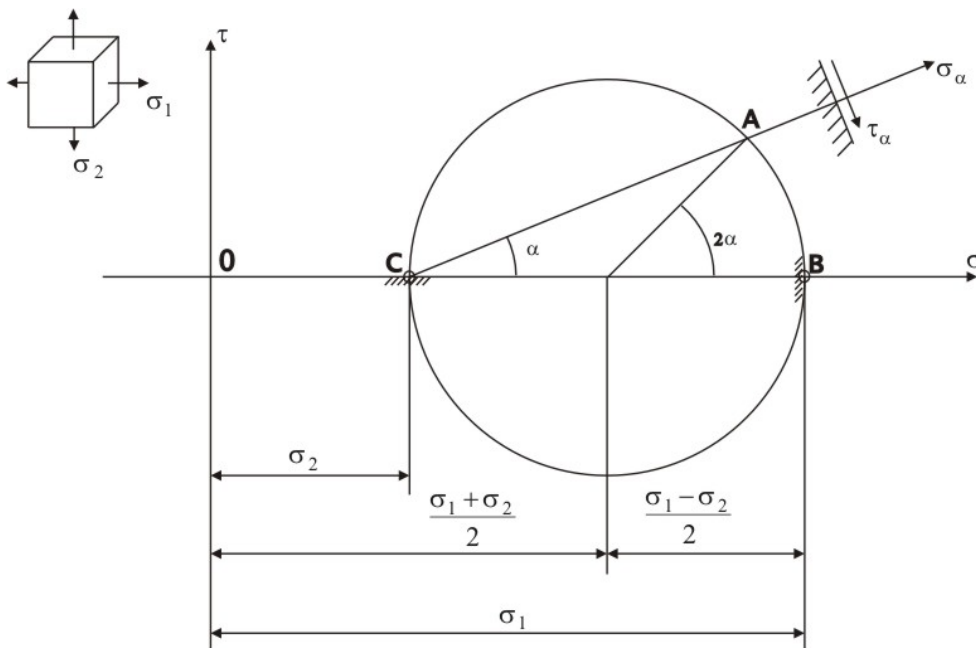


Рисунок 4.8 – Круговая диаграмма напряженного состояния

Точка А соответствует площадке, нормаль к которой расположена под углом α к горизонтали. Для определения направления напряжений σ_α и τ_α находим на круге напряжений полюс круга, точку, где пересекаются все нормали к площадкам. Находим полюс следующим образом, в точке В нормаль к площадке – горизонтальная линия, в точке С нормаль к площадке – вертикальная линия, они пересекаются в точке С, эта точка и является полюсом. Соединив точки А и С прямой, получим направление напряжения σ_α и соответственно τ_α (рис. 4.8).

Если заданы площадки общего положения, по которым действуют нормальные и касательные напряжения, определяемые при том или ином методе расчета, то координаты точек, соответствующих вертикальным и горизонтальным площадкам соответственно $\begin{matrix} \diagup \\ \diagdown \end{matrix}$ (σ_x, τ_{yx}), горизонтальной $\begin{matrix} \diagdown \\ \diagup \end{matrix}$ (σ_y, τ_{xy}) (рисунок 4.9, а). Для построения круга напряжений примем, что в данном случае $\sigma_x > \sigma_y$. Центр круга имеет координату $\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$, радиус круга равен

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{yx}^2} \quad (4.11)$$

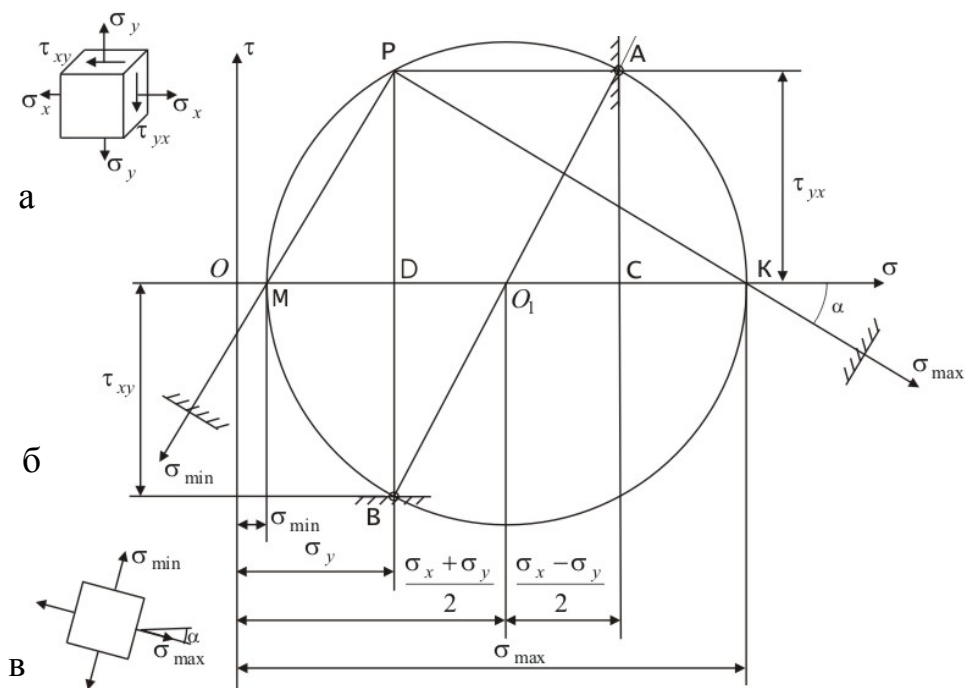


Рисунок 4.9 – Круговая диаграмма напряженного состояния

Главным площадкам соответствуют точки К и М, в этих площадках действуют наибольшие и наименьшие напряжения.

Наибольшие и наименьшие напряжения равны

$$\sigma_{\max} = \sigma_0 + \sigma_1 K = \sigma_0 + R,$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_0 - \sigma_1 M = \sigma_0 - R.$$

После подстановки отрезков получаем

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{yx}^2}, \quad (4.12)$$

затем обозначаем напряжения согласно принятой зависимости $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_4$.

Направление главных напряжений определяется на основании зависимости

$$\operatorname{tg} 2\alpha = -\frac{2\tau_{yx}}{\sigma_x - \sigma_y}. \quad (4.13)$$

Наибольшие касательные напряжения численно равны радиусу окружности напряжений

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{yx}^2}. \quad (4.14)$$

При испытании образцов пород на прочность при растяжении, сжатии получаем линейное напряженное состояние. Круговые диаграммы напряженных состояний представлены на рисунке 4.10.

Рассмотрим построение диаграммы напряжений для объемного напряженного состояния.

Для площадок параллельных осям x, y, z строим круги Мора (рисунок 4.11). Каждой точке любой окружности соответствует определенная площадка. Однако, точки, расположенные на трех кругах не исчерпывают всего множества площадок, проходящих через заданную точку. Точки, соответствующие площадкам, не параллельным ни одной из главных осей, расположены внутри заштрихованного криволинейного треуголь-

ника ABC, образованного тремя совмещенными кругами Мора (рисунок 4.12).

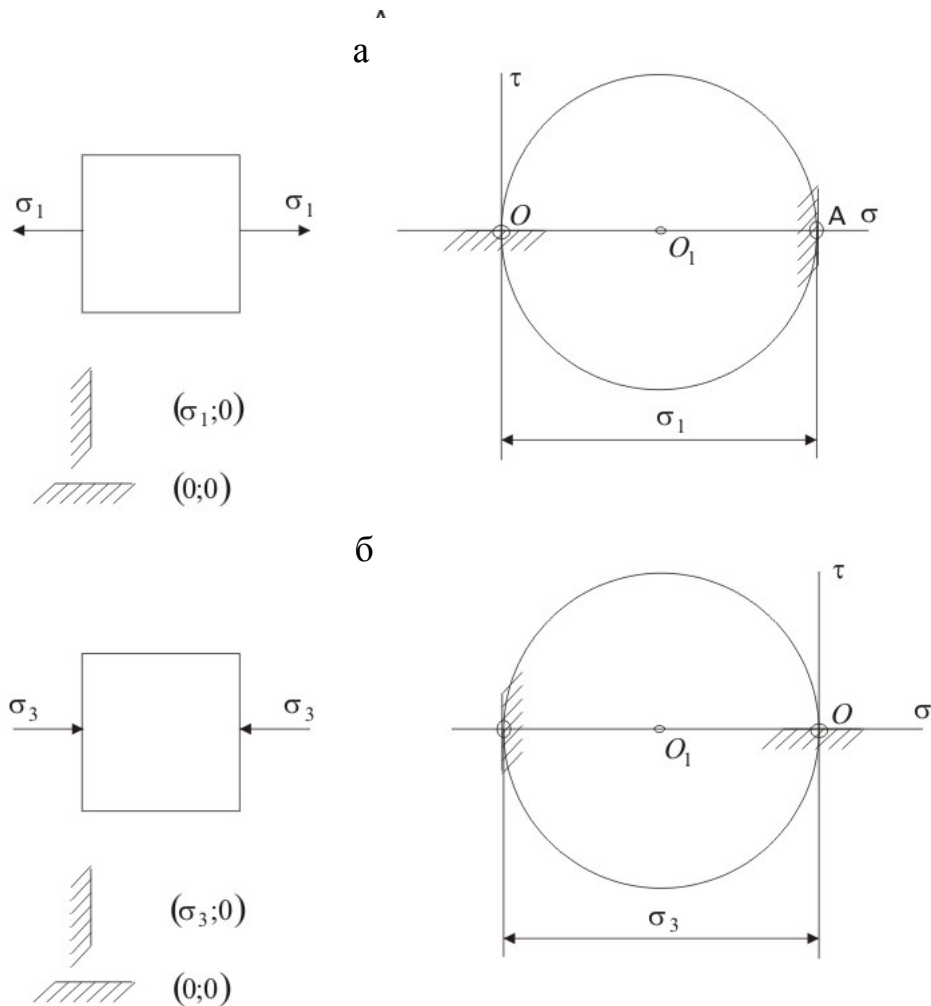


Рисунок 4.10 – Круговая диаграмма напряженного состояния при растяжении (а) и при сжатии (б)

Наибольшие касательные напряжения равны радиусу наибольшего круга

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (4.15)$$

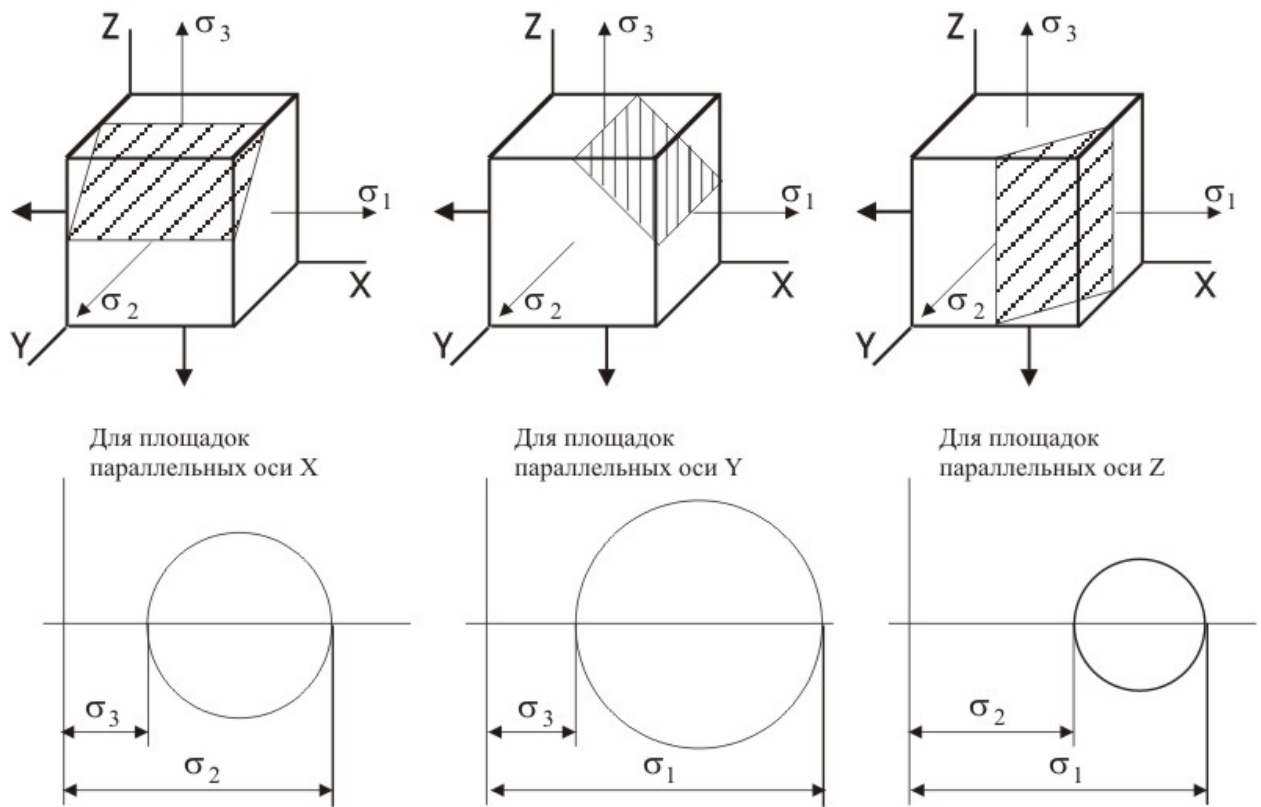


Рисунок 4.11 – Круговые диаграммы для объемного напряженного состояния

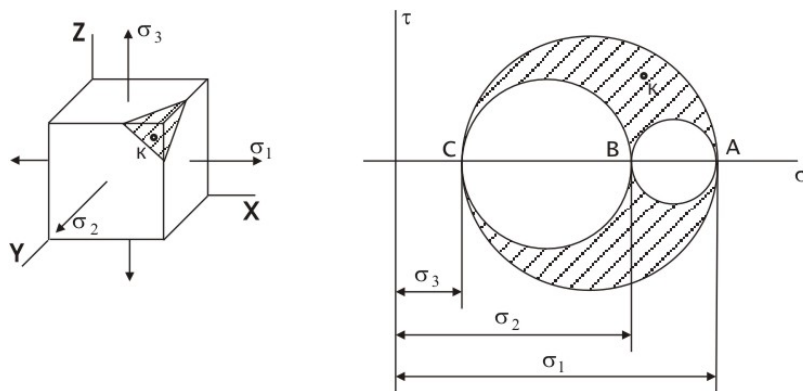


Рисунок 4.12 – Круговая диаграмма напряжений для объемного напряженного состояния

Рассмотрим еще одно напряженное состояние, которое может возникнуть в исследуемом теле, породном массиве, при испытании на срез.

Если по граням элемента, вырезанного вокруг точки, действуют только касательные напряжения, то такое напряженное состояние называется чистым сдвигом (рисунок 4.13).

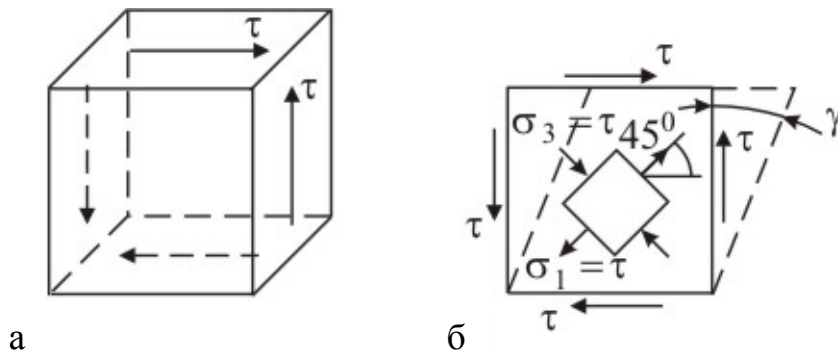


Рисунок 4.13 – Чистый сдвиг

При действии касательных напряжений элемент деформируется (рисунок 4.13, б), вертикальные грани поворачиваются на угол γ , этот угол еще называют *угловой деформацией*.

Закон Гука при сдвиге имеет вид

$$\tau = \gamma G, \quad (4.16)$$

где G - модуль сдвига,

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}. \quad (4.17)$$

Главные направления расположены под углом $\alpha = 45^\circ$ и равны $\sigma_1 = \tau$; $\sigma_2 = 0$; $\sigma_3 = -\tau$.

Графическое представление этого напряженного состояния (координаты точек соответствующих площадок $\swarrow (0; -\tau)$, $\searrow (0; \tau)$) дано на рисунке 4.14. Полюс круга находится в точке В, направление главных напряжений определяется прямыми ВС и ВД.

При объемном напряженном состоянии между компонентами напряженного и деформированного состояния существует определенная зависимость. В пределах малых деформаций эта зависимость является линейной и носит название обобщенного закона Гука. Наиболее простую форму обобщенный закон Гука принимает для изотропного тела, в этом случае коэффициент пропорциональности между компонентами напряженного и деформированного состояний не зависят от ориентации осей в точке.

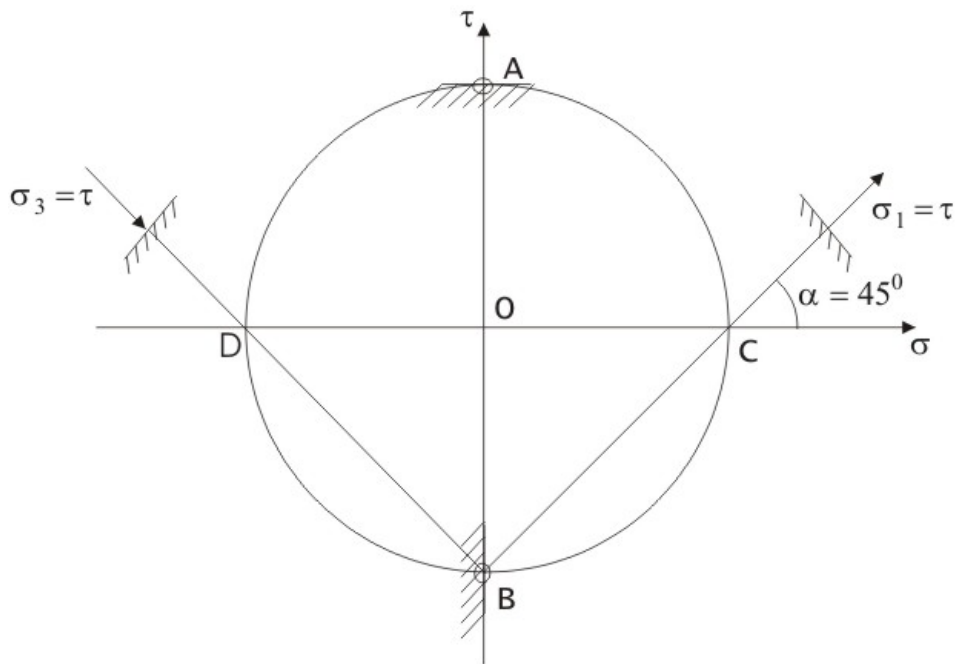


Рисунок 4.14 – Круговая диаграмма при чистом сдвиге

Чтобы получить аналитическое выражение обобщенного закона Гука, необходимо воспользоваться принципом независимости действия сил. Линейные деформации в направлении действия напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 определяются по формулам

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)], \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu \cdot (\sigma_3 + \sigma_1)], \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)]. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Для оценки опасности напряженного состояния необходимо определить *потенциальную энергию деформации* при объемном напряженном состоянии. Потенциальная энергия, накопленная в элементарном объеме, определяется суммой работ сил, распределенных по поверхности этого объема. Нормальная сила σ , dy , dz (рис. 4.6, а) на перемещении $\varepsilon_1 dx$ совершает работу

$$\frac{1}{2} \sigma_1 dy dz \varepsilon_1 dx.$$

Аналогичные выражения работ дают и остальные нормальные составляющие. Если потенциальную энергию отнести к единице объема с учетом выражений (4.13), то получим удельную потенциальную энергию деформации

$$U = \frac{1}{2E} \cdot \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu \cdot (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \right] \quad (4.19)$$

Получим выражения для так называемой энергии изменения формы и энергии изменения объема. Эти выражения потребуются в дальнейшем при изучении вопросов, связанных с пластическими деформациями и предельными напряженными состояниями.

Деление внутренней потенциальной энергии на две указанные составляющие является условным и выполняется по следующему принципу.

Каждое из главных напряжений представим в виде суммы двух величин (рисунок 4.15)

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_1'; \quad \sigma_2 = \sigma_0 + \sigma_2'; \quad \sigma_3 = \sigma_0 + \sigma_3', \quad (4.20)$$

в результате чего напряженное состояние разделяется на два. Первое напряженное состояние представляет собой всестороннее растяжение

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (4.21)$$

а второе является дополнением к нему до заданного напряженного состояния.

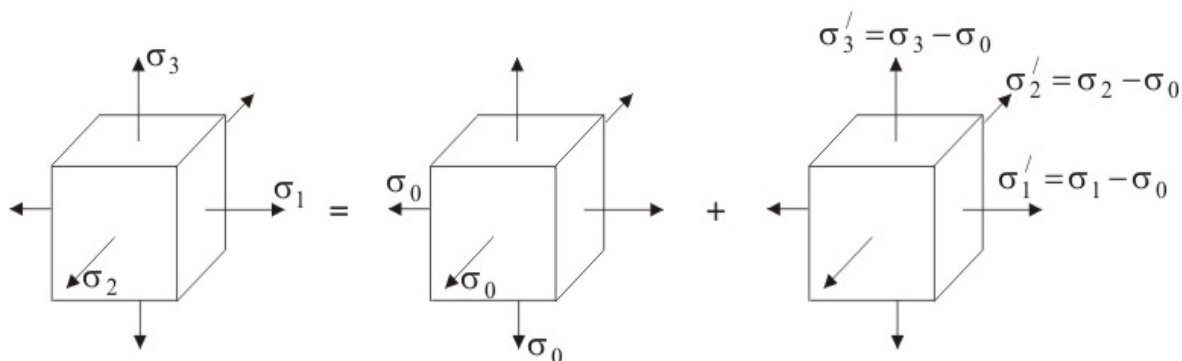


Рисунок 4.15 – Представление напряженного состояния

При указанном условии система сил первого напряженного состояния (σ_0) не производит работы на перемещениях, вызванных силами второго состояния. Точно так же и силы второго напряженного состояния не производят работы на перемещениях первого.

И внутренняя энергия разбивается на две части, соответствующие двум напряженным состояниям

$$U = U_{об} + U_{ф},$$

где $U_{об}$ - потенциальная энергия изменения объема;

$U_{ф}$ – потенциальная энергия изменения формы, или энергия формоизменения.

Подставляя значения напряжений в уравнение (4.14), получаем для первого напряженного состояния

$$U_{об} = \frac{1 - 2 \cdot \mu}{GE} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2, \quad (4.22)$$

для второго напряженного состояния

$$U = \frac{1 + \mu}{GE} \cdot \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] \quad (4.23)$$

Представленные выше зависимости широко используются в расчетной практике.

4.2 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 $\tau_{сдв}$, изгибе $\sigma_{изг}$ и т.д.

Разрушение – это разрыв связей между атомами в кристаллической решетке.

Как показывают расчеты, предел прочности при растяжении должен быть равен $1 \cdot 10^4$ 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 решетки. В породе – границы зерен (плоскостные) и поры (объемные 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 зерен 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 зернах. 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 объеме твердого тела.

На краях трещины обычно возникают напряжения, значительно превышающие средние напряжения σ . Это явление называется концентрацией напряжений. Так, при длине трещины 2ℓ и радиусе ее закрепления на конце r (рисунок 4.16) напряжения на краю трещины равны

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

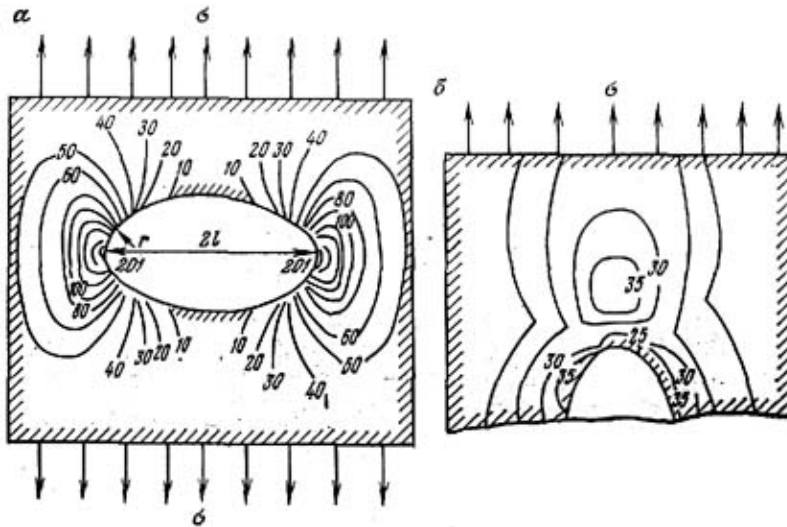


Рисунок 4.16 – Концентрация напряжений на краях трещины длиной $2l$ и с радиусом закругления r (числа указывают кратность превышения напряжений σ^1 над σ):

- а – при нагружении перпендикулярно трещине;
- б – при нагружении параллельно ей.

Как только напряжение σ^1 достигнет определенного значения, трещина начнет 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 ϕl – площадь двух поверхностей трещины, приходящаяся на единицу поперечного размера породы.

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

$$W_E = \sigma^2 \pi l^2 / E, \tag{4.24}$$

Трещина будет расти, если

$$\frac{dW_E}{dl} \geq \frac{dW_s}{dl}. \tag{4.25}$$

Отсюда предел прочности при растяжении

$$\sigma_{вр} = \sqrt{2Ee_s / \pi l}. \tag{4.26}$$

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

$$\frac{\sigma_{вс}}{\sigma_{вр}} = \frac{4}{\sqrt{1 + tq^2 \varphi - tq\varphi}}, \quad (4.27)$$

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

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 $\frac{\sigma_{вс}}{\sigma_{вр}} = 5 \dots 17$, что в ряде случаев близко к значениям, полученным экспериментально.

Кинетическая (термофлуктуационная) теория разрушения твердых 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 твердых телах непрерывно идет процесс накопления повреждений, которое приводит к полному разрушению тел. Время существования тела при действии нагрузки в не разрушенном состоянии определяется по следующей формуле

$$t = t_0 \exp \cdot \frac{(U_0 - \sigma V)}{kT}, \quad (4.28)$$

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 $10^3 \dots 10^4$ атомных объемов (для гранитов $V = 1,5 \cdot 10^{-27}$ м³, для кварцитов $V = 1,9 \cdot 10^{-27}$ м³);

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

$$\sigma_{вр} = \frac{(U_0 - kT \ln t / t_0)}{V}, \quad (4.29)$$

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

Эксперименты, проведенные на породах, подтверждают снижение прочности с увеличением длительности действия нагрузки (рисунок 4.17).

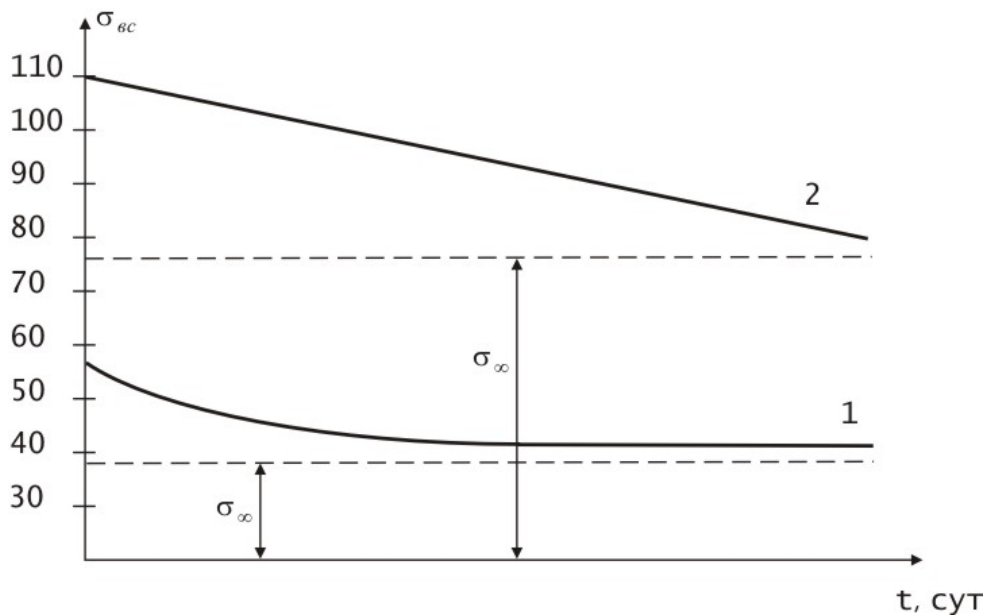


Рисунок 4.17 – Кривые длительной прочности песчанистого сланца Донбасса (1) и известняка (2)

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* σ_{∞} . Предел длительной прочности для многих пород равен $\sigma_{\infty} = (0,7 \dots 0,8) \sigma_{вс}$.

Для оценки прочности горных пород в случае сложного напряженного состояния используют критерии, позволяющие заменить сложное напряженное состояние одноосным напряженным состоянием, для которого пределы прочности могут быть определены путем теоретических исследований, либо путем эксперимента.

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

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

$$\text{II} \quad \sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 - \mu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{\text{вр}}, \quad (4.30)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

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

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

$$\text{III} \quad \sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_{\text{вр}} \quad (4.31)$$

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 σ_2 . Наложение всестороннего давления на любое напряженное состояние не меняет величины наибольших касательных напряжений τ_{max} и, следовательно, не оказывает влияние на возникновение пластических деформаций. В частности, при всестороннем гидростатическом давлении τ_{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 определенных условиях.

Рассмотрим **энергетическую теорию прочности (4 теория прочности)** Представим напряженное состояние (рисунок 4.19) в виде двух напряженных состояний: всестороннее растяжение, где $\sigma_o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ и во втором напряженном состоянии, где по граням элемента действуют напряжения $\sigma_1 - \sigma_o$, $\sigma_2 - \sigma_o$, $\sigma_3 - \sigma_o$.

Первое напряженное состояние вызывает изменение объема элемента без изменения формы (куб до деформации остается кубом и после деформации), второе напряженное состояние вызывает изменение формы элемента (куб превращается в параллелепипед) без изменения объема.

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

Эквивалентные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{IV}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_{\text{вр}} \quad (4.32)$$

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 упрощенной 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

$$\mathbf{R} \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{i} \cdot \mathbf{j}) = 0. \quad (4.33)$$

Если $R \cdot (\sigma \cdot i \cdot j) < 0$, то материал не разрушается. При выполнении условия (4.33) 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 (4.33). 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

$$\tau_n = f \cdot (\sigma_n). \quad (4.34)$$

Это условие (4.34) необходимо записать в зависимости от главных напряжений. Для этого воспользуемся геометрическим представлением напряженного состояния в виде круговой диаграммы Мора. При объемном напряженном состоянии, с учетом принятых обозначений, можно построить три окружности Мора (рисунок 4.18).

Точка, соответствующая определенному напряженному состоянию, с координатами σ_n, τ_n лежит в заштрихованной области, т.е. не мо-

жет выйти за пределы большого круга, построенного на напряжениях σ_2 и σ_4 .

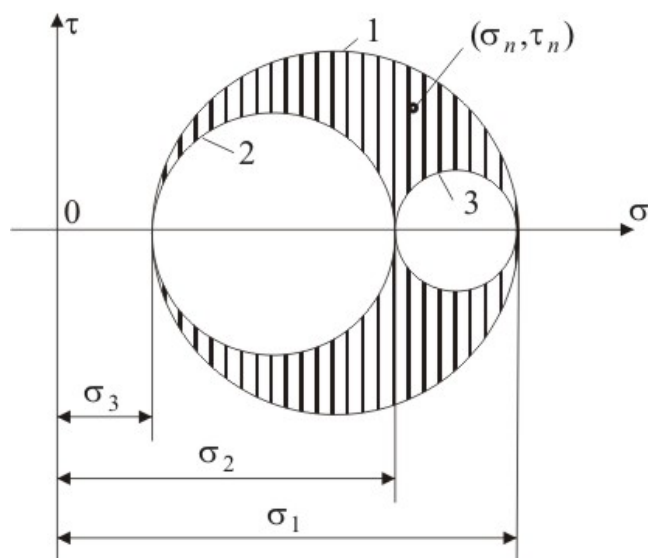


Рисунок 4.18 – Круговая диаграмма для объемного напряженного состояния

Предположим, что мы располагаем испытательной машиной, на которой в образце можно создавать любые напряженные состояния с пропорциональным изменением всех компонент. Выберем некоторое напряженное состояние и будем одновременно увеличивать все компоненты. При некоторых значениях напряжений напряженное состояние станет предельным. Образец либо разрушится, либо в нем возникнут пластические деформации. Начертим один из наибольших кругов Мора для этого напряженного состояния (круг 1, рисунок 4.19).

На образце из того же материала проводим испытание при другом напряженном состоянии, добиваемся, что напряженное состояние становится предельным (круг 2, рисунок 4.19).

В результате испытаний получаем семейство кругов Мора для различных предельных состояний. Вычеркиваем их общую огибающую кривую (рисунок 4.19). Эта огибающая кривая является единственной, независимо от главных напряжений σ_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 произойдет. Если круг Мора коснется 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

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_{вр}}{\sigma_{вс}} \cdot \sigma_3 = \sigma_{вр}, \quad (4.35)$$

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

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

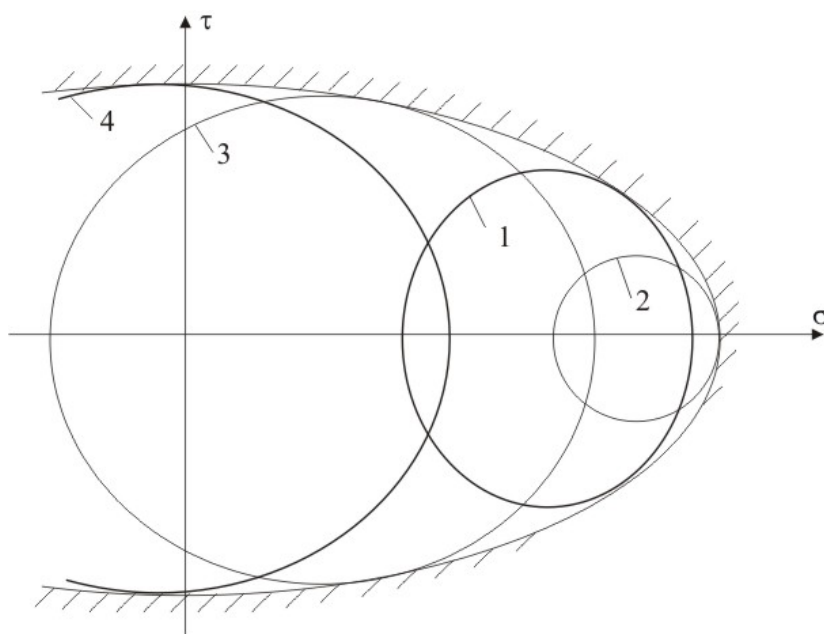


Рисунок 4.19 – Огибающая кривая

Основное ограничение, которое накладывается на применение теории Мора, связано с неточностью определения огибающей кривой в условиях всестороннего растяжения. Это ограничение не столь существенно, поскольку напряженное состояние такого рода при решении практических задач встречается редко. Недостаточно известен вид огибающей кривой в области всестороннего сжатия. Здесь вследствие принятых упрощений возможны погрешности. Наилучшие результаты расчетная формула (4.35) дает для напряженных состояний при $\sigma_1 > 0$, $\sigma_3 < 0$. Тогда предельный круг Мора располагается в интервале между предельными кругами при растяжении и сжатии.

Подход Мора хорош тем, что позволяет объяснить относительную условность деления материалов на пластичные и хрупкие.

Для одного и того же материала можно построить две огибающие предельных кругов Мора. Первая огибающая характеризует переход от упругого состояния к пластическому. Эта огибающая представляет собой прямую, параллельную оси σ (рисунок 4.20). Вторая огибающая соответствует разрушению образца (кривая 2).

Для пластичного материала прямая 1 в правой части диаграммы (рисунок 4.20, а) проходит ниже кривой 2. Это означает, что при обычном испытании образца на растяжение круг Мора 3 по мере увеличения растягивающего напряжения σ , сначала пересечет прямую 1. В образце возникнут пластические деформации. Затем круг 3 коснется кривой 2. Образец разрушится.

Для хрупкого материала (рисунок 4.20, б) прямая 1 расположена выше кривой 2. При испытании образца на растяжение круг Мора 3, не касаясь прямой 1, соприкасается с кривой 2. Разрушение происходит без остаточных деформаций, как и положено для хрупких материалов.

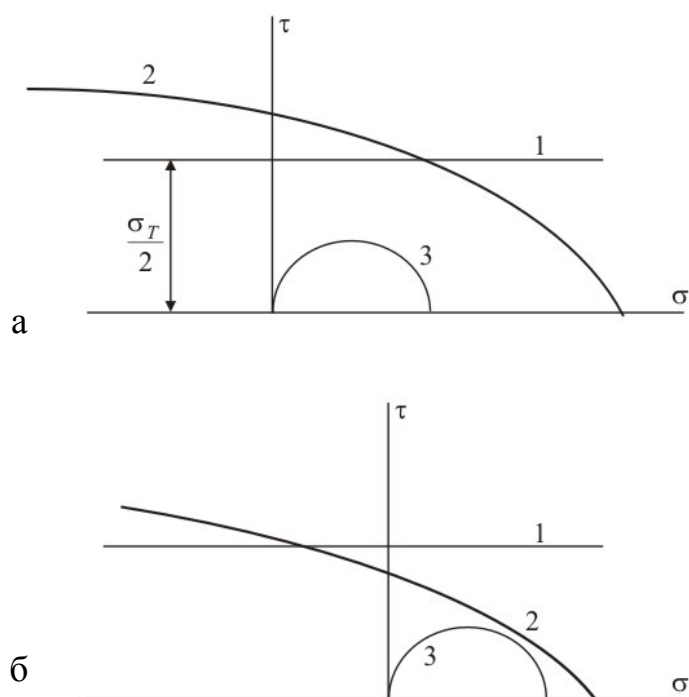


Рисунок 4.20 – Огибающие кривые для пластичных (а) и хрупких (б) материалов

В настоящее время *паспортом прочности горных пород* называют кривую, огибающая все круги напряжений для предельных состояний (рисунок 4.21). При исследовании напряженного состояния в горном массиве сжимающие напряжения считают положительными.

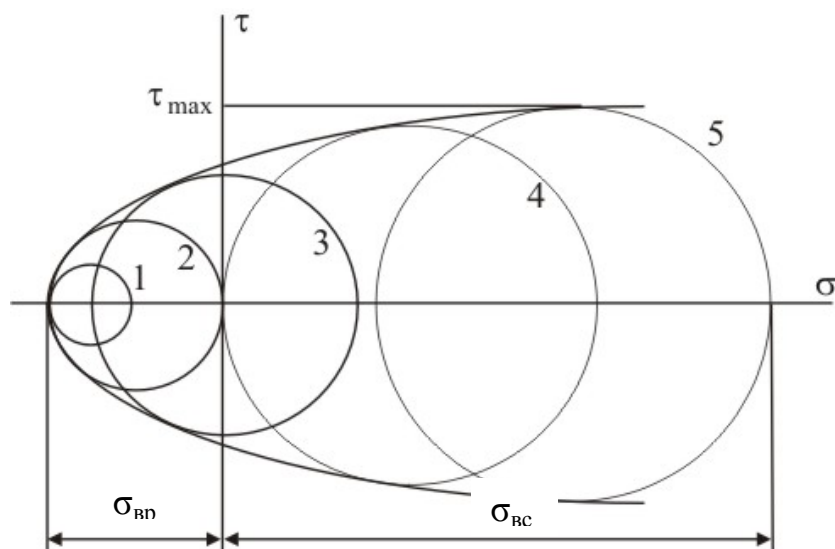


Рисунок 4.21 – Огибающая кривая предельных напряженных состояний: 1 – всестороннее неравномерное растяжение; 2 – одноосное растяжение; 3 – чистый сдвиг; 4 – одноосное сжатие; 5 – всестороннее неравномерное сжатие; $\sigma_{вс}$ – всестороннее равномерное сжатие; $\sigma_{вд}$ – всестороннее равномерное растяжение

Положение огибающей кривой относительно начала координат характеризует степень хрупкости или вязкости пород.

На рисунке 4.22 приведены огибающие кривые для сыпучих, хрупких и пластичных горных пород.

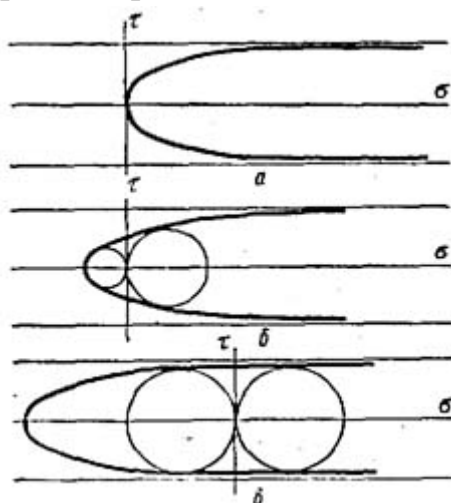


Рисунок 4.22 – Огибающие кривые для различных материалов: а – сыпучих; б – хрупких; в – пластичных.

Проводят испытание образца на растяжение, сжатие и при объемном сжатии, строят огибающую кривую (рисунок 4.23). Основные параметры, определяемые по паспорту прочности:

- предельное сопротивление чистому сдвигу (срезу) τ_c (сцепление C_0) и соответствующий угол внутреннего трения φ_0 (коэффициент внутреннего трения $\text{tg}\varphi_0$);
- условное сцепление C при различных напряжениях σ , τ и соответствующий угол внутреннего трения (коэффициент внутреннего трения $\text{tg}\varphi$), эти параметры – переменные величины.

К огибающей кривой в точке ее пересечения с осью τ переводим касательную mn . Координата точки пересечения касательной mn с осью τ определяет предельное сопротивление материала при чистом сдвиге, угол между горизонтальной линией и касательной mn – угол внутреннего трения.

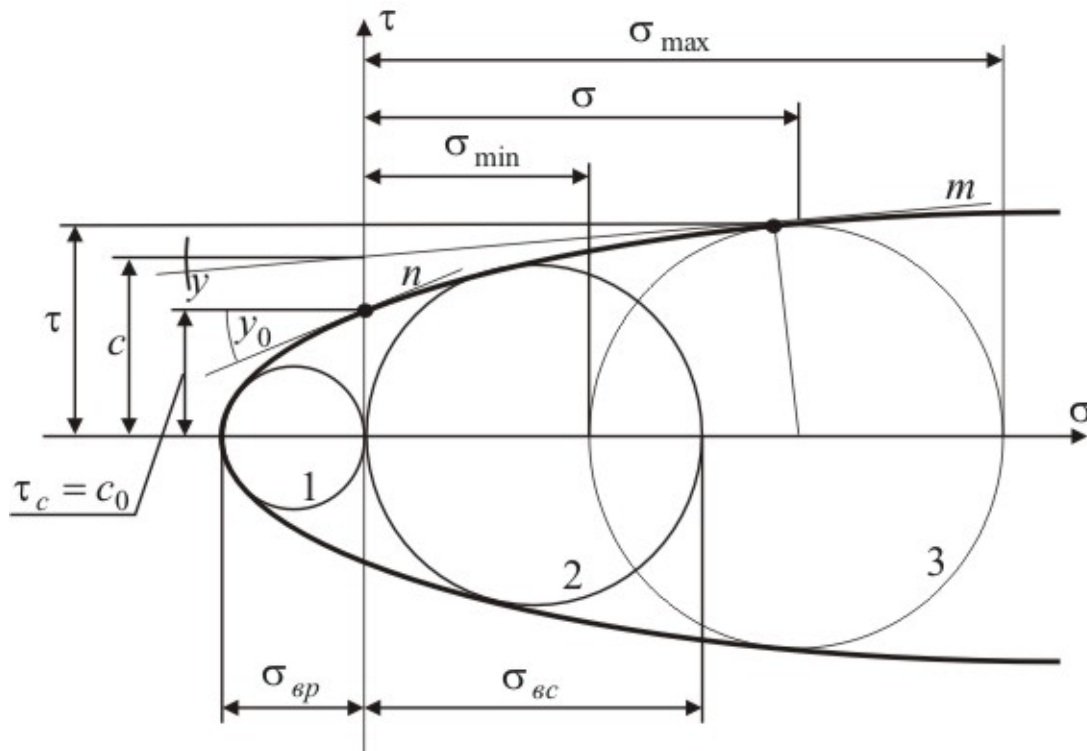


Рисунок 4.23 – Паспорт прочности горной породы: 1 – круг одноосного растяжения; 2 – круг одноосного сжатия; 3 – круг при объемном сжатии.

Касательная mn к огибающей в любой точке с координатами $(\sigma; \tau)$ составляет с горизонталью угол φ – угол внутреннего трения, координата точки пересечения касательной с осью τ , C – условное сцепление.

Метод построения паспорта прочности по данным определения пределов прочности при объемном сжатии, одноосном сжатии и растяжении следующий.

Для построения паспорта используют результаты определения пределов прочности при объемном сжатии $\sigma_{\text{сж}}^o$ не менее чем при трех различных значениях бокового давления. По значению $\sigma_{\text{сж}}^o = \sigma_{\text{max}}$ и боко-

вого давления $p = \sigma_{\min}$ строят семейство полуокружностей радиусами $\frac{\sigma_{сж}^o - p}{2}$ с координатами центров $(\frac{\sigma_{сж}^o + p}{2}; 0)$.

Строят круги напряжений при одноосном растяжении и сжатии радиусами $\frac{\sigma_{вр}}{2}, \frac{\sigma_{вс}}{2}$ с координатами центров $(-\frac{\sigma_{вр}}{2}; 0)$ и $(\frac{\sigma_{вс}}{2}; 0)$. Проводят плавную кривую, огибающую все пять полуокружностей (рисунок 4.23).

Метод *построения паспорта прочности по данным определения пределов прочности при срезе со сжатием*, одноосном сжатии и растяжении таков: по совокупности парных значений нормальных σ_α и касательных τ_α напряжений, определенных при испытании на срез в координатах σ, τ отмечают точки 1, 2, 3 соответствующие углам $\alpha = 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$ наклона призм (рисунок 4.24).

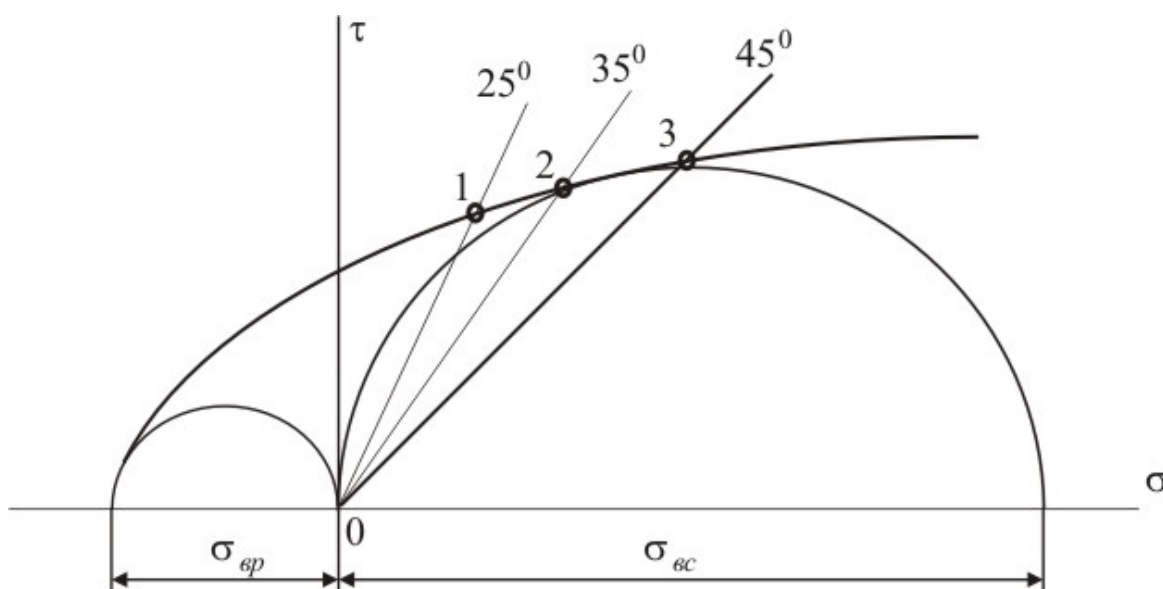


Рисунок 4.24 – Паспорт прочности при испытании на растяжение, сжатие, сдвиг

Строят круги напряжений при растяжении и сжатии, проводят плавную кривую, огибающую полуокружности и проходящую через точки 1, 2, 4.

Расчетный метод построения паспорта прочности по данным определения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении предусматривает определение координат точек огибающей кривой расчетным путем по результатам испытаний при одноосном растяжении и сжатии по эмпирическому уравнению

$$\tau = \tau_{\max} \cdot \left(\frac{\sigma_{\kappa}^2}{\sigma_{\kappa}^2 + a^2} \right)^{3/8}, \quad (4.36)$$

где τ_{\max} – максимальное сопротивление породы срезу (сдвигу), при гипотетически полностью закрывшихся под действием нормального давления трещинах и порах;

σ_{κ} – нормальное напряжение относительно начала координат, перенесенного в точку пересечения огибающей кривой;

a – параметр формы огибающей кривой.

Для удобства расчета и табулирования, уравнение огибающей кривой представляют в безразмерных координатах ℓ и K

$$\ell = 0,73 \cdot \left(\frac{K^2}{K^2 + 1} \right)^{3/8}, \quad (4.37)$$

где ℓ – безразмерная координата соответствующая касательным напряжениям, $\ell = \frac{\tau}{a}$;

K – безразмерная координата, соответствующая нормальному напряжению.

$$K = \frac{\sigma + \sigma_0}{a}, \quad (4.38)$$

σ_0 – значение параметра переноса начала координат.

Вводятся безразмерные радиусы предельных кругов Мора для одноосного растяжения q_1 и одноосного сжатия q_2 , которые связаны отношением

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\sigma_{\text{вс}}}{\sigma_{\text{вр}}}$$

Значение параметра огибающей кривой определяется по формуле

$$a = \frac{\frac{\sigma_{\text{вр}}}{2q_1} + \frac{\sigma_{\text{вс}}}{2q_2}}{2} = \frac{\frac{\sigma_{\text{вр}}}{q_1} + \frac{\sigma_{\text{вс}}}{q_2}}{4}$$

Параметр переноса начала координат

$$\sigma_0 = a \cdot f(q_2 / q_1). \quad (4.39)$$

Координаты σ и τ точек огибающей кривой определяют по формулам

$$\sigma = \mathbf{Ka} - \sigma_0; \quad (4.40)$$

$$\tau = \ell a$$

Для построения кривой вычисляют координаты не менее 10 точек, строят кривую.

Контроль правильности построения кривой выполняют построением кругов Мора при растяжении и сжатии. Если окружности касаются огибающей кривой, то построения выполнены правильно.

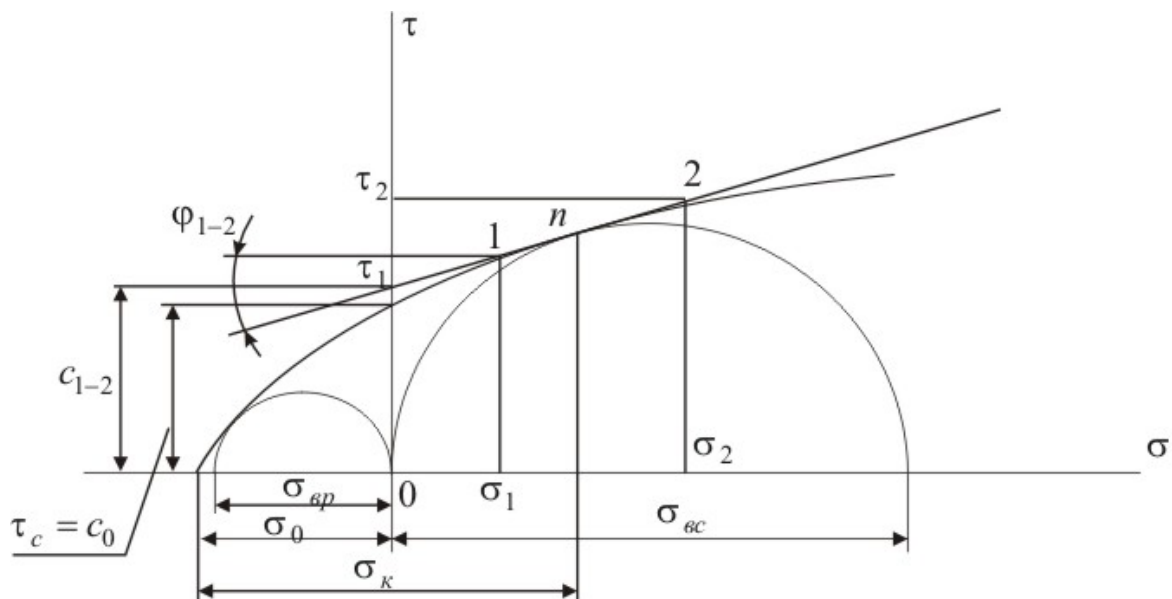


Рисунок 4.25 – Паспорт прочности, построенный расчетным способом

Предельное сопротивление срезу τ_0 (сцепление C_0) определяют как ординату точки пересечения огибающей с осью τ , а соответствующий угол трения φ_0 , как угол наклона касательной nn к кривой в этой точке.

Условное сцепление C в любой точке огибающей кривой определяют как ординату точки пересечения касательной к огибающей в точке (σ, τ) с осью τ ; угол внутреннего трения

$$\varphi = \arcsin \cdot \frac{\tau - C}{\sigma}. \quad (4.41)$$

Условное сцепление C_{1-2} в заданном диапазоне напряжений ($\sigma_1, \dots, \sigma_2$) или (τ_1, \dots, τ_2) определяют как ординату точки пересечения прямой, проведенной через соответствующие точки огибающей, с осью τ и соответствующий угол внутреннего трения φ_{1-2} как угол между этой прямой и осью σ .

$$\varphi_{1-2} = \arctg \cdot \frac{\tau_2 - \tau_1}{\sigma_2 - \sigma_1}. \quad (4.42)$$

Упрощенный метод построения паспорта прочности по данным определения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении заключается в том, что на основании экспериментальных данных предела прочности при растяжении $\sigma_{вр}$ и сжатии $\sigma_{вс}$ строят предельные круги Мора (рисунок 4.26).

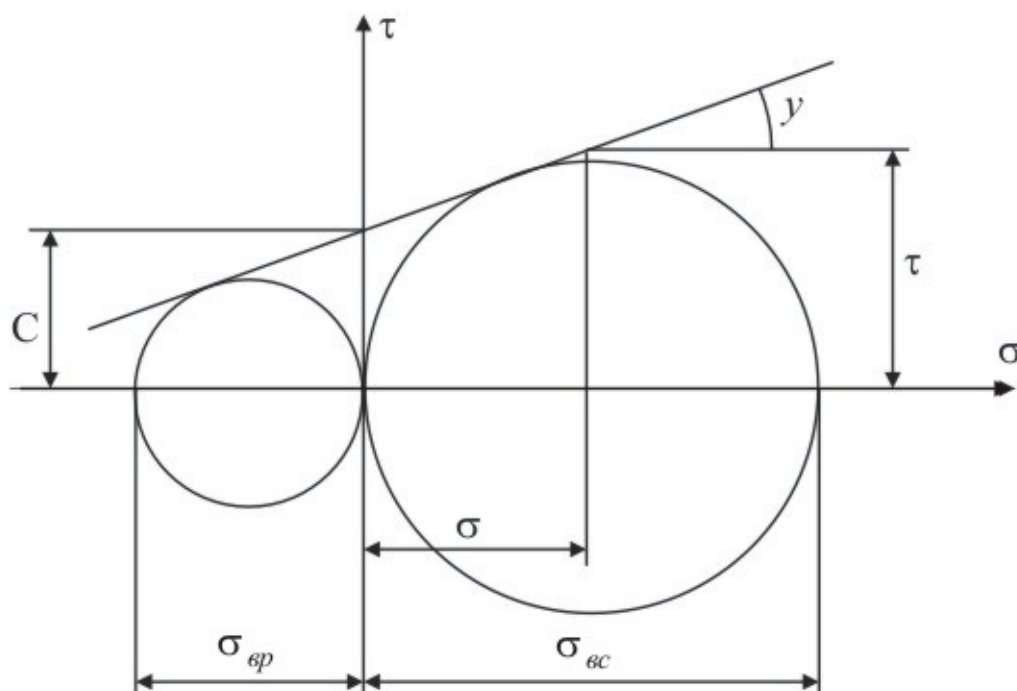


Рисунок 4.26 – Упрощенный метод построения паспорта прочности горных пород

К этим окружностям проводим касательную, которая будет являться огибающей предельных кругов Мора.

Уравнение этой прямой и есть паспорт прочности

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi. \quad (4.43)$$

4.3 Стандартные методы определения прочностных параметров скальных пород

4.4.1 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 определенной 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 определенными 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 расчетных.

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 слоев, 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 σ_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 твердых 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 дает 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 подчиненное 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 $\sigma_{сж}$, временное сопротивление растяжению (предел прочности при растяжении) $\sigma_{рп}$, сопротивление скалыванию. Для мягких связных и рыхлых несвязных пород – показатели сопротивления сдвигу: угол внутреннего трения, общее сцепление и в некоторых случаях коэффициент сдвига.

4.4.2 Определение предела прочности при одноосном сжатии

Определение предела прочности при одноосном сжатии на пробах, отделенных 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 твердостью 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 слоев и перпендикулярно им. Размеры образцов должны соответствовать значениям, указанным в таблице 4.4.

Таблица 4.1 – Размеры образцов

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

Измерение размеров образца производится штангенциркулем в трех местах по высоте и в двух взаимно перпендикулярных направлениях. За расчетный 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 (рисунок. 4.27), совмещают ось образца с центром нижней опорной плиты испытательной машины и нагружают до разрушения с равномерной скоростью 1 – 5 МПа/с.

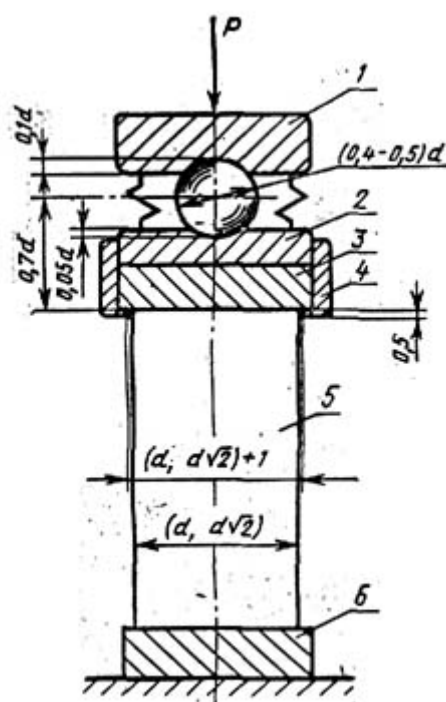


Рисунок 4.27 – Схема приспособления для испытания на сжатие: 1 – накладная пята; 2 – подкладная пята; 3 – верхняя плита; 4 – обойма; 5 – образец; 6 – нижняя плита

Определяют величину разрушающей силы P , зафиксированную си-лоизмерителем машины. При необходимости определяют влажность пробы.

Предел прочности при сжатии определяют по формуле в Па

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S} \cdot K_B, \quad (4.44)$$

где P – сила, разрушающая образец, Н;
 S – площадь поперечного сечения, м^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

m	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
K_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
$S_y, \text{см}^2$	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 (рисунок 4.28), которое устанавливается на опорную плиту испытательной машины. Образец помещают между пуансонами нагрузочного устройства, скорость нагружения образца $0,1 \dots 0,5$ кН/с.

Предел прочности определяют по формуле

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S_y}, \quad (4.49)$$

где P – разрушающая нагрузка, кН;
 S_y – условная площадь поперечного сечения, м².

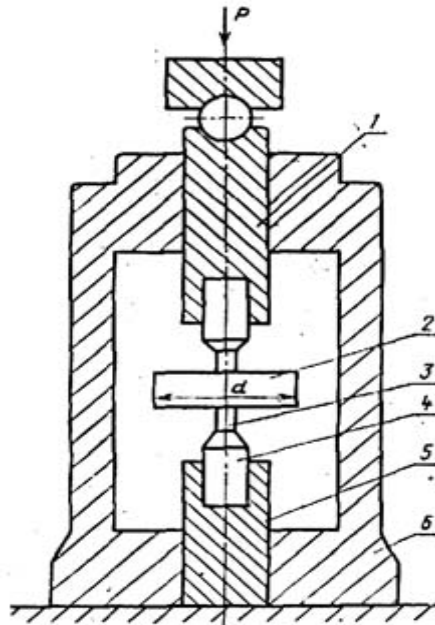


Рисунок 4.28 – Схема установки для испытания образцов с помощью соосных пуансонов: 1 – верхний шток; 2 – образец; 3 – пуансон; 4 – вкладыш; 5 – нижний шток; 6 – корпус

4.4.3 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 пресса (рисунок 4.29) 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

$$\sigma_p = 0,64 \cdot \frac{P_{\max}}{hd}, \quad (4.45)$$

где d – диаметр образца, м;

h – высота образца, м;
 P_{\max} – разрушающая сила, Н.

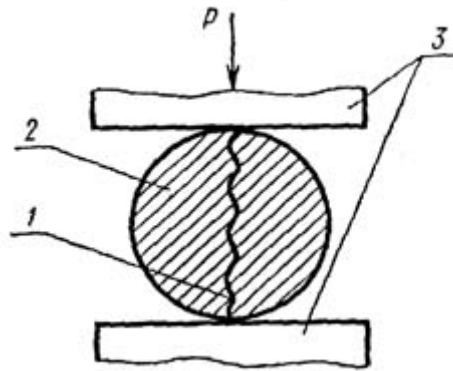


Рисунок 4.29 – Испытание на растяжение: 1 – образец; 2 – плиты пресса; 3 – проекция плоскости разрушения

Результаты испытания применяются при построении паспорта прочности.

4.4.4 Метод определения предела прочности при срезе

Сущность метода заключается в определении максимального разрушающего касательного напряжения при действии на образец пород срезающих 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 трех пар сменных матриц 2 с углом наклона $\alpha = 30^{\circ}$; 45° и 60° , пара бронзовых разрезных цилиндрических обойм – вкладышей 3 с внутренним диаметром 44 мм, две плиты 4 и ролики 5 (рисунок 4.30).

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 среза

$$\sigma_i = \frac{P_{\max} \sin \alpha}{hd}, \quad (4.46)$$

где P_{\max} – вертикальная разрушающая нагрузка, Н;
 α – угол между плоскостью среза и направлением действия силы;
 d – диаметр образца, м;
 h – высота образца, м.

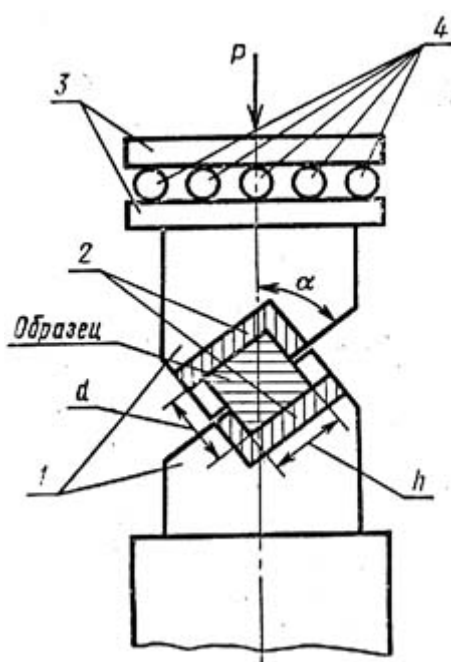


Рисунок 4.30 – Приспособление для испытания на срез

Предел прочности при срезе, соответствующий определенному нормальному давлению

$$\tau_i = \frac{P_{\max} \cos \alpha}{hd} \quad (4.47)$$

По результатам строят предельную кривую прочности горных пород при срезе в зависимости от нормального давления, действующего на плоскость среза, в координатах σ и τ (рисунок 4.31). По оси абсцисс откладывают для каждого из углов наклона матриц α значения нормальных давлений, а по оси ординат соответствующие им значения пределов прочности породы при срезе. Кривая представлена на рисунке, где τ_0 – предел прочности при чистом сдвиге.

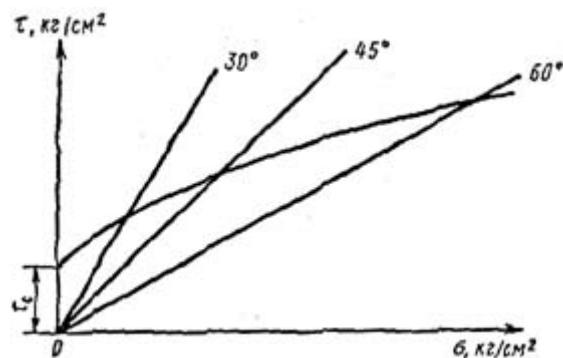


Рисунок 4.31 – Предельная кривая прочности горных пород при срезе

4.4.5 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 ± 1 мм.

Образец 1 устанавливают на опорное кольцо 2, а сверху ставят на него кольцевой пуансон 3 (рисунок 4.32), прикладывают силу и определяют разрушающую нагрузку.

Предел прочности при изгибе определяют по формуле

$$\sigma_{\text{н}} = 75 \cdot \frac{P_{\text{max}}}{h}, \text{ Па}, \quad (4.48)$$

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

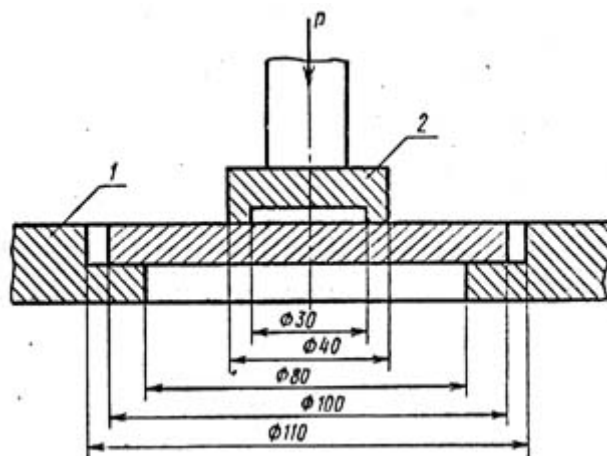


Рисунок 4.32 – Схема установки для испытания на изгиб

4.4.6 Метод определения предела прочности при объемном сжатии

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

Для испытания изготавливают цилиндрические или призматические образцы квадратного поперечного сечения.

В камеру объемного сжатия (рисунок 4.33) 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 объемном сжатии определяют по формуле

$$\sigma_{сж}^o = \frac{P}{S}, \quad (4.49)$$

где P – разрушающая осевая сила, Н;
 S – площадь поперечного сечения образца, м².

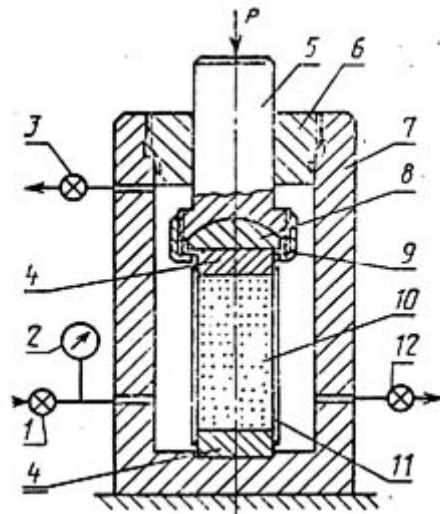


Рисунок 4.33 – Установка для испытания образца горной породы при объемном сжатии: 1 – впускной вентиль; 2 – манометр; 3 – вентиль выпуска воздуха; 4 – стальные плиты; 5 – шток; 6 – крышка; 7 – корпус; 8 – сферическая пята; 9 – накидная гайка; 10 – образец; 11 – изоляция; 12 – выпускной вентиль

4.4.7 Метод комплексного определения пределов прочности при многократном раскалывании и сжатии

Метод комплексного определения пределов прочности горных пород при растяжении и сжатии, применяется при массовом определении прочностных свойств горных пород.

Сущность метода заключается в определении максимальной разрушающей силы при многократном раскалывании образцов породы пластинчатой или брусчатой формы и сжатии полученных при раскалывании образцов кубообразной формы.

При испытании применяется раскалывающее устройство в виде стальных клиньев с длиной лезвия, превышающей наибольший линейный размер образца (рисунок 4.34). Угол заточки клиньев 90° .

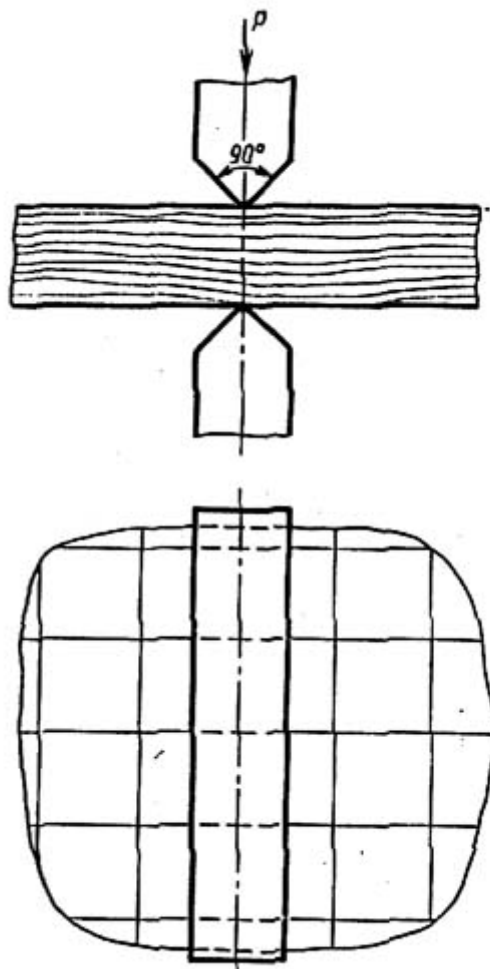


Рисунок 4.34 – К определению предела прочности при раскалывании

Образцы для испытания раскалыванием изготавливают на камнерезной машине, отрезая от проб диски или пластины толщиной 20 мм. Диаметр дисков должен быть не менее 75 мм, а размер пластин – не менее 100x100 мм.

Для испытания на сжатие используются образцы кубической формы, полученные в процессе раскалывания, с линейными размерами 20x20x20 мм.

Перед испытанием на одну из плоскостей образца наносят карандашом квадратную сетку со стороной квадрата 20 мм. Образец устанавливают между клиньями, которые совмещают с одной из линий сетки.

Сначала образец раскалывают на бруски, затем по поперечным линиям на кубики. При каждом раскалывании образца фиксируют разрушающую нагрузку и измеряют штангенциркулем длину линии раскола.

После раскалывания образца, кусочки кубической формы, предварительно измерив их, помещают между плитами пресса, определяют разрушающую нагрузку.

Предел прочности образца при раскалывании σ_p определяют по формуле

$$\sigma_p = \frac{P_{\max}}{2\ell \cdot h}, \quad (4.50)$$

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

ℓ – длина линии раскола, м;

h – толщина образца, м.

Предел прочности образца горной породы при сжатии

$$\sigma_{сж} = \frac{P_{\max}}{S},$$

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

S – средняя площадь поперечного сечения образца породы, равная полусумме площадей параллельных поверхностей образца до его разрушения, м².

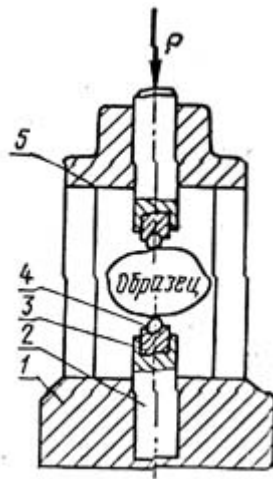
4.4.8 Методы определения механических свойств сжатием образцов встречными сферическими инденторами

Для испытания используют образцы правильной формы, вырезанные из штуфов и кернов. Образцы неправильной формы получают из обнажений и горных выработок путем дальнейшего откалывания, отпиливания. Образцы должны быть с размерами до 100x100x80 мм. Количество образцов правильной формы не менее 6, неправильной формы не менее 10 штук.

Для проведения испытания применяют различные станки и инструменты, обеспечивающие изготовление образцов, а также измерительные устройства: штангенциркуль, индикаторы часового типа, пресс, устройство нагрузочное.

Образец устанавливают (рисунок 4.35) между сферическими инденторами так, чтобы обеспечить нагружение в требуемом направлении, что достигается соответствующей ориентацией оси нагружения. Наиболее рациональные схемы испытаний образцов некоторых типичных форм с соответствующей изотропной породам ориентацией и очертанием вероятных поверхностей разрыва представлены на рисунке 4.36.

Рисунок 4.35 – Установка образцов при испытании на прочность: 1 – корпус; 2 – нижний шток; 3 – вкладыш; 4 – индентор; 5 – верхний шток



Образец нагружают до разрушения в виде сквозного раскола и определяют разрушающую силу, площадь фактической поверхности разрыва.

При разрушении образца на две части определяют площадь поперечного сечения S_p , а при разрыве образца на большее число частей площадь поверхности разрыва определяют по формуле

$$S_p = 2 \cdot \frac{S_{01} + S_{02} + \dots + S_{0n}}{n}, \quad (4.51)$$

где $S_{01}, S_{02}, \dots, S_{0n}$ – площади полуповерхностей разрыва по каждому из направлений разрыва, m^2 ;

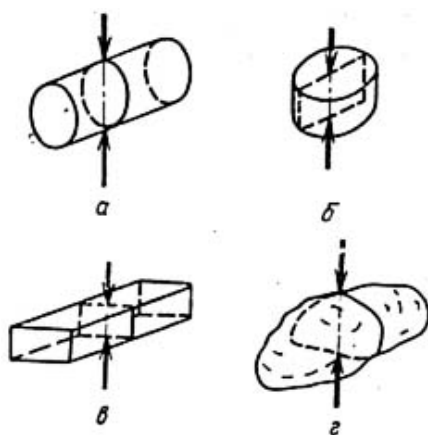
n – число частей разрыва.

Предел прочности горной породы при одноосном растяжении определяют по формуле

$$\sigma_p = 0,75 \cdot \frac{F_p}{S_p} \cdot K_M, \quad (4.52)$$

где K_M – безразмерный масштабный коэффициент, принимаемый равным 1 при площади сечения $S_p = 15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Рисунок 4.36 – Характер разрушения образцов



Для других значений площади этот коэффициент принимается из таблицы 4.4.

Таблица 4.4 – Значение коэффициента K_M

$S_p, \text{ м}^2 \cdot 10^{-4}$	3	4	5	8	10	15	20	30	40	50	80	100
K_M	0,67	0,72	0,76	0,85	0,90	1,00	1,08	1,19	1,28	1,35	1,52	1,61

4.4 Нестандартные методы определения прочностных параметров скальных пород

4.4.1 Методы определения показателей прочности на образцах неправильной формы

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 измене-

нием 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 200х200х200 мм (рисунок 4.37, а), зазор Δ между ними во время заливки сохраняют с помощью картонных прокладок

Минимальное значение зазора Δ определяется размерами структурного элемента. Если зазор Δ 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 (рисунок 4.37).

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

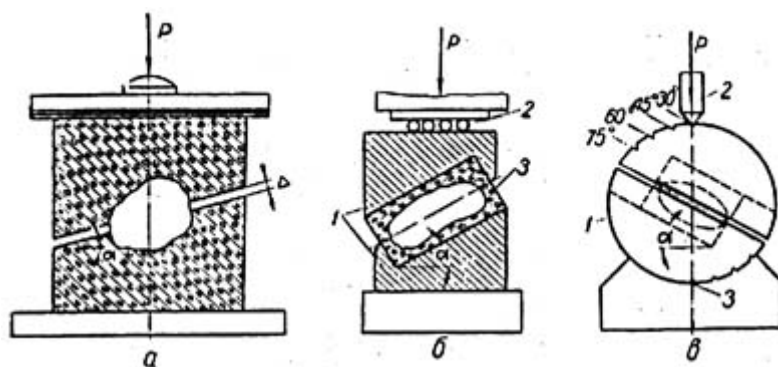


Рисунок 4.37 – Определение механических характеристик горных пород на образцах неправильной формы: а – схема испытаний по ВУГИ; б – схема прибора Фисенко: 1 – матрицы; 2 – ролики; 3 – образец; в – схема прибора Ильницкой: 1 – матрицы; 2 – стержень; 3 – вкладыш

Нормальные предельные напряжения в плоскости разрушения

$$\sigma_{\text{нр}} = \frac{P_p \cos \alpha}{S_{\text{yc}}}, \quad (4.53)$$

предельные касательные напряжения в плоскости разрушения

$$\tau_{\text{нр}} = \frac{P_p \sin \alpha}{S_{\text{yc}}}, \quad (4.54)$$

где P_p – разрушающее усилие, Н;
 S_{yc} – проекция площади поверхности разрушения на плоскость разъема цементных блоков, м²;
 α – угол наклона плоскости разъема.

При испытаниях на сдвиг (рисунок 4.37) угол плоскости разъема блоков α 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 разъема блоков α принимается равным нулю, разрушение происходит в вертикальной плоскости и нарушения разрыва определяются по формуле

$$\sigma_{\text{раз}} = \frac{P_p}{S}, \quad (4.55)$$

где S – площадь поверхности разрыва, замеренная планиметрированием.

Проведенные ВУГИ опыты по определению механических характеристик угля методом испытания необработанных образцов на разрыв и сдвиг показали хорошее совпадение полученных результатов с данными испытаний образцов правильной формы.

Для определения прочностных показателей горных пород $\sigma_{\text{нр}}$ и $\tau_{\text{нр}}$ при испытании образцов неправильной формы на сдвиг со сжатием могут быть использованы приборы (рисунок 4.37, б, в), предложенные Г.Л. Фисенко и Е.И. Ильницкой для определения аналогичных показателей на образцах правильной формы.

В приборе (рисунок 4.37, б) угол сдвига α определяется углом матрицы, а в приборе (рисунок 4.37, 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 нее 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 (рисунок 4.38) аналогична методике определения временного сопротивления раздавливанию на образцах правильной формы.

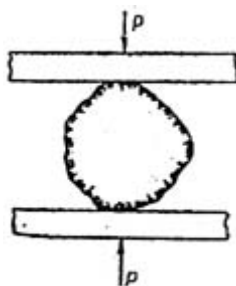


Рисунок 4.38 – Определение временного сопротивления раздавливанию горных пород на образцах неправильной формы

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 – $100 \pm 2 \text{ см}^2$.

Предел прочности при одноосном сжатии вычисляют по формуле

$$\sigma_{сж} = 52,6 \frac{P_{ср}}{\sqrt[3]{V_{ср}^2}}, \text{ МПа}, \quad (4.56)$$

где $P_{ср}$ – среднеарифметическое усилие раздавливания образцов, кН;

$V_{ср}$ – среднеарифметический объем образцов, см^3

4.4.2 Метод удара ручным и пружинным шариковыми молотками

Определение прочности методом удара шариковым молотком ручного или автоматического действия основано на известном принципе погружения стального шарика в испытуемый материал под действием статической или ударной нагрузки (метод Бринелля – испытание на твердость).

Шариковый молоток ручного действия (рисунок 4.39) имеет небольшой вес (250 граммов) и удобную для испытания форму. В ударной части молотка в сферическом гнезде завальцован вращающийся стальной шарик. Диаметр шарика равен 17,463 мм. Молоток изготавливается из стали У-7 и У-8. Твердость заостренной части молотка по Роквеллу 49-56 (шкала С). Шарик калибруется до твердости 62-66 РС. Ручка изготавливается из дерева твердой породы.

При ударе шариковым молотком на поверхности испытуемого материала образуется сферическая лунка, диаметр которой изменяется в зависимости от прочности материала. Наносится 6-10 ударов по защищенной поверхности.

Диаметр лунки измеряется с помощью штангенциркуля, с использованием лупы со шкалой.

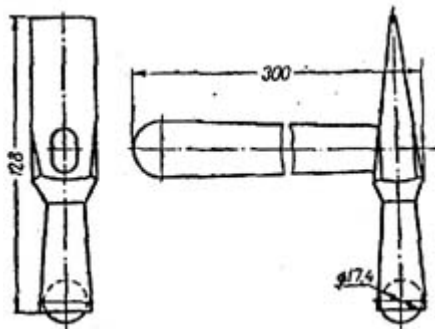


Рисунок 4.39 – Ручной шариковый молоток

Прочность материала оценивается по среднему диаметру лунок. На основании кривой, полученной опытным путем и устанавливающей зависимость между прочностью материала на сжатие $\sigma_{сж}$, полученные при испытании стандартных образцов на сжатие и диаметром лунок (рисунок 4.40).

Определение прочности материала пружинным молотком (рисунок 4.41) производится по аналогичному методу.

Разница состоит в том, что в данном случае ручной удар заменяется механическим, т.е. с помощью пружины.

Этот метод, в основном, может быть применен для определения прочности горных пород на открытых горных разработках, а также для определения прочности бетонных изделий на строительных площадках.

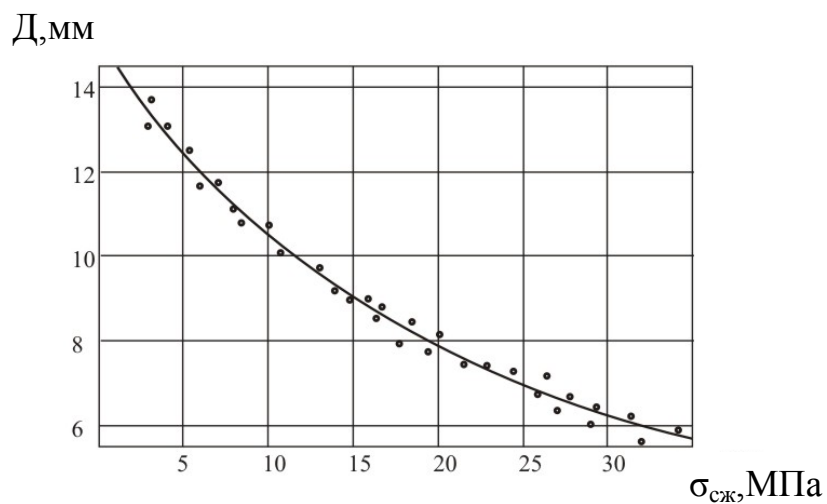


Рисунок 4.40 – Кривая зависимости между прочностью бетона на сжатие и диаметром лунок при оценке прочности бетона шариковым молотком

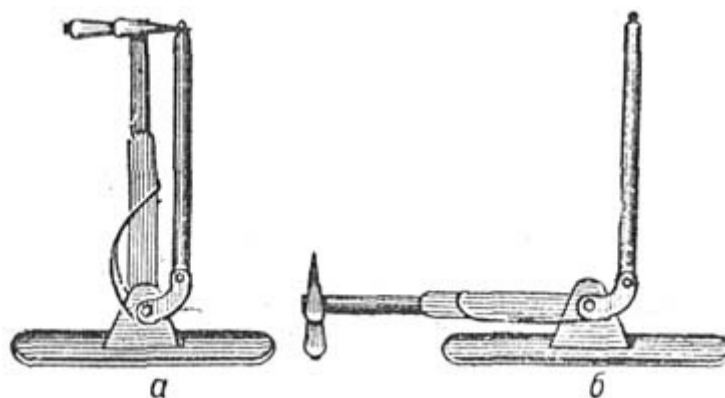


Рисунок 4.41 – Шариковый пружинный молоток: а – положение молотка до удара; б – положение молотка после удара

4.4.3 Метод вдавливания стального шарика с помощью пружинного пистолета

Этот метод аналогичен предыдущим, только вдавливается стальной шарик с помощью пружинного пистолета (рисунок 4.42).

По опытной кривой (рисунок 4.43) определяется предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$.

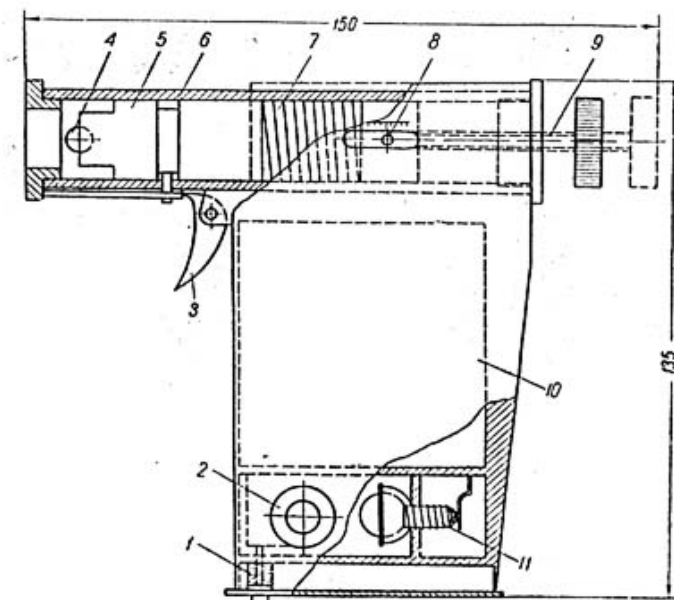


Рисунок 4.42 – Прибор Вильямса для испытания прочности бетона: 1 – выключатель; 2 – микрошкала; 3 – спусковой крючок; 4 – стальной шарик; 5 – боек; 6 – ствол; 7 – пружина; 8 – указатель; 9 – винт; 10 – батарея; 11 – электрическая лампочка

Эти приборы с использованием вдавливания шарика простые, легкие и применяются для предварительной оценки прочности пород.

4.5 Определение прочностных параметров рыхлых и разрыхленных пород

При строительстве зданий, сооружений необходимо знать прочностные характеристики глинистых и песчаных пород.

Для мягких глинистых пород определяют предел прочности при сжатии, растяжении и сдвиге.

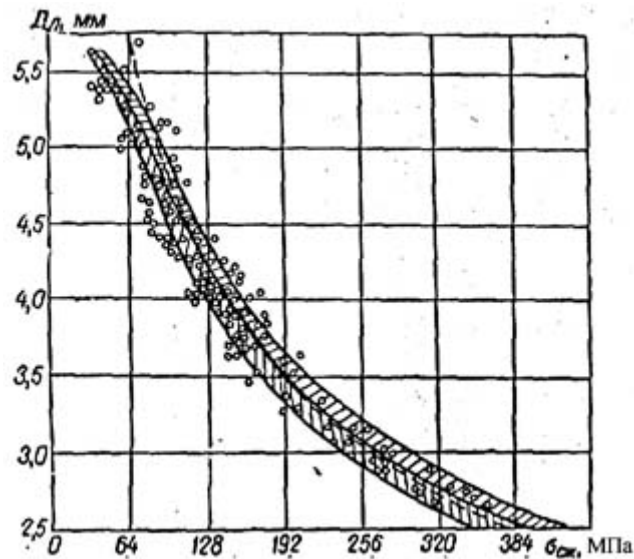


Рисунок 4.43 – Кривая зависимости между прочностью бетона на сжатие и диаметром лунок при оценке прочности с помощью пружинного пистолета

4.5.1 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 ИГП-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 сокращенной программе определяют величину разгружающей силы, при испытании по полной программе для определения модуля упругости образец нагружают до напряжения σ_E , равного примерно половине разрушающего напряжения, с последующей разгрузкой до 0, после чего образец нагружают до разрушения.

Предел прочности определяют по формулам:

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

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

где P_R – сила, при которой происходит разрушение, Н;

S_0 – первоначальная площадь поперечного сечения, м²;

S – площадь поперечного сечения при испытании, м²;

ϵ_R – продольная деформация в момент разрушения.

Образцы до и после испытания представлены на рисунке 4.44.

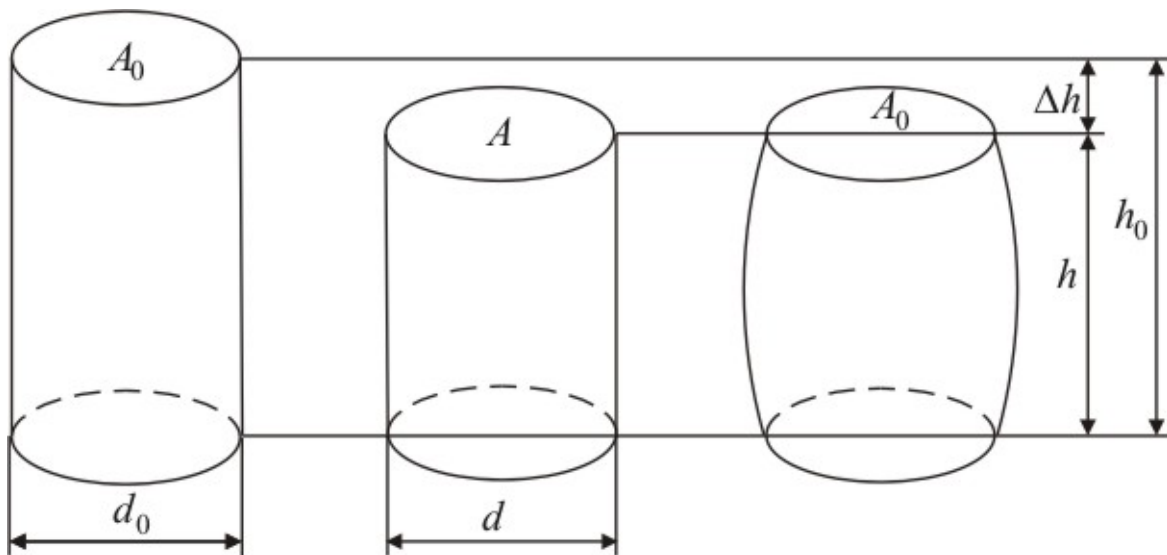


Рисунок 4.44 – Образцы до испытания и после испытания

Площадь образца S определяют при измерении диаметра штангенциркулем, либо по продольной деформации ϵ 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

$$E = \frac{\sigma_e}{\varepsilon'' - \varepsilon'},$$

где σ_e – напряжение, с которого начинается разгрузка образца, МПа;

ε'' , ε' – продольная деформация в начале и конце разгрузки (рисунок 4.45).

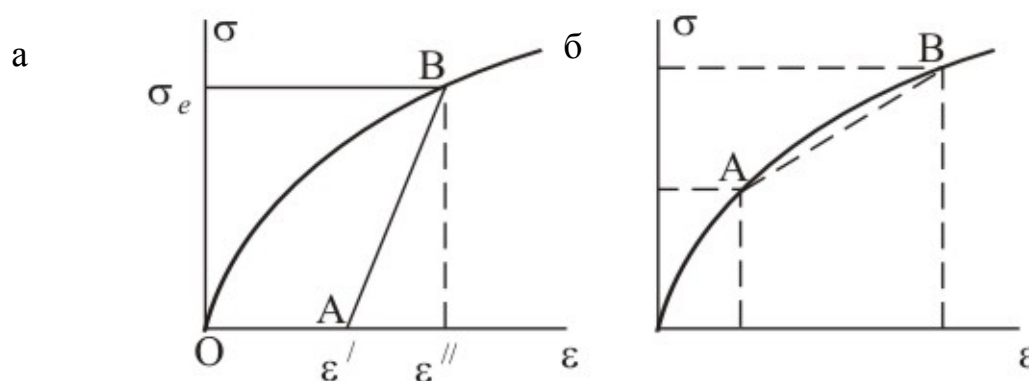


Рисунок 4.45 – Определение модуля упругости (а) и модуля общей деформации (б)

Модуль общей деформации E_o определяют по формуле

$$E_o = \frac{\sigma_k - \sigma_n}{\varepsilon_k - \varepsilon_n}, \quad (4.57)$$

где σ_k и σ_n – напряжения в конце и в начале выбранного участка кривой;

ε_k , ε_n – 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 (рисунок 4.46, а), хрупко-пластический (рисунок 4.46, б), пластический (рисунок 4.46, в).

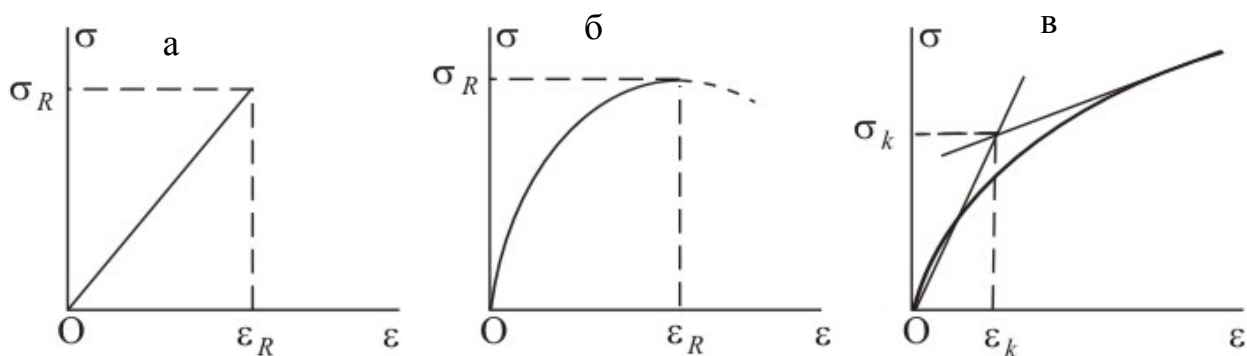


Рисунок 4.46 – Типы деформационного поведения глинистых пород при одноосном сжатии

При исследовании свойств глинистых пород проводят и другие виды испытания при одноосном сжатии. Определяют коэффициент структурной прочности, испытывая стандартные образцы и образцы с нарушенной структурой заданной влажности и прочности; проводится испытание по определению длительной прочности. За величину предела длительной прочности σ_∞ принимается такое напряжение, при котором в течение суток продольная деформация увеличится менее чем на 0,1%.

4.5.2 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 восьмерки или усеченных конусов, сложенных вершинами. Изготовление таких образцов связано с большими трудностями. Часто используют образцы цилиндрической формы (керна) 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 (рисунок 4.47). Испытание проводится для образцов, имеющих форму трапецевидной восьмерки. Образец должен иметь длину 76 мм, ширину 20 мм, высоту 25 мм. Длина разрывной части 25...30 мм, площадь сечения 5 см².

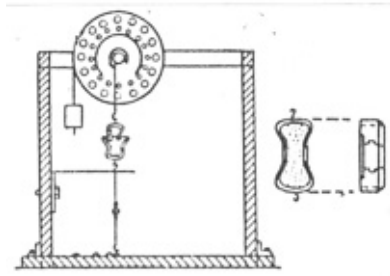


Рисунок 4.47 – Прибор Н.А. Цытовича для определения прочности глинистых пород на растяжение

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, м².

4.5.3 Метод испытания пород на срез

В песчаных и других рыхлых обломочных породах внутренними силами сопротивления сдвигу (разрушению) являются силы трения, возникающие при сдвиге части породы при взаимном перемещении слагающих ее частиц. Трение возникает внутри породы и называется внутренним трением. В связных (глинистых) породах внутренними силами являются еще и силы сцепления, т.е. силы структурных связей. Силы сцепления служат количественным выражением прочности структурных связей, действующих в объеме породы по поверхностям скольжения или в пределах зон скольжения.

Максимальное сопротивление пород сдвигу проявляется при гидростатическом равновесии, т.е. когда их влажность и плотность будут соответствовать действующей уплотняющей нагрузке и уплотнение достигнет стабилизации. Следовательно, прочность пород при сдвиге существенно зависит от режима испытания. Схемы испытания применяются следующие.

1. Испытание пород по схеме быстрого сдвига без предварительного уплотнения, при уплотняющих нагрузках, не превышающих структурной прочности пород, природной нагрузки или веса сооружений. Сдвигающее усилие передается равномерно и непрерывно до разрушения породы. Результаты испытания достаточно четко характеризуют природную прочность.

2. Испытания пород по схеме медленного сдвига после предварительного полного уплотнения - в условиях завершённой консолидации. Сдвигающая нагрузка передается ступенями в возрастающем порядке до разрушения. Новая ступень нагрузки прикладывается после завершения деформаций от предыдущей. Результаты испытаний характеризуют прочность пород при гидростатическом состоянии. Эта схема называется стандартной, она рекомендуется стандартом.

4. Испытание пород в условиях свободного оттока воды в течение опыта, или, как говорят, открытой системы. В этом случае обеспечивается полная консолидация породы от каждой ступени нагрузки. Эта схема выполнима только при медленном сдвиге.

5. Испытания пород в условиях невозможности оттока воды, т.е. в условиях закрытой системы. В этом случае не вся внешняя нагрузка является эффективной, так как часть ее воспринимается поровой водой. Эта схема выполнима при быстром сдвиге или при применении специальных приборов – стабилометров.

Выбор схемы испытаний пород на сдвиг определяется рядом конкретных условий. При исследованиях песков целесообразно применять главным образом срезные приборы, испытывать их при нагрузках, соответствующих природным или весу сооружений, без предварительного уплотнения, по схеме быстрого сдвига и, естественно, в условиях открытой системы. Испытания следует проводить на образцах естественного сложения либо при плотности, соответствующей естественным условиям залегания пород или определенно заданной.

Выбор схемы испытаний глинистых пород более труден. В этом случае надо учитывать их состав, особенно минеральный, физическое состояние, степень водонасыщенности, склонность к набуханию или к просадкам. Важно знать прочность структурных связей (эффективную нагрузку по компрессионным испытаниям), величину природной нагрузки, которую они испытывали, и предлагаемую нагрузку от сооружений.

Государственным стандартом при проектировании и строительстве всех видов зданий и сооружений рекомендуется схема 2, т.е. медленный сдвиг после плотного предварительного уплотнения. В этом случае целесообразно применять главным образом срезные пробы, испытания вести в условиях открытой системы под водой или при естественной влажности пород, при уплотняющих нагрузках, соизмеримых с величи-

ной нагрузок, предполагаемых от веса сооружений, или природных. На стадиях предварительных исследований, когда важно иметь представление о природной прочности пород, целесообразно кроме схемы 2 использовать также схему 1. При проектировании сооружений на слабых глинистых водонасыщенных породах кроме основной схемы изучения сопротивления их сдвигу желательны такие породы исследовать в стабилометрах, в условиях закрытой системы при быстром и медленном темпе разрушения.

Таким образом, для определения прочности песчаных и глинистых пород по сопротивлению сдвигу одним из основных является метод испытаний в срезных приборах.

На рисунке 4.48 показана схема прибора Гидропроекта. Рабочая коробка прибора 4 состоит из двух частей: нижней неподвижной 4а и верхней подвижной 4б.

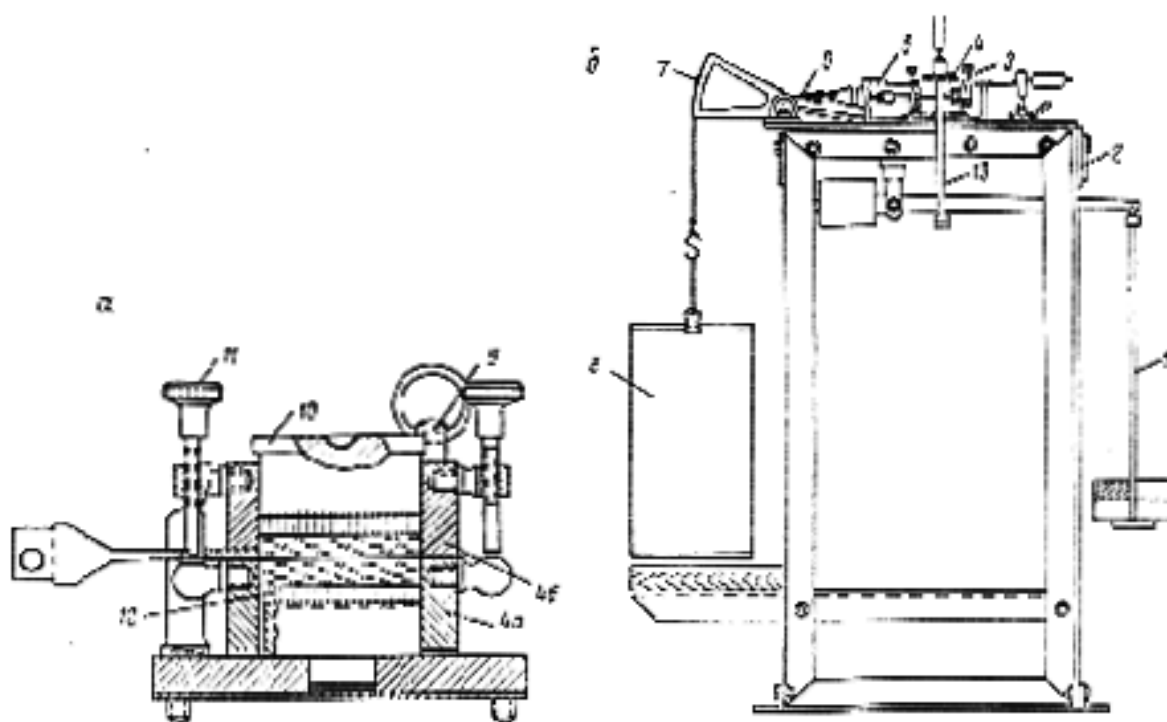


Рисунок 4.48 – Прибор Гидропроекта для испытания пород на сдвиг-срез: а – рабочая коробка; б – общий вид прибора

Для опыта обе части коробки скреплены шпильками 9. Смонтирована коробка в специальной ванне 5, установленной на металлической станине 2. Внутренняя плотность рабочей коробки имеет форму цилиндра. В этот цилиндр загружают образец испытуемой породы диаметром 50 или 70 мм и высотой 15-20 мм. В основании цилиндра находится по-

ристый камень или металлическая пластина 12 с большим количеством отверстий диаметром 0,5 мм. Нормальное уплотняющее давление на породу передается дырчатым штампом 10, имеющим с верхней стороны углубление для стального шарика, на который опирается серьга 14. На серьгу через специальный рычаг с отношением плеч 1:5 подвешивают подвеску с грузом 1.

Для сдвига в плоскости наименьшего сопротивления обе части коробки 4 с помощью подъемных винтов 11 раздвигаются и создается зазор шириной 1-2 мм. Во избежание выдавливания породы зазор создается перед самым сдвигом. Уплотнение породы производится без зазора. Сдвигающее усилие передается с помощью тяги 6, двухступенчатого шкива 7 и загрузочного ведра 8. Регистрация деформаций породы при испытаниях (нормальных и сдвигающих) производится по индикаторам часового типа, закрепленным на кронштейнах 4. При испытаниях породы под водой в ванну 5 заливают воду.

Обработка результатов испытаний должна включать построение графиков зависимости деформации породы от сдвигающих усилий, построение диаграммы зависимости сопротивления породы сдвигу от нормальной нагрузки, установление параметров, характеризующих прочность пород (коэффициент внутреннего трения и сцепления), проверку правильности полученных результатов испытаний пород на сдвиг.

На рисунке 4.49 показан пример построения графиков развития деформаций под влиянием сдвигающих усилий. На этих графиках видно, что с увеличением нормальной уплотняющей нагрузки от σ_1 до σ_2 увеличивается и сопротивление пород сдвигу. Для каждой нормальной нагрузки σ_1 , σ_2 и σ_3 на графиках отмечаются две характерные точки. Точка а отвечает сдвигающим усилиям, создающим первую значительную деформацию породы. Выше этой точки скорость развития деформации заметно увеличивается. Точка а на графиках не всегда отчетливо выделяется, но когда выделяется, то может служить контрольной для точки б, так как усилие, ей соответствующее, составляет 0,7 – 0,8 от усилия, соответствующего точке б. Точка б отвечает предельным максимальным сдвигающим усилиям, при которых наступает непрерывное смещение (деформация) породы по поверхности или вдоль зоны сдвига. Эта точка максимального сдвигающего усилия соответствует стадии разрушения породы. Сдвигающие усилия, отвечающие точкам б, принимаются как исходные при построении диаграмм зависимости сопротивления пород сдвигу от нормального уплотняющего давления.

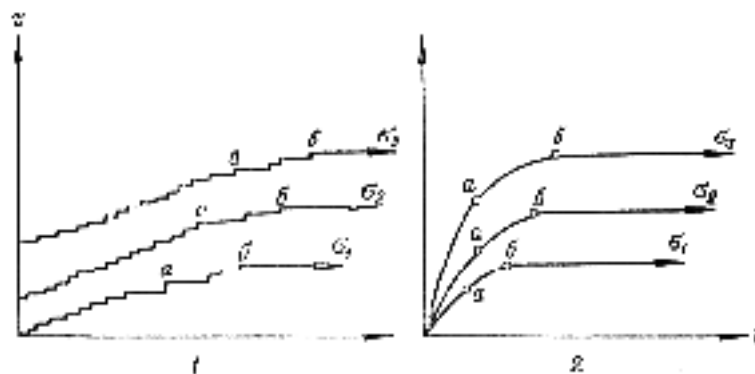


Рисунок 4.49 – Графики развития деформаций под влиянием сдвигающих усилий: 1 – при приложении сдвигающих усилий ступенями; 2 – при непрерывном увеличении сдвигающих усилий с заданной скоростью; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – нормальные уплотняющие нагрузки

Параметры: угол внутреннего трения φ , коэффициент внутреннего трения f и сцепление (зацепление) c – являются количественными показателями прочности пород. Они могут быть установлены по диаграммам и вычислены по результатам проведенных испытаний:

$$\operatorname{tg}\varphi = (\tau_1 - \tau_2) / (\sigma_2 - \sigma_1); \quad (4.58)$$

$$c = \tau_1 - \sigma_1 \operatorname{tg}\varphi = \tau_2 - \sigma_2 \operatorname{tg}\varphi$$

4.5.4 Определение прочности горных пород в приборах трехосного сжатия

Горные породы в условиях естественного залегания обычно находятся в сложном объемном напряженном состоянии, развивающемся под влиянием веса вышележащих масс (гравитационных сил) и тектонических сил, в меньшей мере – перепада температурных градиентов и др. При ведении горных работ напряженное состояние пород может уменьшаться или увеличиваться за счет перераспределения масс горных пород и воздействия внешних нагрузок. При этом если касательные усилия превысят внутренние силы сопротивления пород сдвигу, породы начинают разрушаться, наступает потеря их прочности.

При изучении прочности горных пород, т.е. сопротивления их разрушению, важно испытания пород производить в условиях силовых воздействий, аналогичных или близких к природным. Этим условиям в из-

вестной мере удовлетворяет метод испытания пород в приборах трехосного сжатия, называемых стабилометрами (измеритель прочности). Испытания пород на трехосное сжатие правильно моделируют их напряженное состояние в естественных условиях залегания и дают достаточно надежные данные о сопротивлении сдвигу, но они более сложны, чем испытания в срезных приборах. Поэтому они не могут быть массовыми в условиях производственных исследований.

В стабилометрах образец породы цилиндрической формы в тонкой резиновой оболочке помещают в камеру прибора между верхним и нижним штампами (рисунок 4.50). Всестороннее (в стабилометрах типа А) или только боковое (в стабилометрах типа Б) давление на образец передается при помощи воды, глицерина или другой жидкости, нагнетаемой в камеру. В стабилометрах типа А помимо всестороннего давления (равного боковому) через шток при помощи пресса на образец передается осевое давление $\sigma_1 = \sigma_2 + P$. Следовательно, в таких стабилометрах осевое давление не может быть меньше бокового. В стабилометрах типа Б, в отличие от типа А, боковое давление не является одновременно и всесторонним. Осевое давление на образец σ_1 здесь передается непосредственно через поршень независимо от бокового и, в частности, может быть меньше бокового.

Если в стабилометрах всестороннее или боковое давление поддерживать постоянным, а осевое постепенно увеличивать, то образец породы можно довести до разрушения. Этого же можно достичь, если осевое давление сохранять постоянным, а всестороннее уменьшать.

По данным испытаний образцов исследуемой породы (одного для песчаных пород и двух-трех для глинистых) при различных значениях всестороннего или бокового давления строят диаграммы Мора.

Касательные к предельным кругам напряжений на этих диаграммах удовлетворяют уравнениям $\tau = tg\varphi\sigma_n$ и $\tau = c + tg\varphi\sigma_n$. Параметры касательной к этим кругам $c, \varphi, tg\varphi = f$ являются количественными показателями прочности пород.

Испытаниям в приборах трехосного сжатия для определения прочности могут подвергаться скальные, полускальные, песчаные и другие несвязные и глинистые породы. Особенно целесообразно применять такие испытания для пород слабых глинистых, мягких водонасыщенных, неустойчивой консистенции, так как испытывать такие породы в срезных приборах затруднительно – они легко раздавливаются и выдавливаются в зазоры прибора.

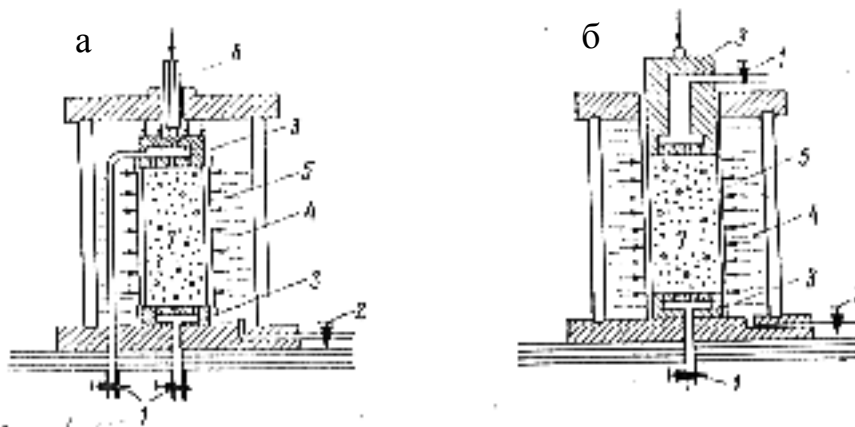


Рисунок 4.50 – Схема конструкций стабилометров: а – типа А; б – типа Б: 1, 2 – краны; 3 – верхний и нижний поршни; 4 – камера; 5 – резиновая оболочка; 6 – шток; 7 – образец

4.5.5 Определение угла внутреннего трения песков по углу естественного откоса

Для ориентировочного представления от угле внутреннего трения песков определяют угол их естественного откоса. Под последним принято понимать тот предельный угол наклона откоса, при котором порода в откосе находится в устойчивом состоянии – не осыпается, не опалывает и т.д.

В лабораторных условиях угол естественного откоса определяют только для песчаных и гравелистых пород. Для песка эта характеристика может определяться при воздушно-сухом состоянии и при помещении его в воду.

В банку в форме параллелепипеда, поставленную на ребро под углом 45° , насыпают песок (рисунок 4.51). Верхняя поверхность должна быть горизонтальной. Затем банку опирают на дно, после осыпания песка измеряют высоту откоса h и длину заложения песка ℓ , затем вычисляют угол естественного откоса

$$\varphi = \arctg \cdot \frac{h}{\ell} \quad (4.59)$$

Таким же образом определяют угол естественного откоса песка, находящегося под водой. В банку с песком медленно наливают воду.

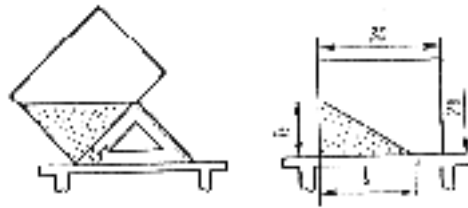


Рисунок 4.51 – Определение угла естественного откоса песчаных пород

Самым простым способом определения угла естественного откоса является определение с помощью цилиндра без дна (рисунок 4.52). В цилиндр засыпают породу и медленно ее поднимают, после чего измеряют высоту h и диаметр основания образовавшегося конуса d .

Угол естественного откоса определяют по формуле

$$\alpha = \arctg\varphi; \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{2h}{d}, \quad (4.60)$$

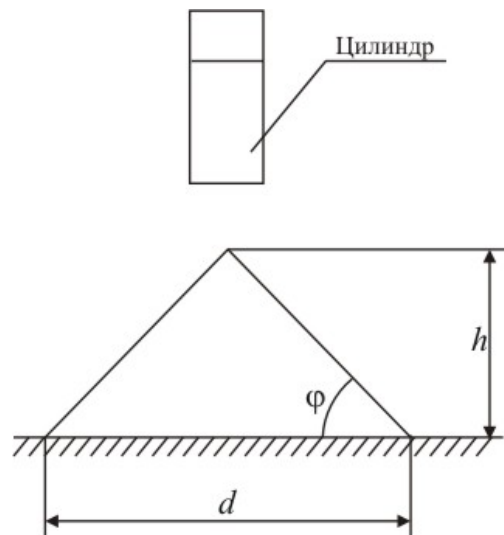


Рисунок 4.50 – Определение угла естественного откоса с помощью цилиндра

4.6 Пределы изменения прочностных параметров пород угольных шахт Донбасса

Прочностные параметры пород зависят от геологических процессов, в результате которых они образовались, а также от трещиноватости,

влажности, температуры, пористости и слоистости.

В естественном состоянии пределы прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ основных типов вмещающих пород Донбасса следующие: песчаники – 60-180 МПа; алевролиты – 25-100 МПа; аргиллиты – 10-70 МПа; известняки – 40-200 МПа. Для углей – 2,4-35 МПа.

Если нет более точных сведений, рекомендуется принимать

$$\sigma_p = 0,1\sigma_{сж}; C = 0,3\sigma_{сж}; \sigma_{н} = (1 \div 5)\sigma_p.$$

Трещиноватость, имеющаяся в массиве горных пород, в зависимости от ее интенсивности, снижает сопротивляемость массива сжатию по сравнению с образцом на 10-80%. Сопротивляемость массива растяжению может быть нулевой при густой сети открытых трещин; может быть снижена на 90-99% по сравнению с образцом при густой сети закрытых трещин и, наконец, быть снижена на 80-95 при микротрещиноватости.

Длительное *увлажнение* пород, которое часто наблюдается на угольных шахтах, снижает сопротивляемость массива сжатию по сравнению с образцом на 20-70%.

Увеличение *температуры* и *пористости* приводит к снижению прочностных характеристик пород.

Слоистость горного массива влияет на его сопротивляемость так, что в направлении вдоль слоистости сопротивляемость сжатию меньше, чем в направлении перпендикулярном слоистости, а сопротивляемость растяжению – наоборот.

Контрольные вопросы

1. Что такое напряжение?
2. Как определяются напряжения при растяжении, сжатии?
3. Как изменяются напряжения при растяжении в зависимости от ориентации сечения?
4. Понятие напряженного состояния в точке.
5. Что представляет собой тензор напряжений?
6. Что такое линейная деформация?
7. В чем заключается закон парности касательных напряжений?
8. Как формулируется закон Гука при растяжении?
9. Виды напряженных состояний.
10. Как определяются касательные напряжения в наклонных площадках при плоском напряженном состоянии?
11. Что такое круговая диаграмма напряженного состояния?
12. Что называют главными напряжениями?

13. Как с помощью круговой диаграммы напряжений определить главные напряжения?
14. Как определяется направление главных напряжений?
15. Круговая диаграмма напряженного состояния при объемном напряженном состоянии.
16. Чему равны наибольшие касательные напряжения?
17. Какие возникают напряжения и деформации при сдвиге?
18. Чему равна потенциальная энергия деформации?
19. В чем заключается природа хрупкого разрушения, разработанная А. Гриффитсом?
20. Что представляет собой кинетическая теория разрушения, разработанная академиком С.Н. Журковым?
21. В чем заключаются теории наибольших линейных деформаций, наибольших касательных напряжений, энергетическая теория прочности?
22. Что такое теория прочности Мора?
23. Способы построения паспорта прочности горных пород?
24. Какие свойства следует называть физико-механическими?
25. Общие понятия о механических свойствах горных пород.
26. Какие показатели характеризуют прочность горных пород?
27. Как определяют прочность горных пород методом соосных пуансонов?
28. Как определяется предел прочности при растяжении?
29. В чем заключается метод определения прочности горных пород на разрыв методом раскалывания?
30. Какие схемы испытания применяются при изучении свойств песчаных и глинистых пород при сдвиге?
31. Опишите устройство стабилометров и их назначение.
32. Схемы передачи напряжений на породу в стабилометрах типов А и Б.
33. Определение угла естественного откоса песчаных пород.
34. Необходимые размеры образцов горных пород для исследования их механических свойств.
35. Каким образом определяются прочностные показатели на образцах неправильной формы?
36. В чем заключается метод определения прочностных характеристик с помощью удара шариковым молотком?

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 объема и формы пород, называется деформацией.

Деформации могут быть неразрушающими и разрушающими.

Неразрушающие деформации изменяют размеры, форму и объем 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, приобретенных 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 рисунке 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.

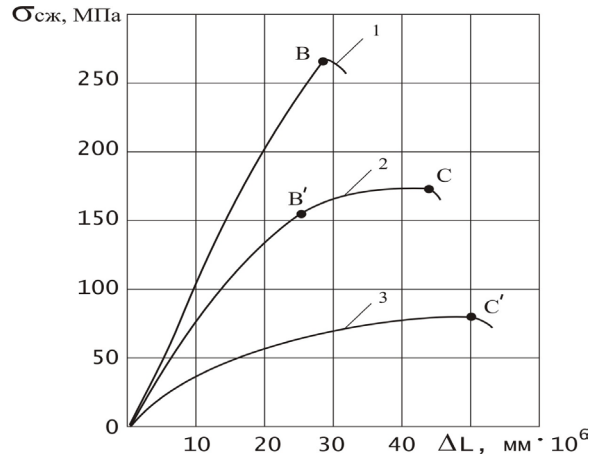


Рисунок 5.1 – Типичные графики деформаций пород: 1 – упругой (кварцит); 2 – упругопластической (осадочные породы); 3 – пластичной (мрамор): OB и OB' – зона упругих деформаций; $B'C$ и OC' — зона пластических деформаций; точки B , C , C' — моменты разрушения пород.

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 (рисунок 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 с снять нагрузку, то процесс остановится и микротрещины закроются;

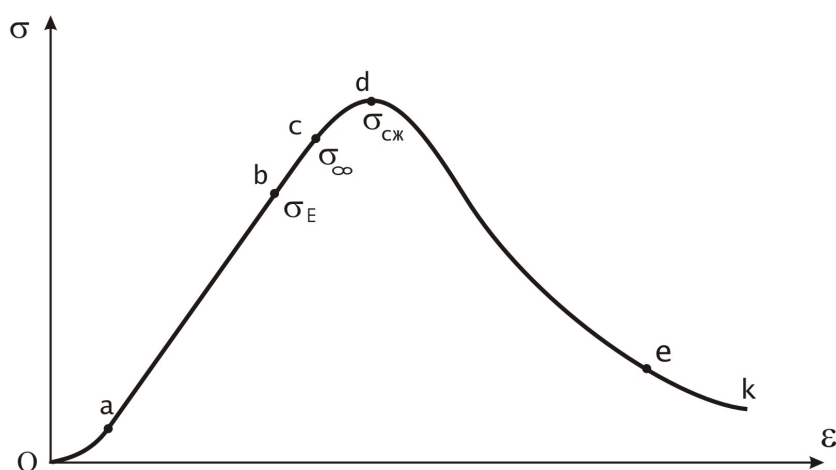


Рисунок 5.2 – Полная диаграмма деформирования образца горной породы.

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

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

циями: он является параметром породы, оценивающим ее упругие свойства.

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

- предел упругости σ_E , Па;
- модуль упругости (модуль Юнга) E , Па;
- модуль сдвига G , Па;
- модуль всестороннего сжатия K , Па;
- коэффициент Пуассона ν , 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 напряженное 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.

На рисунке 5.3 представлен типичный график деформирования горной породы для определения упругих параметров.

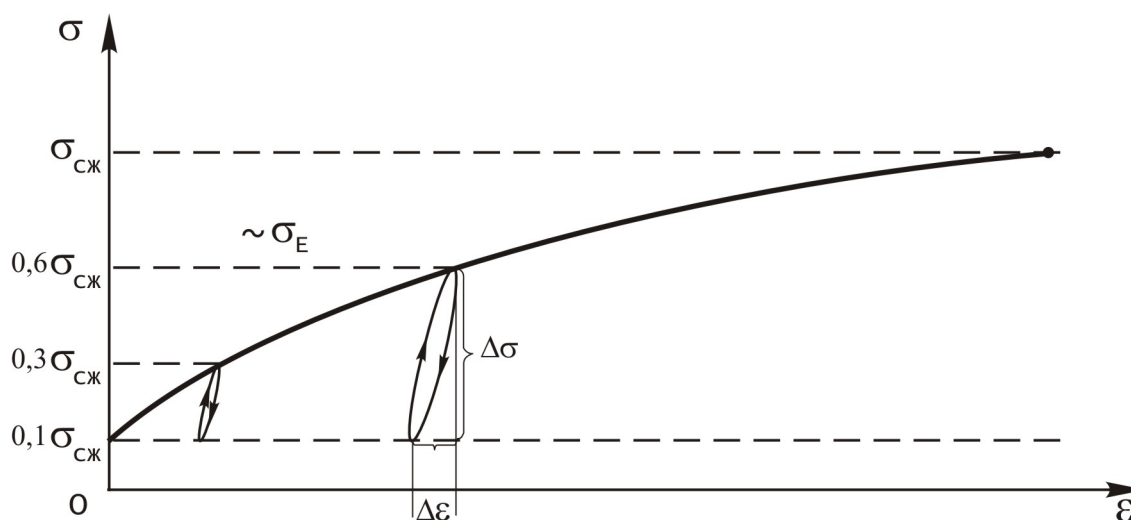


Рисунок 5.3 – Типичный график деформирования образца горной породы.

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 ν , можно расчетным путем определить значения остальных параметров.

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 зерен, соответственно уменьшается способность породы к дальнейшей деформации и, следовательно, возрастает модуль упругости.

Коэффициенты поперечных деформаций ν 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 ν 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 – $0,1 \div 0,49$; аргиллит – $0,08 \div 0,44$; песчаник – $0,1 \div 0,37$; известняк – $0,13 \div 0,44$

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 межзеренным скольжением. Внутризеренное 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

$$E_{\text{пл.}} = \text{tg}\alpha_3 = \frac{\sigma_{\text{сж}} - \sigma_E}{\varepsilon_p - \varepsilon_E} . \quad (5.3)$$

Параметры $\sigma_{\text{сж}}$, σ_E , ε_p и ε_E можно определить из графика, представленного на рисунке 5.5.

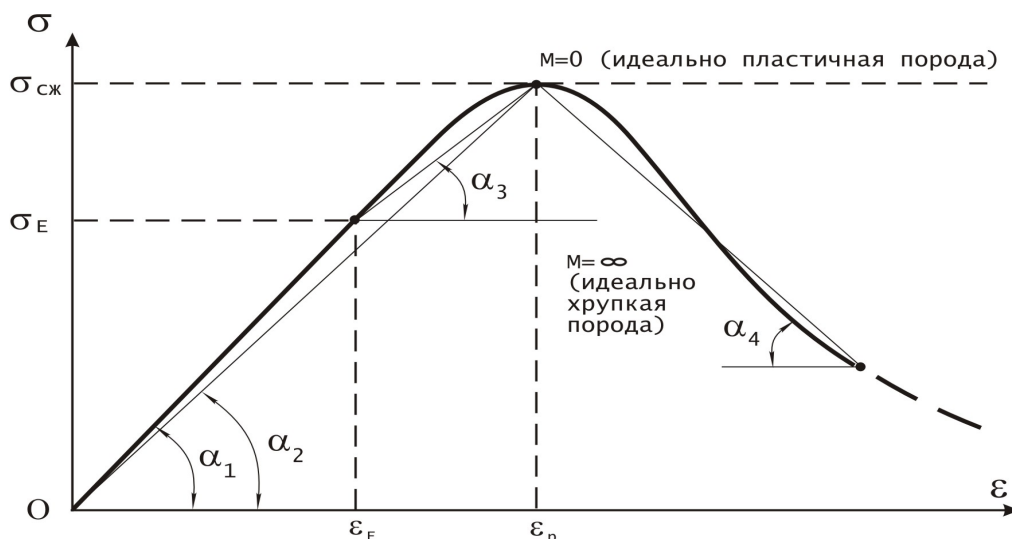


Рисунок 5.4 — График к расчету модуля пластичности образца горной породы.

На графике $\text{tg}\alpha_1$ равен модулю упругости E ; $\text{tg}\alpha_2$ — модулю полных деформаций перед разрушением $E_{\text{деф}}$; $\text{tg}\alpha_3$ — модулю пластичности $E_{\text{пл}}$; $\text{tg}\alpha_4$ — 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 жестких кварцевых зерен и полевого шпата в породе уменьшает ее 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 темпе-

ратуры 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 внутризеренные 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.

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

На рисунке 5.5 изображен характер проявления ползучести (а) и релаксации (б) в горных породах во времени t .

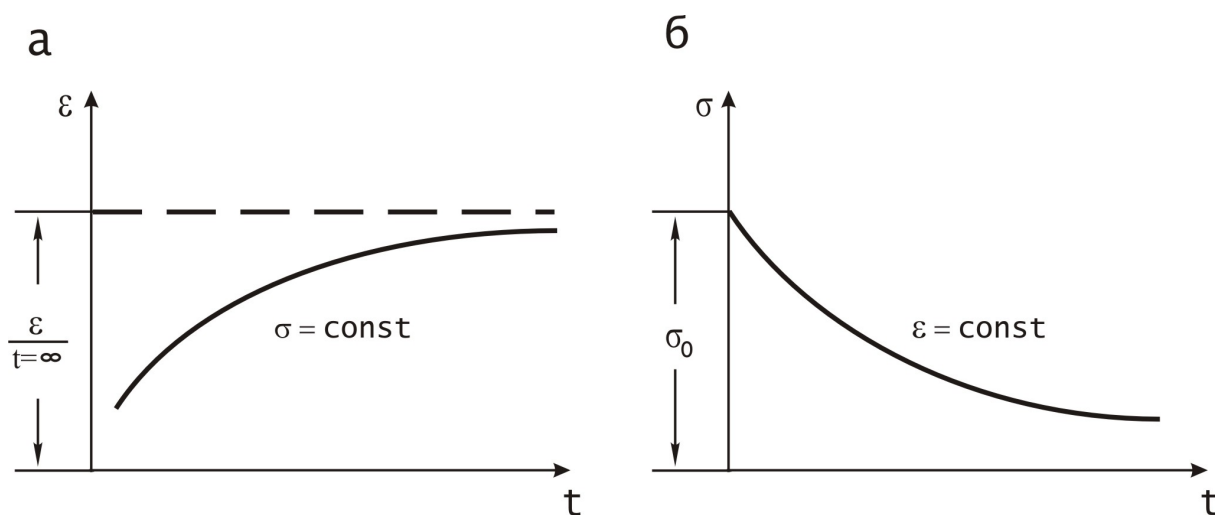


Рисунок 5.5 — Кривые, характеризующие проявление ползучести и релаксации у твердых тел.

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

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} \sigma_{\tau} \delta(t - \tau)^{-\alpha}, \quad (5.4)$$

где σ_{τ} – напряжения в породе в момент времени τ ;

t – другой, больший, чем τ момент времени;
 α и δ – коэффициенты ядра ползучести для данной породы. Они и являются параметрами данного свойства породы; для пород $\alpha \approx 0,7$ и $\delta = (2 \div 5)10^{-3}$.

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 σ , а со временем станет уменьшаться, стремясь к определенной величине.

Уравнения кривой релаксации обычно приводят в следующем виде

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{t_0}}, \quad (5.5)$$

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 (рисунок 5.6). Для этих целей используют образцы призматической формы, поперечные размеры которых в 6 – 10 раз меньше его длины. Образцы нагружают постоянной нагрузкой, создающей усилие F .

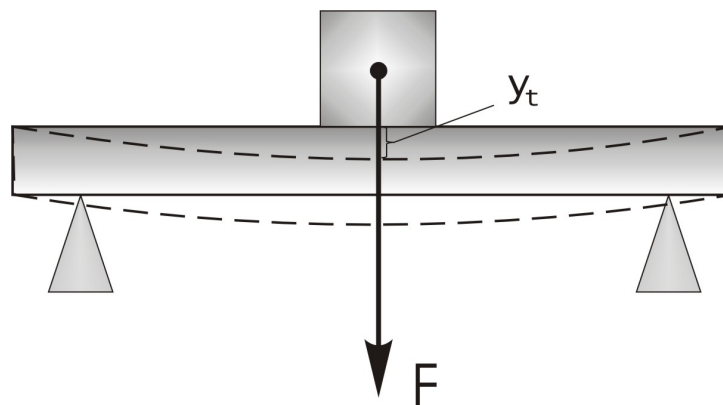


Рисунок 5.6 – Метод испытания «поперечный изгиб образцов-балочек».

С учетом величин F и t устанавливают величину прогиба y_t , а реологические параметры α и δ определяют из выражения

$$\frac{y_t - y_0}{y_0} = \frac{\delta}{1 - \alpha} \cdot t^{1-\alpha}, \quad (5.6)$$

где y_0 – величина мгновенного, упругого прогиба, мм.

$$y_0 = \frac{\kappa \cdot F}{E}, \quad (5.7)$$

κ – коэффициент влияния касательных напряжений.

$$\kappa = \frac{b^3}{4ah^3} \left(1 + 2.95 \frac{h^2}{b^2} - 0.02 \frac{h}{b} \right), \quad (5.8)$$

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 α и δ . 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.

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

Горные породы сохраняют характерную информацию о механических воздействиях в прошлом. Это свойство пород получило название "памяти" о действовавших ранее напряжениях. Со временем (после разгрузки – снятия напряжений) "память" горных пород ослабевает или исчезает полностью.

Деформирование горных пород во времени может быть математически опасно путем абстрактного схематического представления горных пород в виде некоторых моделей из структурных элементарных единиц, причем каждая из этих единиц представляет собой упругий, пластичный или вязкий элемент.

При этом структурные единицы, обладающие упругими свойствами, могут быть уподоблены пружинами с законом деформирования Гу-

ка. Структурные единицы с вязкими свойствами подчиняются закону деформирования Ньютона

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (5.9)$$

где $d\varepsilon/dt$ – скорость деформирования,
 η – коэффициент вязкости.

В модели они могут быть представлены поршнем со сквозными отверстиями в цилиндре с вязкой жидкостью.

Пластические свойства структурных единиц моделируются сухим трением. В этом случае деформирование может иметь место лишь при напряжениях, превышающих некоторое значение, называемое пределом текучести.

Изображение упругих, вязких и пластических элементов при построении реологических моделей горных пород представлено на рисунке 5.7.

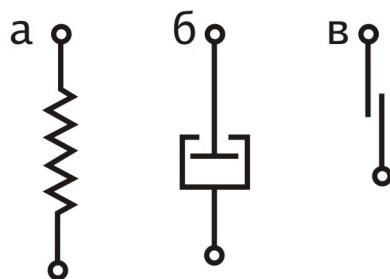


Рисунок 5.7 — Изображение упругих (а), вязких (б) и пластических (в) элементов в моделях горных пород.

Деформирование горных пород может быть отражено посредством соответствующего сочетания указанных элементов (рисунок 5.8).

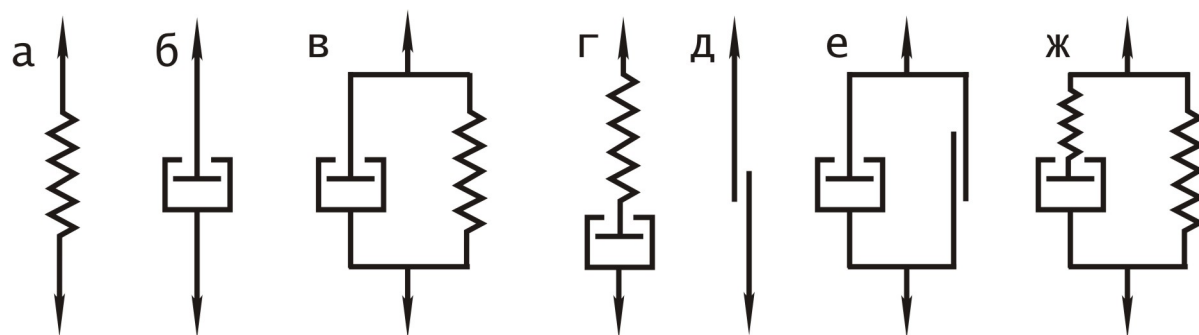


Рисунок 5.8 — Реологические модели горных пород: а – упругого (Гука); б – вязкого (Ньютона); в – упруго-вязкого (Максвелла); д – пла-

стичного (Сен-Венана); e – вязкопластического (Бингама-Шведова), z – линейного стандартного (Пойнтинга-Томпсона).

Большинство горных пород относится к упрочняющимся телам. Для поддержания в них пластических деформаций необходимо повышать напряжения, рост напряжений происходит с убывающей скоростью. Такое поведение породы моделируется комбинацией идеально упругого тела Гука и идеально вязкого тела Ньютона (поршень с отверстиями, движущийся в цилиндре, наполненном вязкой жидкостью). При параллельном соединении этих тел получается модель тела Кельвина-Фойгта, при последовательном – тела Максвелла.

В случае идеального пластического тела после достижения предела упругости тело начинает пластически течь – деформация возрастает при постоянном напряжении. Механическая модель, описывающая эту деформацию, представляет собой тяжелое тело, лежащее на горизонтальной плоскости и соединенное с пружинной (тело Сен-Венана).

Комбинируя свойства описанных выше сред, существует модель Бингама-Шведова, состоящая из последовательно соединенных моделей Сен-Венана и Максвелла. Эта среда при нагрузке, не превосходящей предела текучести, ведет себя как упругая. При нагрузке, превосходящей предел текучести, среда начинает течь, причем напряжения в ней зависят от скорости.

Модель стандартной линейной среды описывается моделью Пойнтинга – Томпсона. Нагрузка, приложенная к такой модели, вызовет, прежде всего, упругую мгновенную деформацию обеих пружин; в дальнейшем деформация будет расти за счет соответствующего расстояния пружины.

Таким образом, все приведенные выше модели можно разделить на классы. Среди них можно выделить класс сред, деформация которых возрастает с течением времени при постоянном напряжении по линейному закону, – модели Максвелла, Сен-Венана, Бингама-Шведова. Возрастание деформаций в таких моделях ограничено только продолжительность действия силы. Другой класс образует модели, деформация которых возрастает по экспериментальному закону, – модели Фойгта, Пойнтинга-Томпсона и обобщенная линейная среда. Возрастание деформации в таких средах ограничено, предельное значение деформации зависит от величины нагрузки и констант вещества.

Контрольные вопросы

1. Что называется деформацией горной породы?

2. Какие виды деформаций известны?
3. Что называется модулем Юнга, модулем сдвига, коэффициентом Пуассона?
5. Что называется явлением ползучести и релаксации?
5. Какие свойства горных пород называются реологическими?
6. Назовите основные принципы составления реологических моделей.

6 АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

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

6.1 Акустические волны в породах

Источники звука в горных породах: естественные (микро - и макросдвигения 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 объемного попеременного сжатия и растяжения. Распространяются в любой среде: газы, жидкости, твердые тела;

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

– поверхностные волны (V_R). Частицы на поверхности твердого 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 тоже значение фазы

волны) различают: плоские волны, сферические и цилиндрические.

6.2 Параметры акустических свойств горных пород

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

Если

$$\frac{d}{2\lambda} < 0,2 \div 0,3 \quad (6.1)$$

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

$$V_p^{ст} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}}, \quad (6.2)$$

где E_d – модуль упругости Юнга, измеренный динамическим методом, Па;

ρ – плотность породы, кг/м³.

Если

$$\frac{d}{2\lambda} > 0,8 \div 1 \quad (6.3)$$

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

$$V_p^м = \sqrt{\frac{E_d(1 - \nu_d)}{\rho(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}}, \quad (6.4)$$

где ν_d – коэффициент Пуассона, измеренный динамическим методом, ед.;

$$V_s = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1 + \nu_d)}}, \quad (6.5)$$

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

Если

$$\frac{d}{2\lambda} = 0,3 \div 0,8 \quad (6.6)$$

– в породах распространяются продольные, поперечные и поверхностные волны, причем при небольших удалениях от источника колебаний – продольные «стержневые», а с удалением – они исчезают и формируются продольные «массива».

В этом случае скорость поверхностной волны Рэлея

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12\nu_d}{1 + \nu_d} \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} = \frac{0,87 + 1,12\nu_d}{1 + \nu_d} \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1 + \nu_d)}} \quad (6.7)$$

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

$$V_p^M > V_p^{ст} > V_s > V_R$$

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).

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

Акустическое сопротивление

$$z = \rho \cdot V, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} \quad (6.8)$$

определяет способность горных пород отражать и преломлять упругие волны и является отношением давления волны p к мгновенной скорости 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.

$$A_i = A_0 e^{-\Theta r_i}, \quad (6.9)$$

где A_i и A_0 соответственно амплитуда волны на удалении r_i от источника;

Θ – коэффициент поглощения.

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

$$\Theta = \frac{2}{3} \frac{\omega^2 \eta}{\nu \rho}, \quad (6.10)$$

где η – коэффициент вязкости (внутреннее трение породы), Па·с.

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

Вообще для горных пород $\Theta = (0,05 \div 0,3)$ 1/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) отраженной волны A_0 к амплитуде (энергии) падающей волны $A_{\text{п}}$ на границе раздела двух сред.

$$K_3 = \frac{A_0}{A_{\text{п}}} = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2 < 1 \quad (6.11)$$

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

На рисунке 6.1 представлены различные случаи преломления и отражения упругих волн на границе раздела двух сред.

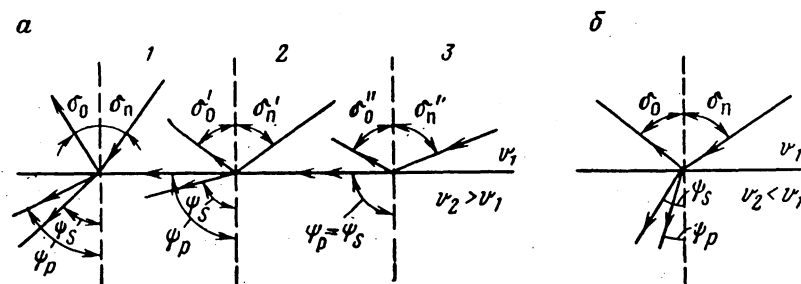


Рисунок 6.1 – Преломление и отражение упругой волны на границе двух сред: а – при условии $V_2 > V_1$; 1 – общий случай; 2 – момент внутреннего отражения продольной волны; 3 – момент внутреннего отражения поперечной волны; б – при условии $V_2 < V_1$

Угол падения δ_n и угол преломления ψ упругой волны, проникшей в горную породу подчиняются закону Снеллиуса, согласно которому эти углы находятся в определенном соотношении со скоростью упругой волны в первой V_1 и второй V_2 средах

$$\frac{\sin \delta_n}{\sin \psi} = \frac{V_1}{V_2} \quad (6.12)$$

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 δ_n , можно добиться такого момента, когда произойдет полное внутреннее отражение сначала продольной, а затем и поперечной волны.

6.3 Определение акустических параметров пород в лабораторных условиях

Обычно целью лабораторных исследований является определение упругих динамических параметров горных пород E_d и ν_d , которые определяются значительно проще, чем при механических испытаниях. При

этом следует иметь в виду, что величины E_d и ν_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 методов.

Метод прямого прозвучивания образцов (см. рисунок 6.2, а) заключается в том, что определяют скорость продольной волны для отрезков керна горной породы разной длины при разных частотах излучения. Затем, используя критерии 6.1–6.3, выявляют величины V_p^m и $V_p^{ст}$. После этого вычисляют E_d из выражения 6.2 и ν_d из выражения 6.4.

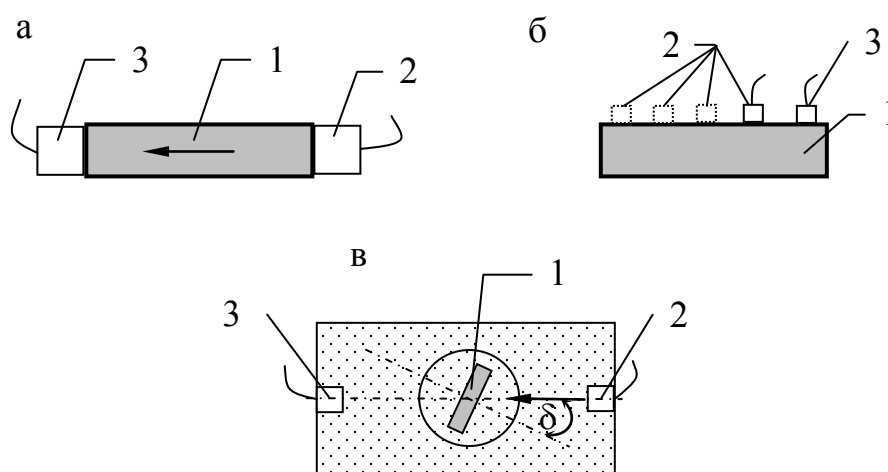


Рисунок 6.2 – Схемы лабораторных экспериментов для определения упругих динамических параметров горных пород: а – прямое прозвучивание; б – продольное профилирование; в – метод критических углов; 1 – образец породы; 2 – излучатель; 3 – приемник

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 ν_d и E_d , используя следующие выражения

$$v_d = \frac{\left(V_p^M\right)^2 - 2V_s^2}{2\left[\left(V_p^M\right)^2 - 2V_s^2\right]} \quad (6.13)$$

$$E_d = \frac{\left(V_p^M\right)^2 \rho(1 + v_d)(1 - 2v_d)}{(1 - v_d)} \quad (6.14)$$

$$E_d = \frac{V_s^2 \rho \left[3\left(V_p^M\right)^2 - 4V_s^2 \right]}{\left(V_p^M\right)^2 - V_s^2} \quad (6.15)$$

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 δ_p и δ_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

$$V_p = \frac{V_{II}}{\sin \delta_p} \text{ и } V_s = \frac{V_{II}}{\sin \delta_s} \quad (6.16)$$

6.4 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 протяженным 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 совмещен с предварительным усилителем и заключен 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 напряженного 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 напряженного 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 $2500 \div 3000$ 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 6.3.), предназначенная для ведения вышеописанных методов прогноза на практике.

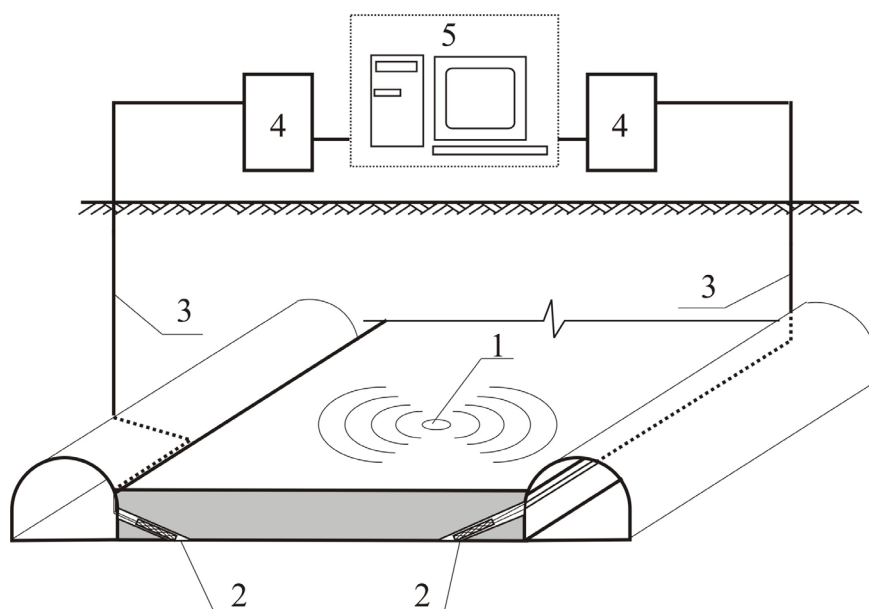


Рисунок 6.3 – Схема организации сейсмических наблюдений с использованием аппаратуры ЗУА-98: 1 – очаг сейсмоакустического события; 2 – передатчик звукоулавливающей аппаратуры; 3 – телефонная линия связи; 4 – приемник звукоулавливающей аппаратуры; 5 – регистратор сейсмоакустической информации

Эта аппаратура существенно превосходит по параметрам все известные аналоги: динамический диапазон сигналов до 90 дБ; полоса рабочих частот от 8 до 4500Гц; коэффициент нелинейных искажений менее 0,01%.

Аппаратура обеспечивает непрерывный контроль линии связи и компенсацию потерь сигнала в линии. Все операции по контролю линий связи и регистрации сейсмоакустической информации полностью автоматизированы, оператор службы прогноза получает информацию о режиме работы аппаратуры с помощью специального дисплея.

Поскольку функцию регистратора аппаратуры выполняет ПЭВМ, весь комплекс технических средств может быть адаптирован для выполнения различных частных задач контроля массива.

Имеется положительный опыт применения данной аппаратуры для исследования параметров процесса обрушения кровли в очистном забое.

Контрольные вопросы

1. Как подразделяют акустические (звуковые) волны по частоте и по характеру деформирования среды?
2. Какие скорости распространения звуковых волн Вы знаете?
3. Что такое акустическое сопротивление?
4. Что такое коэффициент поглощения?
5. Что называют коэффициентом поглощения и коэффициентом преломления?
6. Где в горном деле используют акустические свойства горных пород?

7 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 – коксуемость; для строительных материалов – термостойкость и морозостойкость);

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

– параметры, определяющие особое поведение пород при разработке месторождений полезных ископаемых (выбросоопасность, метаносность, 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 копанью.

7.1 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. Протодьяконовым (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. Протодьяконов (старший) испытывал на одноосное сжатие образцы пород ку-

бической 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:

$$f = \sigma_{сж} / 10 \quad (7.1)$$

где $\sigma_{сж}$ – порочность на сжатие испытанного образца, МПа;

10 – предел прочности на сжатие эталонного образца, МПа.

Проф. М. М. Протодяконов разделил все породы по величине коэффициента крепости на 10 категорий.

Таблица 7.1 – Шкала крепости пород по М. М. Протодяконову

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. Протодяконов 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

$$f_B = \sigma_{сж} / 300 + \sqrt{\sigma_{сж} / 30} \quad (7.2)$$

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

$$f_{\text{оср}} = (\sigma_{\text{сж}} + 10\sigma_{\text{р}}) / 60 + \sqrt{(\sigma_{\text{сж}} + 10\sigma_{\text{р}}) / 12} \quad (7.3)$$

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 (рисунок 7.1.) 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 копр имеет в верхней части отверстия, в которые вставляют штифты 5, ограничивающие подъём гири. В комплект прибора входят: объёмметр, 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.

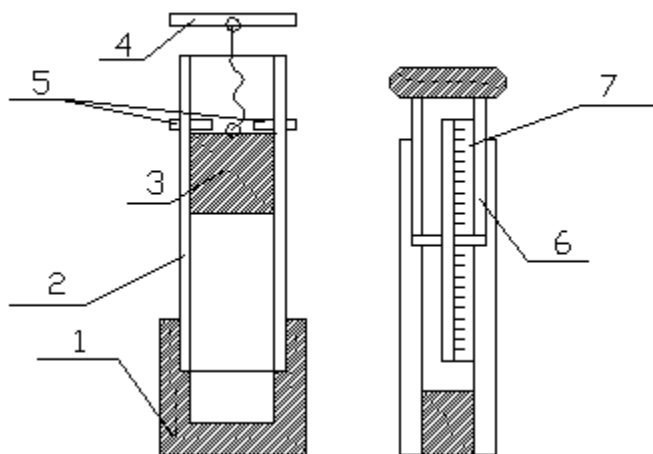


Рисунок 7.1 – Прибор для определения крепости (ПОК)

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 зависимо-

сти 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

$$f = 20n / h \quad (7.4)$$

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.

7.2 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 объемом 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 $3 \div 15$ мм/мин до появления лунки выкола. По шкале сило измерителя пресса определяется усилие вдавливания P , необходимое для образования лунки выкола. Нагружение образца производится на разных участ-

ках одной поверхности не менее 25-30 раз. Показатель контактной прочности определяется в кгс/мм по формуле

$$P_k = \sum \frac{P_i}{nS}, \quad (7.5)$$

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/мм², а XII класс, «крепчайшие» – $P_k > 565$ кгс/мм².

7.3 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 относительные износостойкости пород.

стойкость 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 (G1). 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 50-70мм опускают на образец и включают привод станка на 10 мин. По окончании опыта эталонный стержень взвешивают (G2). Показатель абразивности вычисляют по формуле

$$A = (G_1 + G_2) / 2 \quad (7.6)$$

По величине показателя абразивности все породы разделены на 8 классов (таблица 7.3).

Таблица 7.3 – 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.

7.4 Дробимость

Дробимость характеризует процесс объемного 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

$$K_{\text{дроб}} = G / \gamma, \quad (7.7)$$

где γ – объемная масса породы, г/см³

По величине показателя дробимости все породы разделены на 6 классов (таблица 7.4).

Таблица 7.4 – Классификация пород по дробимости

Класс по дробимости	Характеристика класса	Величина показателя дробимости, см ³
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.

7.5 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 (рисунок 7.2) 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

$$\bar{A} = Z_{cp} / h, \text{ кгс/см}, \quad (7.8)$$

Где Z_{cp} – усилие резания, кгс;

h – толщина среза, см.

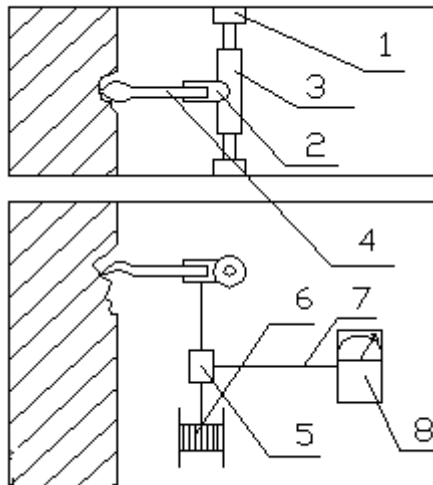


Рисунок 7.2 – Прибор ДКС–2

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. Скочинского, ДонУГИ и Донгипромуглемаше.

Так ИГД им. Скочинского разработал методику определения сопротивляемости угля резанию динамометрическим сверлом СДМ-1, сутью 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 (Донгипромуглемаш), 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 таблице 7.5.

7.6 Буримость

Под буримостью понимают способность горных пород оказывать сопротивляемость проникновению в них бурового инструмента в процессе бурения. Буримость оценивают длиной шпура, пробуренного за

единицу времени в стандартных условиях или чистым временем бурения T_0 1 м шпура в стандартных условиях.

Таблица 7.5 – 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

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. Протождяконова. Классификация пород, вошедшая в строительные нормы и правила (СНиП) представлена в таблице 7.7.

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

$$\mathcal{E}_{\text{бур}} = W / V, \quad (7.9)$$

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 Π_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 7.6 – Классификация пород по СНИП

Категория пород по крепости и способу разработки	Коэффициент крепости, f, ед.	Категория крепости пород по СНИП	T _б , 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	- - -

7.7 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/м³ породы определяется через эталонный удельный расход ВВ – q₀, зависящий от коэффициента крепости пород по шкале М.М. Протодяконова (f)

$$q_0 = 0,065 \cdot f \quad (7.10)$$

Эталонный удельный расход ВВ для пород составляет от 50 до 1000 г/м³. С учётом поправочного коэффициента, учитывающего свойства

ВВ, схему взрывания и размеры шпура (К), формула для определения удельного расхода ВВ запишется в виде

$$q = q_0 K \quad (7.11)$$

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.

7.8 Липкость и сопротивление копанию рыхлых и разрыхленных 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 прилипнуть 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 :

$$K_F = F_K / S, \quad (7.12)$$

где F_k – касательная сила сопротивления породы копанию, Н;
 S – площадь поверхности отрыва, м.

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 $K_F = (0,16 \div 0,25)10^5$ Па, у тяжёлых влажных глин $K_F = (2 \div 3)10^5$ 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

$$\begin{aligned} \sigma_{сж} &= 10f, \text{ МПа}; & P_k &= 1,59f^{1,67}, \text{ кгс / мм}^2; \\ \sigma_{сж} &= 6,3P_k^{0,6}, \text{ МПа}; & K_d &= \frac{67}{f} - 1,7, \text{ см}^3; \\ \sigma_{сж} &= 1000 / K_d^{1,45}, \text{ МПа}; & \bar{A} &= 11\sigma_{сж} + 40, \text{ кгс / см}. \end{aligned}$$

7.9 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, расчетах крепи, расчетах оборудования для разрушения пород, расчетах 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, оговоренные 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 расчетах 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 копанью позволяет обоснованно выбирать тип экскаватора для выемки пород, рассчитывать его производительность.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под крепостью горных пород?
2. Кто предложил понятие крепости породы?
3. Сколько категорий крепости Вам известно?
4. Какие методы определения коэффициента крепости Вам известны?
5. В чём сущность метода толчения для определения крепости?
7. Что называется контактной прочностью породы?
7. Какие требования предъявляются к образцу породы при определении контактной прочности по методике ИГД им. А. А. Скочинского?
8. Каков порядок определения контактной прочности?
9. На сколько классов разделены породы по контактной прочности?
10. Что называется абразивностью породы?
11. Какие группы методов определения абразивности Вы знаете?
12. В чём сущность метода определения абразивности по методике ИГД им. А. А. Скочинского?

13. Что принято за показатель абразивности породы?
14. На сколько классов разделены породы по абразивности?
15. Что такое абразивность трения и ударная абразивность?
17. Что характеризует дробимость породы?
17. В чём сущность метода определения дробимости по методике ИГД им. А. А. Скочинского?
18. На сколько классов распределены породы по дробимости?
19. Что такое сопротивляемость резанию?
20. Как определяется сопротивляемость резанию прибором ДСК?
21. Какие методы (приборы) для определения сопротивляемости резанию Вам ещё известны?
22. Что понимают под буримостью породы?
23. Чем оценивается буримость пород?
24. На сколько категорий делятся породы по буримости в классификации, приведенной в СНиП?
25. Что понимают под показателем трудности бурения?
27. Что такое взрываемость пород и чем она характеризуется?
27. Как классифицируют породы по взрываемости?
28. Что понимают под липкостью породы?
29. Что понимают под размокаемостью породы?
30. Что понимают под набуханием породы?
31. Что понимают под сопротивлением копанию рыхлых и разрыхленных пород?
32. Что Вы знаете об использовании специальных горно-технологических свойств пород в практике горного дела?

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 в глубь 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°C . Для Донбасса это ~ 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 теплоемкость – c , кДж/кг град.
2. Коэффициент теплопроводности – λ , Вт/м град, кДж/м с град.

3. Коэффициент линейного температурного расширения – α , 1/град.

Кроме того, известны другие, часто применяемые в горных расчетах, параметры тепловых свойств пород:

4. Коэффициент теплопроводности — λ , м²/с.

5. Коэффициент объемного теплового расширения – γ_t , 1/град

6. Коэффициент теплопередачи – K , кДж/м² с град.

7. Удельная теплота плавления – L , Дж/кг.

8. Температурный интервал плавления – $(T_1 - T_2)$, °С.

Для углей, кроме того, различают: теплотворная способность, термомеханическая стойкость, коксуюемость, спекаемость и выход летучих.

Рассмотрим некоторые параметры, указанные выше, подробнее.

Удельная теплоемкость – количество тепла, необходимого для нагревания 1 кг породы на 1 градус.

$$dQ=c \cdot m dT \quad (8.1)$$

Для горных пород удельная теплоемкость изменяется в пределах от 0,4 до 2 кДж/кг град. Например: для каменного угля $c = 1,3$ кДж/кг град; для антрацита $c = 0,93$ кДж/кг град; для известняка $c = 0,67 \div 1,04$ кДж/кг град; для песчаника $c = 0,81$ кДж/кг град; для сланец $c = 0,75$ кДж/кг град.

Теплоемкость 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 решетки.

Теплоемкость зависит только от пористости горной породы

$$c \cdot \rho \approx c_0 \rho_0 (1 - \rho) \quad (8.2)$$

где c_0 и ρ_0 – теплоемкость 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 градиента (в направлении уменьшения температуры).

Для горных пород $\lambda = 0,1 \div 7$ Вт/м град. Например: для угля $\lambda = 0,5 \div 0,9$ Вт/м град, для антрацита $\lambda = 0,4$ Вт/м град; для известняка $\lambda = 1,0 \div 2,3$ Вт/м град; для песчаника $\lambda = 1,3 \div 4,2$ Вт/м град; для сланца $\lambda = 1,5 \div 2,2$ Вт/м град.

Величина коэффициента теплопроводности зависит: от пористости породы (у песка он в 6 \div 7 раз меньше, чем у песчаника); от формы пор и трещин (если удлиненные поры или трещины перпендикулярны тепловому потоку, то λ уменьшается); от размеров зерен (с уменьшением зерен уменьшается и коэффициент теплопроводности).

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость распространения изотермической поверхности в породе. Эта скорость зависит не только от теплопроводности, но и от теплоемкости и его величину обычно получают расчетным путем

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (8.4)$$

Для горных пород величина коэффициента температуропроводности изменяется от 10^{-6} до 10^{-7} м²/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

$$\Delta Q = K \Delta T \Delta S \Delta \tau \quad (8.5)$$

Коэффициенты объемного и линейного температурного расширения пород характеризуют связь между повышением температуры пород и увеличением их линейных размеров или объема.

$$\Delta l = \alpha l \Delta T; \quad \Delta V = \gamma_T V \Delta T; \quad \gamma_T = 3\alpha \quad (8.6)$$

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 $\alpha = (0,5 \div 1,2) \cdot 10^{-5}$ 1/град; для известняка $(0,5 \div 0,89) \cdot 10^{-5}$ 1/град; для сланца $\alpha \sim 0,9 \cdot 10^{-5}$ 1/град.

Величины коэффициентов α и γ_T зависят от размеров зерен, слагающих горную породу (увеличиваются с увеличением зерен) 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 теплоемкость; 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 вышеприведенных тепловых параметров горных пород методом мгновенного источника тепла (рисунки 8.1 и 8.2).

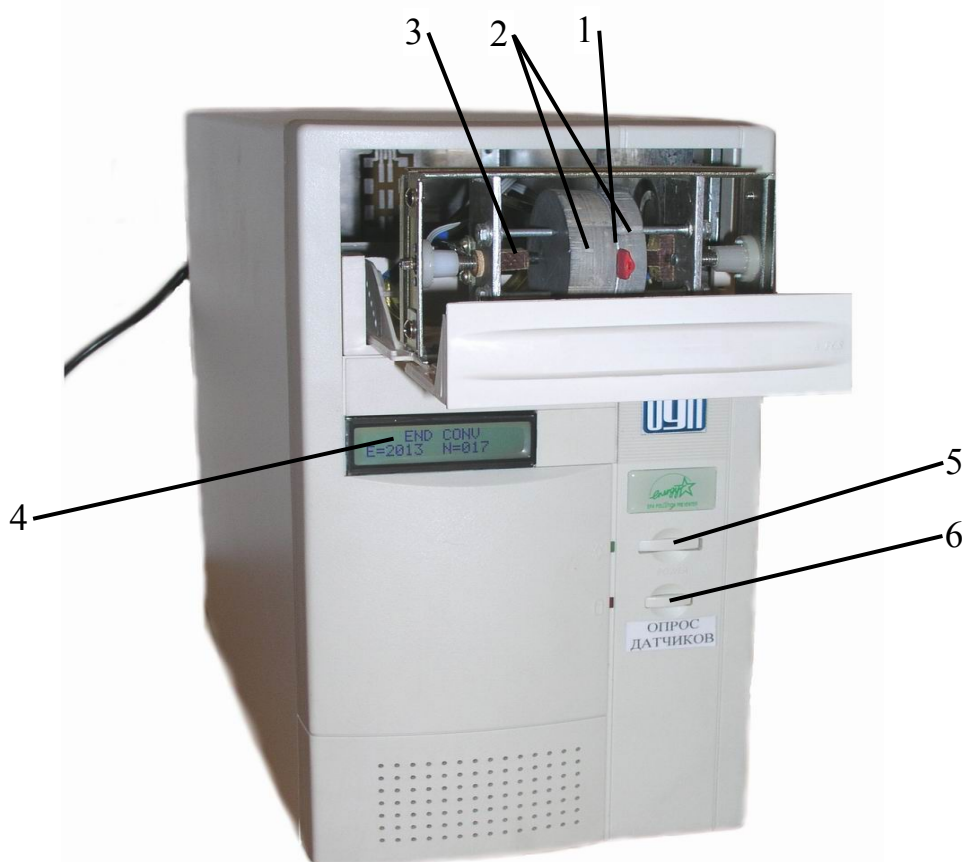


Рисунок 8.1 – Общий вид прибора ДонНТУ для определения тепловых свойств горных пород: 1 – нагреватель, 2 – образец породы, 3 – дат-

чик тепла, 4 – дисплей, 5 – кнопка включения прибора, 6 – кнопка опроса датчиков

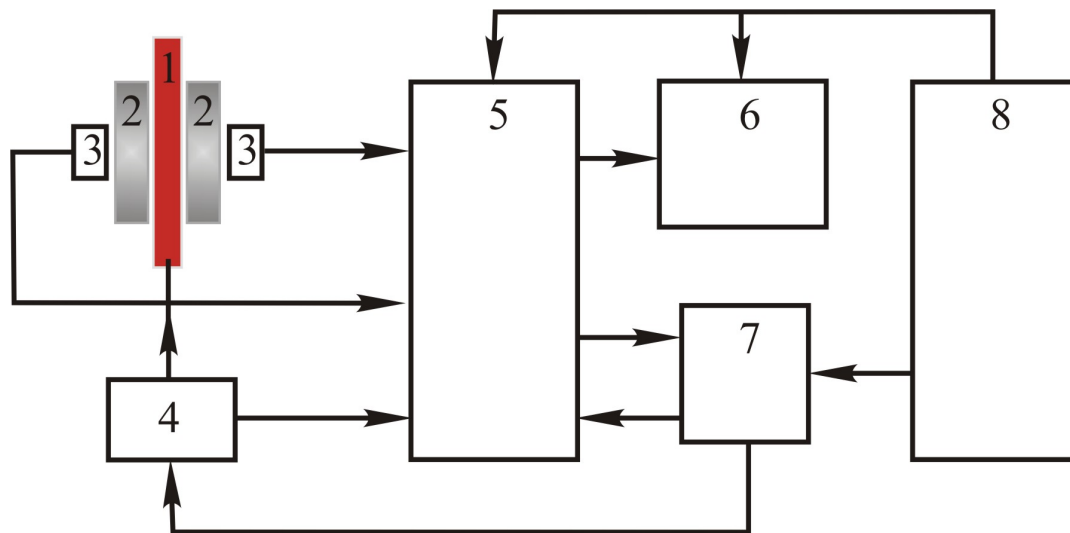


Рисунок 8.2 – Структурная схема прибора ДонНТУ для определения тепловых свойств горных пород: 1 – нагреватель, 2 – образец породы, 3 – датчик тепла, 4 – блок управления током нагревателя, 5 – процессор, 6 – дисплей, 7 – вторичный источник питания, 8 – первичный источник питания

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 на 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 объему породы, разрушенной при воздействии на неё 1 Дж тепла.

$$\Pi_{\text{ТБ}} = \frac{\alpha E}{c_r \sigma_p (1 - 2\nu)} \quad (8.7)$$

Для горных пород вообще $\Pi_{\text{ТБ}} = 2 \cdot 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$. Чем меньше величина $\Pi_{\text{ТБ}}$, тем хуже порода поддается термобурению.

Большое значение имеет знание тепловых свойств горных пород в расчетах *тепловых режимов шахт*. Например, установлено, что коэффициент теплопередачи, характеризующий процесс передачи тепла из горного массива в горную выработку может быть рассчитан для незакрепленной выработки по формуле

$$K = 2\varepsilon_{\text{ш}} G^{0,8} \Pi^{0,2} / S, \quad (8.8)$$

где $\varepsilon_{\text{ш}} = 1 \div 3$ – коэффициент, учитывающий шероховатости породного обнажения;

G – расход воздуха в выработке;

Π , – периметр выработки;

S , – площадь поперечного сечения выработки.

Для закрепленной выработки

$$K' = \frac{1}{(1/K + \delta_k / \lambda_k)}, \quad (8.9)$$

где δ_k – толщина крепи;

λ_k – коэффициент теплопроводности крепи.

Глубин 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 объема руды зависит от температуры плавления серы ($T_c = 119 \text{ }^\circ\text{C}$), удельной теплоты плавления серы ($L \approx 49 \text{ кДж/кг}$), удельной теплоемкости серы ($c_c = 0,67 \div 1,86 \text{ кДж/кг град}$) и рассчитывается по формуле

$$Q = L\gamma_c + c_c\gamma_c(T_c - T_0), \quad (8.11)$$

где γ_c – объемный вес серы;

T_0 – температура массива.

При *подземной газификации* угля для создание 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.

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 нее 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 решетки минералов. Удаление такой воды приводит к разрушению минерала, превращению его в другое - безводное соединение.

Если вода в кристаллической решетке 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° С.

Вода, образующаяся при нагреве не входящих в кристаллическую решетку гидроксильных ионов (OH^- и 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° С.

Наличие в породе химически связанной воды проявляется только при ее нагревании. Она обуславливает изменение свойств породы при высоких температурах. Благодаря нарушению кристаллической решетки 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 твердыми частицами породы, обволакивая их в виде пленки. Ее количество зависит от смачиваемости пород.

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

Смачиваемость пород зависит от их *адсорбционной* способности, т.е. способности концентрировать (адсорбировать) на своей поверхности молекулы жидкости за счет 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 решеткой – монтмориллонитов), а также с увеличением удельной поверхности твердой 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/м³), низкую температуру замерзания (-78°C), малые значения теплоемкости, 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 влагоемкости. Последняя зависит от среднего размера поровых каналов, перпендикулярных к зеркалу грунтовых вод в изучаемом объеме.

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 пока-

зателями максимальной гигроскопичности и максимальной молекулярной влагоемкости.

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 пленочная *влагоемкость*, 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 счет наличия в породе слабо связанной пленочной воды $w_m > w_g$, отличием которой от физически (прочно) связанной воды является способность передвигаться под действием молекулярных сил.

Для кварцевых частиц размером $0,1 \div 0,05$ мм w_m составляет 0,02%, размером менее 0,001мм – 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 влагоемкостью (массовой и объемной).

Массовая полная влагоемкость

$$w_n = \frac{m_n - m_c}{m_c} \quad (9.2)$$

объемная полная влагоемкость

$$w_{n.ob} = \frac{V_{ж}}{V}, \quad (9.3)$$

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.

Объемная влагоемкость связана с массовой посредством следующей формулы

$$w_{н.об} = w_n \cdot \frac{\rho_{ж}}{\rho}, \quad (9.4)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность воды;

ρ – объемная масса породы.

По величине объемная полная влагоемкость примерно равна пористости породы. Если поры в породах не имеют свободного сообщения друг с другом, то в них может остаться некоторое количество заземленных газов или воздуха даже при полном насыщении пород водой. Тогда $w_{н.об} < P$.

Иногда вода способна проникнуть между пакетами кристаллических решеток некоторых минералов (монтмориллонит, вермикулит, галлуазит). Тогда наблюдается $w_{н.об} > P$.

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 $w_{н.об}$, а w_n пористостью P , то коэффициент водонасыщения будет характеризовать степень максимально возможного заполнения порового пространства водой.

Извлечь всю воду из увлажненной породы механическими средствами невозможно. При любом механическом воздействии в породе остается физически связанная вода. Весьма трудно отдать 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* ξ

$$\xi = w_n - w_m \quad (9.6)$$

Таким образом, чем больше молекулярная влагоемкость 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 нефтеводогазонасыщенных породах сумма объемов нефти V_n , газа V_g и воды V_v равна объему порового пространства пород V_p , следовательно

$$\frac{V_n}{V_p} + \frac{V_g}{V_p} + \frac{V_v}{V_p} = 1 \quad (9.7)$$

Отношения V_n/V_p , V_g/V_p , V_v/V_p называются относительными коэффициентами соответственно нефтенасыщения k_n газонасыщения k_g и водонасыщения k_v .

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* $k_{пр}$, выводимым из уравнения Дарси, согласно которому количество жидкости Q , прошедшей через образец породы, выражается следующим образом

$$Q = \frac{\Delta P S t}{\Delta l \eta} \cdot k_{пр}, \quad (9.8)$$

где S – площадь поперечного сечения образца, m^2 ;

t – время фильтрации, с;

ΔP – перепад давлений на пути фильтрации Δl ; Па;

η – вязкость жидкости, Па · с.

Из формулы (9.8) имеем

$$k_{np} = \frac{Q\Delta l}{S\Delta P t} \cdot \eta, \quad (9.9)$$

Размерность коэффициента проницаемости – м². Практической единицей измерения проницаемости является дарси (Д) – величина проницаемости, присущая образцу породы площадью 1 см², длиной 1 см, через который при давлении $9,8 \cdot 10^4$ Па проходит в 1 с 1 см³ жидкости вязкостью 10^{-3} Па · с. При этом 1Д = $1,02 \cdot 10^{-12}$ м².

В практике горного производства широкое распространение получил другой параметр – *коэффициент фильтрации* k_{ϕ} . Практически он представляет собой скорость фильтрации газа или жидкости через породы

$$k_{\phi} = \frac{Q}{tS}. \quad (9.10)$$

Коэффициент фильтрации k_{ϕ} не учитывает влияние напора пластовых вод и их вязкости на изменение количества фильтрующейся воды. Сравнение k_{ϕ} 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 ($k_{\phi} < 0,1$ м/сут), слабопроницаемые ($0,1 \leq k_{\phi} \leq 10$), среднепроницаемые ($10 \leq k_{\phi} \leq 500$) и легкопроницаемые ($k_{\phi} > 1000$ м/сут).

Коэффициент трещинной проницаемости $k_{np.t}$ может быть рассчитан по формуле

$$k_{np.t} = 8,45 \cdot 10^{-4} \cdot b^2 \cdot P_t, \quad (9.11)$$

где b – величина раскрытия трещин, м;

P_m – трещинная пористость. Так как раскрытие трещин обычно бывает порядка $(14 \div 15) \cdot 10^{-6}$ м, то $k_{np.t} = 1,66 \cdot 10^{-13} P_t$.

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 натурных условиях. Как правило, k_{ϕ} , определенный на образце в лабораторных условиях, может на несколько порядков отличаться от действительного коэффициента k_{ϕ} массива, поэтому чаще всего для расчетов используют величину k_{ϕ} , установленную в полевых условиях путем опытной откачки воды из какой-либо центральной скважины, около которой пробурены наблюдательные скважины.

При этом для безнапорных вод

$$k_{\phi} = \frac{2A}{2H - S_1 - S_2}, \quad (9.12)$$

для напорных вод

$$k_{\phi} = \frac{A}{h}, \quad (9.13)$$

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 объему V_0

$$k_n = \frac{V_n}{V_0} \geq 1 \quad (9.15)$$

Набухание происходит в результате проникновения воды между пакетами кристаллических решеток минералов. Набухание горных пород отрицательно сказывается как в подземных, так и в открытых горных выработках: оно ведет 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 твердости*. 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 η^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 путем 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 твердое. 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 °С. Влагоемкость горной породы определяют так: образец помещают в сушильный шкаф и высушивают при температуре 100-110 °С,

после чего взвешивают. Затем в автоклаве под вакуумом его насыщают водой и опять взвешивают. По разности масс сухого и насыщенного водой образца определяют влагоемкость 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, погружных, 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 расчетах совершенно необходимо. Расчеты по осушению месторождений и сооружению водоотлива, по устойчивости бортов карьера и откосов отвала основываются на естественной влажности пород, их коэффициентах фильтрации, водоотдачи, влагоемкости. Большая молекулярная влагоемкость 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 газовой выделением 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 добывания. 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, влагоемкости, 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, ионосорбционной 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. Перечислите виды воды в горных породах?
2. Перечислите параметры, характеризующие физически связанную воду?
3. Дайте определение естественной влажности горной породы?

4. В чем проявляется статическое и динамическое воздействие воды на горные породы?

5. Где применяют умение гидравлических свойств в практике горного дела?

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 (CO_2), оксид углерода (CO), метан (CH_4), сероводород (H_2S);
- воздушные: азот (N_2), кислород (O_2);
- продукты распада радиоактивных минералов: гелий (He), радон (Rn), торон (Tn), аргон (Ar);
- техногенные, порожденные 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 распространенные: аммиак (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 определен-

ных условиях, газодинамические явления (ГДЯ): интенсивное отделение от массива измельченного угля или породы, сопровождающееся значительным выделением газа. Наиболее распространенным видом ГДЯ являются выбросы: газа, угля и газа, породы и газа, угля, породы и газа. Первый выброс произошел 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 CO₂ (CO) и H₂S известны случаи отравления людей газами. Воздух в действующих подземных выработках не должен содержать вредных газов больше предельно допустимых концентраций, указанных в таблице 9.1

Таблица 10.1 – Допустимые концентрации газов

Вредные газы	Предельно допустимые концентрации газов в действующих выработках шахт	
	% по объему	мг/м ³
Оксид углерода (CO)	0,00170	20
Оксиды азота (в пересчете на NO ₂)	0,00025	5
Диоксид азота (NO ₂)	0,00010	2
Сернистый ангидрит (SO ₂)	0,00038	10
Сероводород (H ₂ S)	0,00071	10

Ведение горных работ в горных массивах, зараженных 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 горняка 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 $5 \text{ м}^3/\text{т.с.д.}$; II категория – $5 \div 10 \text{ м}^3/\text{т.с.д.}$; III категория – $10 \div 15 \text{ м}^3/\text{т.с.д.}$; сверхкатегорные – более $15 \text{ м}^3/\text{т.с.д.}$

Газы в толще горных пород распределены неравномерно, фильтрационные свойства массивов также неоднородны, это сказывается на газообильности угольных шахт (таблица 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 расчетах наиболее часто используют следующие газодинамические характеристики горных пород:

- газоносность, $q, x, \text{ м}^3/\text{т}$
- коэффициент газоотдачи, $k_{\text{отд.}}, \%$
- газоемкость, $\omega, \text{ см}^3/\text{г}$
- газопроницаемость, $k_{\text{пр.}}, \text{ Д.}$

Газоносность характеризуется количеством газа, содержащемся в единице массы угля или породы ($\text{м}^3/\text{т}$).

Различают газоносность:

$x_{\text{п}}$ – потенциальную (реально возможная газоносность породы в определенных термодинамических условиях);

x – природную (газоносность пород в естественных условиях);

x_0 – остаточную (остаточная после частичной искусственной или естественной дегазации пород);

q – относительную, на тонну суточной добычи;

Природная газоносность углей составляет $20 \div 40 \text{ м}^3/\text{т}$, в отдельных случаях – $70 \div 100 \text{ м}^3/\text{т}$. Остаточная газоносность составляет $5 \div 10 \text{ м}^3/\text{т}$.

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:

$$x_{\text{п}} = \frac{a \cdot b \cdot p}{1 + bp} + \frac{pT \cdot P}{T_0 k} \cdot \frac{1}{1 + 0,31W}, \quad (10.1)$$

где a, b – константы сорбции газа данным видом породы или угля, определяемые в лабораторных условиях;

T – температура, К;

$T_0 = 273^{\circ}\text{K}$;

P – пористость, м³/г;

k – коэффициент сжимаемости газа;

W – влажность, %.

Коэффициент газоотдачи характеризует способность породы отдавать часть содержащегося в ней газа после обнажения

$$K_{\text{отд}} = \frac{X - X_0}{X} \cdot 100\% \quad (10.2)$$

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 подается около 1500÷2000 м³/мин воздуха.

Газоёмкость- ω , см³/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 счет физических и химических связей молекулы газа у минерального скелета пород.

Различают:

абсорбцию – поглощение газа за счет его диффузии в массу сорбита, приводящее к образованию твердого раствора. Этот процесс характеризуется малой скоростью и требует значительного времени для его завершения.

адсорбцию – размещение и уплотнение молекул газа на поверхности твердого тела. Как чисто поверхностное явление процесс характеризуется весьма большой скоростью (на гладкой поверхности процесс за-

вершается практически мгновенно). Для пористых пород скорость зависит от темпов диффузии газа через узкие поры.

хемсорбцию – химическое взаимодействие газов с твердыми 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 (рисунок 10.1), при увеличении температуры среды – сорбционная способность снижается (рисунок 10.2). Это объясняется увеличением внутренней энергии молекул нагреваемого газа, что способствует преодолению ими сорбционных сил.

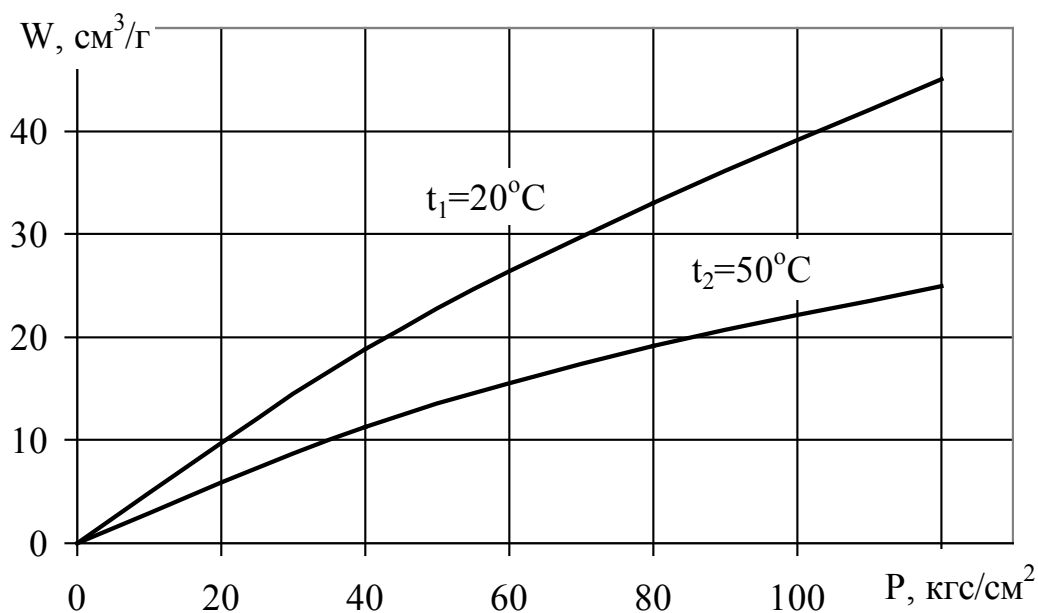


Рисунок 10.1 – Изотермы адсорбции метана в угле

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 $S_{\text{пор}}=150\div 200 \text{ м}^2/\text{г}$. В шахтных условиях около 55÷90 % пор заполнены в угле метаном.

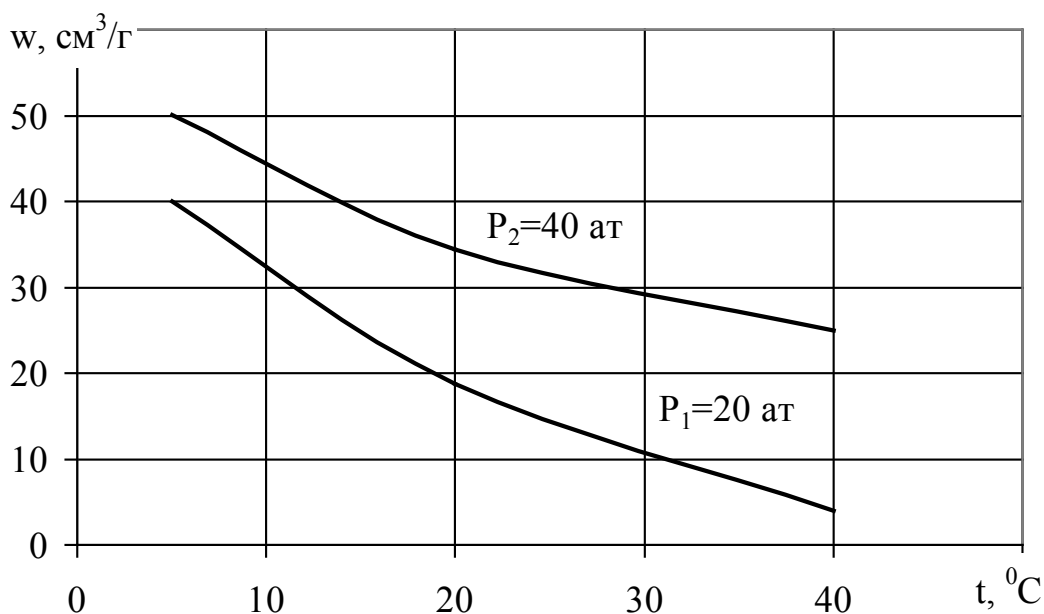


Рисунок 10.2 – Изобары адсорбции метана в угле

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, $k_{пр}$, выводится из уравнения Дарси (см. предыдущий раздел)

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 напряженно-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 (рисунок 10.3).

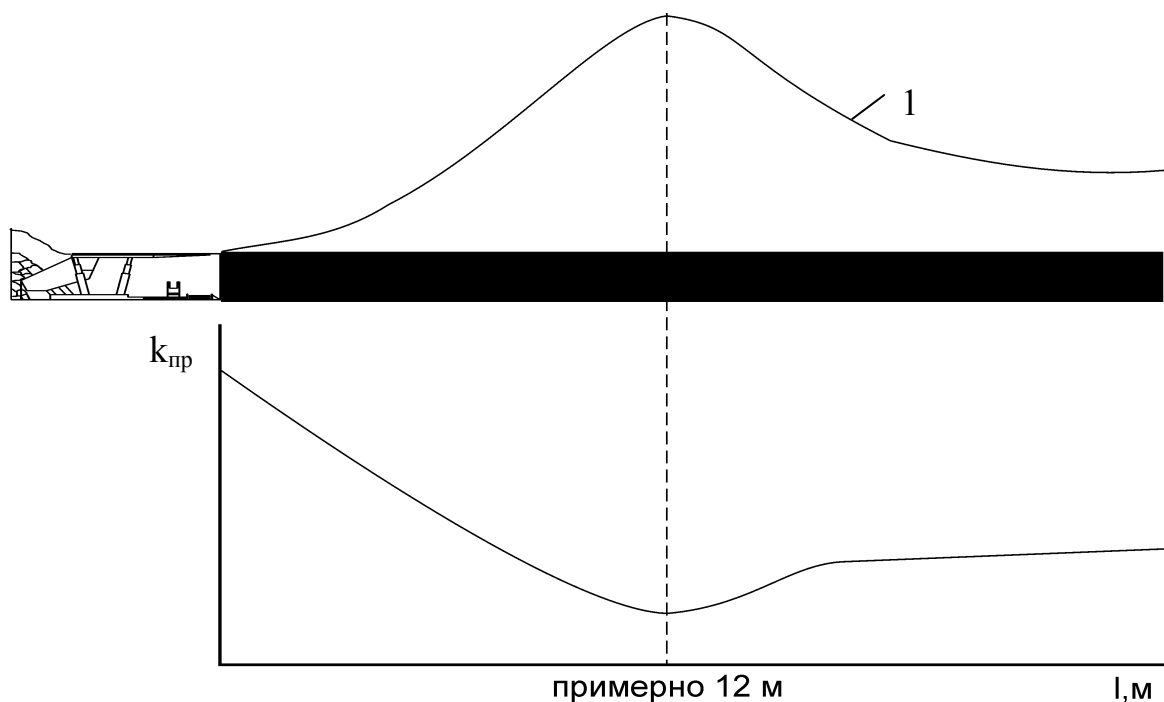


Рисунок 10.3 – Характер изменения газопроницаемости угольного пласта вблизи очистного забоя: 1 – эпюра опорного давления

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, слоев 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 газодина-

мических явлений и эндогенных пожаров.

Контрольные вопросы

1. Какова природа происхождения содержащихся в горном массиве газов?
2. Как влияют содержащиеся в угольных пластах и породных слоях газы на процессы горного производства?
3. Что называют газоемкостью горных пород, ее виды?
4. Какими физико-химическими процессами обусловлена газоемкость горных пород?
4. Что называют газопроницаемостью горных пород, коэффициент газопроницаемости?

11 Электромагнитные свойства пород

Электромагнитные свойства горных пород – это свойства, характеризующие поведение горных пород в электрическом и магнитном поле.

11.1 Базовые параметры электромагнитных свойств горных пород и методы их определения.

Удельное электрическое сопротивление ($\rho_э$), Ом м

Это величина, обратная силе тока, проходящего через 1 м^2 площади образца породы при напряженности электрического поля 1 В/м .

По величине $\rho_э$ породы делятся на:

- проводники $\rho_э = 10^{-3} \div 10^3 \text{ Ом м}$
- полупроводники $\rho_э = 10^{-3} \div 10^{12} \text{ Ом м}$
- диэлектрики $\rho_э = 10^{12} \div 10^{20} \text{ Ом м}$.

Породы, слагающие угольную толщу Донбасса имеют следующую величину $\rho_э$:

- глинистый сланец — $10^2 \div 10^5 \text{ Ом м}$
- известняк — $10^2 \div 10^5 \text{ Ом м}$
- уголь — $10^3 \div 10^5 \text{ Ом м}$
- песчаник — $10 \div 10^8 \text{ Ом м}$

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 неуравновешенные 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 так же от температуры и влажности.

Относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) — это коэффициент, показывающий во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля при нахождении в нем породы

$$\epsilon_r = \frac{E_{э0}}{E_0}, \quad (11.2)$$

где $E_{э0}$ – напряженность электрического поля в вакууме, В/м;
 E_0 – суммарная напряженность электрического поля в породе, В/м.

Таблица 11.1 – Показатели относительной диэлектрической проницаемости

Порода, вещество	Относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ_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 (см. рисунок 11.1), слоистость; пористость; трещиноватость; влажность; температура.

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 $f \leq 10^7 \div 10^{10}$ Гц – в породе возникает дипольная, ионная и электронная поляризация, т.е. при возрастании f от 0 до ∞ диэлектрическая проницаемость уменьшается

Для оценки магнитных свойств горных пород используют показатель *относительной магнитной проницаемости* (μ) – это коэффициент, показывающий во сколько раз магнитная индукция поля в данном магнетике изменится при помещении образца в магнитном поле в вакууме.

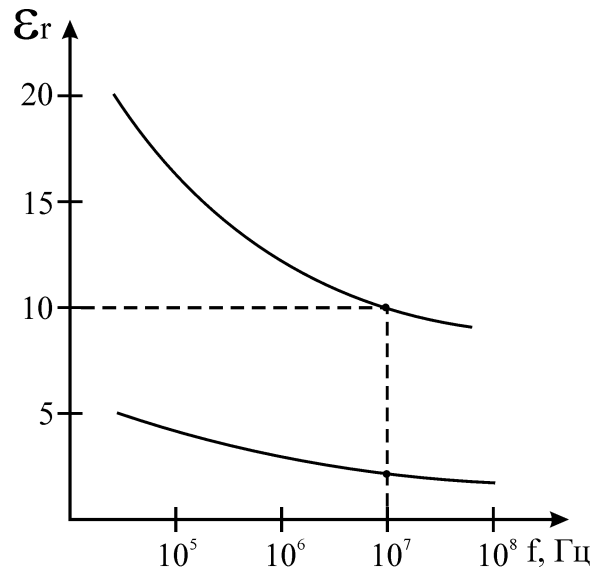


Рисунок 11.1 – Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от частоты электрического поля

Магнитное поле характеризуется двумя показателями: напряженность H и индукцией B . Напряженность 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 μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды.

Магнитная индукция B – векторная величина, выражающая интенсивность магнитного поля. Между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля в веществе существует прямо пропорциональная зависимость

$$B = \mu_a H \quad (11.4)$$

В этой зависимости коэффициент пропорциональности μ_a также равен абсолютной магнитной проницаемости вещества. В вакууме

$$\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м}$$

Эта константа (μ_0) называется магнитной постоянной.
Относительная магнитная проницаемость, равна отношению

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} \quad (11.5)$$

Произведение элементарного тока i на площадь магнитного диполя ΔS 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 объемы обладают магнитными моментами при отсутствии внешнего поля, называются ферромагнитными (см. таблицу 11.2).

Таблица 11.2 – Некоторые диа-, пара- и ферромагнитные минералы

Диамагнитные $\mu = 0,999836 \div 1,0$	Парамагнитные $\mu = 1,0004$	Ферромагнитные $\mu = 1,0064 \div 6,5$
Вода	Воздух	Магнетит
Гипс	Доломит	Пирротин
Графит	Мусковит	Франклинит
Кальций	Пироскен	Якобит
Кварц	Сидерит	Лимонит
Уголь	Хромит	γ -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 определенной конфигурации. Таким образом, можно создать направленное электрическое поле или концентрировать его на определенных 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 шпуры, 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 мерзлой.

Слой, по которому протекает ток, нагревается и передает 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 путем 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 1700-1800⁰С, 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 счет диэлектрических потерь независимо от его проницаемости, трещиноватости и теплопроводности. Скорость нагрева, таким образом, определяется только электрическими свойствами и теплоемкостью нагреваемого объема.

Для **разведки месторождений** полезных ископаемых широко применяются электромагнитные методы

Магнитный метод. Суть метода заключается в измерении величины напряженности магнитного поля. Напряженность магнитного поля в каждой точке поверхности Земли зависит от намагниченности находящихся под этой точкой геологических объектов. Этим методом можно исследовать породы, залегающие на глубине $10 \div 20$ м. По результатам этой съемки можно судить о геолого-петрографических особенностях массива, трещиноватости пород, разломах и т.д.

Электрические свойства пород используются в *методах электро-разведки*. 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 скважиной 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 $10 \div 20$ раз и более. В результате залежь заряжается и создает вокруг себя электрическое поле. Залежь оконтуривают эквипотенциальные линии. Это дает 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 создает в породах вокруг шпура электромагнитное поле постоянной частоты 1МГц; величина тока в приемной 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.

Контрольные вопросы

1. Какой смысл удельного электрического сопротивления горной породы?
2. Какой смысл относительной диэлектрической проницаемости горной породы?
3. Какой смысл относительной магнитной проницаемости горной породы?
4. Можно ли разрушить горную породу электромагнитным полем?
5. Как используют электромагнитные свойства горных пород при разведке месторождений?

12 РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД

12.1 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 высокорadioактивных 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 α - и β - частиц, а также γ - 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:

- слаборadioактивные – главные породообразующие минералы (кварц, плагиоклаз, нефелин, калиевые полевые шпаты);
- повышенно-radioактивные – главные акцессорные и рудные минералы (апатит, флюорит, магнетит, ильменит и др.);
- высокорadioактивные – 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 поро-

дах 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 счет 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 Θ и длиной волны $\lambda\gamma$, существует следующая зависимость:

$$\Theta = \lambda Z \gamma \quad (12.1)$$

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, радиометрические методы позволяют обнаруживать очень незначительные количества радиоактивных веществ.

Абсолютные измерения активности альфа и бета излучений проводятся *методом 4π-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, приведенная к относительному содержанию урана):

$$\Gamma_{\text{акт}} = (\Pi_{\text{п}} \cdot T_{\text{э}} \cdot A) / (\Pi_{\text{э}} \cdot T_{\text{п}}), \quad (12.2)$$

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.

12.2 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 эманационный каротаж*.

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 называется радиоактивностью горных пород?
2. Как классифицируются минералы по степени их радиоактивности?
3. Какие параметры, характеризующие радиационные свойства пород Вам известны?
4. Какие виды излучения имеют место при радиоактивном распаде?
5. Какие методы применяются для определения радиоактивности горных пород?
6. Что Вы знаете об относительных методах измерения радиоактивности горных пород?
7. Что такое радиоактивность, приведенная к относительному содержанию урана?
8. Какие методы применяют при разведке месторождений полезных ископаемых?
9. Как используются радиационные свойства пород в практике горного дела?

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Алексеенко С.Ф., Мележик В.П. Физика горных пород. Горное давление. Лабораторный практикум: Учеб. пособие. – К., Вища школа, 1990. – 183 с.
2. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механические процессы в породных массивах: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. 272 с.
3. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – М.: Недра, 1984. –415с.
4. Барон Л.И. Горнотехнологическое породоведение. – М.: Наука, 1977. – 324 с.
5. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести.-М.: Физматгиз, 1959.-610с.
6. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Том 1. –М.: Физматгиз, 1962.-628с.
7. Бреббия К., Теллес Ж., Врuebas Л. Методы граничных элементов.-М.: Мир, 1987.-524с.
8. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1994. – 382 с.
9. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учебное пособие для вузов. – М.: Недра, 1989. 270 с.
10. Витке В. Механика скальных пород: Пер. с нем. – М.: Недра, 1990. – 439 с.
11. Врублевский В.И. Определение механических свойств горных пород в производственных условиях. Киев, Гос.изд.тех.лит. УССР, 1961. – 91 с.
12. Глушко В.Т., Цай Т.Н., Ваганов И.И. Охрана выработок глубоких шахт. – М.: Недра, 1975. – 200 с.
13. Горная энциклопедия (в 5-ти томах) /Гл.ред.Е.А.Козловский. – М.: Сов.энциклопедия. 1984 – 1991.
14. Дашко Р.Э. Механика горных пород: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987. – 264 с.
15. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термодинамические процессы в горных породах: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 360 с.
16. Зборщик М.П., Назимко В.В. Охрана выработок глубоких шахт в зонах разгрузки. – К.: Техника, 1991. – 248 с.
17. Зборщик М.П. Охрана выработок глубоких шахт в выработанном пространстве. К.: Техника, 1978. – 176 с.
18. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике.-М.: Мир, 1975.-511с.

19. Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. Свойства горных пород и методы их определения. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
20. Каретников В.Н., Клейменов В.Б., Нуждихин А.Г. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок. Справочник. – М.: Недра, 1989. – 571 с.
21. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, гл.ред.физ.-матем.лит., 1974. – 312 с.
22. Кацауров И.Н. Механика горных пород. – М.: Недра, 1981. – 166 с.
23. Кошелев К.В., Петренко Ю.А., Новиков А.О. Охрана и ремонт горных выработок /Под ред. К.В.Кошелева – М.: Недра, 1990 – 218 с.
24. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела.-М.: Мир, 1987. –328с.
25. Лейбензон Л.С. Курс теории упругости. -М.: Гостехиздат. 1947.-324с.
26. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: Учебное пособие для вузов. – М., Недра, 1990. – 328 с.
27. Метод конечных элементов в механике твердых тел.-К.: Вища школа, 1982.-480с.
28. Моделирование проявлений горного давления /Г.Н.Кузнецов, М.Н.Будько, Ю.И.Васильев и др. Л., Недра, 1968. 279 с.
29. Недвига С.Н., Недашковский И.В. Гидроразрыв как способ определения напряжений в угольных пластах. – В кн.: Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск, 1970, с.210-211.
30. Нифонтов Б.И., Корнев Г.Н., Суходрев В.М. Основы электрического моделирования действия взрыва и удара. М., Недра, 1971. 159 с.
31. Определение напряжений в массивах скальных пород. /И.А.Турчанинов, В.И.Панин, В.С.Кононенко и др. В кн.: Диагностика напряженного состояния породных массивов. Новосибирск, 1980. С.42-48.
32. Павловский Н.Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения. Пг., Литогр. Изд. Науч. – мелиорац. Ин-та, 1922. 752 с.
33. Поддержание сопряжений горных выработок /К.В.Кошелев, Н.В. Игнатович, В.И.Полтавец. – К.: Техника, 1991. – 176 с.
34. Прогрессивные паспорта крепления, охрана и поддержания подготовительных выработок при бесцеликовой технологии отработки угольных пластов. – Л.: ВНИМИ, 1985. – 112 с.
35. Проскураков Н.М. Управление состоянием массива горных пород: Учеб. Для узов. М.: Недра, 1991. – 386 с.
36. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – Учеб.пособие для вузов. – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1988. – 712 с.

37. Распределение напряжений в породных массивах /Г.А.Крупенников, Н.А.Филатов, Б.З.Амусин и др. – М.: Недра, 1972. – 144 с.
38. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов. Справочник.-М.: Машиностроение, 1989.-520с.
39. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1984. – 359 с.
40. Сонин Н.В. Изучение и обобщение физико-механических свойств вмещающих пород угленосного карбона Луганской области по данным разведочных работ. // Изучение физико-механических свойств горных пород в Донбассе». Сб. Тезисы докладов Республиканского научно-технического совещания «Состояние работ по изучению физико-механических свойств горных пород в Донецком бассейне в процессе проведения геологоразведочных работ с целью прогнозирования устойчивости горных пород». Донецк: МУП УССР. 1969.
41. Справочник взрывника. Под общ. Ред. В.Н.Кутузова. – М.: Недра, 1988. – 511 с.
42. Справочник по теории упругости. –К.: Будивельник, 1971, 418с.
43. Галобр Ж. Механика горных пород. – М., Гос.науч.-техн.изд.лит. по горн.делу, 1966. – 430 с.
44. Тарасов Б.Г., Дырдин В.В., Иванов В.В., Геоэлектрический контроль состояния массивов. – М.: Недра, 1983, 216 с.
45. Тимошенко С.П. Теория упругости. – М.: ОНТИ, 1937.-404с.
46. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1989. – 488 с.
47. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. – Л.: ВНИМИ, 1986. – 222 с.
48. Феодосьев В.М. Соппротивление материалов: Учебник для вузов. – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1986. – 512 с.
49. Черняк И.Л., Ярунин С.А. Управление состоянием массива горных пород: Учеб. Для вузов. – М.: Недра, 1995. – 395 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 4

ВВЕДЕНИЕ 5

Раздел 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ 6

1 ПРЕДМЕТ И МЕТОД МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД	6
1.1 Механика горных пород в системе горных наук	6
1.2 Объект и метод механики горных пород	7
1.3 Задачи механики горных пород и ее практическое значение.....	7
Контрольные вопросы	8
2 ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД.....	9
2.1 Минералы, горные породы, массив горных пород, образец горной породы.....	9
2.2 Классификация физико-технических свойств пород.....	10
2.3 Отбор, хранение и подготовка к испытаниям образцов горных пород	11
2.4 Обработка результатов определения свойств пород	13
Контрольные вопросы	16

Раздел 2 ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД 17

3 ПЛОТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД.....	17
3.1 Плотностные свойства скальных и связных пород	17
3.2 Плотностные свойства рыхлых и разрыхленных горных пород.....	20
Контрольные вопросы	24
4 ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД.....	25
4.1 Механические напряжения в горных породах.....	25
4.1.1 Основные представления о напряженном состоянии горных пород.....	25
4.2.1 Понятие о напряжениях и деформациях.....	26
4.2 Теории прочности пород	43
4.3 Стандартные методы определения прочностных параметров скальных пород.....	59
4.4.1 Основные показатели механических свойств горных пород.....	59
4.4.2 Определение предела прочности при одноосном сжатии.....	62
4.4.3 Метод определения предела прочности при одноосном растяжении	65
4.4.4 Метод определения предела прочности при срезе.....	66
4.4.5 Метод определения предела прочности при изгибе.....	68
4.4.6 Метод определения предела прочности при объемном сжатии	69
4.4.7 Метод комплексного определения пределов прочности при многократном раскалывании и сжатии.....	70
4.4.8 Методы определения механических свойств сжатием образцов встречными сферическими инденторами.....	72
4.4.9 Методы определения прочностных параметров скальных пород	74
4.4.1 Методы определения показателей прочности на образцах неправильной формы ..	74
4.4.2 Метод удара ручным и пружинным шариковыми	78
молотками.....	78
4.4.3 Метод вдавливания стального шарика с помощью.....	80
пружинного пистолета	80
4.5 Определение прочностных параметров рыхлых и разрыхленных пород.....	80
4.5.1 Метод определения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии	81
4.5.2 Испытание глинистых пород при растяжении	84

4.5.3	Метод испытания пород на срез.....	85
4.5.4	Определение прочности горных пород в приборах трехосного сжатия.....	89
4.5.5	Определение угла внутреннего трения песков по углу естественного откоса.....	91
4.6	Пределы изменения прочностных параметров пород угольных шахт Донбасса.....	92
	Контрольные вопросы	93
5	ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД.....	95
5.1	Деформации в горных породах	95
5.2	Упругие свойства горных пород	97
5.3	Пластические и реологические свойства горных пород.....	99
	Контрольные вопросы	105
6	АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД.....	107
6.1	Акустические волны в породах	107
6.2	Параметры акустических свойств горных пород.....	108
6.3	Определение акустических параметров пород в лабораторных условиях	111
6.4	Использования акустических свойств горных пород в горном деле	113
	Контрольные вопросы	116
7	СПЕЦИАЛЬНЫЕ ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРНЫХ ПОРОД.....	117
7.1	Крепость	117
7.2	Контактная прочность.....	120
7.3	Абразивность.....	121
7.4	Дробимость	123
7.5	Сопротивляемость резанию.....	124
7.6	Буримость.....	125
7.7	Взрываемость	127
7.8	Липкость и сопротивление копанию рыхлых и разрыхленных пород	128
7.9	Использование горно-технологических свойств в горной практике	129
	Контрольные вопросы	130
8	ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД.....	132
8.1	Общие сведения о температурном поле в горных породах.....	132
8.2	Основные тепловые параметры горных пород	132
8.3	Определение параметров термодинамических свойств пород в лабораторных условиях.....	135
8.4	Использование тепловых свойств и явлений в горном деле	136
	Контрольные вопросы	138
9	ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД.....	139
9.1	Общие сведения о воде в горных породах	139
9.2	Параметры гидравлических свойств горных пород	140
9.3	Воздействие жидкости на горные породы	146
9.4	Определение гидравлических параметров горных пород	147
9.5	Использование гидравлических свойств горных пород для дегазации угольных пластов, ослабления и упрочнения пород	148
	Контрольные вопросы	149
10	ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД.....	151
	Контрольные вопросы	158
11	ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД	159
11.1	Базовые параметры электромагнитных свойств горных пород и методы их определения.	159
11.2	Использование электрических магнитных свойств горных пород для горного производства	162
	Контрольные вопросы	165
12	РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД.....	166

12.1 Базовые параметры радиационных свойств горных пород и методы их определения .	166
12.2 Использование радиационных свойств пород в горной практике	168
Контрольные вопросы	169

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....	170
----------------------	-----

Навчальний посібник

ГРЕБЬОНКІН Сергій Семенович
ГАВРИШ Микола Миколайович

ДЕГЛІН Борис Моїсейович
ЗБОРЩИК Михайло Павлович
ЗІНЧЕНКО Сергій Анатольйович
КОВАЛЬЧУК Інна Сергійовна
КОСТЕНКО Віктор Клементійович
НАЗИМКО Віктор Вікторович
НОВІКОВ Олександр Олегович
ПЕТРЕНКО Юрій Анатольйович
ПЛЮГІН Віталій Іванович
ПОДКОПАЄВ Сергій Вікторович
САМОЙЛОВ Вячеслав Лаврентійович

МЕХАНІКА ГІРСЬКИХ ПОРІД

Здано до набору

Формат

Ум. друк. арк.

Підп. до друку

Папір

Обл. вид. Арк.

Друк

Тираж 300 прим.

Надруковано: РВА, ДонНТУ, 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58,
9-й уч. корп. Тел. (0622) 90-36-31