



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра строительства подземных сооружений, шахт  
и разработки месторождений полезных ископаемых

Андрей Валерьевич Дементьев

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ГЕОМЕХАНИКА»**

**Электронное учебное пособие**

Кемерово 2016

© КузГТУ, 2016  
© А. В. Дементьев, 2016

[Вперед→](#)

УДК 622.02(075.8)(086.76)

Рецензенты Копытов А. И. – доктор технических наук, профессор кафедры строительства подземных сооружений, шахт и разработки полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»  
Войтов М. Д. – кандидат технических наук, профессор кафедры строительства подземных сооружений, шахт и разработки полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Дементьев Андрей Валерьевич

Конспект лекций по дисциплине «Геомеханика»: электронное учебное пособие для студентов направления подготовки 21.05.04 «Горное дело», 21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства» / А. В. Дементьев; КузГТУ. – Кемерово, 2016. – 1 электрон. опт. диск (4,33 Мб)

Даны основные понятия и представления о геомеханических процессах, происходящих в массивах горных пород при выемке полезных ископаемых подземным и открытым способом. Рассмотрены механические свойства и напряженное деформированное состояние массивов горных пород в естественном залегании, и их изменение под влиянием горных работ. Описаны механизмы, методы прогноза и способы предупреждения газодинамических явлений (горные удары, внезапные выбросы угля, породы и газа). Приведены технические и геотехнологические решения, обеспечивающие управление геомеханическими процессами горного производства.

### Текстовое (символьное) электронное издание

Минимальные системные требования: Частота процессора не менее 1,0 ГГц; ОЗУ 512 Мб; 20 Гб HDD; операционная система Windows XP; CD-ROM 4-скоростной; ПО для чтения файлов PDF-формата; SVGA-совместимая видеокарта; мышь.

© КузГТУ, 2016

© А. В. Дементьев, 2016

[Вперед→](#)

Сведения о программном обеспечении, которое использовано для создания электронного издания	MS Word
Сведения о технической подготовке материалов для электронного издания	Редактор      З. М. Савина
Объем издания в единицах измерения объема носителя, занятого цифровой информацией (байт, Кб, Мб)	4,33 мегабайт
Наименование и контактные данные юридического лица, осуществившего запись на материальный носитель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28 Тел./факс: 8(3842) 58-35-84

[Вперед](#) →

Введение.....	7
1 Массив горных пород и его особенности.....	8
2 Механические свойства горных пород и грунтов. Особенности механического состояния породных и грунтовых массивов .....	11
2.1 Понятие и определение механических свойств горных пород. Плотностные свойства горных пород.....	11
2.2 Прочностные свойства горных пород.....	15
2.2.1 Основные факторы, влияющие на прочность горных пород.....	18
2.3 Деформирование и разрушение горных пород.....	20
2.3.1 Деформационные свойства горных пород .....	20
2.3.2 Полная диаграмма деформирования пород. Основные факторы, влияющие на деформационные свойства пород.....	22
2.4 Пластические свойства горных пород.....	25
2.4.1 Основные факторы, влияющие на пластические свойства .....	25
2.5 Реологические свойства горных пород .....	30
2.5.1 Основные факторы, влияющие на реологические свойства .....	30
2.6 Распространение упругих колебаний в породах .....	33
2.7 Акустические свойства горных пород и массивов. Основные факторы, влияющие на акустические свойства горных пород .....	35
3 Состав и строение грунтов. Влияние воды на механическое состояние грунтов .....	40
3.1 Механические свойства грунтов. Основные факторы, влияющие на механические свойства грунтов .....	42
4 Механические модели и начальное напряженное состояние породных и грунтовых массивов .....	46
4.1 Общие понятия о моделях массива горных пород.....	46
4.2 Основные механические модели массива горных пород и краткая их характеристика.....	47
4.2.1 Упругая модель массива .....	47
4.2.2 Пластичная модель массива.....	49
4.2.3 Упругопластическая модель массива .....	49
4.2.4 Реологические модели массива .....	50
5 Механические характеристики грунтов .....	52
5.1 Сопротивление грунтов сдвигу .....	54
6 Естественное напряженное состояние массивов горных пород.....	56
6.1 Тектонические и сейсмические напряжения массива горных пород.....	59
6.2 Напряженное состояние сыпучих горных пород .....	61

7	Механические процессы в массивах пород вокруг подготовительных выработок, проводимых вне зоны влияния очистных работ.....	62
7.1	Методы изучения взаимодействия пород с крепью.....	62
7.2	Напряженно-деформированное состояние массива пород вокруг одиночных выработок .....	64
7.3	Напряженно-деформированное состояние массива пород вокруг вертикальных выработок.....	69
7.4	Механизм движения пород при проведении выработки .....	70
7.5	Перераспределение напряжений в породных массивах вокруг очистных выработок .....	71
8	Деформация и разрушение пород непосредственной и основной кровли пластов .....	73
8.1	Механизм влияния опорного давления на выработку .....	76
8.2	Устойчивость обнажений кровли по угольным пластам.....	79
9	Сдвигение горных пород при подземной разработке месторождений.....	81
9.1	Механизм образования провала на земной поверхности при ведении очистных работ.....	85
9.2	Общая продолжительность процесса сдвигения.....	87
10	Геомеханические процессы при надработке и подработке пластов.....	88
10.1	Общие положения.....	88
10.2	Механические процессы в надрабатываемых пластах и породных толщах .....	90
10.3	Механические процессы в подрабатываемых пластах и породных толщах .....	92
10.4	Напряженно-деформированное состояние пород вокруг взаимовлияющих подготовительных выработок .....	95
11	Формы проявления сдвигения пород при открытой разработке...	97
11.1	Основные способы управления устойчивостью открытых горных выработок .....	99
11.2	Напряженно-деформированное состояние горных пород в бортах и уступах карьеров .....	100
12	Горные удары .....	104
12.1	Общие сведения о горных ударах .....	104
12.2	Природа и механизм горных ударов.....	104
12.3	Классификация горных ударов.....	107
12.4	Прогноз горных ударов .....	109

13	Внезапные выбросы горных пород и газа.....	111
13.1	Условия возникновения внезапных выбросов.....	111
13.2	Энергия внезапных выбросов.....	112
13.3	Классификация выбросов.....	112
13.4	Природа, механизм и баланс энергии внезапных выбросов угля и газа .....	114
13.5	Прогноз внезапных выбросов угля и газа. Классификация .....	116
14	Управление механическими процессами в массивах пород вокруг подготовительных выработок .....	118
14.1	Общие положения.....	118
14.2	Способы повышения устойчивости подготовительных выработок, проводимых и поддерживаемых вне зоны влияния очистных работ.....	119
15	Управление механическими процессами в массивах пород вокруг подготовительных выработок в зоне влияния очистных работ .....	122
15.1	Выработки, охраняемые в массиве и погашаемые за очистным забоем .....	122
15.2	Выработки, охраняемые целиками .....	123
15.3	Способы управления пучением пород почвы подготовительных выработок.....	124
16	Управление геомеханическими процессами в породных массивах при ведении подземных очистных работ .....	126
16.1	Общие сведения .....	126
16.2	Управление кровлей пластов полным обрушением пород в выработанном пространстве .....	126
	Список рекомендуемой литературы .....	129

## ВВЕДЕНИЕ

**Геомеханика** – отрасль горной науки, изучающая напряжения в горных породах, их деформации, условия прочности и устойчивости, а также изменения их состояния и свойств под влиянием внешних механических воздействий, вызываемых ведением горных работ. Геомеханика является одновременно технической и научной дисциплиной.

Геомеханика как отдельная дисциплина горной науки, по своей внутренней логике состоит из двух частей: практической механики горных пород и теоретической механики горных пород. Практическая механика горных пород является базовой частью дисциплины. Установленные в ней общие закономерности протекания геомеханических процессов при выемке полезных ископаемых составляют основу, на базе которой осуществляется выбор конкретной системы разработки и расчет ее конструкции, а также разрабатываются мероприятия по технике безопасности. Только после этого используются приемы теоретической механики горных пород в виде решения аналитических задач и построения различного рода математических моделей, и осуществляется их анализ для проверки правильности конструирования системы разработки и уточнения ее отдельных параметров. Это связано с тем, что прежде, чем описать в аналитическом виде или при помощи моделей какой-либо процесс, происходящем в горном массиве, необходимо широкое и глубокое обсуждение до мельчайших особенностей протекания ожидаемых геомеханических процессов.

Законы геомеханики широко используются при проектировании, строительстве и эксплуатации горных предприятий. Правильное понимание механических процессов, происходящих в массивах скальных и полускальных пород при ведении горных работ, способствует выбору наиболее рациональной системы разработки, установлению эффективных ее параметров, нахождению оптимальных временных режимов работы добычных агрегатов, подвигания забоев очистных и подготовительных выработок и т. п. Механика горных пород в значительной степени, а некоторых случаях полностью, определяет безопасность и экономику горного производства.

Геомеханика изучает процессы, происходящие в недрах, поэтому в ней особое внимание уделяется среде – горным породам, которые являются сложной средой, резко выделяющейся в группе материалов, представляющие твердое тело. Так, в зависимости от

рассматриваемой задачи по виду деформирования одни и те же массивы пород могут рассматриваться как среда упругая, пластичная, вязкая, сыпучая и т. д. Кроме того, в зависимости от масштабов области, затронутой воздействием горных работ, горные породы могут быть представлены как изотропные, анизотропные, квазиизотропные. Это своеобразие механических свойств горных пород определяется рядом текстурных и структурных особенностей горного массива, среди которых наиболее существенную роль играют трещиноватость и слоистость. Практика показала, что свойства пород, полученные в лабораторных условиях при испытаниях небольших образцов, резко отличается от свойств, проявляющихся в массиве, т. е. в местах их естественного залегания. В связи с этим, возникло новое направление в механике горных пород – изучение механических свойств массивов горных пород, которое более достоверно характеризуют показатели пород, используемых в расчетных схемах.

Массивы горных пород до проведения в них выработок находятся в напряженном состоянии, которое определяется действие веса пород залегающей толщи, так и тектоническими процессами. В результате в нетронутом горными работами массиве формируется сложное исходное поле напряжений. Проведение в массиве горных выработок изменяет первоначальное поле напряжений, еще более его усложняет.

Рассмотрение особенностей воздействия сложного напряженно-деформированного состояния массива горных пород на его устойчивость является распространенной задачей механики горных пород. Для этого широко применяют решения, используемые в механике твердого деформируемого тела.

## **1 МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД И ЕГО ОСОБЕННОСТИ**

**Горные породы** – естественные минеральные агрегаты более или менее постоянного состава, сформировавшиеся в результате геологических процессов и залегающие в земной коре в виде самостоятельных литологических разностей.

В геомеханике пользуется понятие **массив горных пород** – часть земной коры, в пределах которой локализуются все механические процессы, обусловленные горными работами.

По характеру связей между твердыми минеральными частицами горные породы разделяют на: твердые (скальные и полус-

кальные), связные (пластичные), раздельнозернистые или рыхлые, сыпучие (песчаные и крупноблочные), текучие.

По геологическим процессам горные породы разделяют три генетические группы: магматические, осадочные и метаморфические. Магматические породы занимают 95 % от общей массы земной коры. На поверхности земли наибольшее распространение имеют осадочные горные породы.

Главными породообразующими минералами являются кварц, полевые шпаты, нефелин, минералы из группы слюд, амфиболов, пироксенов, оливин.

По условиям образования магматические горные породы делятся на глубинные и излившиеся. Отдельно выделяется группа жильных пород.

Осадочные горные породы образуются путем накопления продуктов разрушения магматических и метаморфических пород. Осадочные породы залегают чаще всего в виде пластов.

Метаморфические породы образуются из первичноосадочных и магматических пород под действием температуры давления и климатических веществ (растворов, газов).

Особенность строения горных пород, зависящие от условия образования, выражаются в структурных и текстурных признаках.

Структура оценивается кристаллами и размерами зерен, а также формой и взаимными отношениями составных частей породы.

Текстура характеризует расположение частей составляющих породу.

Магматические породы имеют полнокристаллические структуры (глубина породы); полукристаллические и стекловатые структуры (излившиеся породы).

По величине делятся на крупнозернистые – размер зерен более 5 мм; среднезернистые – 1–5 мм; мелкозернистые – 0,5–1 мм.

Текстура магматических пород – массивная, пятнистая, вкрапленная, полосчатая, линзовидная, прожилковая, сланцевая, брекчиевая, друзовая.

Структуры осадочных пород делятся на обломочные более 1 мм, псаммитовые – 1–0,1 мм, алевролитовые – 0,1–0,01 мм, политовые – менее 0,01 мм.

В обломочных породах различают обломочные зерна и «цемент» – тонкообломочный материал, скрепляющий между собой крупные зерна.

Текстуры осадочных пород делятся на внутрислоистые и поверхности напластования. Основным элементом текстуры осадочных пород – слоистости. Если слоистость отсутствует, текстуру называют беспорядочной.

При анализе механических и геомеханических процессов пород в основном обращают внимание на их трещиноватость.

Трещины по происхождению делят на четыре типа:

1. Прирожденные (первичные);
2. Тектонические (вторичные);
3. Экзогенные (трещины выветривания);
4. Техногенные (возникшие при производственной деятельности).

Трещины могут быть открытыми или заполненными частично или полностью. По протяженности трещины делят на 5 классов:

1. Дефекты кристаллической решетки;
2. Микротрещины на уровне размеров минеральных зерен;
3. Макротрещины;
4. Разрывы – длиной от 100 м до 10 км;
5. Крупные тектонические разрывы длиной от 10 до 100 км.

В зависимости от взаимной ориентации трещины делятся на упорядоченные и неупорядоченные.

Для количественной оценки трещиноватости используют линейный и объемный коэффициенты трещиноватости, а также площадной коэффициент трещиноватости

$$\begin{aligned} K_{l(\text{тр})} &= \frac{l}{l_{\text{ср}(\text{тр})}}; \\ K_{S(\text{тр})} &= \frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{ср}(\text{тр})}}; \\ K_{V(\text{тр})} &= \frac{V}{V_{\text{ср}(\text{тр})}}, \end{aligned} \tag{1.1}$$

где  $l$  – единица линейного размера, м;  $l_{\text{ср}(\text{тр})}$  – среднее расстояние между трещинами, м;  $S_{\text{пл}}$  – единица принятой площади, м<sup>2</sup>;  $S_{\text{ср}(\text{тр})}$  – средняя трещиноватая площадь, м<sup>2</sup>;  $V$  – единица принятого объема породы, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{ср}(\text{тр})}$  – средний объем трещиноватой породы, м<sup>3</sup>.

Также трещиноватость оценивают ее интенсивностью – т. е. число трещин, приходящихся на 1 м в направлении перпендикулярном трещинам

$$J_{\text{ин}} = \frac{l}{l_{\text{ср(тр)}}}, \quad (1.2)$$

где  $J_{\text{ин}}$  – интенсивность трещиноватости;  $l$  – единица линейного размера, 1 м;  $l_{\text{ср(тр)}}$  – среднее расстояние между трещинами в пределах 1 м.

## **2 МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД И ГРУНТОВ. ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНЫХ И ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ**

### **2.1 Понятие и определение механических свойств горных пород. Плотностные свойства горных пород**

**Механические свойства горной породы** – это класс физических свойств, оценивающий поведение породы в условиях различных механических воздействий.

Под физическими свойствами породы понимают ее особое поведение при воздействии на нее определенных физических полей: механические силы, тепловые поля, электрические поля, магнитные поля и т. д.

Количественная мера каждого из этих свойств – это численное выражение одним или несколькими параметрами, показателями, характеристиками.

Основными механическими свойствами горных пород являются:

- плотностные (вес, масса и пустоты пород);
- прочностные (при сжатии, растяжении, сдвиге, изгибе, кручении и т. д.);
- деформационные (упругие, пластические, упругопластические);
- акустические (скорости продольных и поперечных волн, затухание и отражение волн);
- реологические (длительная прочность, ползучесть, релаксация напряжения).

В зависимости от величины и характера приложения нагрузки, величины действующих напряжений в массиве горных пород меха-

нические свойства их по приложению к ним силы в статическом или динамическом режимах.

Все физические, в том числе и механические свойства горных пород зависят от большого количества факторов: минерального состава, влажности, структуры, текстуры, величины давления, его длительности, температуры и др. Все эти факторы делятся на внутренние и внешние.

К внутренним факторам относятся: вещественный состав, структура, текстура пород, и их внутренняя температура; к внешним – различные физические поля, влага, давление, внешняя температура и т. д. В наибольшей степени на физические свойства горных пород оказывают их внутренние факторы, в особенности макродефекты строения – трещиноватость, слоистость и др.

Механические свойства образцов горных пород и механические свойства массива в целом разные.

Так образец не может представить всю информацию о развитии трещиноватости, слоистости, геологических нарушениях массива в целом. Поэтому при решении технических и технологических задач необходимо учитывать этот фактор. В общем, эта проблема решается через определенные коэффициенты, учитывающие особенности массива, так например

$$\sigma_{\text{массива}} = K\sigma_{\text{образца}}, \quad (2.1)$$

где  $\sigma_{\text{массива}}$  – соответствующее свойство пород массива;  $\sigma_{\text{образца}}$  – то же, образца;  $K$  – коэффициент, учитывающий структурно-текстурные и другие отличия массива пород от образца.

Основными плотностными свойствами горных пород являются плотность, объемная масса, удельный вес, объемный вес и пористость.

Плотность  $\rho_0$  (кг/м<sup>3</sup>) масса единицы объем  $V_T$  твердой фазы породы

$$\rho_0 = \frac{m}{V_T}. \quad (2.2)$$

Объемная масса  $\rho$  – масса единицы объема породы  $V$  в естественном состоянии, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (2.3)$$

Удельный вес  $\gamma_0$  – вес  $\sigma$  единицы объема твердой фазы породы, Н/м<sup>3</sup>

$$\gamma_0 = \frac{\sigma}{V_T} = \frac{mg}{V_T} = \rho_0 g, \quad (2.4)$$

где  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение силы тяжести.

Объемный вес  $\gamma$  – вес в единице объема породы в естественном состоянии, Н/м<sup>3</sup>

$$\gamma = \frac{\sigma}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g. \quad (2.5)$$

Пористость – пустоты в горных породах

$$P = \frac{V_{\Pi}}{V}$$

или

$$P = \frac{V_{\Pi}}{V} \cdot 100\%, \quad (2.6)$$

где  $V_{\Pi}$  – объем пустот в породе, м<sup>3</sup>.

$$V_{\Pi} = V - V_T = \frac{m}{\rho} - \frac{m}{\rho_0}. \quad (2.7)$$

Подставляя (2.7) в (2.6) получим

$$\begin{aligned} P &= \frac{V_{\Pi}}{V} \cdot 100\% = \frac{V - V_T}{V} \cdot 100\% = \frac{\frac{m}{\rho} - \frac{m}{\rho_0}}{m/\rho} \cdot 100\% = \\ &= \left( \frac{m\rho}{m\rho} - \frac{m\rho}{m\rho_0} \right) \cdot 100\% = \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) \cdot 100\% = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (2.8)$$

По величине плотности породы, слагающие земную кору, подразделяют на три группы:

- легкие  $\rho_0 < 2500$  кг/м<sup>3</sup>;
- средние  $\rho_0 = 2500 - 4000$  кг/м<sup>3</sup>;
- тяжелые  $\rho_0 > 4000$  кг/м<sup>3</sup>.

Пористость горных пород колеблется от нескольких долей процента до 80–90 %. По величине пористости породы делятся на 5 групп:

- низкопористые – до 5 %;
- пониженной пористости – 5–10 %;
- среднепористые – 10–15 %;

- повышенной пористости – 15–20 %;
- высокопористые – более 20 %.

Плотность зависит от минерального состава и степени метаморфизма рис. 2.1.

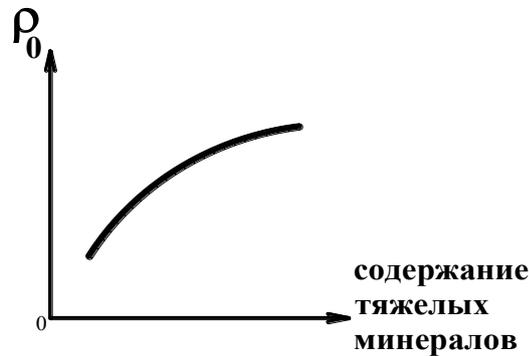


Рис. 2.1. График зависимости плотности пород от их степени метаморфизма

Объемная масса пород в большей мере зависит от пористости, влажности, давления, температуры (рис. 2.2–2.4).

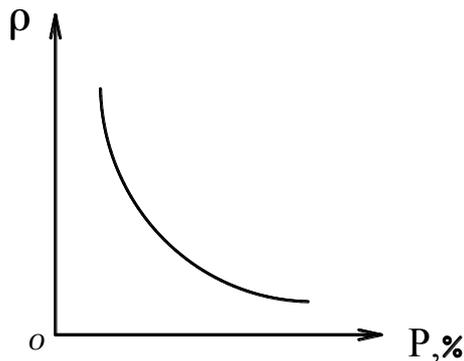


Рис. 2.2. График зависимости объемной массы пород от их пористости

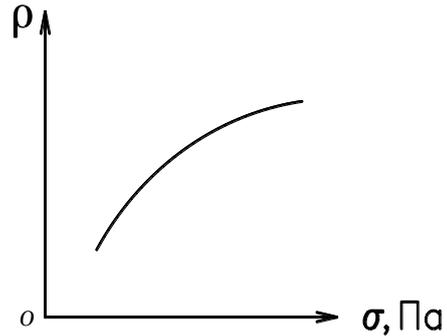


Рис. 2.3. График зависимости объемной массы породы от давления на них

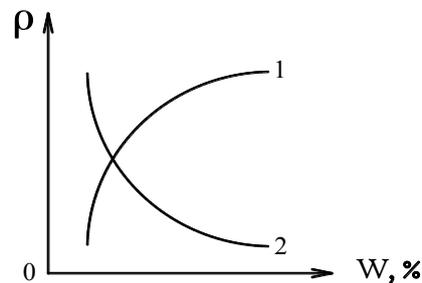


Рис. 2.4. График зависимости объемной массы пород от их влажности

Кривая 1 характеризует поглощение воды, заполнение пустот водой без заметного разрушения, набухания пород; кривая 2 – по-

роды, увеличение объема которых в результате набухания, опережает рост массы пород за счет поглощения воды.

## 2.2 Прочностные свойства горных пород

Под прочностью горной породы понимают ее способность сопротивляться силовым воздействиям, не разрушаясь. Разрушение породы характеризуется нарушением внутренних связей и разрывом сплошности. Прочность породы оценивается величиной критических напряжений, при которых происходит ее разрушение. Критические напряжения в свою очередь определяются отношением максимальных сил, при которых происходит разрушение породы, к ее площади на которую воздействуют эти силы. Данные напряжения носят название пределов прочности. Различают пределы прочности при сжатии, растяжении, сдвиге, изгибе и т. д.

**Разрушение** – это разрыв связей между атомами и ионами в кристаллической решетке. Величина силы разрыва зависит от типа межатомных связей и строения кристаллической решетки вещества.

Различают реальную и теоретическую прочность горных пород.

**Теоретическая прочность** – прочность, обусловленная силой связи между элементарными частицами кристаллической решетки, не имеющей никаких микродефектов строения. Реальная прочность пород отличается от их теоретической прочности большой микро- и макродефектностью, соответственно она в десятки раз меньше теоретической.

На оценку прочности пород большое влияние оказывает масштаб ее разрушения. Существует три категории масштаба разрушения:

**Мегаскопический** – разрушение пород открытым способом с помощью взрывания. В данном случае на разрушение пород большое влияние оказывают крупные трещины, борозды скольжения, зеркальные поверхности.

**Макроскопический** – разрушение пород происходит в основном за счет небольших трещин, пор, контактов слоев, кливажей при буровзрывных работах в подземных условиях, а также выемке полезного ископаемого с помощью различных машин.

**Микроскопический уровень** – характерен для истирания горных пород. На этом уровне происходит разрыв связей в кристаллах. При этом на силу разрушения существенное влияние оказывают дислокации и точечные дефекты.

В настоящее время существует несколько теорий описывающих прочность, как свойство горных пород. Основными из них являются: теория Кулона-Мора, Гриффитса, кинетическая теория прочности. Применительно к горным породам наибольшее распространение получила теория прочности Мора. Она основана на том, что каждая точка тела находится в объемном напряженном состоянии и существует зависимость между касательными  $\tau$  и нормальными  $\sigma$  напряжениями. Согласно этой теории в любой точке тела  $\tau = f(\sigma)$  в объемном напряженном состоянии.

По теории Мора разрушение породы наступает тогда, когда либо касательные напряжения  $\tau$  превысят определенные критические значения  $\tau_{кр}$ , величина которых тем больше, чем больше нормальные напряжения, действующие на породы, либо когда при  $\tau = 0$  нормальные растягивающие напряжения превысят определенный предел, равный  $\sigma_p$  – пределу прочности при растяжении (рис. 2.5).

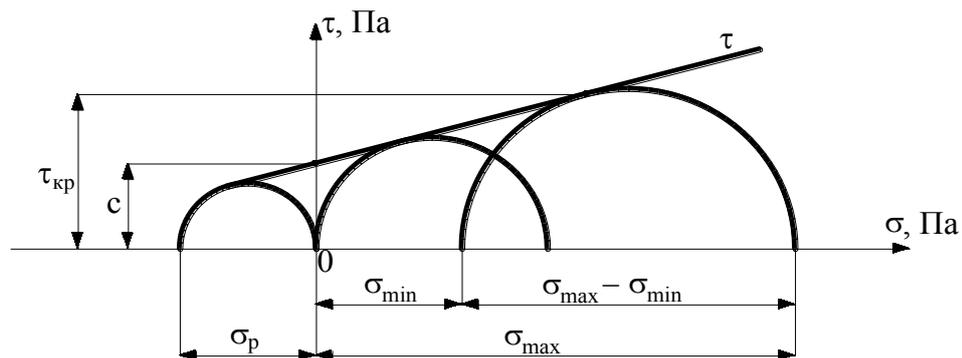


Рис. 2.5. Взаимосвязи между касательными и нормальными напряжениями

В любой точке породы при ее нагружении возникают касательные и нормальные напряжения, которые взаимосвязаны и соответственно могут быть рассчитаны по формуле  $\varepsilon = \varepsilon_1 \pm \sigma_{max} \operatorname{tg} \varphi$ .

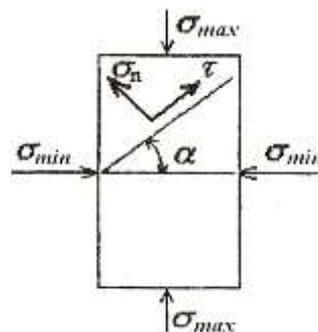


Рис. 2.6. Взаимосвязь между нормальными и касательными напряжениями

- Нормальные:  $\sigma_n = \sigma_{\max} \cos^2 \alpha + \sigma_{\min} \sin^2 \alpha;$
- Касательные:  $\sigma = 0,5(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \sin^2 \alpha.$

$$(2.9)$$

Связь между  $\sigma_n$  и  $\tau$  обычно представляют графически с помощью кругов напряжений. Данные круги называют предельными. Огибающую предельных кругов напряжений называют паспортом прочности горной породы.

Любое значение напряжений внутри огибающей не является разрушающим для данной породы, а за пределом огибающей – разрушающим.

Значения непосредственно расположенные на огибающей, являются предельными для данной породы. Аналитически чаще всего огибающую описывают в виде параболы либо прямой.

Парабола – огибающая описывается следующим образом

$$\tau = \sqrt{(\sigma_p + \sigma_{сж}) [2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{сж}) + \sigma_{сж}}]}. \quad (2.10)$$

Прямая, огибающая предельные круги описывается следующим образом

$$\tau = \tau_1 + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.11)$$

где  $\tau_1(\sigma)$  – предел прочности породы при срезе (чистом сдвиге) в условиях отсутствия нормальных напряжений, или сцепление породы;  $\varphi$  – угол внутреннего трения породы;  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент внутреннего трения показывает отношение между приращениями касательных и нормальных напряжений.

В тех случаях, когда порода находится в одноосном напряженном состоянии и паспорт прочности ее показан в виде прямой, взаимосвязь между  $\tau$ ,  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$  графически представляют следующим образом (рис. 2.7).

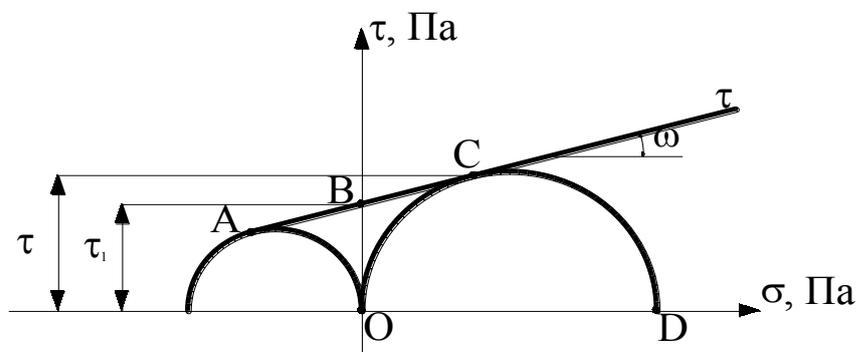


Рис. 2.7. Паспорт прочности горных пород: ABC – огибающая;  $\tau_1$  – сцепление породы;  $\varphi$  – угол внутреннего трения породы; AO –  $\sigma_p$ ; O –  $\sigma_{сж}$

**Теория Гриффитса** описывает в основном разрушение хрупких пород не склонных к проявлению пластических деформаций.

Согласно данной теории для разрушения пород решающее значение имеют критические трещины, имеющиеся в объеме тела.

Как правило, на краях трещин возникают напряжения  $\sigma'$  превышающие среднее значение напряжений, приложенных к телу.

В том случае, когда  $\sigma'$  превысит предел прочности породы при растяжении в определенной точке, трещина начинает развиваться, производя работу  $A_S$  по разрыву молекулярных соединений. Эта работа пропорциональная удельной поверхности энергии  $e_s$  данного тела

$$A_S = 4le_s, \quad (2.12)$$

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

Упругая энергия, запасенная в породе в результате действия внешних сил и необходимая для образования трещины, составит

$$A_E = \sigma_p^2 \pi l^2 / E, \quad (2.13)$$

где  $E$  – модуль упругости породы;  $l$  – площадь одной поверхности трещины.

Трещина будет расти при условии:

$$\frac{\partial A_E}{\partial l} \geq \frac{\partial A_S}{\partial l} \text{ или } \left[ \frac{\sigma_p^2 \pi l^2}{E} \right] \geq (4le_s), \quad (2.14)$$

отсюда  $2l\pi\sigma_p^2 / E \geq 4e_s$ , отсюда

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{2e_s E}{\pi l}}. \quad (2.15)$$

Согласно теории Гриффитса

$$\sigma_{сж} = 8 \sqrt{\frac{2e_s E}{\pi l}}. \quad (2.16)$$

### **2.2.1 Основные факторы, влияющие на прочность горных пород**

Прочностные свойства горных пород в большей мере зависят от минерального состава, структуры, текстуры, влажности, температуры, давления, вида напряженного состояния и характера приложения нагрузки. А углей – степени метаморфизма.

В зависимости от вида напряжения прочность горных пород при сжатии характеризуется соотношением

$$\sigma_{\text{одн}} < \sigma_{\text{двухостн}} < \sigma_{\text{трехостн}} \quad (2.17)$$

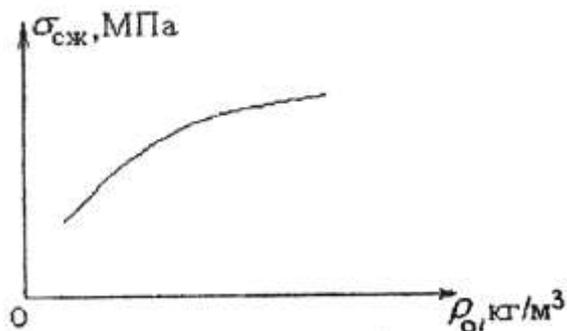


Рис. 2.10. График зависимости  $\sigma_{\text{сж}}$  от плотности минералов, слагающих породу

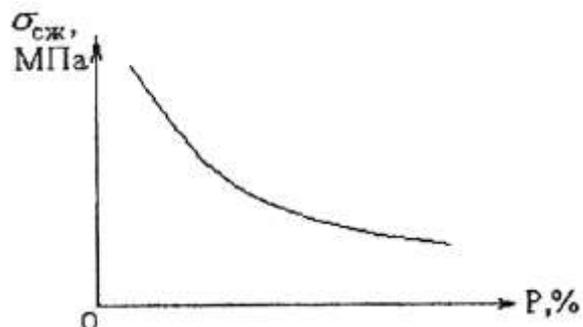


Рис. 2.11. График зависимости  $\sigma_{\text{сж}}$  от пористости P пород

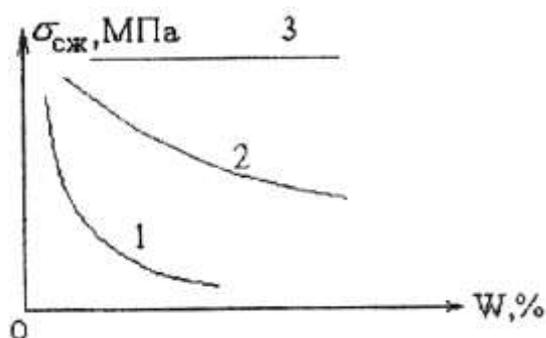


Рис. 2.12. График зависимости  $\sigma_{\text{сж}}$  от влажности пород:  
1 – глинистые породы;  
2 – среднеразмокаемые породы;  
3 – практически неразмокаемые породы

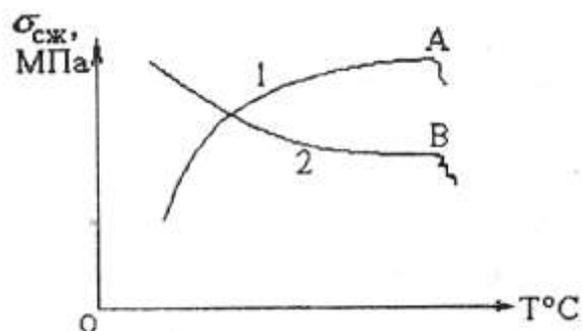


Рис. 2.13. График зависимости  $\sigma_{\text{сж}}$  от внутренней температуры пород: 1 – глинистые породы; 2 – прочные породы; А, В – точки разрушения

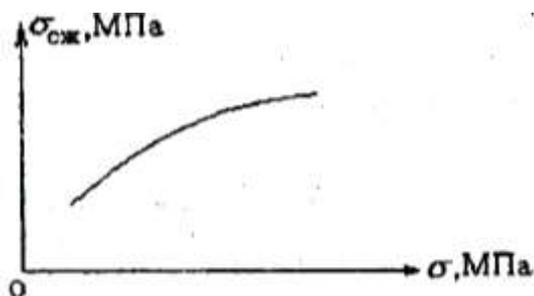


Рис. 2.14. График зависимости  $\sigma_{\text{сж}}$  от внешнего давления на породу

С глубиной залегания пород их прочность увеличивается (рис. 2.14), т. к. уменьшается пористость. Наиболее интенсивно породы уплотняются до глубины залегания 80 м. Вторая по величине уплотнения, а следовательно и упрочнения зона от 80 до 250 м. Третья зона, в которой породы практически не уплотняются – 250–1200 м. На большей глубине породы еще не изучены.

Прочность осадочных пород в большей мере зависит от типа и прочности цемента. Наиболее прочным является кварцевый цемент, наименее прочный – глинистый цемент.

Прочность горных пород определяется на образцах, отбираемых в массиве. Параметры получаемые на образцах больше, чем в массиве. Поэтому для выявления истинной прочности пород применяют коэффициент структурно-текстурного ослабления  $K_c$ , который определяется либо лабораторным способом, либо по СП 91.13330.2012

$$R_{сж} = K_c \sigma_{сж}, \quad (2.17)$$

где  $R_{сж}$  – прочность породы при сжатии в массиве.

Прочностные параметры горных пород определяют на образцах правильной, полуправильной и неправильной формах. Параметры  $\tau_1(\sigma)$  и  $\varphi$  определяют графически из паспорта прочности Мора.

## 2.3 Деформирование и разрушение горных пород

### 2.3.1 Деформационные свойства горных пород

**Деформация** – изменение взаимного расположения частиц, составляющих тело. Основные причины деформации – воздействие внешних механических сил, изменение температуры, воздействие электрическими зарядами, магнитными полями и т. д.

В кристаллической решетке любого вещества существуют силы взаимного притяжения и отталкивания. При воздействии на породу внешних сил, стремящихся сдвинуть ионы в решетке благодаря упругим свойствам в породе возникают внутренние силы, противодействующие внешним.

Соответственно, свойства деформации твердого тела (породы), зависят от его упругих свойств и величины приложенных сил, напряжений. Увеличение нагрузок извне приводит к возрастанию внутренних деформаций тела и в итоге к его разрушению, т.е. потере сплошности, разделу на части.

Деформации бывают упругие, упругопластические, пластические. При упругих деформациях наблюдается прямая зависимость между величиной напряжения и деформированностью тела. При этом в породе накапливается потенциальная энергия, стремящаяся после снятия нагрузки вернуть объем тела в исходное состояние. При пластических деформациях объем тела, после снятия внешних нагрузок, полностью не восстанавливается. Не существует четкой границы между переходом тела из упругих деформаций в пластические. Поэтому существует понятие упруго-пластические деформации.

При постоянном увеличении напряжений, либо из начальной его задаче достаточной величины в породе можно наблюдать все три вида деформаций – упругую  $\epsilon_e$ , пластическую  $\epsilon_{пл}$  и разрушающую  $\epsilon_p$  (рис. 2.15).

Основная часть горных пород обладает высокими упругими свойствами. Данные породы способны вплоть до полного разрушения под действием достаточной внешней нагрузки очень мало деформироваться. При разгрузке таких пород остаточная деформация  $\epsilon_{ост}$  очень маленькая, т. е.  $\epsilon_e \approx (0,8-0,9) \epsilon_{ост}$ .

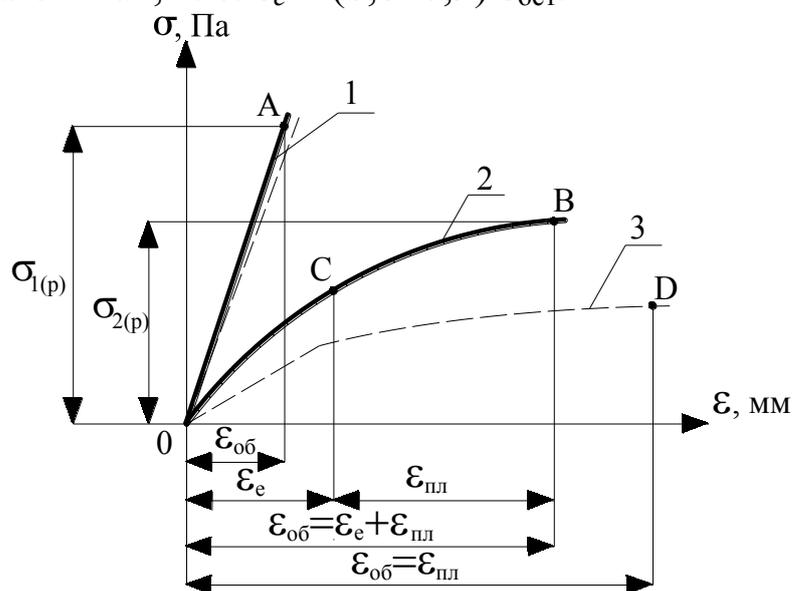


Рис. 2.15. Графики деформаций пород: 1 – упругая; 2 – упруго-пластическая; 3 – пластическая; точки А, В, Д – разрушение

Основные характеристики упругих деформаций горных пород являются модуль упругости  $E$ , модуль сдвига  $G$ , коэффициент Пуассона и модуль всестороннего сжатия  $K$ .

Между данными характеристиками имеются взаимосвязи, которые описываются следующими выражениями

$$\begin{aligned} G &= \frac{E}{2(1+\nu)}; \\ \nu &= \frac{E-2G}{2G}; \\ K &= \frac{E}{3(1-2\nu)}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Связь между деформациями при нормальных и касательных напряжениях в породе, находящейся в объемном напряженном состоянии, выражается обобщенным законом Гука

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu_{xy}(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \nu_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu_{zy}(\sigma_x + \sigma_z)]; \\ \nu_{zy} &= \frac{\tau_{zy}}{G}; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu_{zx}(\sigma_x + \sigma_y)]; \\ \nu_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

### 2.3.2 Полная диаграмма деформирования пород. Основные факторы, влияющие на деформационные свойства пород

Для обоснования геомеханических процессов происходящих в породах вокруг подземных горных выработок, обычно пользуются полной диаграммой деформирования пород (рис. 2.17). Данная диаграмма характеризует деформационные и прочностные свойства горных пород в допредельном и запредельном состояниях.

На участке *OA* происходит закрытие микротрещин и пор, модуль упругости *E* увеличивается. Зависимость между  $\varepsilon_1$  и  $\sigma$  не пропорциональная. На участке *AB* происходит упругое сжатие минерального скелета образца с постоянным модулем упругости.

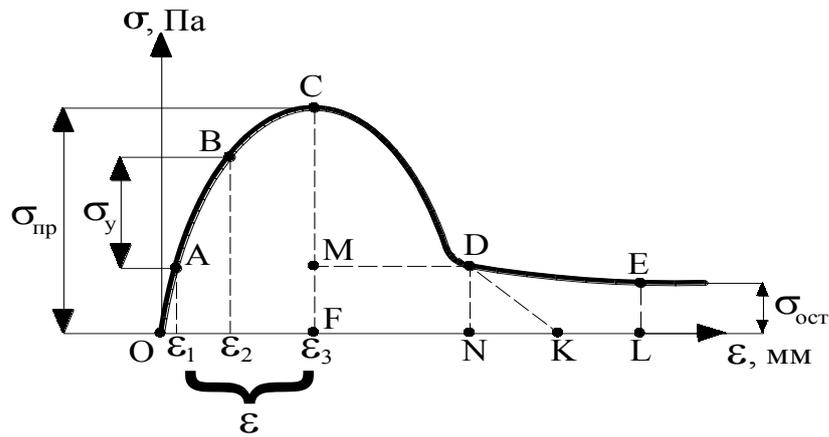


Рис. 2.17. Полная диаграмма деформирования горных пород

На этом участке нагружения связь между  $\sigma_y$  и  $\epsilon_y$  выражается законом Гука  $\sigma_y = E\epsilon_y$ . На участке  $BC$  происходит образование микротрещин, и зависимость между напряжением и деформацией не пропорциональная. Ближе к точке  $C$  происходит лавинообразное раскрытие трещин и в точке  $C$  образец разрушается. Величина напряжений  $\sigma_{пр}$  является пределом прочности породы на одноосном сжатии. Отношение  $\sigma_{пр}/\epsilon = \frac{CF}{OF} = E_d$  – называют модулем деформации пород. Область  $OCF$  – называется допредельной прочностью породы (при одноосном сжатии), область  $FCDE$  – запредельная прочность. Отношение  $\frac{CF}{KF} = M$  – называют модулем спада породы.

Угол  $FOC = \arctg E_d$ ; угол  $FKC = \arctg M$ .

Прочность  $EL$  – называют остаточной. Исходя из вышеизложенного можно записать

$$E = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y};$$

$$E_d = \frac{\sigma_{пр}}{\epsilon_{дп}}; \quad (2.20)$$

$$M = \frac{\sigma_{пр} - \sigma_{ост}}{\epsilon_{зп}},$$

где  $\epsilon_{дп}$  – допредельная деформация (отрезок  $OF$ );  $\epsilon_{зп}$  – запредельная деформация, (отрезок  $FN$ ).

Модуль спада  $M$  иначе еще называют запредельным модулем деформации. Он характеризует склонность горных пород к крупному разрушению, которая увеличивается с увеличением  $M$ . Соответственно, порода, у которой  $M = 0$ , является идеально пластичной, порода с  $M \rightarrow \infty$  – идеально хрупкая. Свойства хрупкого (запредельного) разрушения пород, обычно оцениваются коэффициентом хрупкости  $K_{хр}$ , который в свою очередь определяется из выражения

$$K_{хр} = \frac{\Pi_y}{\Pi_y + \Pi_з} = \frac{M}{E + M}, \quad (2.21)$$

где  $\Pi_y$  – работа упругих деформаций на пределе прочности (в допредельной области);  $\Pi_з$  – работа необратимых деформаций в запредельной области.

Породы, обладающие свойством накапливать большую потенциальную энергию, не деформируясь и мгновенно разрушаться (с достаточно большим показателем  $M$ ) склонны к горным ударам и другим динамическим проявлениям. Поэтому диаграмма деформирования пород представляет достаточно ценную информацию о их индивидуальных свойствах в процессе проведения подземных горных выработок.

Деформационные свойства горных пород зависят от вещественного состава, структуры, текстуры, влажности, температуры, давления, характера приложения нагрузки.

Деформационные свойства горных пород также зависят от направления действия усилия по отношению к направлению слоистости, трещиноватости. Также на модуль упругости и модуль сдвига существенное влияние оказывает характер приложения нагрузки. Так динамические модули упругости в 1,1–1,6 раза больше статических.

У глинистых мокрых пород на их приобретение ими упругих свойств существенное влияние оказывает увеличение их замораживания.

Деформационные свойства горных пород определяются в основном на образцах с помощью ручных прессов, индикаторов часового типа и датчиков различных конструкций.

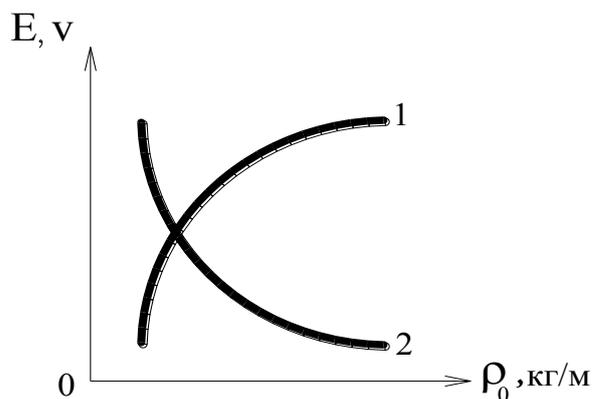


Рис. 2.18. График зависимости  $E$  (1) и  $\nu$  (2) от плотности породы

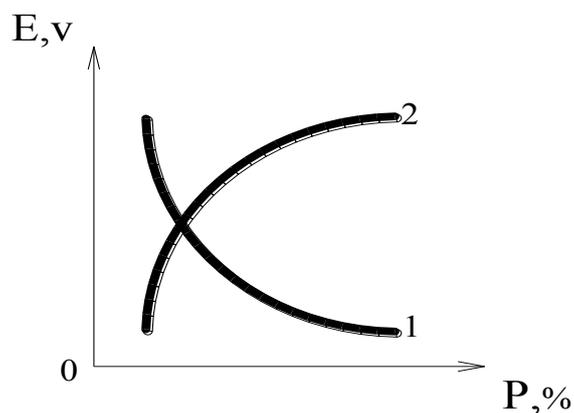


Рис. 2.19. График зависимости  $E$  (1) и  $\nu$  (2) от пористости породы

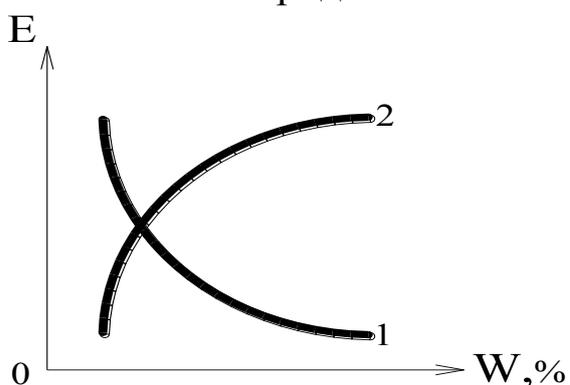


Рис. 2.20. График зависимости модуля Юнга от влажности породы: 1 – порода размокшая; 2 – неразмокшая порода

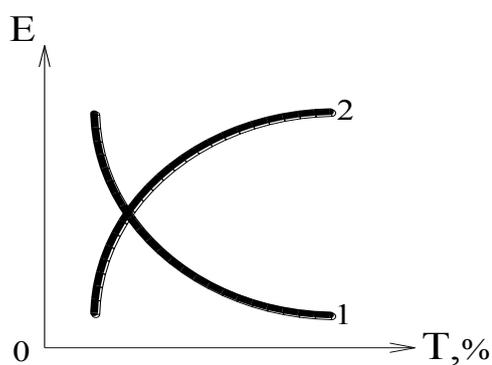


Рис. 2.21. График зависимости модуля Юнга от внутренней температуры породы: 1 – прочностные породы; 2 – глинистые породы

## 2.4 Пластические свойства горных пород

### 2.4.1 Основные факторы, влияющие на пластические свойства

В основной своей массе породы разрушаются в области упругих деформаций. Но бывают случаи, когда породы претерпевают разрушение за пределами упругих деформаций – в области пластического состояния, характеризуемого появлением в породах значительных остаточных деформаций.

**Пластичность горной породы** – способность породы под воздействием приложенной к ней силы изменять свои размеры и форму без разрыва сплошности и сохранять полученные размеры и форму после устранения этой силы.

Пластические деформации возникают в результате перемещения дислокаций; они начинаются от мест нарушения структуры в

кристалле и распространяются по плоскости скольжения постепенно не нарушая кристаллической структуры и сплошности вещества.

Максимальное напряжение в породе, не приводящее к ее остаточным деформациям, называется пределом упругости. До достижения предела упругости зависимость между напряжением и предельной деформацией у породы прямопропорциональная. Данная модель описывается законом Гука.

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 пружиной (тело Сен-Венана). Но большинство горных пород относится к упрочняющимся телам. Для поддержания в них пластических деформаций необходимо постоянно повышать напряжения. Рост данных напряжений происходит с убывающей скоростью. Такое поведение породы можно смоделировать комбинаций идеального упругого тела Гука и идеального 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 (рис. 2.22).

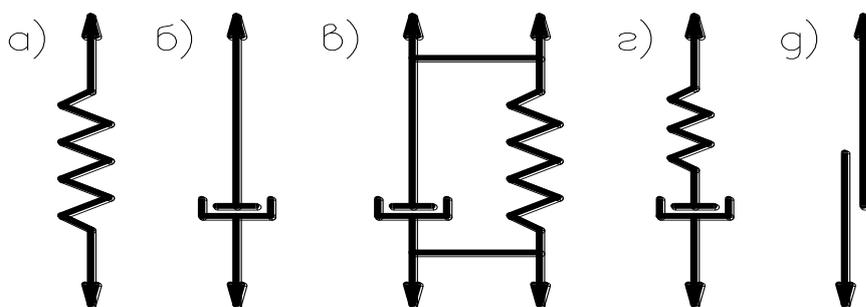


Рис. 2.22. Реологические модели различных тел:  
 а – упругого (Гука); б – вязкого (Ньютона); в – упруговязкого (Кельвина-Фойгта); г – упруговязкого (Максвелла);  
 д – пластического (Сен-Венана)

Упрощенная связь между напряжением  $\sigma$  и относительной деформацией  $v'$  в области пластической деформации выражается коэффициентом  $E'$  (секущий модуль деформации)

$$E' = f(v') = \text{const}; \quad (2.22)$$

$$E \text{ } ^3 \text{ } E' > 0.$$

Предельный секущий модуль деформации – отношение величины прироста напряжений в пластической зоне (до момента разрушения породы) к величине полной относительной деформации в области пластической зоны (до момента разрушения), называемое модулем пластичности (рис. 2.23)  $E_{пл}$ .

$$E_{пл} = \frac{\sigma_{сж} - \sigma_y}{\Delta l_1 - \Delta l_y} \cdot l. \quad (2.23)$$

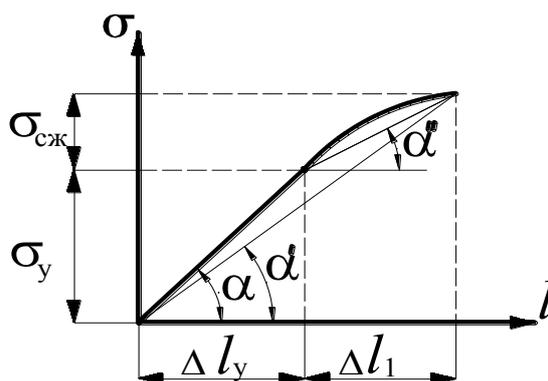


Рис. 2.23. График к расчету модулей деформации и пластичности горных пород  $\operatorname{tg} \alpha = E$ ;  $\operatorname{tg} \alpha' = E_{деф}$ ;  $\operatorname{tg} \alpha'' = E_{пл}$

Если соединить прямой линией конечную точку графика «напряжение-деформация» (момент разрушения образца) с началом координат, то тангенс такого угла называется модулем полной деформации

$$E_{деф} = \frac{\sigma_{сж} l}{\Delta l_1}. \quad (2.24)$$

Отличие пластической деформации от разрушающей заключается в том, что первая происходит без явного нарушения сплошности породы. Для того, чтобы разрушить пластическую породу необходимо тратить большее количество энергии, чем на разрушение упругой породы с одним и тем же пределом прочности. На рис. 2.24 видно, что площадь  $OCD$  равна работе  $W_p$ , затраченной на разрушение реального образца, а площадь  $OAB$  – работе, затраченной на разрушение идеально хрупкой породы,  $W_y$  с тем же  $\sigma_{сж}$ .

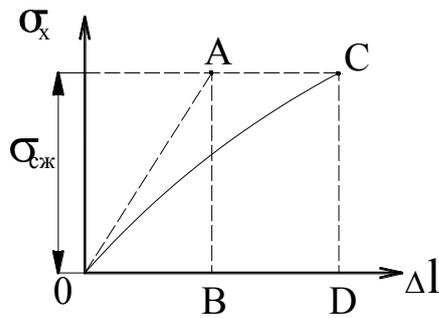


Рис. 2.24. График к расчету коэффициента пластичности горных пород  $k_{\text{пл}} = \frac{OCD}{OAB}$

Отношение  $W_p$  к  $W_y$  представляет собой коэффициент пластичности  $k_{\text{пл}}$

$$k_{\text{пл}} = 2 \frac{E}{E_{\text{деф}}} - 1,$$

или

$$k_{\text{пл}} = \frac{E}{E_{\text{деф}}}. \quad (2.25)$$

В теории пластичности часто используют два условия пластичности материала, которые определяют переход породы из упругого состояния в пластическое.

**Первое условие** – условие пластичности Треска-Сен-Венана – пластические деформации наступают тогда, когда в материале максимальные касательные напряжения достигают значения, равного пределу текучести при чистом сдвиге.

$$\tau_{\text{max}} = \tau_T. \quad (2.26)$$

Из паспорта прочности Мора известно, что

$$\tau_{\text{max}} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2. \quad (2.27)$$

Известно, что при линейном напряженном состоянии переход из упругого состояния в пластическое в породе наблюдается при условии

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_T; \\ \sigma_2 &= \sigma_3 = 0, \end{aligned} \quad (2.28)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести горных пород при растяжении.

Подставив в (2.27) зависимость (2.28), получим

$$\tau_{\text{max}} = \sigma_T/2. \quad (2.29)$$

Сравнив (2.26) и (2.29), получаем

$$\tau_T = \sigma_T/2. \quad (2.30)$$

После подстановки (2.27) и (2.29) в (2.30) получаем условие пластичности Треска-Сен-Венана в виде

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \tau_T. \quad (2.31)$$

По величине  $k_{пл}$  можно сравнить относительную пластичность различных пород. Обычно с увеличением предела прочности на одноосное сжатие коэффициент пластичности породы снижается. Поэтому повышение  $\sigma_{сж}$  пород обладающих высокой хрупкостью не только не затрудняет их разработку, а наоборот эти породы значительно легче поддаются динамическому разрушению (взрыванию), чем слабые, но высокопластичные породы.

**Второе условие** – условие пластичности Губера-Мизеса-Генки – пластические деформации в породе возникают, когда интенсивность касательных напряжений достигает некоторого постоянного для данной породы значения.

$$\tau_i = (\sqrt{2}\sigma_T)/3,$$

или

$$C = (\sqrt{2}\sigma_T)/3. \quad (2.32)$$

Пластичность зависит от минерального состава горных пород. Наличие в породе кварца, полевого шпата уменьшает ее пластичность. Пластичность углей зависит от содержания в них углерода. На пластические свойства горных пород также оказывают внешние факторы. Так они (свойства) повышаются при увлажнении пород.

**Пределы пластичности** – это значения влажности пород (%), при которых происходит переход породы из хрупкого состояния в пластическое – нижний предел пластичности  $W_n$ , и из пластического в текучее – верхний предел пластичности  $W_T$ . Число пластичности  $\Phi$  равно разности верхнего и нижнего пределов пластичности и характеризует диапазон влажностей в пределах которых порода находится в пластическом состоянии.

В глинах с увеличением числа пластичности возрастает их сжимаемость и водонепроницаемость. У скальных пород пластичность увеличивается с повышением температуры и всестороннего давления.

При увеличении температуры количество дислокаций в породе не изменяется, но увеличивается их подвижность. При увеличении всестороннего давления более легко проявляются внутризеренные движения и смещения, не приводящие к нарушению сплошности и

возникновению трещиноватости, т. е. к разрушающим деформациям. Эти факторы важно знать при разработке месторождений на больших глубинах, где как раз и присутствуют повышенные температура и давление.

## **2.5 Реологические свойства горных пород**

### **2.5.1 Основные факторы, влияющие на реологические свойства**

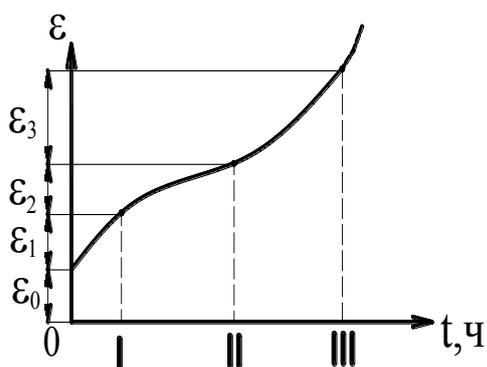
Законы деформирования горных пород как в образце, так и в массиве, рассматриваемые в теории пластичности и упругости, не учитывают факторы времени. В большинстве же случаев ведения горных работ мы имеем дело с длительным воздействием нагрузки на горные породы. Наука, изучающая изменение механических свойств твердых тел при длительном воздействии нагрузок, называется **реологией**.

Под реологическими понимают свойства, характеризующие изменение всех механических характеристик породы при длительном воздействии на нее нагрузок, в том числе нагрузок ниже предела упругости.

Основными реологическим свойствами породы называются ползучесть и релаксация напряжений.

Под ползучестью понимают явление постепенного роста деформации породы во времени при постоянном напряжении. Внешне явление ползучести похоже на пластическое течение. Но последнее происходит только за пределами зоны упругости и при возрастающем напряжении, в то время как ползучесть может проявляться также при напряжениях, не превышающих предела упругости при достаточном длительном воздействии нагрузки.

Идеальная кривая изменения деформации во времени при длительном воздействии нагрузки состоит из 3-х отрезков (рис. 2.25).



I – процесс мгновенной деформации в момент нагружения породы;  
 II – установившееся состояние пластического течения при постоянной нагрузке;  
 III – стадия возрастания скорости деформации и наступления момента разрушения породы.

Рис. 2.25. График ползучести

Для анализа явления ползучести можно воспользоваться моделью тела Максвелла, согласно которой, если не превышен предел упругости, то общая деформация  $v$  породы в любой отрезок времени состоит из двух составляющих – упругой деформации  $v_y$  и деформации ползучести  $v_{II}$ .

$$v = v_y + v_{II}. \quad (2.33)$$

Скорость изменения деформации во времени

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv_y}{dt} + \frac{v_{II}}{dt}. \quad (2.34)$$

Так как  $v_y = \frac{\sigma}{E}$ , а составляющая ползучести является некоторой функцией напряжения  $f(\sigma)$

$$\frac{dv_{II}}{dt} = \frac{\sigma}{Et_0}. \quad (2.35)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{Et_0}, \quad (2.36)$$

где  $t_0$  – постоянная, имеющая размерность времени.

Это равенство называется уравнением ползучести. Если напряжения  $\sigma$  постоянны, то  $\frac{d\sigma}{dt} = 0$  и  $\frac{dv}{dt} = \frac{\sigma}{Et_0}$ .

Ползучесть зависит от величины и направления приложения нагрузки на породу. Наибольшие ползучести наблюдаются при нагрузках, приложенных перпендикулярно слоистости, причем отношение

$$\frac{v_{n1}}{v_{n2}} \approx 1,4.$$

Явление, обратное ползучести – постепенное снижение напряжений в породе при постоянной ее деформации – называется **релаксацией напряжений**. Упругие деформации, появившиеся в породе при первоначальном нагружении, постепенно переходят в пластические. В результате этого после снятия нагрузки образец не восстанавливает свои первоначальные формы, не смотря на то, что исходные напряжения не превышают предел упругости породы.

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

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau_0}, \quad (2.37)$$

где  $\sigma_0$  – первоначальное напряжение в образце;  $\tau_0$  – период релаксации, время, в течение которого напряжения в породе убывают в  $e$  раз.

Период релаксации большинства горных пород очень велик. Так, у скальных грунтов он составляет 100–1000 лет, у стекла – 100 лет, в то время как у воды  $\tau_0 = 10^{-2}$  с. Поэтому на практике для характеристик реологических свойств пород при меньшей длительности нагружения часто используют относительный показатель падения напряжений в породе  $R'$  (%) за определенный период времени (неделю, месяц и т. д.).

$$R' = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_t} \cdot 100\%, \quad (2.38)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение в испытываемом образце в момент приложения нагрузки;  $\sigma_t$  – напряжение оставшееся в образце по истечении определенного периода.

При длительном воздействии напряжений происходит постепенное снижение прочности горных пород (рис. 2.25).

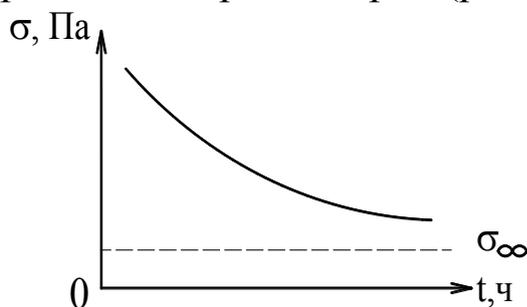


Рис. 2.25. Уменьшение прочности породы с увеличением продолжительности действия нагрузки,  $\sigma_\infty$  – предел длительной прочности

В этом случае используют понятие «длительная прочность». Нагрузка с увеличением времени воздействия уменьшается по определенной кривой, асимптотически приближаясь к некоторому предельному значению, называемому пределом длительной прочности  $\sigma_{\infty}$ .

Длительная прочность значительно меньше стандартной прочности

$$\sigma_{\text{дл}} = \sigma_0 l_n \frac{A}{t}, \quad (2.39)$$

где  $\sigma_0$  – прочность породы при мгновенном напряжении;  $A$  – константа, характеризующая стойкость породы;  $t$  – время приложения нагрузки.

Для некоторых глин  $\sigma_{\infty} = 0,5 \sigma_0$ , для большинства других пород  $\sigma_{\infty} = 0,7 \div 0,8 \sigma_0$ .

## 2.6 Распространение упругих колебаний в породах

Если к участку породы ограниченных размеров мгновенно приложить нагрузку (удар), вызывающую напряжения, которые не превышают предел упругости, то этот участок будет испытывать деформацию, т. е. смещение частиц по направлению действующей силы. Ввиду того, что частицы породы жестко связаны между собой, деформация одной частицы вызывает смещение других, более удаленных частиц. Происходит распространение упругой деформации с определенной скоростью. При отсутствии потерь энергии за счет трения соседних частиц упругое возмущение должно распространяться по всей породе.

Произведение массы  $m$  элементарного объема на его ускорение, согласно второму закону Ньютона, равно сумме всех сил  $\sum dF$ , действующих на этот объем

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} = \sum dF, \quad (2.40)$$

где  $u$  – амплитуда колебаний;  $t$  – время;  $m = \delta \Delta x \Delta y \Delta z$ , где  $\delta$  – плотность породы.

Сумму всех сил вдоль любой оси координат можно выразить как сумму всех элементарных напряжений, умноженных на соответствующую площадь, на которую они действуют. Если принять, что нормальная сила действует только вдоль оси  $x$ , а образец поро-

ды представляет собой тонкий длинный стержень, так, что касательные напряжения отсутствуют, то

$$\sum dF = \frac{d\sigma_x}{d_x} \Delta x \Delta y \Delta Z. \quad (2.41)$$

После преобразования получим

$$\frac{d^2 u}{dt^2} \delta = \frac{d\sigma_x}{d_x}. \quad (2.42)$$

Это уравнение движения некоторого объема породы вдоль оси  $x$  при отсутствии других сил, действующих на него, выраженное через напряжение. Для перехода к деформациям следует воспользоваться уравнением закона Гука  $\sigma_x = \nu_x E$  и заменить относительную деформацию соответствующим перемещением вдоль оси  $x$

$$\nu_x = \frac{du}{d_x}. \quad (2.43)$$

Скорость распространения упругой волны сжатия в стержне породы

$$v_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{E}{\delta}}. \quad (2.44)$$

**Упругие колебания** – это процесс распространения в породе знакопеременных упругих деформаций ее частиц. Частота этих колебаний может быть самой различной в зависимости от частоты генератора, возбуждающего их.

По частоте колебаний упругие волны подразделяют на инфразвуковые – частота колебаний до 20 Гц, звуковые – 20÷20000 Гц, ультразвуковые – более 20000 Гц, гиперзвуковые – более  $10^{10}$  Гц.

Упругие волны возникают в результате распространения деформаций в веществе. В зависимости от вида деформаций могут возникать волны различных типов (рис. 2.26).

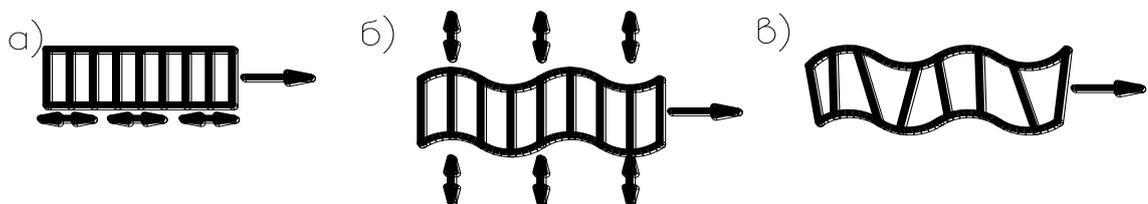


Рис. 2.26. Упругие волны различных типов: а – продольные, б – поперечные, в – изгибные

Деформации поперечного объемного сжатия и растяжения обуславливают распространение в веществе продольных упругих

волн. Продольные упругие волны распространяются в любой среде – газах, жидкостях и твердых телах. Поперечные волны характерны только для твердых тел. Этот тип волн распространяются по всему объему тела и поэтому называется объемным.

Частицы горной породы, находящиеся на поверхности, испытывают особое состояние, т. к. встречают меньшее сопротивление своим перемещением в сторону свободной поверхности. В результате этого на поверхности возникает плоская (поверхностная) волна, которая характеризуется движением частиц, образуемым траекторию в виде эллипса с большой осью, направленной перпендикулярно перемещению волны. В этом случае каждая частица совершает двойное колебание: вдоль и поперек направления движения волны. Для образцов пород типа стержней различают также крутильные и изгибные волны.

## **2.7 Акустические свойства горных пород и массивов. Основные факторы, влияющие на акустические свойства горных пород**

Характер распространения упругих колебаний в горных породах определяется акустическими параметрами пород. К ним относятся скорости распространения упругих волн, коэффициенты поглощения, отражения и преломления и волновое сопротивление.

Под скоростью волны понимают скорость распространения некоторой фазы упругих колебаний.

Скорость распространения упругих волн в абсолютно упругой изотопной среде определяется по следующим формулам теории упругости:

Скорость продольной упругой волны в массиве, м/с

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}. \quad (2.45)$$

Если  $\nu = 0,25$ ,

$$v_p \approx 1,1 \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Скорость распространения поперечной упругой волны, м/с

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}. \quad (2.46)$$

Если  $\nu = 0,25$ , то

$$v_s \approx 0,63 \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Скорость распространения поверхностной упругой волны

$$v_L = (0,87 + 1,12\nu) \sqrt{\frac{G}{\rho(1+\nu)}}. \quad (2.47)$$

Если  $\nu = 0,25$ , то

$$v_L = 0,92 v_s \approx 0,58 \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

При этом всегда соблюдается следующее соотношение скоростей

$$v_p > v_s > v_L.$$

Скорость распространения продольной упругой волны в тонкой пластине породы

$$v_{пл} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu)^2}}. \quad (2.48)$$

Если  $\nu = 0,25$ , то

$$v_{пл} \approx 1,33 \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Скорость распространения упругой волны в тонком стержне породы

$$v_{ст} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2.49)$$

Скорость распространения упругих волн в горных породах определяется их упругими свойствами и плотностью.

Отношение скоростей продольных и поперечных волн является функцией коэффициента Пуассона

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}. \quad (2.50)$$

С увеличением модуля Юнга и коэффициента Пуассона возрастает скорость распространения продольной упругой волны. Скорость распространения поперечной волны увеличивается с увеличением  $E$  и уменьшается с увеличением коэффициента Пуассона.

Распространение упругих волн в горных породах, так же как и в любом веществе сопровождается постепенным уменьшением их

интенсивности (амплитуды) по мере удаления от источника излучения.

Интенсивность колебаний в большинстве случаев уменьшается по следующим причинам:

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

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

Амплитуда упругих колебаний  $U$ , характеризующая интенсивность колебаний, связана с пройденным волной расстоянием  $X$  экспоненциальной зависимостью

$$U = U_0 e^{-\theta x}, \quad (2.51)$$

где  $\theta$  – коэффициент поглощения,  $m^{-1}$ .

Коэффициент поглощения зависит как от свойств породы, так и от частоты колебаний  $f$ . Для большинства пород зависимость  $\theta$  от  $f$  линейная. В глинистых породах коэффициент  $\theta$  пропорционален  $\lg f$ .

Породы обладают сопротивлением распространению в них упругих волн, которое оценивается удельным волновым сопротивлением (акустической жесткостью) горной породы. Акустическая жесткость в сущности является отношением давления волны  $P_k$  мгновенной скорости колеблющихся частиц  $v'$

$$Z = P/v' = \rho v_p. \quad (2.52)$$

Единица  $Z$  называется акустическим Омом.

Удельное волновое сопротивление пород определяет их способность отражать и преломлять упругие волны. Отражение и преломление происходит либо на границе между породами с различными акустическими параметрами, либо при переходе упругих волн из внешней среды в породу (и наоборот).

К преломлению и отражению упругих волн можно применить законы геометрической оптики.

Коэффициентом отражения называется отношение энергии отраженной волны  $W_R$  к энергии падающей волны  $W_0$ . При этом углы падения  $\delta_n$  и отражения  $\delta_0$  звуковой волны от границы раздела равны (рис. 2.27).

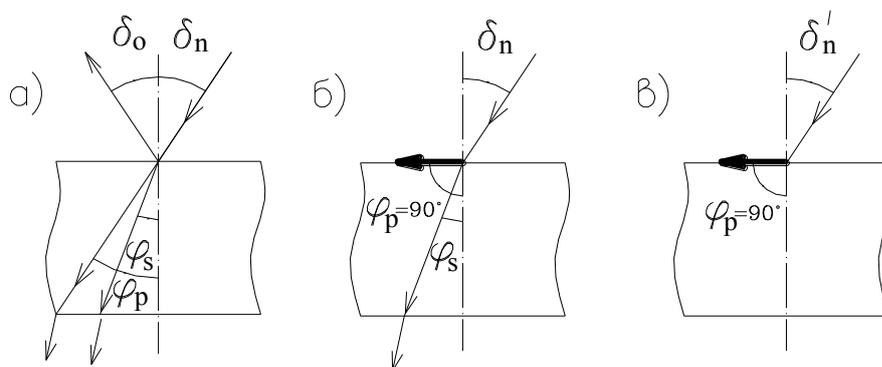


Рис. 2.27. Преломление и отражение ультразвуковой волны на границе раздела двух сред: а – общий случай; б – момент внутреннего отражения продольной волны; в – момент внутреннего отражения поперечной волны;  $\delta_n$  и  $\delta_0$  – углы падения и отражения;  $\varphi_p$  и  $\varphi_s$  – углы преломления продольной и поперечной волны

Коэффициент  $K_э$  при нормальном падении волны можно выразить также через удельное волновое сопротивление – чем больше разница в волновых сопротивлениях сред, тем больше отражается энергии

$$K_э = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2. \quad (2.53)$$

Угол падения  $\delta_n$  и угол преломления  $\varphi$  упругой волны, проникшей в горную породу, подчиняется закону Снеллиуса, согласно которого углы находятся в определенном соотношении со скоростями упругой волны в первой  $v_1$  и второй  $v_2$  средах

$$\frac{\sin \delta_n}{\sin \varphi} = \frac{v_{p1}}{v_{p2}}. \quad (2.54)$$

Отношение  $\frac{v_{p1}}{v_{p2}} = n$  – называется коэффициентом преломления упругой волны относительно первой среды.

Больше колебания акустических свойств горных пород объясняются значительным разнообразием минерального состава, структуры, текстуры и влажности.

Увеличение плотности пород сопровождается ростом скорости распространения в них упругих волн и снижением потерь волновой энергии. Влияние основных внутренних и внешних факторов

на скорости распространения упругих волн в горных породах приведены на рис. 2.28–2.32.

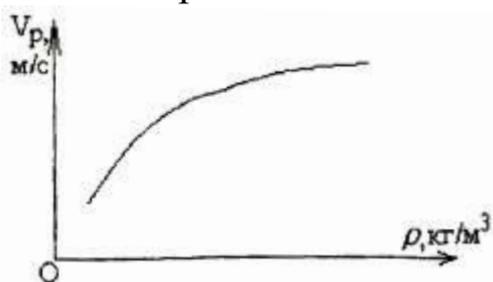


Рис. 2.28. График зависимости скорости продольной волны  $v_p$  от объемной массы

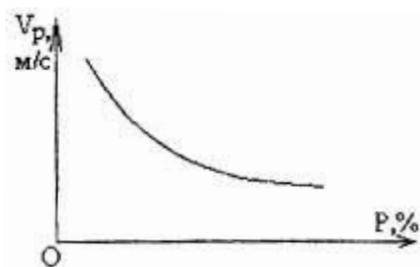


Рис. 2.29. График зависимости скорости продольной волны  $v_p$  от пористости

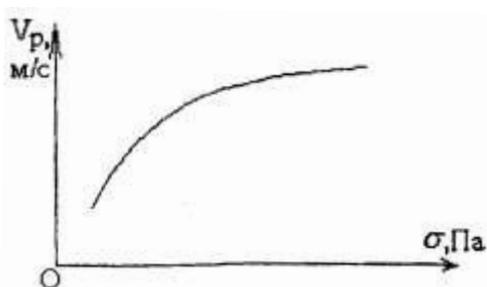


Рис. 2.30. График зависимости скорости продольной волны  $v_p$  от напряжений в породе

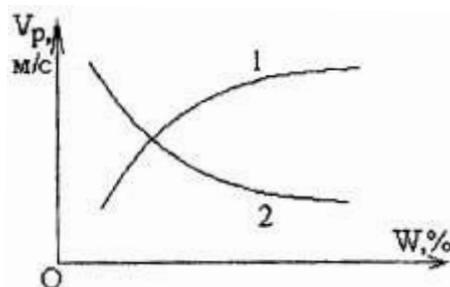


Рис. 2.31. График зависимости скорости продольной волны  $v_p$  от влажности породы:  
1 – неразмочаемые породы;  
2 – размочаемые породы

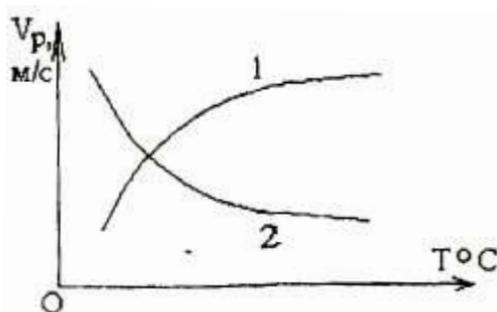


Рис. 2.32. График зависимость скорости продольной волны  $v_p$  от температуры  $T$ : 1 – породы, уплотнение которых происходит при нагревании; 2 – породы, ослабление которых происходит при нагревании

В слоистых породах скорость упругих волн вдоль и поперек слоев различна, причем всегда  $v_n > v_{\perp}$ . Если порода состоит из сло-

ев 2-х типов, то скорость упругих волн перпендикулярно слоям в простейшем случае при их равных удельных волновых сопротивлениях может быть вычислена по суммарному времени прохождения волн через все слои

$$\frac{1}{v_{\perp}} = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2}, \quad (2.55)$$

где  $l_1, l_2$  – относительные толщины слоев прозвучиваемой породы;  $v_1, v_2$  – скорости продольной упругой волны в этих слоях.

Скорость упругой волны при тех же условиях

$$v_{\parallel} = v_1 S_1 + v_2 S_2, \quad (2.56)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площадь слоев в поперечном сечении.

Отношение скоростей упругих волн вдоль и поперек слоистости породы характеризуется коэффициентом анизотропии.

$$K_a = \frac{v_{p\parallel}}{v_{p\perp}} \approx 1,05 - 2. \quad (2.57)$$

### **3 СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ГРУНТОВ. ВЛИЯНИЕ ВОДЫ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВ**

Грунты являются поверхностными отложениями самого молодого возраста. Грунты, в общем, делятся на: связные, сыпучие, твердые, полужидкие.

В состав природных грунтов входят разнообразные элементы, которые можно объединить в три группы:

- 1 – твердые минеральные частицы;
- 2 – вода в различных видах и состояниях;
- 3 – газообразные включения.

Также в состав некоторых грунтов входят органические и органоминеральные соединения.

Каждая рыхлая и глинистая порода состоит из обломков различного размера. Обломки, близкие по размеру делятся на фракции количественное содержание этих фракций принято называть гранулометрическим составом.

Вода в грунте в зависимости от величины взаимодействия с минеральными частицами и содержания в грунте определяет гидрофильность минеральных частиц.

Минеральные частицы грунтов заряжены отрицательно, а молекулы воды представляют диполи, заряженные положительно на одном (атом кислорода) и отрицательно на другом (два атома водорода) конце. При соприкосновении твердой минеральной частицы с водой возникают электромолекулярные силы взаимодействия, которые притягивают диполи воды к поверхности минеральных частиц с огромной силой (особенно первые слои), и чем больше удельная поверхность частиц, тем больше количество молекул воды будет находиться в связанном состоянии. Эти слои образуют пленки так называемой прочносвязанной адсорбированной воды.

Следующие слои молекул воды, окружающие минеральные частицы, будут связываться и ориентироваться граничной фазой по мере удаления от твердой поверхности грунтовых частиц все меньшими силами; они образуют слои рыхлосвязанной воды, которые поддаются выдавливанию из пор грунта внешним давлением до нескольких сотен килопаскалей.

Наконец, молекулы воды, находящиеся вне сферы действия электромолекулярных сил взаимодействия с поверхностью минеральных частиц, будут образовывать свободную или гравитационную воду, движение которой происходит под действием разности напора, и капиллярную, подтягиваемую на некоторую высоту от уровня грунтовых вод силами капиллярного натяжения воды.

Строение грунтов характеризуется их структурой и текстурой. Структура грунтов, т. е. закономерное расположение различных по крупности и форме минеральных частиц и их агрегатов, зависит не только от природы их структурных связей, но также от величины и характера контактов глинистых частиц между собой.

Структура грунтов весьма разнообразна и определяется количественным и морфологическим взаимоотношением твердой, жидкой и газообразной частей, образующих грунт.

**Текстура** – это пространственное размещение и взаимное расположение частиц грунтов и их агрегатов, характеризующее неоднородность грунтовых толщ в массивах.

Различают следующие основные типы текстур природных глинистых грунтов: слоистые (тонко- и грубослоистые, параллельные, косослоистые, сланцеватые); массивные и скрытослоистые и сложные (порфиоровые, ячеистые, макропористые и др.).

### 3.1 Механические свойства грунтов.

#### Основные факторы, влияющие на механические свойства грунтов

Основными физическими свойствами грунтов в зависимости от их состояния, является плотность, объемная масса, удельный вес, пористость, влажность, влагоемкость, нижний и верхний предел пластичности (у глинистых пород), сжимаемость, водонепроницаемость, сопротивляемость сдвигу, угол внутреннего трения, угол естественного откоса (у сыпучих грунтов).

Плотность грунтов, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_0 = \frac{m}{V_T}. \quad (3.1)$$

Объемная масса, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (3.2)$$

Удельный вес грунтов, Н/м<sup>3</sup>

$$\gamma_0 = \frac{G}{V_T} = \rho_0 g. \quad (3.3)$$

Объемный вес грунтов, Н/м<sup>3</sup>

$$\gamma = \frac{a}{V_T} = \rho g. \quad (3.4)$$

Пористость грунта

$$\rho = \frac{V_{\text{пустот}}}{V} 100\% = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} 100\%. \quad (3.5)$$

**Влажность грунта** – отношение массы воды  $m_B$  в массе высушенного грунта  $m_{гр}$  при температуре 105°C, т. е.

$$W = \frac{m_B}{m_{гр}} 100\%. \quad (3.6)$$

Коэффициент водонасыщенности грунтов  $K_{wh}$  называют отношение природной (естественной) влажности  $W$  и его полной влагоемкости  $W_{max}$ , т. е.

$$K_{wh} = \frac{W}{W_{max}}. \quad (3.7)$$

Несвязанные (сыпучие) грунты по классификации делят на три группы:

- маловлажные, с  $K_{wh} \leq 0,5$ ;
- влажные, с  $K_{wh} = 0,5-0,8$ ;
- насыщенные, с  $K_{wh} > 0,8$ .

В глинистых грунтах при изменении содержания воды они переходят из одного состояния в другое. Воздушно-сухие глинистые грунты при увлажнении в начале размягчаются, затем переходят в пластическое состояние, а по достижении некоторого состояния влажности грунты приобретают текучую консистенцию, значение, которой выражается в процентах.

Значения, при которых породы переходят из одного состояния консистенции в другое, называют пределами пластичности. В качестве показателей пластичности грунтов используют верхний  $W_L$  и нижний  $W_{pk}$  пределы пластичности.

Верхний предел пластичности (граница текучести) соответствует такому содержанию воды в грунте, когда он переходит из пластического состояния в текучее.

Нижний предел пластичности (граница раскатывания) характеризует переход грунта из полутвердой (твердой) консистенции в пластическую.

Разность между верхним и нижним пределами пластичности называется числом пластичности  $J_p$  и используется как классифицированный показатель пластичности грунтов.

По числу пластичности группы делятся на:

Супеси  $1 \leq J_p \leq 7$

Суглинки  $7 \leq J_p \leq 17$

Глины  $J_p > 17$

Песок не пластичен

Сжимаемость грунтов заключается в способности грунтов изменять свое строение под влиянием внешних воздействий (сжимающей нагрузки, высыхания и т. д.) на более компактные, за счет уменьшения пористости грунта.

Различают уплотнение грунтов:

- при кратковременном действии динамических нагрузок (механическое);

– при длительном действии постоянной статической нагрузки (компрессия).

Степень сжатия глинистых грунтов зависит от их пористости. Пористость глин характеризуется коэффициентом пористости  $K_{\Pi}$ , т. е. отношением объема пор  $\Pi$  грунта к объему его скелета (твердой фазы)  $V_T$ , т. е.

$$K_{\Pi} = \frac{\Pi}{V_T}. \quad (3.8)$$

Кривая, выражающая зависимость между коэффициентом пористости  $K_{\Pi}$  и давлением на грунт  $\sigma$ , называется кривой сжимаемости или компрессионной кривой ( $K_{\Pi} = f(\sigma)$ ).

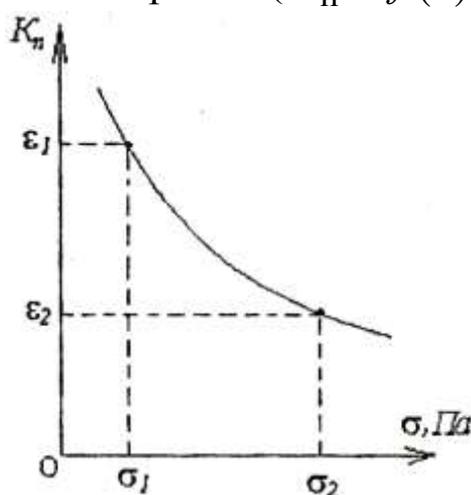


Рис. 3.1. Компрессионная кривая

Кривая, показывающая уменьшение коэффициента пористости грунта во времени при постоянной нагрузке, называется кривой сжатия или кривой консолидации ( $K_{\Pi} = f(t)$ , при  $\sigma = const$ ).

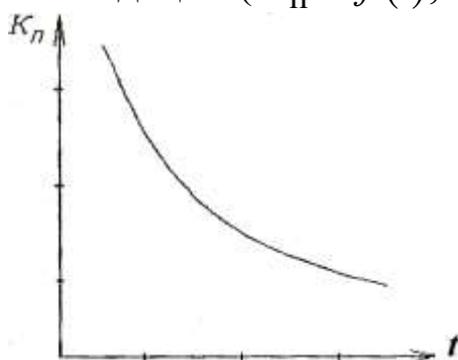


Рис. 3.2. Кривая консолидации глинистых грунтов

Мерой величины сжимаемости глинистых грунтов является коэффициент уплотнения или коэффициент сжимаемости  $K_{сж}$ , ха-

рактически характеризующий изменение коэффициента пористости  $K_{II}$  под действием приложенной нагрузки

$$K_{сж} = (E_1 - E_2) / (\sigma_2 - \sigma_1). \quad (3.9)$$

Грунты также характеризуются их сопротивлением сдвигу под действием внешних нагрузок в отдельных областях, где напряжения могут превзойти внутренние связи между частицами.

Сдвиг  $C$  несвязанных твердых минеральных частиц (песков) произойдет при условии

$$C < \sigma f, \quad (3.10)$$

где  $\sigma$  – нормальное давление;  $f$  – коэффициент трения.

Сдвиг  $C_{сд}$  агрегатов с ворно-коллоидными связями произойдет при условии

$$C_{сд} = C_{в.к} + C_{сц}, \quad (3.11)$$

где  $C_{в.к}$  – вязкое сопротивление скольжению;  $C_{сц}$  – силы сцепления частиц, которые зависят от уплотняющих давлений, возникающих в точках и на площадке контактов частиц.

Кулоном в 1773 г. установлено, что предельное сопротивление сыпучих грунтов (песков, галечнико) сдвигу есть сопротивление их трению, прямопропорциональное нормальному давлению  $\sigma$ , т. е.

$$\tau_{пред} = \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (3.12)$$

или

$$\tau_{пред} = \sigma f, \quad (3.13)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта;  $f = \operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент внутреннего трения грунта.

Соотношение  $\sigma \operatorname{tg} \varphi$  является основой прочности грунтов и носит название **Закона Кулона**.

Для связных грунтов Кулоном была получена зависимость между предельным сопротивлением сдвигу и нормальным давлением (напряжением сжатия)

$$\tau_{пред} = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.14)$$

где  $C$  – коэффициент сцепления грунта.

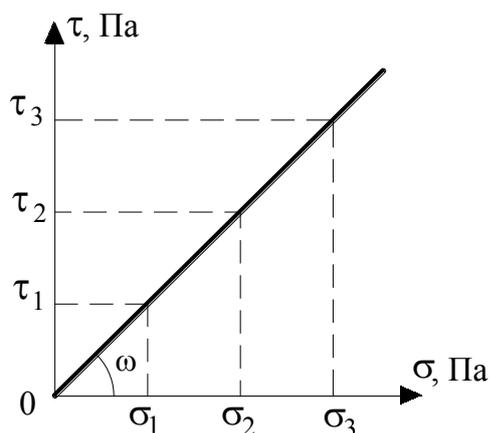


Рис. 3.3. Графическое выражение закона Кулона  $\tau = f(\sigma)$

Сцепление и угол внутреннего трения пород в значительной мере зависят от их влажности и пористости.

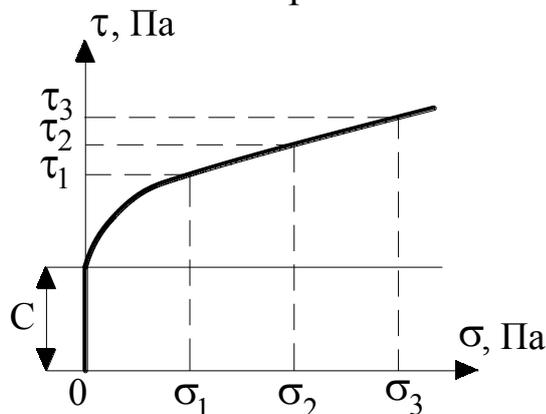


Рис. 3.4. График  $\tau = f(\sigma)$  для связных пород

## 4 МЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И НАЧАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОДНЫХ И ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ

### 4.1 Общие понятия о моделях массива горных пород

**Модель** – упрощенная схема какого-либо физического объекта или явления. Моделирование выполняется либо с увеличением, либо с уменьшением масштаба моделируемой системы.

**Механическая модель** – упрощенная схема деформирования или перемещения тела, отдельных ее частей под действием приложенных к нему сил. Сами модели могут быть физическими, математическими и аналоговыми.

При исследовании механических процессов в массиве горных пород рассматривают не собственно породный массив, а некоторое идеализированное его отображение, учитывающее только главные

существенные его свойства. Это отображение и называют механической моделью массива горных пород или геомеханической моделью.

## 4.2 Основные механические модели массива горных пород и краткая их характеристика

### 4.2.1 Упругая модель массива

Упругая модель применяется наиболее часто и является основной моделью массива горных пород в геомеханике.

Главное в упругой модели – это линейная связь между напряжениями и деформациями, выраженная законом Гука

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (4.1)$$

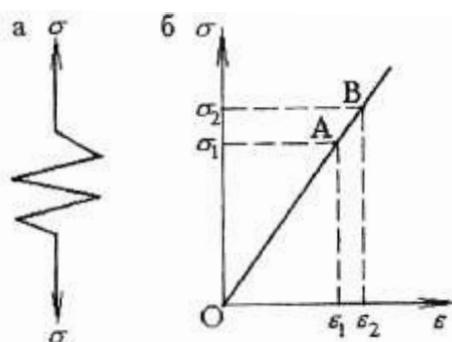


Рис. 4.1. Структурная схема (а) и диаграмма (б) напряжений, характеризующие упругую модель массива

Обобщенный закон Гука описывает объемное напряженное состояние в упругой модели (рис. 4.2).

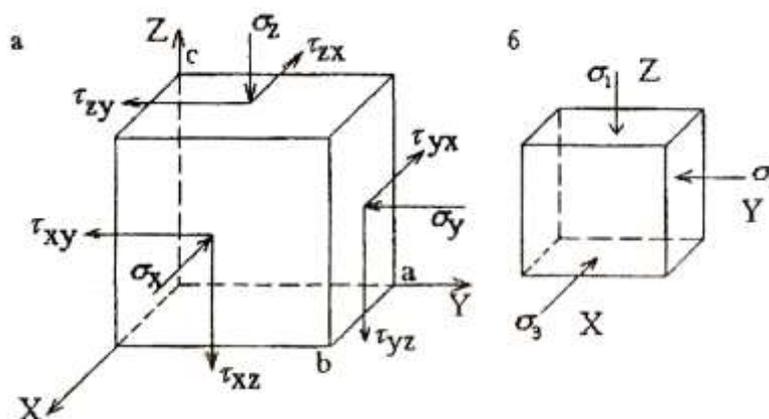


Рис. 4.2. Схема объемного напряженного состояния массива пород:  
 а – напряжение на произвольных площадках;  
 б – главные напряжения

На основании принципа независимости действия сил находим полное относительное удлинение ребра  $ab$  (рис. 4.2, а) как сумму удлинений при действиях каждого напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ .

$$\varepsilon_x = \varepsilon'_x + \varepsilon''_x + \varepsilon'''_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E}, \quad (4.2)$$

или, вынося за скобки  $E$  и  $\nu$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]. \quad (4.3)$$

Аналогично можно найти линейные деформации в направлении осей  $y$  и  $z$ .

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]; \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]; \quad (4.5)$$

$$\tau_{xy} = \gamma_{xy} G;$$

$$\tau_{yz} = \gamma_{yz} G; \quad (4.6)$$

$$\tau_{zx} = \gamma_{zx} G.$$

Уравнения 4.2–4.5 выражают обобщенный закон Гука для изотропного массива горных пород.

Обобщенный закон Гука для плоского напряженного состояния ( $\sigma_z = 0$ ) имеет вид

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu\sigma_y];$$

или

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu\sigma_3]; \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu\sigma_x]$$

или

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu\sigma_2].$$

## 4.2.2 Пластичная модель массива

Пластичная модель (модель Сен-Венана) характеризует процесс деформирования пластических горных пород (грунтов) под действием приложенных нормальных напряжений.

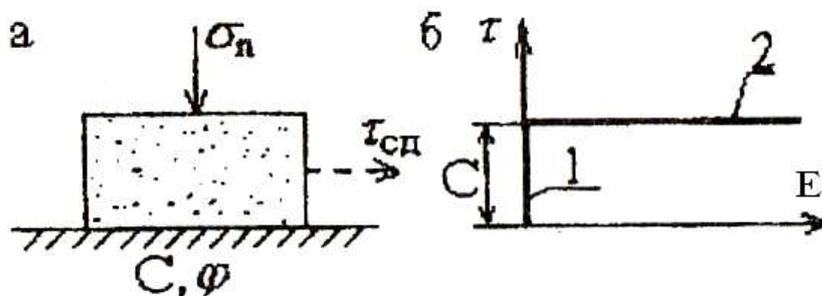


Рис. 4.3. Структурная схема (а) и диаграмма напряжений (б) пластической модели:  
1 – отсутствие деформаций; 2 – пластические деформации

Условие пластичности горных пород (грунта) Кулона (рис. 4.3)

$$\tau_{сд} = C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (4.8)$$

где  $\tau_{сд}$  – напряжения сдвига породы;  $C$  – сцепление породы, т. е. напряжения сдвига при  $\sigma_n = 0$ ;  $\varphi$  – угол внутреннего трения породы.

Условие (4.7) называют условием предельного состояния. Графическое выражение этого условия представляет собой паспорт прочности связной горной породы, находящейся в объемном напряженном состоянии (паспорта прочности Кулона-Мора).

## 4.2.3 Уругопластическая модель массива

Отличие уругопластической модели от пластической заключается в наличие упругих деформаций, которые предшествуют пластическим.

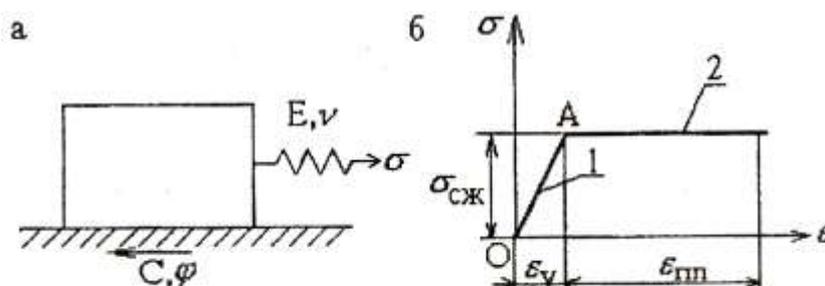


Рис. 4.4. Структурная схема (а) и диаграмма напряжений (б) уругопластической модели:  
1 – область упругих деформаций;  
2 – область пластических деформаций

$$\varepsilon_{об} = \varepsilon_y + \varepsilon_{пл} = \frac{d\sigma_y}{E} + \varepsilon_{пл}. \quad (4.9)$$

#### 4.2.4 Реологические модели массива

Реологические модели отражают свойство ползучести (течения) горных пород, т. е. их способность деформироваться во времени при постоянном напряжении.

Существуют вязкоупругие и вязкопластические реологические модели. Обе включают в себя вязкий элемент Ньютона в виде поршня в цилиндре с вязкой жидкостью.

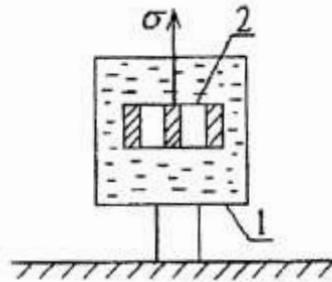


Рис. 4.5. Вязкий элемент Ньютона:  
1 – цилиндр с вязкой жидкостью;  
2 – поршень с отверстиями

Согласно закону Ньютона в вязком элементе напряжения пропорциональны скорости деформации (скорости смещения слоев вязкой жидкости)

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (4.10)$$

где  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  – скорость деформации (градиент скорости смещения слоев);  $\eta$  – коэффициент вязкости, Па·с.

Одна из наиболее распространенных вязкоупругих моделей, модель Максвелла.

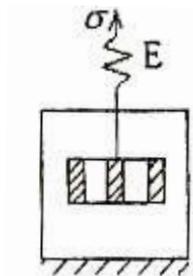


Рис. 4.6. Структурная модель Максвелла

Модель Максвелла состоит из пружины, т. е. упругого элемента и последовательно соединенного с ней вязкого элемента Ньютона. Напряжения, приложенные к структурной модели, вызывают в начальный момент мгновенную упругую деформацию пружины, соответствующую закону Гука. В дальнейшем деформация системы растет с постоянной скоростью в результате поддавливания жидкости через отверстия поршня.

Скорость деформации среды  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  складывается из скорости упругой деформации  $\frac{d\varepsilon_y}{dt}$  и скорости вязкой деформации  $\frac{d\varepsilon_B}{dt}$ .

$$\frac{d\varepsilon_y}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt}$$

и (4.11)

$$\frac{d\varepsilon_B}{dt} = \frac{1}{E} \frac{\sigma}{E\tau_0},$$

отсюда получаем

$$E \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau_0}, \quad (4.12)$$

где  $\tau_0$  – период релаксации напряжения в данном теле, т. е. время, в течение которого напряжения в теле уменьшаются в  $e = 2,72$  раза.

При  $\sigma = const$  процесс деформации принимает процесс ползучести и предыдущее уравнение примет вид

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\sigma t}{\tau_0} = \frac{\sigma}{E} \left( 1 + \frac{t}{t_0} \right), \quad (4.13)$$

где  $\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E}$  – произвольная постоянная, или упругая деформация в начальный момент времени.

Следовательно, рост деформации при постоянном напряжении идет по линейному закону.

Вязкопластические модели учитывают развитие во времени упругих, пластических и вязких деформаций.

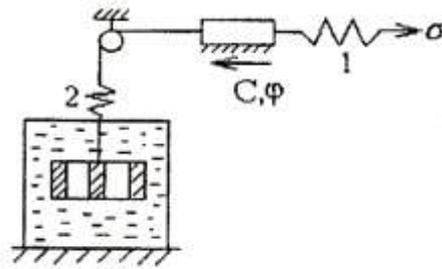


Рис. 4.7. Структурная схема вязкопластической модели Шведова

Общая деформация такой среды под действием приложенной нагрузки равна

$$\varepsilon_{об} = \varepsilon_{у.1} + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_{у.2} + \varepsilon_{пз}. \quad (4.14)$$

## 5 МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ

Важной механической характеристикой глинистых грунтов является консистенция, под которой понимают густоту и в известной мере вязкость грунтов, обуславливающие их способность сопротивляться пластическому изменению формы. Пустота и вязкость грунтов зависит от количественного соотношения твердых частиц и воды в единице объема грунта, а также от сил взаимодействия между частицами грунта.

Показатель консистенции или индекс текучести  $J_1$  грунтов определяется из выражения

$$J_1 = \frac{W - W_{pk}}{W_L - W_{pk}}. \quad (5.1)$$

Различают следующие виды консистенции глинистых грунтов в зависимости от величины показателя консистенции  $J_1$ :

Супеси:

твердые	$J_1 < 0$
пластичные	$0 < J_1 < 1$
текучие	$J_1 > 1$

Суглинки и глины:

твердые	$J_L < 0$
полутвердые	$0 < J_L < 0,25$
тугопластичные	$0,25 < J_L < 0,5$
мягкопластичные	$0,5 < J_L < 0,75$
текучепластичные	$0,75 < J_L < 1$
текучие	$J_L > 1$

Данные о консистенции глинистых грунтовых массивов имеют исключительно большое значение для ведения в них горностроительных, горных и строительных работ.

Сжимаемость грунтов заключается в способности грунтов изменять свое строение (упаковку твердых частей) под влиянием внешних воздействий (сжимающей нагрузки, высыхания и др.) на более компактные, за счет уменьшения пористости грунта.

Следует различать уплотняемость грунтов при кратковременном действии динамических нагрузок (механическую) и уплотнение при длительном действии постоянной статической нагрузки (компрессию, консолидацию пр.). Наибольшей сжимаемостью, кроме торфяных, обладают глинистые грунты.

При сжатии трехфазного грунта уменьшение объема происходит вначале за счет вытеснения из грунта газовой фазы, после чего начинается вытеснение воды. Нагрузка постепенно передается на твердые частицы.

Степень сжатия глинистых грунтов можно охарактеризовать их пористостью. Кривая, выражающая зависимость между коэффициентом пористости  $K_{п}$  и давлением на грунт  $\sigma$ , называется кривой сжимаемости или компрессионной кривой

$$K_{п} = \frac{\Pi}{V_r} = f(\sigma). \quad (5.2)$$

Кривая, показывающая уменьшение коэффициента пористости грунта во времени при постоянной нагрузке, называется кривой сжатия или кривой консолидации  $K_{п} = f(t)$  при  $\sigma = \text{const}$ .

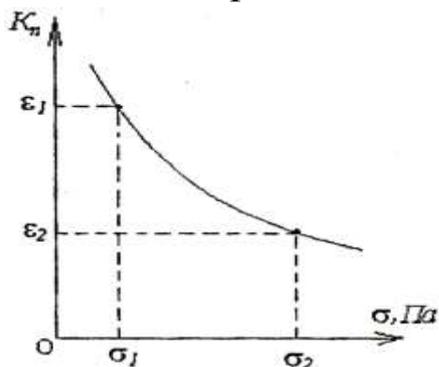


Рис. 5.1. Компрессионная кривая (кривая сжимаемости) глинистых грунтов

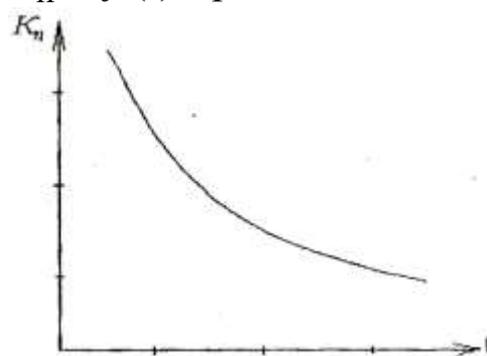


Рис. 5.2. Кривая консолидации глинистых грунтов

Мерой величины сжимаемости глинистых грунтов является коэффициент уплотнения или коэффициент сжимаемости  $K_{сж}$ , ха-

рактически характеризующий изменение коэффициента пористости  $K_{\Pi}$  под действием приложенной нагрузки. В частности, в интервале давления от  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  и изменения коэффициента пористости от  $\varepsilon_1$  до  $\varepsilon_2$  (рис. 4.8) коэффициент сжимаемости  $K_{сж}$  грунта определяется из выражения

$$K_{сж} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_1}. \quad (5.3)$$

По величине этого коэффициента в интервале нагрузок от 0,1 до 0,2 МПа глинистые грунты подразделяются на:

- сильно сжимаемые  $K_{сж} > 0,1 \text{ см}^2/\text{кг}$ ;
- средне сжимаемые  $K_{сж} = 0,1-0,005 \text{ см}^2/\text{кг}$ ;
- слабо сжимаемые  $K_{сж} < 0,005 \text{ см}^2/\text{кг}$ .

### 5.1 Сопротивление грунтов сдвигу

Под действием внешней нагрузки в отдельных точках или областях грунта напряжения могут превзойти внутренние связи между частицами грунта. При этом возникают скольжения (сдвиги) одних частиц или агрегатов по другим, что приводит к нарушению сплошности грунта в некоторой области.

Сопротивление сдвигу  $C$  несвязанных твердых минеральных частиц (например, песков) есть только сопротивление их трению. Сдвиг произойдет при условии

$$C < \sigma f, \quad (5.4)$$

где  $\sigma$  – нормальное давление,  $f$  – коэффициент трения.

Сопротивление  $C_{сд}$  агрегатов частиц с водно-коллоидными связями складывается как из вязкого сопротивления  $C_{в.к}$  скольжению и нарастания сдвигающих усилий, так и сил  $C_{сц}$  сцепления, которые в свою очередь зависят от уплотняющих давлений возникающих в точках и на площадках контактов частиц, т. е.

$$C_{сд} = C_{в.к} + C_{сц}. \quad (5.5)$$

Показатели сопротивления сдвигу – это основные прочностные показатели сопротивления грунтов внешним силам. Для грунтов их важнейшая особенность в том, что они переменны, зависят от величины давления и условий в точках контакта частиц, сопротивляющихся сдвигению.

Ш. Кулоном в 1773 г. установлено, что предельное сопротивление сыпучих грунтов (песков, галечников, других крупнообломочных грунтов) сдвигу есть сопротивление их трению, прямопропорциональное нормальному давлению  $\sigma$ , т. е.

$$\tau_{\text{пред}} = \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (5.6)$$

или обозначив  $\operatorname{tg} \varphi = f$ ,

$$\tau_{\text{пред}} = \sigma f, \quad (5.7)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта;  $\operatorname{tg} \varphi = f$  – коэффициент внутреннего трения грунта.

Соотношение (5.6) является основной прочностной зависимостью для сыпучих грунтов и носит название **закон Кулона**. Графически эта зависимость может быть представлена таким образом.

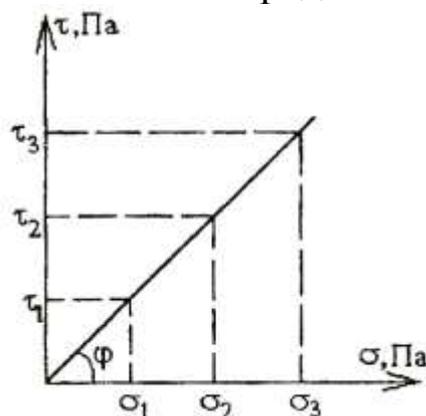


Рис. 5.3. График зависимости между нормальным и сдвигающим напряжением

Связные грунты (глины, суглинки, супеси) отличаются от грунтов несвязных (сыпучих) тем, что частицы и агрегаты частиц этих грунтов связаны между собой пластичными (водно-коллоидными) и частично жесткими (цементно-кристаллическими) связями. Сопротивление их сдвигу будет зависеть в значительной степени от их связности (от сил сцепления).

Для этих грунтов Кулоном получена зависимость между предельным сопротивлением их сдвигу и нормальным давлением (напряжением сжатия)

$$\tau_{\text{пред}} = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (5.8)$$

или

$$\tau_{\text{пред}} = C + \sigma f, \quad (5.9)$$

где  $C$  – коэффициент сцепления грунта.

Сцепление и угол внутреннего трения в значительной степени зависят от влажности и пористости грунтов. Так, например, для мягкопластических грунтов:  $f = 0,1-0,2$  и  $\varphi = 5-10^\circ$ , для тугопластических глин –  $f = 0,4-0,5$  и  $\varphi = 15-35^\circ$ . Величина сцепления  $C$  глинистых пород в большинстве случаев колеблется от 0,005 до 0,15 МПа.

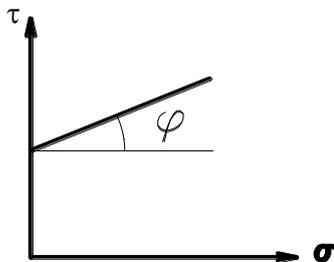


Рис. 5.4. График зависимости сцепления грунтов угла внутреннего трения

Наиболее опасными геомеханическими процессами в грунтах являются: оползнеселевые потоки, просадки грунтов.

**Оползни** – широко распространенный тип разрушения природных склонов, а иногда и бортов открытых горных выработок. Причины оползней – ослабление прочности массива пород в результате выветривания, увлажнения и насыщения водой, подрезки основания склона, массовые взрывы вблизи склонов.

**Сели** – грязекаменные и водокаменные потоки. Они делятся на связные (структурные) и турбулентные (неструктурные) потоки. Связные происходят без перемещения оползающих масс в ядре потока, турбулентные – с перемещением масс.

**Просадка** – свойства грунтов уменьшать свой объем и деформироваться при увлажнении.

## 6 ЕСТЕСТВЕННОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Информация о напряженном состоянии массива горных пород необходима прежде всего для оценки устойчивости породных обнажений, расчета крепи выработок, выбора способа охраны подготовительных выработок, прогноза горных ударов и т. д.

Заметное влияние на поле напряжений оказывают гравитация, инертные силы вследствие движения земли, внутренние силы, вы-

званные тектоническими процессами, подземные воды, газовое давление, температура пород и т. д.

Основной причиной напряженного состояния горных пород являются объемные силы тяжести. В задачах геомеханики можно выделить ряд типовых схем, которые являются как бы классическими и которые можно применять к бесконечному множеству реальных ситуаций. При рассмотрении массива пород, как упругой среды решается задача о распределении напряжений в произвольном элементарном объеме изотропного массива в поле гравитационных сил.

На рис. 8.1 представлена схема напряженного состояния элементарного объема (кубика со стороной равной единице) породы массива, расположенного на глубине  $H$  от дневной поверхности. Кубик находится в условиях всестороннего сжатия, характеризующего напряжения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ .

Вертикальные напряжения  $\sigma_z$  равны весу столба пород

$$\sigma_z = \gamma H, \quad (6.1)$$

где  $\gamma$  – объемный вес пород, залегающих над элементарным объемом породы.

Под действием  $\sigma_z$  кубик укорачивается в вертикальном направлении, стремясь расширяться в горизонтальном, чему препятствуют окружающие породы.

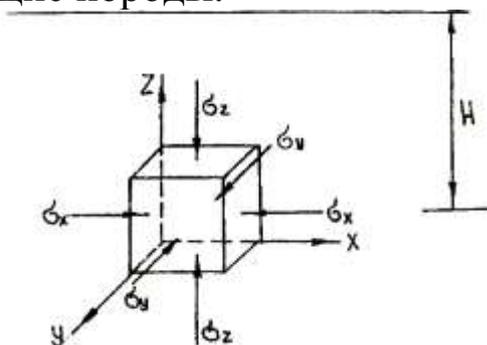


Рис. 6.1. Схема к определению напряженного состояния массива горных пород

Таким образом, возникают горизонтальные сжимающие напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , которые равны между собой и определяются из обобщенного закона Гука, т. е.

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu_{xy}(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \nu_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu_{yz}(\sigma_x + \sigma_z)]; \\ \nu_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G}; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu_{zx}(\sigma_x + \sigma_y)]; \\ \nu_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G},\end{aligned}\tag{6.2}$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $G$  – модуль сдвига.

Поскольку  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$  и  $\sigma_x = \sigma_y$ , то из выражения (6.2) получим

$$\begin{aligned}\varepsilon_x = \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] = 0; \\ \frac{1}{E} \neq 0 &\Rightarrow [\sigma_x - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] = 0.\end{aligned}\tag{6.3}$$

Тогда из выражения (6.3) получим, что

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{1}{1 + \nu} \sigma_x ;$$

или

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda \gamma H\tag{6.4}$$

и

$$\lambda = \frac{\nu}{1 - \nu},$$

где  $\lambda$  – коэффициент бокового давления.

При предельном значении  $\nu = 0,5$ ,  $\lambda = 1$  и, следовательно,  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ .

Данное условие характеризует идеальное состояние равновесия без сдвига. Это называется **гидростатическое напряженное состояние пород массива**.

При неоднородных массивах, состоящих из слоев пород с различным объемным весом напряжение по осям  $x, y, z$  принимают вид

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \sum \gamma_i h_i; \\ \sigma_x &= \sigma_y = \lambda \sum \nu_i h_i.\end{aligned}\tag{6.5}$$

### 6.1 Тектонические и сейсмические напряжения массива горных пород

В результате многочисленных исследований напряженного состояния пород в естественном залегании установлено, что горизонтальные напряжения превышают вертикальные. Это объясняется продолжающимися тектоническими процессами. Во многих месторождениях, породных массивах тектонические напряжения превышают гравитационные в 2–4 раза. Особенно этот процесс наблюдается на небольших глубинах.

В зависимости от увеличения глубины изменение суммы напряжений по двум горизонтальным направлениям происходит по следующей зависимости

$$\begin{aligned}\sigma_{об} &= \sigma_x + \sigma_y; \\ \sigma_{об} &= 18 + 0,98H.\end{aligned}\tag{6.6}$$

Из этой зависимости следует, что на поверхности земли (т. е. на глубине  $H = 0$ ) действующие горизонтальные напряжения составляют

$$\sigma_x + \sigma_y \cong 19 \text{ МПа}.\tag{6.7}$$

Согласно этой зависимости изменение суммы горизонтальных напряжений с глубиной  $H$  представлены на рис. 6.2.

Реальный массив не является однородной средой, а имеет блочную структуру, осложненную пликативными нарушениями и контактами пород. Все это вносит возмущение в поле напряжений, и реальная картина становится более разнообразная. Уровень концентрации напряжений вблизи разрывов достигает в среднем 1,5–3,0 кратной величины средних напряжений, действующих вне зоны влияния разрыва. Протяженность областей повышенных напряжений зависит, как правило, от мощности разрывного нарушения и амплитуды его смещения.

Напряженное состояние породных массивов так же во многом зависит от сейсмических напряжений. (seismos – землетрясение, сейсмические волны в земной коре, возникшие вследствие землетрясения).

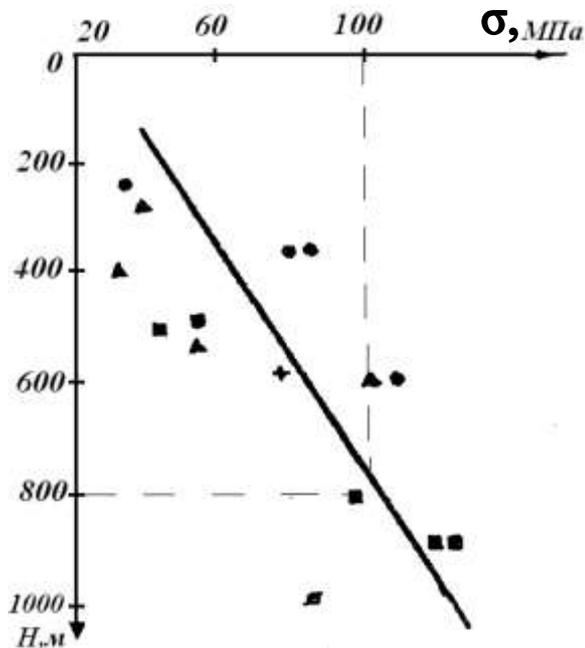


Рис. 6.2. График зависимости изменения напряжений в массиве пород от глубины его залегания

**Землетрясение** – это подземный удар, мгновенное разрывное разрушение земной коры, перемещение масс в результате высвобождения огромной энергии в очаге. В центре этого очага условно выделяется точка – гипоцентр землетрясения. Проекция гипоцентра на поверхность Земли называется эпицентром.

От очага землетрясения во все стороны распространяются упругие волны (продольные и поперечные).

Скорость распространения волн в массивах пород определяется из выражений

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}; \quad (6.8)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}; \quad (6.9)$$

$$v_p \cong (1,4 - 1,6)v_s. \quad (6.10)$$

Вследствие прохождения этих волн в глубине массива с достаточно высокой амплитудой колебания на поверхности Земли возникают поверхностные волны.

Все эти виды волн, распространяясь по массиву, вызывают в нем сейсмические напряжения, которые делятся на нормальные и касательные и определяются из выражений

$$\sigma = \pm \frac{1}{2\pi} AK_1 \gamma v_p T_0; \quad (6.11)$$

$$\tau = \pm \frac{1}{2\pi} AK_1 \gamma v_s T_0, \quad (6.12)$$

где  $A$  – коэффициент, принимающий значения 0,1; 0,2; 0,4 соответственно для интенсивности землетрясений 7, 8, 9 баллов;  $K_1 = 0,25$  – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения подземных сооружений, определяемый по нормативным документам;  $\gamma$  – объемный вес породы;  $T_0$  – преобладающий период собственных колебаний частиц породы.

Величину  $T_0$  принимают по данным инженерной сейсмологической службы,  $A$  если таких данных нет, принимают равной 0,5.

## 6.2 Напряженное состояние сыпучих горных пород

Сыпучая среда представляет собой среду, состоящую из отдельных зерен, т. е. дискретную среду. Сила сцепления между зёрнами практически равна «нулю» ( $C \approx 0$ ).

Поэтому сыпучие среды не воспринимают растягивающие усилия (в отличие от твердых тел). Так же как и твердые тела, дискретные среды способны воспринимать сжимающие нагрузки. В механике под напряжением дискретных сред понимают усилия на отдельные частицы, отнесенные к площади сечения этих частиц.

Понятие «деформация» для сыпучих материалов также имеет некоторую условность. Под действием приложенных усилий отдельные частицы могут деформироваться сами, перемещаться с одного места на другое, поворачиваться на месте под разными углами. В результате этого изменяется плотность среды.

Исходя из вышеизложенного вертикальные напряжения  $\sigma_z$  в сыпучих материалах (сыпучих горных породах) равны весу столба вышележащих пород

$$\sigma_z = \gamma_c H. \quad (6.13)$$

Горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  у сыпучих пород практически равны друг другу и определяются по формуле

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z \lambda_c, \quad (6.14)$$

где  $\lambda_c = \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}$  – коэффициент бокового давления сыпучих горных пород;  $\varphi$  – угол внутреннего трения сыпучих горных пород;  $\gamma_c$  – объемный вес сыпучих горных пород.

Тогда, исходя из вышеизложенного горизонтальные напряжения можно определить по следующей формуле

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda_c \gamma_c H. \quad (6.15)$$

По данным формулам, очевидно, что напряжения в массиве сыпучих горных пород зависят от объемного веса и угла внутреннего трения, а также от глубины, на которой рассматриваются эти напряжения.

Коэффициент бокового давления для наиболее распространенных сыпучих горных пород определялся экспериментальным путем и составил:

- для песков            0,35–0,41
- для суглинков        0,5–0,7
- для глин                0,7–0,74

## **7 МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МАССИВАХ ПОРОД ВОКРУГ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК, ПРОВОДИМЫХ ВНЕ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ**

### **7.1 Методы изучения взаимодействия пород с крепью**

Ведение горных работ в массиве пород ведет к изменению начального напряженного состояния и проявлению в них различных механических процессов.

**Механические процессы в горных породах и массивах горных пород** – механические процессы деформирования, перераспределения напряжений и разрушения.

Данные явления в массивах горных пород обычно скрыты от наблюдения. Выявление и изучение их требует проведения специальных инструментальных наблюдений и исследований.

**Проявления механических процессов в массиве горных пород** – это инструментально или визуально наблюдаемые реализации механических процессов в виде разрывов сплошности массива, подъема или оседания его, смещений, расслоений, обрушений, горных ударов, внезапных выбросов.

**Механическое состояние массива горных пород** – совокупность показателей, характеризующих деформируемость, прочность, устойчивость и степень разрушенности массива при определенном силовом воздействии.

Силы, возникающие в массиве горных пород называются **горным давлением**.

**Проявление горного давления** – механические процессы и явления, возникающие в результате действия горного давления, влияющие на горные породы и контактирующие с ними конструкции и устройства.

Крепь горных выработок определенным образом взаимодействует с окружающими породами, в результате чего образуется единая весьма сложная система, связанная с пространством и временем «крепь – массив». Напряженно-деформированное состояние элементов этой системы определяется влиянием большого числа одновременно действующих факторов, из которых основными являются напряжения массива горных пород, напряжения в крепи, а также деформационные характеристики как вмещающих пород, так и крепи.

Одним из основных методов изучения процессов взаимодействия крепи выработок с массивом вмещающих пород в реальных горно-геологических условиях является проведения специальных натурных измерений, которые включают в себя:

а) измерение деформаций контура выработки и параметров зоны неупругих деформаций вокруг выработки с целью определения размеров области пород, непосредственно оказывающей давление на крепь;

б) измерение деформаций в элементах крепи с последующим расчетом напряжений и усилий, испытываемых крепью;

в) измерение давления на крепь со стороны вмещающих пород и реакции крепи.

Деформации в элементах крепи измеряют несколькими методами:

а) электротензометрический метод;

б) метод фотоупругих покрытий.

Тензодатчики и фотоупругие покрытия приклеивают непосредственно на крепь, стремясь определить на ней места и величину напряжений. Некоторые трудности этих методов заключаются в

обеспечении надежности работы датчиков и аппаратуры в условиях повышенной влажности и загрязнения.

Изучать особенности работы анкерной крепи в различных горно-геологических условиях наиболее целесообразно при помощи тензометрической аппаратуры. С этой целью на поверхности анкеров наклеивают тензометры и при помощи тензометрической аппаратуры измеряют деформации анкера после его установки в шахте (рис. 7.1).

Для определения нагрузок на крепь других различных типов также широко используется механический стоечный динамометр.

Измерения нагрузок такими динамометрами обычно сопряжены со значительными погрешностями, которые возникают в результате различной жесткости элементов крепи и динамометров. С целью исключения этого негативного фактора разработаны многочисленные конструкции динамометрических стоек, которые полностью сохраняют формы, и характеристики стандартной крепи. Отличие данных стоек от предыдущих заключается в том, что наряду с деформациями исследуемой крепи фиксируется деформация самих стоек.

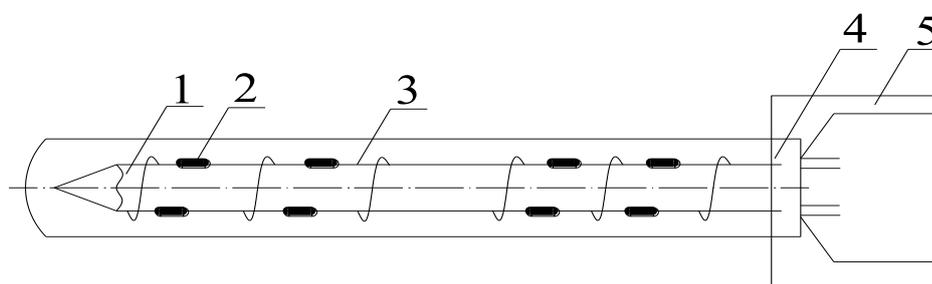


Рис. 7.1. Тензометрическая штанга: 1 – арматурный стержень, 2 – электрические тензометры, 3 – влагозащитный слой, 4 – штепсельный разъем, 5 – корпус штепсельного разъема

## 7.2 Напряженно-деформированное состояние массива пород вокруг одиночных выработок

Проведение горной выработки или строительство любого подземного сооружения вызывает изменение напряженного состояния массива пород в некоторой области вокруг них. Это происходит в результате того, что столб породы на ширину выработки лишается непосредственной опоры, и часть веса столба передается на соседние части массива. В результате этого вокруг выработки в массиве пород появляются зоны пониженных и повышенных напряжений.

**Зона повышенных напряжений** – участки массива вокруг выработки, на которых находят опору подработанные породы.

**Зона пониженных напряжений** – нижние слои подработанной толщи пород. Породы за зонами повышенных и пониженных напряжений находятся в естественном напряженном состоянии.

Следовательно, вокруг любой выработки, находящейся в зоне гравитационных сил, формируются две новые зоны напряженного состояния пород: в кровле и в почве – зона пониженных напряжений, в боках – зона повышенных напряжений (зона опорного давления) рис. 7.2.

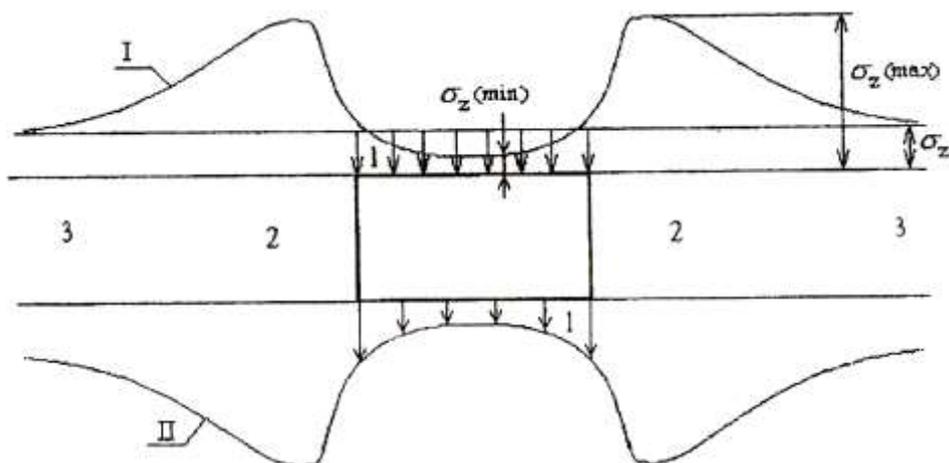


Рис. 7.2. Схема распределения напряжений в породах вокруг одиночной горной выработки: 1 – зона пониженных напряжений; 2 – зона повышенных напряжений (зона опорного давления); 3 – зона естественного напряженного состояния; I – кривая давления в породах кровли; II – то же, в породах почвы

В нетронутом массиве вертикальные напряжения, как уже известно, определяются

$$\sigma_z = \gamma H. \quad (7.1)$$

При проведении выработки в ее кровле и почве возникают растягивающие напряжения. В боках выработки, т. е. в зоне опорного давления значительно повышаются сжимающие напряжения вследствие того, что к сжимающим нагрузкам вызванным гравитационными силами вышележащих слоев складывается части веса столба пород, находящегося в кровле выработки.

Если массив рассматривается изотропной упругой средой, то вертикальные напряжения в зоне пониженных напряжений определяются

$$\sigma_{z(\min)} = K_1 \sigma_z = K_1 \gamma H, \quad (7.2)$$

а в зоне опорного давления

$$\sigma_{z(\min)} = K_2 \sigma_z K_2 \gamma H, \quad (7.3)$$

где  $K_1$  – коэффициент концентрации растягивающих напряжений;  
 $K_2$  – коэффициент концентрации сжимающих напряжений.

**Коэффициентом концентрации напряжений** называется отношение величины напряжения возникающего после проведения выработки, к величине напряжения в той же точке до проведения выработки.

В направлении осей  $x$  и  $y$  в изотропном упругом нетронутом массиве

$$\sigma_z = \sigma_y = \lambda \gamma H, \quad (7.4)$$

где  $\lambda = \frac{\nu}{1-\nu}$  – коэффициент бокового давления пород;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Следовательно, в породах в некоторой области вокруг выработки

$$\sigma_{x(max)} = \sigma_{y(max)} = \lambda \sigma_{z(max)} = K_2 \lambda \gamma H; \quad (7.5)$$

$$\sigma_{x(min)} = \sigma_{y(min)} = \lambda \sigma_{z(min)} = K_1 \lambda \gamma H. \quad (7.6)$$

На моделях из оптических активных материалов были получены значения коэффициента концентрации напряжений вокруг выработок различных форм поперечного сечения (табл. 7.1).

Из данной таблицы видно, что  $K_1$  находится в пределах 0,25–0,64;  $K_2$  – 1,3–3.

Таблица 7.1

Форма сечения выработки	Отношение ширины выработки к ее высоте	$K_1$	$K_2$
Эллиптическая	2:3; 3:2	0,0; 0,42	2,2; 3,75
Круглая	1:1	0,25	2,0
Квадратная	1:1	0,44	1,3
Сводчатая с прямыми боками	1:1; 3:2	0,35; 0,32	2,0; 3,0
Прямоугольная и трапецевидная	1:1; 1,5:1	0,64; 0,6	2,8; 3,2
Арочная с прямыми боками	1:1; 1,5:1	0,38; 0,32	2,0; 2,5
Арочная с наклонными боками	1:1; 1,5:1	0,32; 0,28	1,8; 2,0

Часть массива, где в результате проведения выработки напряжения становятся отличными от гравитационных называется **область перераспределения напряжений**. По результатам многочисленных исследований, проведенных на моделях поляризационно-оптическим способом данная область обычно не превышает  $3 \div 4B$ , где  $B$  – наибольший линейный размер поперечного сечения выработки.

Область, в которой происходит перераспределение напряжений при проходке выработки еще часто называют **зоной влияния выработки**.

В реальных условиях характер и степень перераспределения напряжений вокруг проводимых одиночных выработок зависит от следующих наиболее значимых факторов:

- а) прочность вмещающих пород;
- б) глубины расположения выработки;
- в) площади и формы сечения выработки;
- г) соотношения ширины к высоте выработки;
- д) способа ее проведения;
- е) плотности установки и механической характеристики применяемой крепи.

Классический вариант характера распределения напряжений (горного давления) в кровле (почве) проводимой выработки показан на рис. 7.3.

При проведении выработки впереди забоя сосредотачиваются и перемещаются по мере продвижения забоя повышенные напряжения, т. е. опорное давление (зона  $l_1$ ).

Рис. 7.3. Характер распределения давления в породах кровли до (1) и после проведения выработки (2)

Протяженность зоны  $l_1$  зависит от многих горногеологических и горнотехнических факторов. В большинстве случаев она составляет 2–6 м. Впереди зоны  $l_1$  породы находятся в естественном

напряженном состоянии (в состоянии  $\gamma H$ ). Непосредственно за забоем на участке  $l_2$  напряжения в породах кровли интенсивно снижаются.

Протяженность зоны  $l_2$  обычно не превышает 40 м. За пределами зоны  $l_2$  напряжения в кровле (почве, боках) стабилизируются и становятся близкими к первоначальному уровню (до проведения выработки).

Как уже было сказано раньше, в зоне пониженных напряжений породы кровли и почвы выработки испытывают в основном растягивающие напряжения, в боках – сжимающие. Поэтому, несмотря даже на то, что в кровле и почве напряжения, гораздо ниже, чем в боках. Именно в кровле и почве породы находятся в опасном деформационном состоянии. В связи с тем, что прочность пород на растяжение обычно в 8–15 раз меньше, чем на сжатие.

На интенсивность распределения напряжения на контуре проводимой выработки существенное влияние оказывают:

- а) слоистость;
- б) трещиноватость;
- в) ориентация оси проведения выработки относительно элементов нарушенности массива;
- г) упругие и прочностные характеристики вмещающих пород.

Так по данным исследований, проведенных на фотоупругих моделях, установлено, что максимальные напряжения в массиве вокруг выработок в слабых породах значительно меньше, чем в прочных. Иначе говоря с уменьшением модуля упругости материала в 5 раз концентрация напряжения в боковых стенках на контуре круглого отверстия модели уменьшается в 1,5 раза.

В слоистых породах максимальные напряжения в массиве вокруг выработки концентрируются в местах контакта слабых прослойков с более прочными. Концентрация повышенных напряжений в местах залегания прочных слоев над слабыми является в значительной мере причиной неравномерного смещения, расслоения пород по контуру выработки.

В пластовых выработках обычно пачка угля начинает интенсивно нарушаться и выдавливаться в бортах, т. к. именно борта любой выработки испытывают повышенное горное давление. В результате этого пласт угля, находящийся в бортах, испытывая на себе влияние горного давления, не выдерживает таких нагрузок и разрушается.

### 7.3 Напряженно-деформированное состояние массива пород вокруг вертикальных выработок

Оценить напряженно-деформированное состояние пород вокруг проводимых стволов с помощью натуральных исследований достаточно сложно. Поэтому современная картина распределения напряжений на контуре ствола складывается на основе ряда теоретических изысканий и лабораторных исследований, проводимых на моделях.

Наиболее популярная теоретическая оценка напряженного состояния упругого изотропного массива вокруг вертикальной выработки дана проф. С. Г. Лехницким. Им решена задача о распределении напряжений вокруг круглого отверстия в упругой невесомой пластинке, испытывающей равномерное давление (рис. 7.4), т. е.

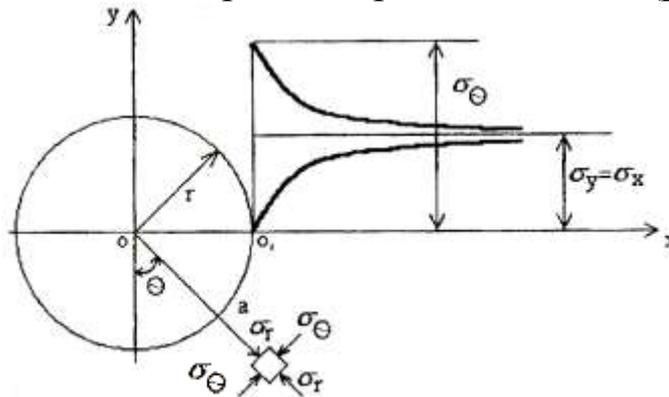


Рис. 7.4. Схема распределения напряжений в массиве пород вокруг ствола

Напряжения в массиве вертикального ствола вокруг сечения в цилиндрической системе координат (рис. 7.5) описывается  $\sigma_\theta$  выражениями

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \gamma H; \\ \sigma_r &= \lambda \gamma H \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right); \\ \sigma_\theta &= \lambda \gamma H \left( 1 + \frac{r^2}{a^2} \right); \\ \tau_{r\theta} &= \tau_{rz} = 0, \end{aligned} \tag{7.7}$$

где  $r$  – радиус ствола в проходке;  $a$  – расстояние до рассматриваемой точки в массиве от центра ствола;  $\theta$  – полярный угол.

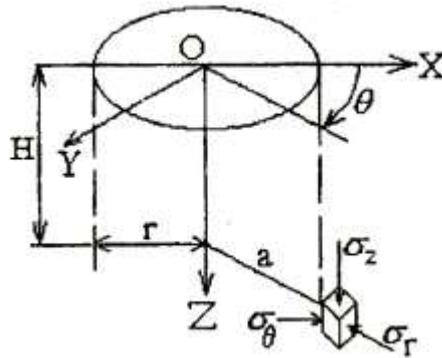


Рис. 7.5. Компоненты напряжений в массиве пород  
вблизи вертикальной выработки

Согласно выражения (7.7), если  $r = a$ , то получим  $\sigma_r = 0$ , т. е. напряжения (радиальные) на контуре ствола равны нулю, а тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta = 2\lambda\gamma H = 2\sigma_x$ . При удалении рассматриваемой точки концентрации напряжений от контура ствола  $\sigma_r$  растет до величины  $\sigma_r = \lambda\gamma H$ , т. е. до естественного напряженного состояния пород, а тангенциальные напряжения постепенно сжимаются и на расстоянии  $a = r$  становятся равными  $\sigma_\theta = \lambda\gamma H$ , т. е. напряжениям в естественных условиях залегания пород.

Согласно расчетов в реальных условиях проведения вертикальных стволов, если:  $a = 3r$  изменения напряжений (нормальных) составляет около 10 %, на расстоянии  $a = 5r$  влияние выработки на изменение напряжений составляет 4 %, а при  $a = 10r$  не более 1 %.

#### 7.4 Механизм движения пород при проведении выработки

При проведении горизонтальной наклонной и вертикальной выработки установившемся полю напряжений в окрестности контура выработки соответствует поле перемещений пород.

Максимальные перемещения породного массива направлены внутрь выработки, и их пик сосредоточен, как и максимальные напряжения, на контуре и быстро затухает вглубь массива.

Условно различают упругую и неупругую составляющие перемещений породного контура выработки. Согласно теории упругости пород, упругие перемещения пород протекают практически мгновенно и составляют лишь несколько процентов от всей величины перемещений. Неупругие перемещения более значительные во времени и механизме деформации. Продолжительность и вели-

чина смещения пород в этой фазе, зависит от их структурно-текстурной особенности, прочности глубины расположения выработки, формы и размеров поперечного сечения, срока службы.

Прочность или несущая способность пород окружающих выработку ограничены, т. е. породы могут деформироваться без разрыва сплошности только в ограниченных пределах. Поэтому следствием нового напряженно-деформированного состояния породного массива, сформировавшегося после проведения выработки, могут быть процессы разрушения, связанные с частичной или полной потерей несущей способности пород и трещинообразованием.

В зависимости от свойств пород за пределом их прочности, механические процессы, связанные с разрушением, могут реализовываться в виде пластического течения или в виде хрупкого разрушения. Хрупкое разрушение может иметь двойной характер: мгновенное развитие трещин или полное разрушение пород в некоторой области вокруг выработки. И в том и в другом случае напряжения в породах в месте разрушения или деформации падают, а максимум напряжений перемещается вглубь массива в область неразрушенных пород. Этот процесс продолжается до тех пор, пока прочность пород массива вокруг выработки не окажется большей действующих в них напряжений.

При наличии крепи в выработке механические процессы в породном массиве вокруг нее протекают совместно с крепью. В этом случае массив и крепь являются единым механизмом, от деформационных свойств и несущей способности которой зависят характер и степень распределения напряжений в приконтурной части массива. Задача крепи состоит в том, чтобы при совместной работе с массивом уменьшить его перемещение. Концентрации напряжений при этом вокруг выработки снижаются, а зоны разрушения пород (если они есть) развиваются медленнее и размеры их значительно меньше. Размеры перемещения пород работающих совместно с крепью зависят от степени податливости крепи. Жесткая крепь (монокристаллическая) значительно снижает перемещение породного массива, но зато сама вынуждена принимать большие нагрузки. Более податливые крепи испытывают меньше нагрузки, но не способны преодолевать расслоение пород и образование вывалов, нагрузка от которых также должна восприниматься конструкцией крепи.

## **7.5 Перераспределение напряжений в породных массивах**

## вокруг очистных выработок

На угольных шахтах основными очистными выработками являются лавы, а отработку пластов осуществляют с обрушением пород кровли. Сравнительно небольшая часть угольных пластов и рудных тел обрабатывается с закладкой выработанного пространства закладочными материалами.

Как и в подготовительных выработках в очистных лавах ведение работ приводит к нарушению начального напряженного состояния пород в некоторой области вокруг выработки. Разница лишь в масштабах очагов напряжений вокруг контура выработки.

Как и в подготовительной выработке, в очистной лаве по ее контуру формируются две зоны напряженного состояния пород – зона повышенных напряжений (зона опорного давления) и зона пониженных напряжений (зона разгрузки).

Интенсивность и продолжительность перераспределения напряжений в породах вокруг очистных выработок имеет более сложный характер, чем вокруг подготовительных выработок. Это объясняется тем, что очистными работами подрабатываются породные массы на значительных площадях. Например, площадь одной лавы колеблется в пределах 350–1200 м<sup>2</sup>.

Схема распределения напряжений в породах вокруг очистной выработки (лавы) по угольному пласту пологого и крутого залегания показаны на рис. 7.6

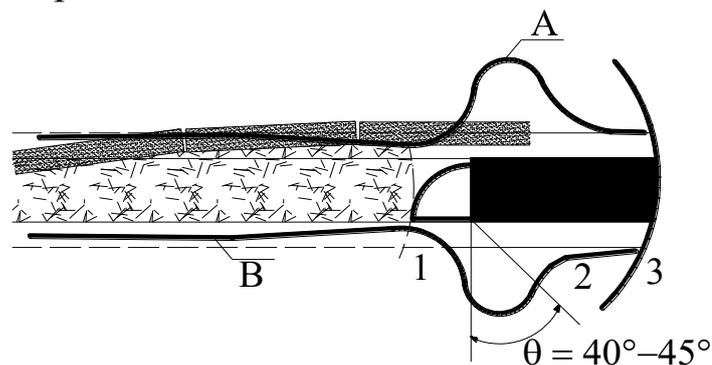


Рис. 7.6. Схема распределения напряжений вокруг очистной выработки: А – кривая давления в кровле пласта; В – тоже в почве пласта; 1 – зона разгрузки; 2 – зона опорного давления; 3 – зона начальных напряжений

**Основными горно-геологическими факторами** влияющими на характер распределения горного давления являются структура,

текстура, угол залегания, механические свойства, влажность пород, мощность пласта.

**Основными горнотехническими факторами** являются способ управления кровлей (с полным обрушением самостоятельно, принудительно или с закладкой выработанного пространства), глубине разработки, вид, плотность и механическая характеристика крепи (индивидуальная крепь, механизированы комплекс), длина очистного забоя, длина выемочного поля, системы разработки.

**Технологические факторы** – способ выемки полезного ископаемого (буровзрывной, комбайновый), скорость подвигания забоя, ширина одновременно вынимаемой полосы полезного ископаемого, форма очистного забоя.

Далее рассмотрим влияние основных факторов на геомеханические процессы в породных массивах вокруг очистных выработок.

## **8 ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ПОРОД НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ И ОСНОВНОЙ КРОВЛИ ПЛАСТОВ**

В Кузбассе подавляющее большинство пластовых месторождений полезных ископаемых составляет уголь. Кровлю угольных пластов обычно делят (исключая ложную) на непосредственную и основную.

**Непосредственная кровля** – толща пород, залегающая непосредственно над пластом.

**Основная** – толща прочных и очень прочных пород, залегающих над непосредственной кровлей или непосредственно над пластом, обрушающаяся при выемке угля на незначительной площади.

Процесс деформации пород в очистной выработке начинается с медленного прогиба кровли пласта. По мере удаления выработанного пространства от разрезной выработки (монтажной камеры) в движение приходят все большие участки подработанной толщи пород кровли и увеличивается прогиб слоев. Затем нижележащие слои определяются от вышележащих, разрушаются на отдельные пуски и глыбы и обрушаются. Этот процесс распространяется на вышележащие слои непосредственной кровли вплоть до основной кровли.

По мере удаления забоя от разрезной выработки непосредственная кровля все больше обнажается и работает аналогично плите, закрепленной на четырехстороннем контуре (по четырем сторонам выработки).

В плите развиваются деформации изгиба, которые приводят к первому обрушению непосредственной кровли. Предельный пролет первого обрушения непосредственной кровли после отхода очистной выработки от разрезной камеры называют **шагом начального ее обрушения**  $L_{н.кр}$ .

В условиях Кузбасса этот шаг обычно находится в пределах 8–15 м.

В дальнейшем процесс обрушений непосредственной кровли устанавливается. Это явление называется **шагом установившегося обрушения непосредственной кровли**  $L_{у.н.кр}$ . Как правило, последнее меньше шага начального обрушения. В условиях Кузбасса этот шаг составляет

$$L_{у.н.кр} \approx (0,4-0,5) \times L_{н.кр}. \quad (8.1)$$

В процессе разрушения породы непосредственной кровли образуют **зону интенсивного дробления**. Со временем в этой зоне происходит уплотнение, а в ряде случаев – слеживание породы. Степень уплотнения или слеживания зависит от свойств пород непосредственной кровли и толщины ее слоя. В самых нижних слоях коэффициент разрыхления составляет примерно  $K_p \approx 1,6-1,8$ , а в верхних слоя обрушившейся породы непосредственной кровли  $K_p = 1,1-1,5$ .

Высота зоны обрушения пород непосредственной кровли  $h_{н.к}$  обычно определяется по формуле

$$h_{н.к} = \frac{m}{(K_p - 1)}, \quad (8.2)$$

где  $m$  – мощность пласта;  $K_p$  – коэффициент разрыхления породы.

В процессе деформации и обрушения непосредственной кровли при подвигании очистного забоя возникает прогиб и обрушение основной кровли. До первого обрушения она работает также аналогично плите, закрепленной на четырехстороннем контуре. Пролет первого обрушения называется **шагом начального первичного обрушения кровли**. В зависимости от мощности пласта, его прочности и параметров выработки в условиях Кузбасса этот шаг составляет от 20 до 100 м.

После первичного обрушения этот процесс упорядочивается (шаг установившегося обрушения). В условиях Кузбасса этот шаг составляет 12–25 м.

$$L_{у.окр} \approx (0,4-0,5) \times L_{н.окр}. \quad (8.3)$$

В отличие от беспорядочного обрушения пород непосредственной кровли процесс обрушения основной кровли носит довольно четкий характер. В зависимости от мощности пласта основная кровля в одном случае обрушается в виде изгиба слоев (тонкослоистая), в других случаях в виде среза на короткие блоки, упорядоченно выпадающие на почву пласта.

Исходя из вышеизложенного, целесообразно уточнить понятия непосредственной и основной кровли.

**Непосредственная кровля** – это пачка пластов, которая образует зону беспорядочного обрушения.

**Основная кровля** – все остальные слои, образующие зону связного движения пород.

Обрушение должно прекратиться при условии

$$h_{n+1} > h_c, \quad (8.4)$$

где  $h_{n+1}$  – мощность слоя, ограничивающего зону интенсивного разрыхления;  $h_c$  – расстояние между задним краем основной кровли и разрушенными породами непосредственной кровли, называемые пределом свободного опускания основной кровли.

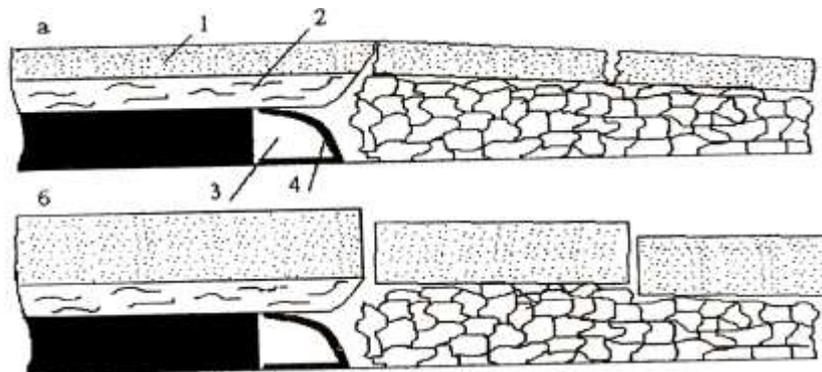


Рис. 8.1. Схема разрушения пород основной кровли пласта на блоки: а – при изгибе; б – при срезе; 1 – основная кровля; 2 – непосредственная кровля; 3 – призабойное пространство; 4 – крепь

Согласно исследованиям к легкообрушаемым породам относят кровли с мощностью 7 кратной мощности самого пласта, т. е.  $h_{н.к} / m > 7$ . К труднообрушающимся – у которых  $h_{н.к} \leq 1m$ . При  $h_{н.к} / m \geq 8-10$  породы непосредственной кровли полностью подбучивают основную кровлю. И в итоге, имея сравнительно жесткую опору в выработанном пространстве, она не обрушается, а лишь прогибается.

## 8.1 Механизм влияния опорного давления на выработку

**Опорное давление** – давление покрывающих пород и пород, зависающих на краевые части массива и целики, на закладочный массив, обрушение породы в выработанном пространстве. Иначе говоря, это давление действующее вблизи опорного контура по всему его периметру. Опорное давление определяется

$$P_{\text{оп}} = P_{\text{п}} + P_{\text{з}}, \quad (8.5)$$

где  $P_{\text{п}}$  – давление покрывающих пород массива;  $P_{\text{з}}$  – давление зависающих пород.

Наиболее значительно опорное давление проявляет себя при ведении очистных работ, так как именно отработка лавы сопровождается обнажением довольно большого пространства массива по сравнению с проведением подготовительных выработок.

На рис. 8.2 показан общий характер распределения напряжений при отработке лавы.

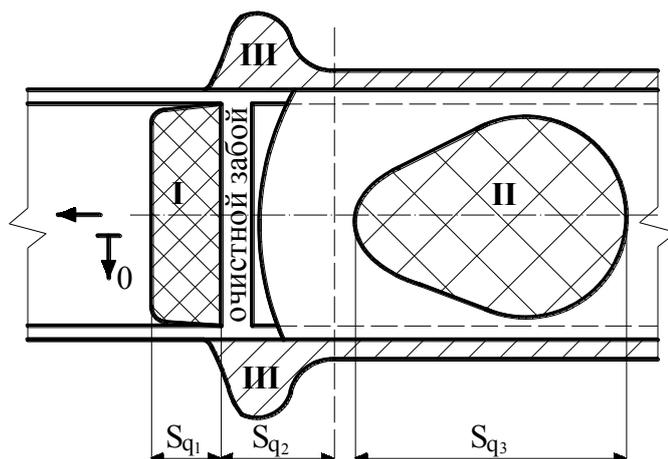


Рис. 8.2. Общий характер распределения опорного давления в плоскости

При проведении очистного забоя выделяют следующие зоны опорного давления:

I – передняя; II – задняя; III – боковые (по падению и восставанию). По характеру изменения опорного давления выделяют зоны динамических проявлений опорного давления; затухания динамических проявлений опорного давления; статического состояния или псевдостатического состояния опорного давления.

Опорное давление в передней зоне I отличается от такового в боковых зонах III, что обусловлено динамикой зависаний пород вблизи забоя. В боковых зонах на значительном расстоянии от очистного забоя динамических проявлений не существует.

Динамика проявления опорного давления в передней и боковой зонах опорного давления соответствует границам, равным  $Sq_1$  и  $Sq_2$  при практически одинаковой несущей способности и жесткости опор. Максимум опорного давления наблюдается вблизи забоя в направлении его продвижения по простиранию, падению или восстанию.

В задней зоне II динамика проявления опорного давления довольно различна и зависит от шага обрушения основной кровли, ее мощности и степени подбучивания породами непосредственной кровли, т. е. соотношения  $h_{н.к} / m$ . В дальнейшем по мере удаления от очистного забоя опорное давление в этой зоне затухает.

На рис. 8.3 показана схема распределения опорного давления (вид сбоку).

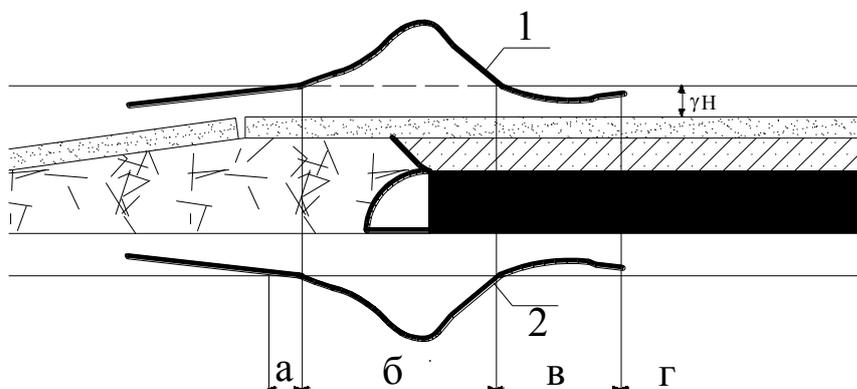


Рис. 8.3. Распределение опорного давления в зоне I:

- 1 – кривая давления в кровле;
- 2 – кривая давления в почве пласта

В передней зоне I (рис. 8.3) выделяют следующие подзоны: а – пониженных напряжений, сравнительно с  $G_z = \gamma H$ ; б – повышенных напряжений; в – вторая подзона пониженных напряжений; г – подзона напряжений, близких к  $\gamma H$ .

В приконтурной части а очистного забоя, а также в боковых зонах опорного давления пласт угля под действием опорного давления частично разрушается. В нем раскрываются трещины и другие макродефекты. В результате этого напряжения в этой зоне носят пониженный характер.

Кроме того, в призабойном пространстве часть пласта угля находится в двухосном напряженном состоянии, в то время как на большем удалении от забоя он находится в объемном напряженном состоянии. По этой причине опорное давление перемещается с

участка а на участок б. Участок б является местом концентрации напряжений.

Зоны находящиеся вблизи контура выработки и нагруженные опорным давлением называются **краевыми**.

Величина деформации пород в краевых зонах зависит от интенсивности опорного давления, механических характеристик пласта, условий на контактных поверхностях и продолжительности действия нагрузки. Последняя определяется скоростью подвигания очистного забоя.

Как уже известно, породы непосредственной и основной кровли пласта периодически зависают и обрушаются. Это приводит к периодическому изменению напряжений в заделке как со стороны забоя, так и боковых массивов пород. С увеличением консоли пласта напряжения возрастают, с обрушением консоли напряжения падают. Это приводит к волнообразному характеру проявления опорного давления (рис. 8.4).

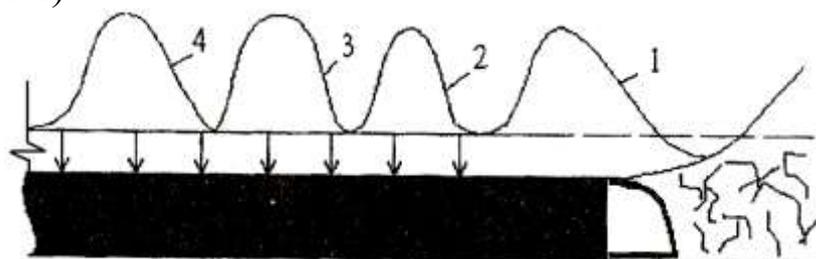


Рис. 8.4. Схема волнообразного проявления опорного давления впереди забоя лавы:

1, 2, 3, 4 – кривые опорного давления в кровле

Под действием напряжений в приконтурной части массива происходит смещение пласта угля в сторону выработанного пространства, развитие в нем трещин и его разрушение. Этот процесс носит название **отжима угля**. Ширина зоны отжима угля зависит от стандартных горно-геологических и горнотехнических факторов и колеблется в пределах от 0,3 до 3–4 м.

По данным многочисленных шахтных наблюдений протяженность зоны I опорного давления впереди забоя лавы колеблется от 10 до 250 м. Ширина боковой зоны по восстанию и падению пласта от 10 до 60 м, а позади забоя лавы от 40 до 200 м.

С увеличением глубины разработки полезного ископаемого протяженность зон I и III возрастает. Так, например, на глубине 100–150 м она составляет 15–20 м. На глубине 600–700 м, 60–80 м. Стабилизация опорного давления и формирование зоны II в выра-

ботанном пространстве происходит в основном с отставанием от забоя 70–80 м при легкообрушающихся породах, кровли, 100–120 м – при среднеобрушающихся породах и 170–200 м – при труднообрушающихся породах.

## 8.2 Устойчивость обнажений кровли по угольным пластам

В связи с тем, что кровля любой выработки, хоть и находится в зоне разгрузки, но ее породы, находятся во власти растягивающих напряжений. А, как известно, на растяжение породы работают значительно хуже, чем на сжатие. Поэтому устойчивость именно кровли выработок с пологими и наклонными пластами имеет первостепенное значение. А у выработок с крутонаклонными пластами важна устойчивость как кровли, так и почвы пласта. У выработок с такими условиями залегания пластов потеря устойчивости почвы происходит обычно в результате сползания слоев по контактам напластования с никзйо силой сцепления, т. е. при условии когда  $F_{сц} < F_{сд}$ , где  $F_{сц}$  – сила сцепления по поверхности сползания слоев;  $F_{сд}$  – сила сдвига слоев.

Устойчивость кровли пласта в очистной выработке обычно оценивается площадью и временем, в течение которого она с момента обнажения сохраняет устойчивое состояние. Устойчивость очистной выработки главным образом зависит от устойчивости пород непосредственной кровли. Эти породы, как правило, имеют слоистую структуру. Поэтому устойчивость очистной выработки при обнажении определяется главным образом устойчивостью нижнего слоя в призабойном пространстве.

Устойчивость пород кровли угольного пласта в призабойном пространстве лавы оценивается коэффициентом  $K_y$  устойчивости незакрепленной кровли

$$K_y = \frac{m_{сл} \sigma_{сж} K_s}{H \gamma K_{тр}}, \quad (8.6)$$

где  $m_{сл}$  – мощность нижнего слоя непосредственной кровли;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности породы слоя на сжатие;  $K_s$  – величина, обратная площади незакрепленного пространства кровли;  $H$  – глубина залегания кровли пласта;  $\gamma$  – средний объемный вес пласта (пород залегающих под пластом);  $K_{тр}$  – коэффициент трещинова-

тости, равный квадратному корню из общего числа трещин на  $1 \text{ м}^2$  кровли.

Согласно натурных исследований, если  $K_y < 0,8$  – кровля считается южной и обрушается сразу при обнажении. При  $K_y = 0,8-1,1$  – кровля находится в пограничном состоянии и требует закрепления вслед за выемкой угля. При  $K_y = 3-5$  – кровля устойчивая и применяется режущая крепь; а при  $K_y = 5-6$  – кровля очень устойчивая и применение режущей крепи не обязательно.

В. Д. Слесарев при определении степени устойчивости кровли лавы, кровлю рассматривал как плиту, свободно опертую или защемленную по контуру, и получил ряд формул для определения пролетов обнажений кровли, при которых она находится в различных состояниях.

Согласно этой теории существует три состояния кровли (предельные).

Первое предельное состояние характеризуется тем, что в опасном сечении растягивающие напряжения равны нулю (рис. 8.5).

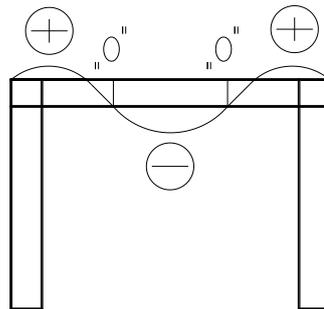


Рис. 8.5. Эпюра напряжений в кровле

Величина первого предельного пролета определяется по формулам:

для балки со свободно-опертыми концами

$$L_1 = \sqrt{\frac{4\sigma_p h}{3\gamma}}; \quad (8.7)$$

для балки с защемленными концами

$$L'_1 = \sqrt{\frac{2\sigma_p h}{\gamma}}, \quad (8.8)$$

где  $\sigma_p$  – предел прочности породы на растяжение;  $h$  – мощность слоя;  $\gamma$  – объемный вес пород.

Второе предельное состояние кровли характеризуется тем, что породы испытывают максимальные деформации без нарушения их сплошности. Второй предельный пролет для свободно-опертой и защемленной балок, определяется из выражений

$$\angle_2 = \sqrt{\frac{2\sigma_p h}{\gamma}} \quad (8.9)$$

Третье предельное состояние характеризуется распространением трещин в кровле и ее обрушением.

Этот метод позволяет лишь условно определять предельные пролеты кровли, т. к. в реальных условиях процессы нагружения деформации и обрушения кровель очистных выработок гораздо сложнее и зависят от многих горно-геологических и технических факторов.

Наибольшее распространение получили классификации устойчивости пород кровли очистных выработок, основанные на натурных исследованиях реальных процессов деформации и обрушения пород залегающих в кровле.

Одна из них разработана А. А. Борисовым:

- неустойчивые – без применения крепи породы кровли обрушаются вслед за подвиганием забоя;
- слабоустойчивые – в призабойной зоне шириной до 1 м устойчивы в течение 2–3 часов;
- среднеустойчивые – в призабойной зоне шириной до 2 м устойчивы в течение 1 суток;
- устойчивые – в призабойной зоне шириной до 2 м устойчивы в течение 2 суток;
- весьма устойчивые – в призабойной зоне шириной до 5–6 м устойчивы в течение обладают длительной устойчивостью.

## **9 СДВИЖЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Проведение горных работ нарушает естественное состояние массивов горных пород, в результате чего последние выходят из равновесия, деформируются и перемещаются. Эти процессы, как правило, захватывают всю толщу массива, включая поверхность. Породы на земной поверхности также претерпевают деформации и перемещения.

Перемещение и деформирование пород в результате равновесия под влиянием горных выработок или других естественных процессов называют **сдвижением горных пород и земной поверхности**. Сочетание форм сдвижения и изменения состояния толщи в результате ее подработки называют **характером сдвижения**.

Часть породного массива, подвергшуюся сдвижению под влиянием горных выработок, называют **областью сдвижения горных пород**, а соответствующую часть земной поверхности – **мульдой сдвижения**.

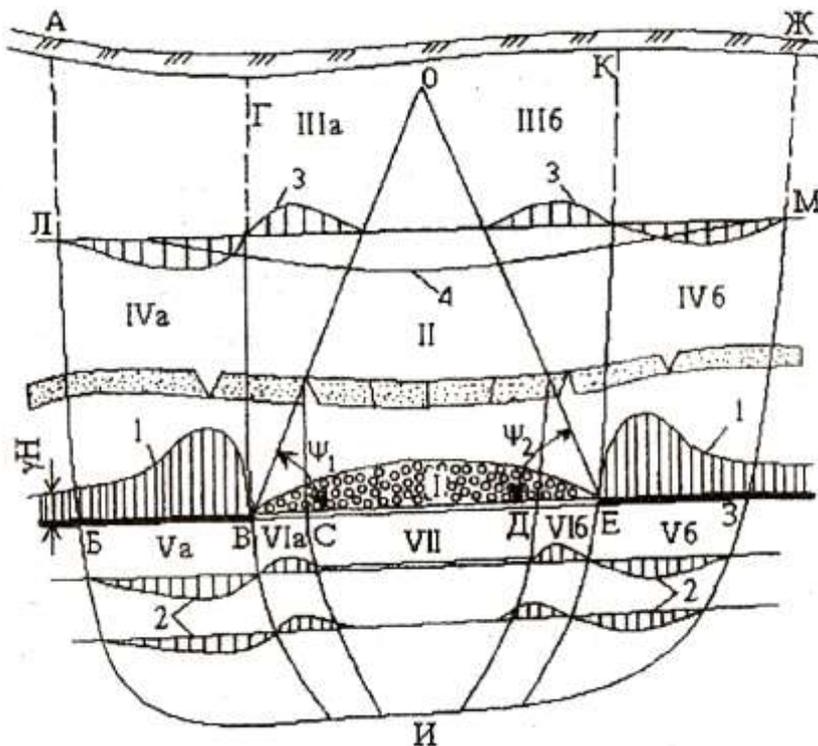


Рис. 9.1. Схема движения пород по ВНИМИ (вкрест простиранию) при выемке угля пласта и перераспределения горного давления около очистной выработки

Сдвижение пород начинается обычно с прогиба кровли выработки пройденной по пласту. По мере увеличения площади выработанного пространства прогиб породы растет, в сдвижение вовлекается все большее число слоев, происходит сдвиг пород по плоскостям напластования, в толще появляются секущие трещины и трещины расслоения, при этом слои непосредственной кровли разбиваются на отдельные блоки и обрушаются. Под влиянием горных работ в движение приходят и породы почвы, испытывающие поднятие. Поднятие почвы и выдавливание ее в сторону выработано-

го пространства объясняется снятием с нее нагрузки от вышележащих пород и перераспределением напряжений в массиве пород.

Зона I обрушения или интенсивного дробления пород кровли пласта находится непосредственно над очистной выработкой. При достаточно больших размерах площади обнаженной кровли высота этой зоны по нормам к напластованию составляет обычно 3-6 мощностей разрабатываемого пласта. Она зависит главным образом от вынимаемой мощности пласта, структурно-текстурных элементов строения и механических свойств кровли.

Зона II полных сдвижений или шарнирно-блочного перемещения пород располагается над зоной I, если же последняя отсутствует, то непосредственно над выработанным пространством. По мере подвигания очистного забоя и с течением времени слои пород в этой зоне оседают, теряя связь с остальным массивом. Совместно с породами зоны I они постепенно уплотняются и образуют ядро свода сдвижений.

Зачастую зоны I и II объединяют в одну под названием **зона полных сдвижений (разгрузки) пород**. Эта зона ограничена линиями, проведенными от границ выработки под углами  $\psi_1$  – по падению,  $\psi_2$  – по восстанию,  $\psi_3$  – по простиранию (углами полных сдвижений или обрушений). При пологом залегании пластов эти углы имеют примерное значение 65–70°.

Зоны IIIа и IIIб характеризуются наибольшей неравномерностью вертикального опускания пород. В них происходит наибольший изгиб слоев с образованием полостей и раскрытых трещин. Прогиб слоев горных пород здесь можно представить как прогиб большой пачки плит, имеющих небольшую контактную связь между собой.

В зонах IVа и IVб происходит сжатие пород и формирование опорного давления. Здесь слои преимущественно прогибаются плавно без разрыва сплошности. Опорное давление тут создается вследствие давления пластов над выработанным пространством и передачи части веса зависающих пород в качестве дополнительной нагрузки на краевые части массива.

Величина опорного давления зависит в основном от:

- а) строения и прочностных свойств пород;
- б) глубины залегания выработки;
- в) размеров площади очистной выработки.

Зона опорного давления распространяется от границы сдвижения подработанного массива ЛБ и МЗ и линий ВТ и ЕК.

При сдвигении пород в зонах IVa и IVб прилегающих к земной поверхности образуются трещины, разрывы, выходящие на земную поверхность вблизи границы мульды сдвижения.

В почве пласта под одной опорного давления IVa и IVб образуется другая зона опорного давления Va и Vб. В следствии этого под очистным выработанным пространством в зоне VII породы расширяются и поднимаются в сторону выработки, т. е. существенно разгружаются.

В зонах VIa и VIб происходит неравномерное поднятие пород с разрывом их сплошности и раскрытием трещин.

Внешняя огибающая АЛБИЗМЖ образует контур области влияния горной выработки. Часть массива в области влияния очистной выработки расположенную над пластом называют **подработанной**, под пластом – **надработанной**.

В процессе сдвижения происходит изменение объема пород: в зоне повышенного (опорного) давления породы уплотняются, а в зоне обрушения – разрыхляются. Разрыхленная порода, увеличиваясь в объеме, заполняет выработанное пространство и создает подпор вышележащим слоям.

Различают полную и неполную подработку. По полной подработке породы зоны полных сдвижений пород (зона II, рис. 9.2) достигают земной поверхности с образованием плоского дна мульды сдвижения, при неполной подработке зона полных сдвижений расположена внутри подработанных пород.

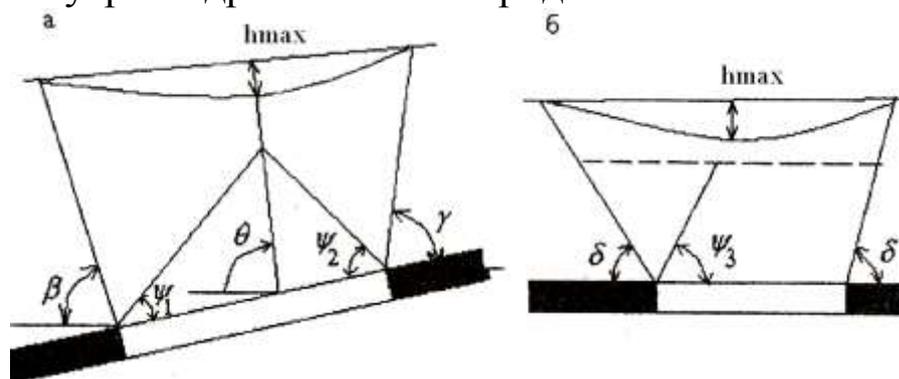


Рис. 9.2. Углы сдвижения пород при неполной подработке земной поверхности (а, б – разрезы вкрест и по простиранию):

$\beta, \gamma, \delta$  – граничные углы сдвижений пород;

$\psi_1, \psi_2, \psi_3$  – углы полных сдвижений пород;

$\eta_{max}$  – максимальное оседание земной поверхности

Углы  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  – также еще называют углами разрывов – это внешние относительно выработанного пространства углы, образованные на вертикальных разрезах по главным сечениям мульды сдвига горизонтальными линиями и линиями, соединяющими границу выработки с наиболее удаленной от центра мульды сдвига трещиной.

Углы разрывов, как правило, на  $5-10^\circ$  круче углов сдвига, но не более  $90^\circ$ . Угол максимальных оседаний  $\theta$  образован горизонтальной плоскостью и линией, соединяющей середину выемочного пространства и максимального оседания на дневной поверхности ( $\eta_{\max}$ ). При полной подработке и управлении кровлей полным обрушением  $\eta_{\max}$  по Кузбассу достигает  $(0,7-0,75) \times m$  ( $m$  – мощность отрабатываемого пласта).

### **9.1 Механизм образования провала на земной поверхности при ведении очистных работ**

В зависимости от условий разработки деформации горных пород и земной поверхности носят плавный или же сосредоточенный характер. Иногда на земной поверхности образуются провалы. В условиях пологого и горизонтального залегания пластов провалы, как правило, возникают при отработке мощных залежей полезного ископаемого на небольших глубинах.

Провалы часто образуются при ликвидации горных выработок самообрушением. Глубина разработки пластов полезного ископаемого, при которой наиболее часто образуются провалы, определяется

$$H \leq 8\sqrt{S}, \quad (9.1)$$

где  $S$  – площадь сечения выработки в черне,  $\text{м}^2$ .

При расположении выработок на глубине  $H \geq 16\sqrt{S}$  провалы практически не образуются. Вероятность образования провалов на глубинах  $8\sqrt{S} \leq H \leq 16\sqrt{S}$  зависит от степени заполнения выработки вмещающими породами на момент обрушения ее кровли.

При камерно целиковой системе разработки полезных ископаемых провал на земной поверхности образуется при выполнении следующих условий:

- размеры выработанного пространства, не поддерживаемого целиками должны превысить предельные значения;
- суммарная выемочная мощность залежей должна быть достаточно большой, а глубина их залегания – достаточно малой,

чтобы не произошла забутовка выработанного пространства обрушенными породами.

Ликвидация хотя бы одного из этих условий исключит возникновение провала на земной поверхности.

Если не выполнено первое условие, процесс обрушения налегающей толщи завершится образованием свода естественного равновесия.

Вышележащие породы зависнут и будут формировать зону опорного давления на целики и массив, окружающие зону обрушения.

Если размеры выработанного пространства достигнут предельных значений, то происходит полная посадка налегающей толщи до поверхности, при которой ликвидируется все залегания.

Максимально возможная высота зоны обрушения  $h_0$  при которой возникает эффект забутовки пустоты обрушенными породами определяется по формуле

$$h_0 = \sum h / (k_p - 1), \quad (9.2)$$

где  $\sum h$  – суммарная выемочная мощность погашаемых выработанных пространств на перекрывающихся залежах;  $k_p$  – коэффициент разрыхления пород при обрушении.

Если глубина залегания выработанного пространства  $H$  превышает максимально возможную высоту зоны обрушения  $h_0$ , то процесс обрушения заканчивается в налегающей толще пород забутовкой пустоты обрушенными породами. У земной поверхности остается необрушенной потолочина мощностью  $h_{\text{пот}}$

$$h_{\text{пот}} = H - h_0. \quad (9.3)$$

Обрушение налегающей толщи развивается до земной поверхности и на ней образуется провал, если глубина залегания выработанного пространства  $H$  меньше максимально возможной высоты зоны обрушения  $h_0$ . Глубина провала в этом случае  $h_{\text{пр}}$  определяется

$$h_{\text{пр}} = \sum h - H(k_p - 1). \quad (9.4)$$

Как видно из формул, коэффициент разрыхления пород при обрушении является важным параметром пород, определяющим максимально возможную высоту зоны обрушения  $h_0$ , при которой пустота в массиве заполняется обрушенными породами, и возможность образования провала на земной поверхности маловероятна.

## 9.2 Общая продолжительность процесса сдвижения

**Общей продолжительностью** процесс сдвижения принято называть период, в течение которого земная поверхность над выработанным пространством находится в состоянии сдвижения. Она делится на три стадии: начальную, интенсивную и затухания.

**Начальная стадия** занимает около 30 % общей продолжительности процесса сдвижения. Оседание земной поверхности на этом этапе составляет до  $0,15 \eta_{\max}$ .

**Интенсивная стадия** начинается при подходе забоя непосредственно под рассматриваемую точку.

Она занимает около 40 % общей продолжительности процесса сдвижения. За этот период земная поверхность оседает до  $0,7 \eta_{\max}$ .

**Стадия затухания** охватывает период, равный примерно 30 % общей продолжительности процесса сдвижения. Заканчивается эта стадия, как правило, при отходе забоя от рассматриваемой точки на расстоянии  $(1,2-1,4) H$ , где  $H$  – глубина выработки от поверхности.

Из общей продолжительности процесса сдвижения обычно выделяют **период опасных деформаций**, т. е. период, в течении которого наиболее вероятно появление повреждений в подрабатываемых объектах.

Понятие «период опасных деформаций» является условным, поскольку оно не увязано с конструктивными и эксплуатационными особенностями подрабатываемых объектов.

В зависимости от способа определения различают сдвижения и деформации: фактические, измеренные, ожидаемые и расчетные.

**Фактические деформации** – сдвижения и деформации которые в действительности потерпели горные породы и земная поверхность под влиянием очистных работ.

**Измеренные деформации** – деформации и сдвижения полученные в результате натурных наблюдений.

**Ожидаемые деформации** – определяют путем предварительного расчета по формулам, таблицам и графикам.

Общая продолжительность процесса сдвижения пород и период опасных деформаций подработанных пород очистными работами зависят от глубины разработки, системы разработки, параметров очистной выработки, мощности и угла залегания пласта полезного

ископаемого, строения и механических свойств пород, скорости подвигания очистного забоя.

Общую продолжительность  $T_{\text{общ}}$  процесса сдвижения горных пород определяют из выражения

$$T_{\text{общ}} = \frac{k_T H}{U}, \quad (9.5)$$

где  $H$  – глубина горных работ, м;  $U$  – скорость подвигания очистного забоя, м/мес.;  $k_T$  – коэффициент, зависящий от совокупности свойств массива горных пород, для условий Кузбасса  $k_T = 0,9–1,5$  (определяется опытным путем).

Период опасных деформаций  $t_{\text{оп}}$  также устанавливают опытным путем и определяют из выражения

$$t_{\text{оп}} = k_{\text{оп}} \cdot T_{\text{общ}}, \quad (9.6)$$

где  $k_{\text{оп}}$  – коэффициент, зависящий от значения ожидаемого максимального оседания земной поверхности  $\eta_{\text{max}}$  и угла залегания пластов.

Для условий Кузбасса  $k_{\text{оп}} \approx 0,3–0,5$ .

## 10 ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НАДРАБОТКЕ И ПОДРАБОТКЕ ПЛАСТОВ

### 10.1 Общие положения

В пределах месторождения, шахтного поля, пласты чаще залегают свитами, т. е. группами на небольшом расстоянии друг от друга. В условиях шахт Кузбасса среднее расстояние между пластами составляет 30–40 м.

Существенно сближенные пласты независимо друг от друга отрабатывать нельзя, т. к. это может привести к оседанию части из них под влиянием выработанного пространства, или раздавливанию их под действием опорного давления отрабатываемого пласта.

Пласты называют **сближенными**, если независимая разработка их невозможна, или если разработка одного из них осложняет разработку другого.

Различают два основных вида взаимовлияния при разработке сближенных пластов:

– первый – при нисходящем порядке отработки, когда верхний пласт влияет на нижележащий под ним;

– второй – при восходящем порядке, когда нижележащий пласт влияет на вышележащий. При первом виде отработка верхнего пласта влияет на нижележащий пласт, или говорят, что верхним пластом **надрабатывают** нижележащий пласт.

В тех случаях, когда горные работы по нижележащему пласту влияют на вышележащий пласт, то говорят, что последний подрабатывается первым.

При разработке свит пластов часто ограничиваются нахождением такого взаимного расположения выработок, когда суммарные деформации земной поверхности от очистных выработок в нескольких пластах не превышает деформаций, возникающих от каждой из этих выработок, т. е. когда не происходит существенного однозначного суммирования деформаций одновременно. Это требование выполняется в тех случаях, если граница влияния на земную поверхность каждой последующей очистной выработки совпадает с точкой максимальной деформации от предыдущей выработки (рис. 10.1).

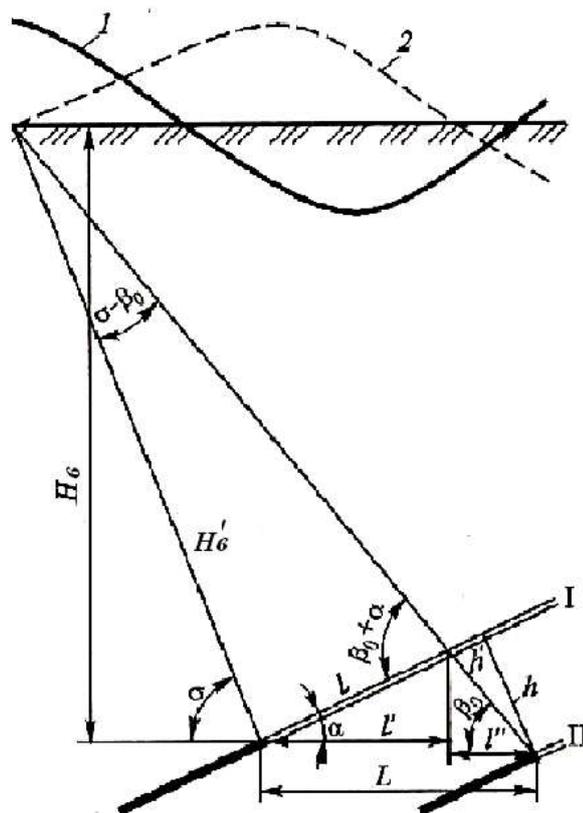


Рис. 10.1. Взаимное расположение выработок, исключающее накопление однозначных деформаций: 1, 2 – графики горизонтальных деформаций обусловленных проведением работ по пласту I и возникающих при разработке пласта II

Ориентироваться можно на любой вид деформаций, но обычно за основу берут горизонтальные деформации, т. к. они являются наиболее опасными для большинства зданий и сооружений, находящихся на поверхности.

Определение взаимного положения очистных выработок производят графически, с помощью номограмм или аналитически. В последнем случае определяют оптимальное горизонтальное расстояние  $L$  между нижними границами очистных выработок в соседних пластах по формулам:

для низходящего порядка отработки

$$L = H_{\sigma} \sin(\sigma - \rho_0) + h \cos \beta_0; \quad (10.1)$$

для восходящего порядка отработки

$$L = \frac{H_{\text{н}} \sin(\sigma - \beta_0) \cos \alpha}{\sin \beta_0 \sin(\sigma + \alpha)} + h \frac{\cos \sigma}{\sin(\sigma + \alpha)}, \quad (10.2)$$

где  $H_{\text{н}}, H_{\sigma}$  – глубины залегания нижней границы очистной выработки соответственно в верхнем и нижнем из рассматриваемых пластов;  $\beta_0$  – граничный угол со стороны падения пласта;  $\alpha$  – угол падения пластов;  $\sigma$  – угол максимального влияния, определяемый по данным натуральных наблюдений;  $h$  – расстояние между пластами по нормам.

При отработке свит крутопадающих пластов, вскрываемых вертикальными стволами и квершлагами, расстояние между пластами, при котором не будет существенного однозначного наложения деформаций, определяется

$$L = H(\text{ctg} \beta_0 - \text{ctg} \sigma), \quad (10.3)$$

где  $H$  – глубина расположения откаточного квершлага.

## **10.2 Механические процессы в надрабатываемых пластах и породных толщах**

Как правило, разработке надрабатывающего пласта происходит перераспределение напряжений и деформационные процессы в породах кровли и почвы и краевых частях пласта, граничащих с выработанным пространством.

В окрестностях очистной выработки надрабатывающего пласта в надрабатываемом пласте и породах формируются три зоны: I – зона сжатия пласта и пород, т. е. зона повышенных напряжений; II – зона разгрузки пласта и пород; III – зона уплотнения пород (рис. 10.2)

Под влиянием опорного давления впереди забоя по надрабатываемому пласту (зона I) в надрабатываемой толще происходит сжатие пласта и пород. Деформация пород междупластья происходит с расслоением. Влияние опорного давления при надработке распространяется на расстояние до 120 м вглубь массива от надрабатываемого пласта.

С увеличением мощности и прочности пород междупластья глубина распространения влияния надработки довольно интенсивно уменьшается.

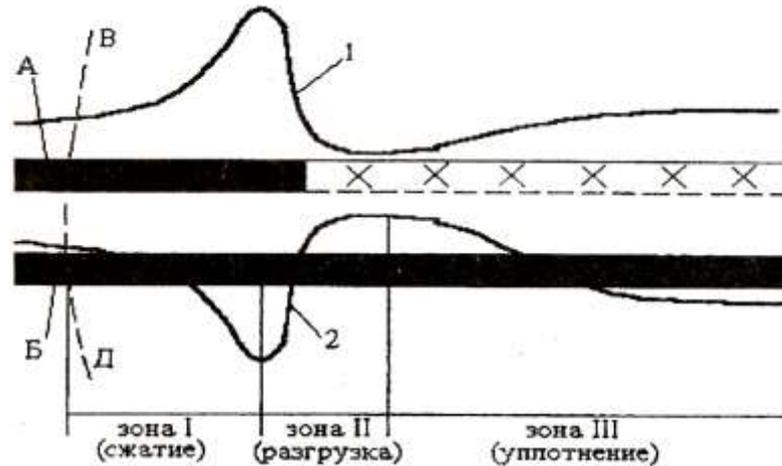


Рис. 10.2. Схема деформаций толщи пород и пласта при надработке: А – надрабатывающий пласт;

Б – надрабатываемый пласт; ВД – граница влияния опорного давления; Г – междупластье; 1 – кривая давления в породах надрабатываемого пласта; 2 – кривая давления надрабатываемого пласта

Затухание деформаций  $\varepsilon$  расширения пород в зоне разгрузки на расстоянии  $h$  от выработки в сторону ее кровли и почвы происходит

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\frac{c}{a}h}, \quad (10.4)$$

где  $\varepsilon_0$  – относительная деформация упругого расширения пород на уровне кровли и почвы выработки;  $c$  – коэффициент, зависящий от механических свойств пород массива;  $a$  – ширина выработки.

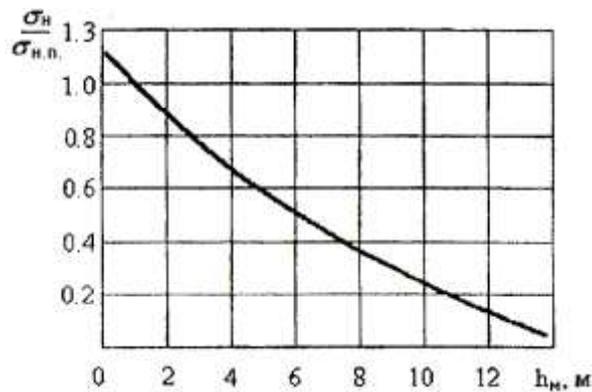


Рис. 10.3. Изменение концентрации напряжений в междупластье при надработке:  $\sigma_n$ ;  $\sigma_{н.п.}$  – напряжение естественно в надработанной толще пород и надрабатываемом пласте

Расстояние  $l_{уп}$  начина с которого позади очистного забоя по надрабатываемому пласту происходит уплотнение надработанной толщи массива (зона III) определяется по формуле

$$l_{уп} = kH \operatorname{ctg} \psi_3, \quad (10.5)$$

где  $H$  – глубина разработки;  $\psi_3$  – угол полных сдвижений пород по простиранию пласта;  $k$  – коэффициент, учитывающий неполную надработку.

В условиях Кузбасса  $k = 1,13-1,15$ ;  $\psi_3 = 53-56^\circ$ .

### 10.3 Механические процессы в подрабатываемых пластах и породных толщах

По характеру деформации в подрабатываемых пластах выделяют три зоны: I – зона сжатия; II – зона разгрузки; III – зона уплотнения (рис. 10.4).

Протяженность зоны опорного давления подрабатываемой очистной выработки (кривая 2) составляет от 15 до 80 м и более. Попадая в зону опорного давления подрабатываемый пласт и породы испытывают нагружение и происходит их сжатие (зона I).

Зона разгрузки начинается обычно с 5–8 м впереди забоя подрабатываемой очистной выработки и продолжается до 30–40 м за ним. Наиболее интенсивная разгрузка пород происходит на участке до 10–15 м за забоем надрабатываемой лавы.

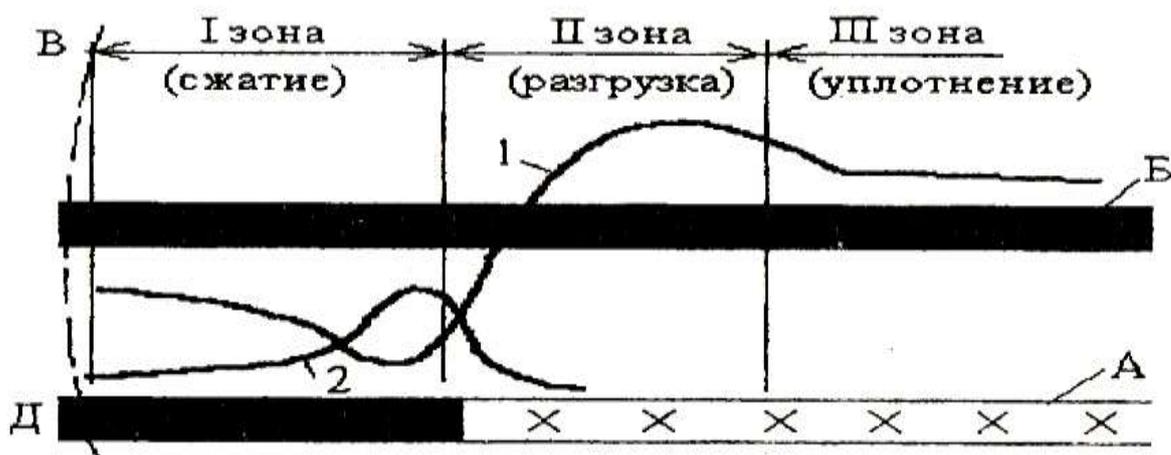


Рис. 10.4. Схема деформаций пород при подработке:  
 А – подрабатываемый пласт; Б – подрабатываемый пласт;  
 ВД – граница влияния опорного давления; 1 – кривая деформации подработанной толщи пород и пласта; 2 – кривая опорного давления в породах кровли подрабатываемого пласта

Зона разгрузки начинается обычно с 5–8 м впереди забоя подрабатываемой очистной выработки и продолжается до 30–40 м за ним. Наиболее интенсивная разгрузка пород происходит на участке до 10–15 м за забоем надрабатываемой лавы.

Протяженность зоны разгрузки обычно возрастает с увеличением шага обрушения основной кровли и уменьшением мощности непосредственной кровли подрабатываемого пласта.

В зоне уплотнения (зона III) подрабатываемого очистного забоя вертикальные напряжения близки к первоначальным, т. е.  $\sigma \rightarrow \gamma_{\text{ср}} H$ . Однако, поскольку пласт и породы испытали разломы и разбиты многочисленными новыми трещинами, прежнее напряженное состояние в них практически полностью не может восстановиться.

Таким образом, режим нагружения подрабатываемого пласта сложнее, чем надрабатываемого, так как последний не испытывает разломов и перемещений в зонах разгрузки и уплотнения обрушенных пород кровли.

При подработке пластов рассчитывается два параметра: минимальная мощность пород междупластья  $h_{\text{min}}$ , допускающую подработку, и минимально допустимое опережение очистного забоя по подрабатываемому пласту.

Подработка угольных пластов, обрабатываемых с полным обрушением кровли, допускается при выполнении условий:

– пологих и наклонных пластов

$$h_M > 6m; \quad (10.5)$$

– крутонаклонных и крупных пластов

$$h_M > h_3 \sin \alpha (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \alpha), \quad (10.6)$$

где  $h_M$  – мощность междупластья;  $m$  – мощность подрабатывающего пласта;  $h_3$  – высота этажа;  $\alpha$  – угол падения пластов;  $\beta$  – угол, ограничивающий зону трещиноватости пород в кровле, принимаемый по экспериментальным данным.

Минимальное опережение очистного забоя по подрабатываемому пласту забоя следует принимать таким, чтобы очистные работы на подработанном пласте велись в зоне, где процесс сдвижения подработанных пород прекратился (рис. 10.5).

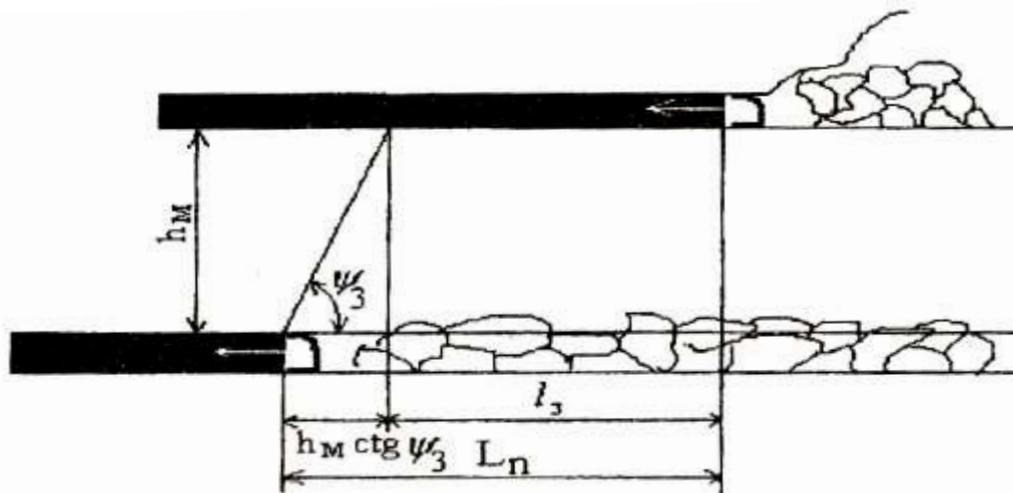


Рис. 10.5. Схема расчета опережений между забоями по подрабатываемому и подрабатывающему пласту

Опережение  $L_{\Pi}$  в этих условиях рекомендуется определять из выражения

$$L_{\Pi} = h_M \operatorname{ctg} \psi_3 + l_3, \quad (10.7)$$

где  $\psi_3$  – угол полного сдвижения подработанных пород по простиранию пласта, град;  $l_3$  – запас опережения, м. Обычно величину опережения  $L_{\Pi}$  забоя принимают равной

$$L_{\Pi} \geq 3l_{\text{ш}}, \quad (10.8)$$

где  $l_{\text{ш}}$  – шаг обрушения основной кровли подрабатываемого пласта, м.

С увеличением угла падения пласта высота зоны обрушения кровли пласта существенно снижается, а с увеличением мощности пласта возрастает.

Высота зоны трещинообразования и полных сдвижений пород, расположенная над зоной обрушения составляет от 11 до 30-кратной мощности разрабатываемого пласта. На практике она составляет в кровле 20–30 м.

Протяженность зоны опорного давления в подрабатываемом пласте впереди движущегося подрабатывающего забоя лавы для условий разработки пологих и наклонных пластов может быть определена из выражения

$$L_{\text{оп}} = 7,5 + \frac{5H/h_{\text{м}}}{m} - 0,07 \left( \frac{H/h_{\text{м}}}{m} \right)^2, \quad (10.9)$$

а протяженность зоны повышенного давления позади забоя подрабатывающей толщи лавы – из выражения

$$L_{\text{пз}} = (0,7h_{\text{м}} - 0,02h_{\text{м}}^2) K_{\text{л}} K_{\text{с}}, \quad (10.10)$$

где  $H$  – глубина очистных работ;  $h_{\text{м}}$  – мощность междупластья;  $m$  – мощность подрабатываемого пласта;  $K_{\text{л}}$  – коэффициент, учитывающий литологический состав пород в подрабатываемой толще;  $K_{\text{с}}$  – коэффициент, учитывающий состояние подрабатываемого очистного забоя.

#### **10.4 Напряженно-деформированное состояние пород вокруг взаимовлияющих подготовительных выработок**

В породах вокруг взаимовлияющих выработок распределение напряжений имеет более сложный характер и протекает в значительно большей области массива по сравнению с одиночной выработкой. На распределение напряжений вокруг взаимовлияющих выработок большое влияние оказывает степень их сближенности, т. е. размеры целика между ними, вид выработок, расположение друг относительно друга (параллельно, одна под другой и др.) и порядок проведения их во времени (одновременно или с разрывом во времени).

При разных площадях сечения наибольшие напряжения концентрируются вблизи меньшей выработки.

Из анализа картины изохром моделей следует, что коэффициент концентрации максимальных касательных напряжений на внешнем боку маленькой выработки равен 5,5, на внешнем боку большой выработки – 4,8, в центре целика – 4.

Из рис. 10.6 видно, что если на границе большого выреза концентрация напряжений составила  $2,7 \gamma H$ , то на границе меньшего –  $4,25 \gamma H$ .

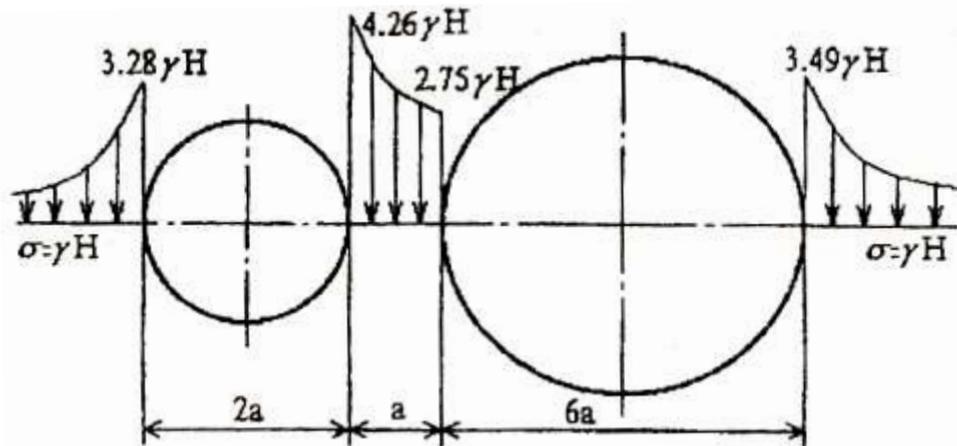


Рис. 10.6. Распределение напряжений вокруг сближенных горизонтальных выработок различной площади и сечения

Из данного рисунка видно, что если на границе большего выреза концентрация напряжений составила  $2,75 \gamma H$ , то на границе меньшего  $4,25 \gamma H$ .

Как правило, область интенсивного распределения напряжений вокруг выработок составляет 1,2–1,5 ширины выработки. На расстоянии от контура выработок более утроенной ширины выработки влияние их на напряженное состояние массива почти не наблюдается.

Аналогично распределение напряжений происходит в породах почвы выработок.

При расположении взаимовлияющих выработок находящихся на одном уровне, т. е. в одном гравитационном поле начальных напряжений концентрация напряжений на их контуре как видно из рис. 10.7 возрастает.

Если же выработки расположить одну над другой, то концентрация напряжений уменьшается (даже по сравнению с одиночной выработкой), т. е. взаимовлияющие выработки, расположенные таким образом, друг друга разгружают, рис. 10.8.

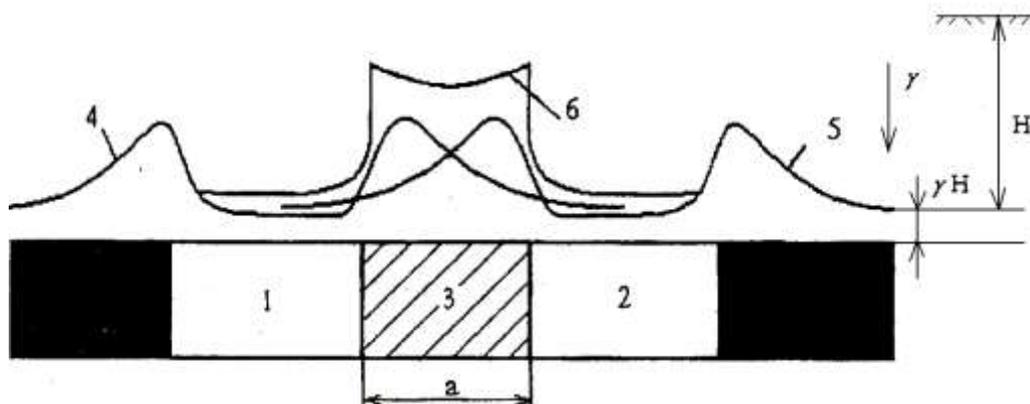


Рис. 10.7. Схема формирования напряжений в породах кровли взаимодействующих выработок: 1, 2 – выработки; 3 – целик между выработками; 4 – кривая давления в кровле выработки 1; 5 – то же в кровле выработки 2; 6 – суммарная кривая давления

Взаимное влияние выработок и воздействие опорного давления одной выработки на опорное давление другой, пройденной рядов не произойдет при условии

$$a > a_1 + a_2, \quad (10.11)$$

где  $a_1$  – протяженность зона опорного давления в окрестности 1-й выработки;  $a_2$  – протяженность зона опорного давления в окрестности 2-й выработки.

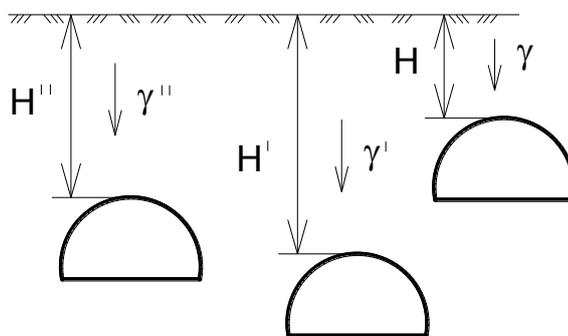


Рис. 10.8. Схема расположения выработок

## 11 ФОРМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ СДВИЖЕНИЯ ПОРОД ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ

По мере оснащения горной промышленности новыми мощными технологиями, средствами все большее число месторождений отрабатывают открытым способом. Глубина открытой разработки отдельных месторождений в нашей стране превысила 300 м.

Деформация пород в карьере начинается обычно сразу же после образования открытой (обнаженной поверхности) и происходит практически в течение всего срока службы.

Различают непрерывные и циклические процессы.

К **непрерывным**, относят оседания, осыпи, оплывания.

К **циклическим**, т. е. идущим с переменной скоростью – оползни, обрушения и т. д.

Наибольшую опасность представляют оползни обрушения (циклические процессы).

**Оползень** – медленное скользящее движение (смещение) масс горных пород, слагающих откос (или его основание). Оползни проявляют себя в толще пород с пластическими прослойками, слоями и слабыми контактами.

Оползни происходят при углах наклона бортов и откосов уступов положе  $25\text{--}35^\circ$ .

Развитие оползня обычно сопровождается образованием трещин отрыва, размеры которых характеризуются глубиной их распространения, шириной раскрытия и протяженностью. По скорости развития трещин можно судить о ходе развивающихся деформаций.

Оползневый цикл складывается из процесса перехода массива пород, прилегающих к откосу, из равновесного состояния в неравновесное и затем в новое равновесное состояние.

**Обрушение** – быстрое смещение породных масс или блоков и пачек пород, слагающих откос, сопровождающееся дроблением смещающейся части массива. Наклон поверхности отрыва превышает угол внутреннего трения пород. После преодоления сил сцепления отрывающийся массив не может удержаться на этой поверхности силами трения и перемещается вниз к подошве откоса. Активная стадия обрушения протекает практически мгновенно, что представляет большую опасность для людей и механизмов, работающих на нижележащих уступах. Как правило, обрушения возникают при углах откосов, превышающих  $25\text{--}35^\circ$ .

**Оплывина** – перемещение в виде потока насыщенных водой до текучего состояния некоторых разновидностей песчано-глинистых пород. Оплывины растекаются по площадям уступов под углом  $4\text{--}6^\circ$  и менее.

**Осыпь** – разрушение и смещение при поверхностной части крутых откосов. Осыпи вызывают выполаживание общего угла наклона борта карьера за счет уменьшения площадок уступов.

**Просадка** – неравномерное вертикальное опускание площадок уступов и поверхности отвалов, сложенных высокопористыми рыхлыми породами естественной и нарушенной структуры под влиянием собственного веса, внешних пригрузок, увлажнения атмосферными осадками, динамических нагрузок и т. д.

### **11.1 Основные способы управления устойчивостью открытых горных выработок**

Основные способы управления устойчивостью карьеров и уступов являются:

– обоснование и выбор параметров (углов откосов, высоты и др.), бортов и уступов, обеспечивающих их устойчивость на протяжении всего срока эксплуатации;

– расположение внешних вскрывающих выработок в прочных устойчивых горных породах;

– выбор направления и скорости подвигания фронта горных работ в карьерном поеле, исходя из структурно-текстурных особенностей строения вмещающих пород и полезного ископаемого;

– выбор способа и технологии взрывных и очистных работ и типов выемочного и транспортного оборудования, исключающих нарушение устойчивости бортов и уступов;

– обоснование и выбор последовательности отработки карьерного поля с учетом сложности его строения, степени ослабленности пород массива трещинами, другими макродефектами и исходя из устойчивости откосов;

– укрепление откосов;

– осушение обводненных массивов горных пород, защита карьеров от подземных и поверхностных вод.

Устойчивость бортов и уступов карьеров на протяжении всего времени их функционирования обеспечивается при выполнении условий

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{ф}} &< \alpha_{\text{пр}}; \\ H_{\text{ф}} &< H_{\text{пр}}, \end{aligned} \tag{11.1}$$

где  $\alpha_{\text{ф}}$  и  $\alpha_{\text{пр}}$  – угол откоса борта соответственно фактический и предельный;  $H_{\text{ф}}$  и  $H_{\text{пр}}$  – высота борта соответственно фактическая и предельная.

При разработке вскрышных пород без применения буровзрывных работ высоту рабочего уступа целесообразно принимать равной высоте черпанья экскаватора.

Существенное повышение устойчивости рабочего борта обеспечивается при направлении подвигания очистного забоя по падению слоев, трещин и других значительных поверхностей ослабления в породных массивах и полезном ископаемом.

## 11.2 Напряженно-деформированное состояние горных пород в бортах и уступах карьеров

Массив пород, ненарушенный горными работами находится в объемном напряженном состоянии. Вертикальные напряжения:

$$\sigma_z = \gamma H, \quad (11.2)$$

а горизонтальные напряжения

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H = \lambda \gamma H. \quad (11.3)$$

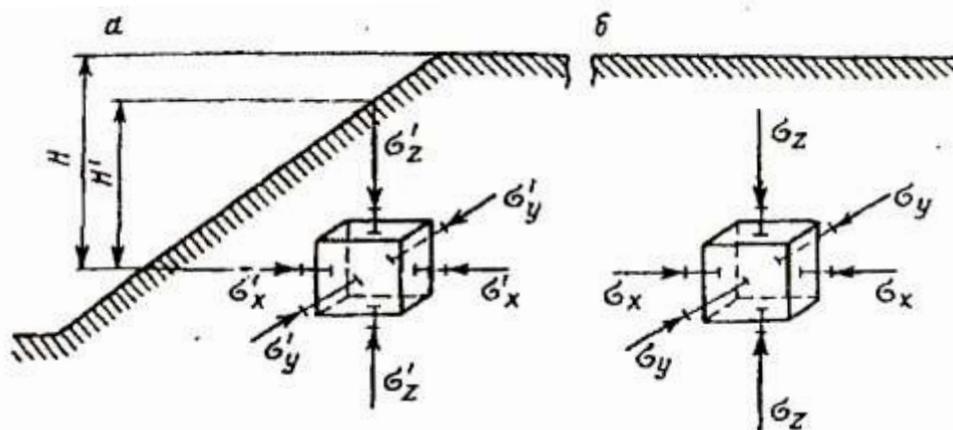


Рис. 11.1. Схема напряженного состояния пород массива:  
а – вблизи откоса; б – естественного

Как подземным способом, так и разработка полезных ископаемых открытым способом нарушает начальное напряженное состояние массива в некоторой области вокруг подготовительных, очистных и других выработок карьера и приводит к возникновению нового поля напряжений в связи с выемкой пород.

Состояние пород в приконтурной части массива нарушенного бортами и уступами при плоском в плане откосе характеризуется напряжениями (рис.11.1, а) определяемыми по формулам

$$\sigma'_x = \frac{E \varepsilon'_x}{1-\nu} + \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H; \quad (11.4)$$

$$\sigma'_{y'} = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H; \quad (11.5)$$

$$\sigma'_{z'} = \gamma H', \quad (11.6)$$

где  $E$  – модуль упругости пород;  $\varepsilon_x$  – относительная деформация пород в направлении оси  $X$  (в сторону откоса);  $\nu$  – коэффициент Пуассона пород;  $H$  – глубина залегания пород откоса.

При изучении распределения напряжений на модели вертикального уступа, полученного поляризационно-оптическим способом, получается следующая картина, из рис. 11.2 видно, что по высоте уступа максимальная концентрация напряжений находится в основании уступа.

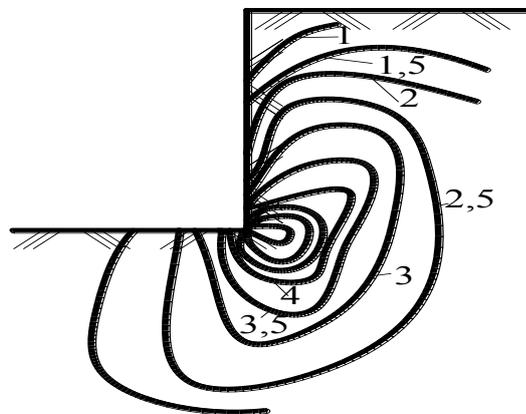


Рис. 11.2. Распределения изохром в краевой части массива

Устойчивость карьерных откосов оценивают обычно коэффициентом устойчивости откосов

$$K_y = \frac{\sum F_{уд}}{\sum F_{сд}}, \quad (11.7)$$

где  $\sum F_{уд}$  – сумма удерживающих сил;  $\sum F_{сд}$  – сумма сдвигающих сил.

**Сдвигающие силы** – силы, действующие вдоль поверхности скольжения. Они обусловлены гравитациями и внешними нагрузками на откос (горный транспорт).

**Удерживающие силы** – действуют вдоль поверхности скольжения и обусловлены сопротивлением горных пород деформированию, сдвигу под действием сдвигающих сил.

Для массива горных пород в бортах, уступах открытых выработок, находящихся в допредельном напряженном деформирован-

ном состоянии  $K_y > 1$ , в предельном –  $K_y = 1$ , в запредельном –  $K_y < 1$ .

При плоской поверхности скольжения коэффициент устойчивости определяют

$$K_y = \frac{f_{\text{тр}} F_{\text{н}} + CL}{F_{\text{сд}}}, \quad (11.8)$$

при криволинейной поверхности скольжения

$$K_y = \frac{f_{\text{тр}} \sum F_{\text{н},i} + \sum l_i c_i}{\sum F_{\text{сд},i}}, \quad (11.9)$$

где  $F_{\text{н}}, F_{\text{н},i}$  – нормальная сила, действующая по всей поверхности скольжения длиной  $L$  (плоской) и  $i$ -го блока длиной  $l$  (криволинейной) шириной  $1 \text{ м}^2$ ;  $F_{\text{сд}}, F_{\text{сд},i}$  – сила сдвига вдоль поверхности скольжения длиной соответственно  $L$  и  $l_i$ ;  $C$  и  $c_i$  – сцепление пород на поверхности длиной соответственно  $L$  и  $l_i$ ;  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения пород.

К основным **горно-геологическим факторам**, влияющим на процессы перераспределения напряжений и деформаций пород массивов в бортах открытых горных работ относят строение месторождения, их структурно-текстурные особенности, тектоническую нарушенность, физико-механические свойства, гидрогеологические условия месторождения.

К основным горнотехническим факторам относят параметры откосов (высоту и угол откоса борта уступа, ориентировку горных выработок в карьере относительно поверхности ослабления массива, наличие на бортах и уступах дополнительных нагрузок в виде тяжелого горнотранспортного оборудования и навалов горной массы, эффективность дренажных работ и их своевременность, продолжительность функционирования откосов, время стояния откосов без обновления их поверхности).

Основными технологическими факторами являются способ разрушения и выемки вскрышных пород и полезного ископаемого, скорость подвигания работ.



## 12 ГОРНЫЕ УДАРЫ

### 12.1 Общие сведения о горных ударах

В настоящее время в Кузбассе разрабатывается 201 угольный пласт, угрожаемый по горным ударам, и 19 пластов, опасных по горным ударам, на которых зарегистрированы 145 горных ударов.

Горные удары происходят на различной глубине от земной поверхности, как в очистных, так и в подготовительных забоях. Имеются сведения о случаях горных ударов при ведении горных работ открытым способом.

В результате горных ударов разрушению подвергаются как отдельные участки выработок, так и целые комплексы выработок, приводящие к остановке горнодобывающих предприятий. Так, при некоторых горных ударах на соляных шахтах разрушениям подвергались до 3 млн м<sup>2</sup>. В результате серии горных ударов на шахте «Усинская» в Кузбассе были разрушены пять вскрывающих уклонов на протяжении 400 м. Шахта была выведена из строя действующих на 2 года.

Месторождения подразделяются на неопасные и склонные к горным ударам.

Месторождения, склонные к горным ударам, в свою очередь, подразделяются на угрожаемые и опасные.

К угрожаемым горным ударам относятся месторождения, на которых при ведении горных работ в выработках наблюдаются явления шелушения и интенсивного заколообразования, если происходили горные удары на соседней шахте в пределах той же разности пород с аналогичными геологическими условиями; в пределах, которых имеются породы и руды с высокими упругими свойствами и склонные к хрупкому разрушению под нагрузкой, а также достаточно высокими натяжениями в нетронутом массиве.

К опасным по горным ударам относится часть угрожаемого месторождения, начиная с глубины, на которой появились горные удары.

### 12.2 Природа и механизм горных ударов

Под **горным ударом** понимается явление хрупкого разрушения предельно-напряженной части массива пород (угля, руды, соли) в зоне влияния горных выработок, возникающее в условиях, когда после достижения максимальной нагрузки на разрушаемый эле-

мент приток энергии в него из окружающих пород превышает его затраты на саморазрушение.

Для достижения ровного удара необходимыми и достаточными условиями являются:

– действующие в массиве напряжения должны превышать прочность пород на обнажении;

– жесткость массива, окружающего очаг горного удара, должна быть ниже жесткости пород в очаге, или, приток энергии в вероятный очаг горного удара должен быть выше способности его поглотить ее.

В математическом виде условия возникновения горного удара можно записать в виде:

**первое** – условие достижения предельной нагрузки

$$P_M \geq P_{II}, \quad 12.1$$

где  $P_M$  – максимальная нагрузка, возникающая на краевую часть массива;  $P_{II}$  – предельная нагрузка, которую способна выдерживать рассматриваемая краевая часть массива.

**второе** – условие неустойчивости, или превышение притока энергии над его поглощением

$$\frac{M}{E} \frac{a_n}{h} \geq \mu_0, \quad (12.2)$$

где  $M$  – модуль склада разрушаемого материала (угля, руды, соли, породы), характеризующий скорость падения абсолютный величины напряжений;  $E$  – модуль упругости окружающих пород;  $a_n$  – размер зоны, в которой деформация происходит на падающем участке;  $2h$  – минимальный размер обнажения;  $\mu_0$  – критическое сочетание параметров, зависящее от рассматриваемых условий ( $\mu_0 = 1$  – для подготовительной выработки,  $\mu_0 = 0,73$  – для очистной выработки).

Ликвидация одного из условий исключает возможность возникновения горного удара.

Горные удары происходят при определенных сочетаниях геологических и горнотехнических условий.

К наиболее существенным горно-геологическим факторам относятся:

– высокая прочность полезного ископаемого и вмещающих пород;  
– склонность горной породы (угля, руды) к упругому деформированию и хрупкому разрушению;

– наличие в кровле и почве полезного ископаемого мощных прочных слоев пород;

– большую относительную глубину ведения горных работ;

– сильную тектоническую нарушенность месторождения.

К наиболее существенным горнотехническим факторам относятся:

– ведение горных работ с оставлением целиков;

– изрезанность обрабатываемого участка большим числом подготовительных и нарезных выработок;

– ведение работ под целиками, оставленными на смежных пластах или жилах;

– ведение горных работ встречными забоями, выемку сильно напряженных целиков;

– дополнительные импульсные пригрузки, вызываемые взрывными работами;

– применение камерных и камерно-столбовых систем разработки.

Горный удар в своем развитии проходит несколько стадий:

– стадию, предшествующую горному удару, когда горная порода достигает такого напряженно-деформированного состояния, при котором становится возможным переход отдельных ее участков в предельное состояние;

– стадию потери устойчивости, при которой вместе разрушения реализуется условие мягкого нагружения;

– стадию распространения волн динамического разрушения – стадию спонтанного разрастания очага разрушения и его затухания.

Механизм горного удара наиболее удачно описывается на основании схему хрупкого разрушения (рис. 12.1).

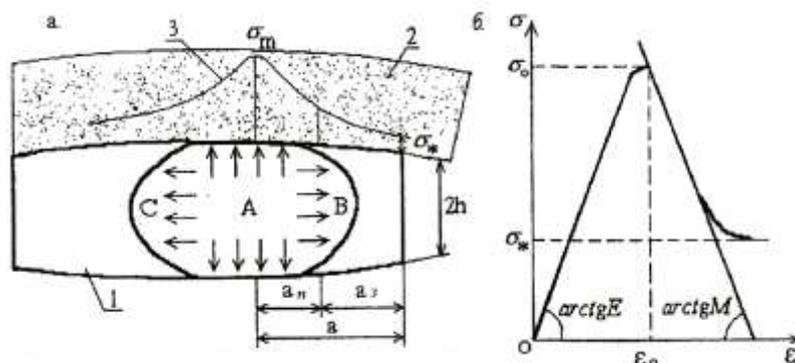


Рис. 12.1. Диаграмма «напряжение – деформация» для хрупких горных пород

Хрупкое разрушение полезного ископаемого или породы носит характер ценной реакции. В зоне А находящейся в критическом состоянии, при появлении трещин-разрывов концентрация напряжений вокруг нее приводит к разрушениям материалов вблизи зоны. Разрушение материала в зоне А сопровождается переходом потенциальной энергии этой зоны в кинетическую, следствием чего является выброс материала в выработку (зона В) и удар в сторону массива (зона С), кровли и почвы.

В процессе горного удара энергия различных элементов массива горных пород изменяется и перераспределяется между ними в соответствии с законом сохранения энергии.

Баланс энергии представляется равенством

$$W_M + (-\Delta \mathcal{E}) = W_p + W_{\text{б}} + W_c + \Delta K, \quad (12.3)$$

где  $W_M$  – энергия, заключающаяся в разрушенном материале;  $W_p$  – энергия, расходуемая на разрушение пород;  $W_{\text{б}}$  – энергия, поглощаемая боковыми породами вблизи мест разрушения;  $W_c$  – энергия, расходуемая на сейсмические колебания;  $\Delta K$  – энергия, расходуемая на придание кинетической энергии кускам разрушенного материала;  $(-\Delta \mathcal{E})$  – энергия, поступающая из вмещающих пород.

### 12.3 Классификация горных ударов

Горные удары по силе и характеру проявления подразделяются на собственно горные удары, горно-геологические удары, микроудары, толчки и стреляния.

**Собственно горный удар** – мгновенное хрупкое разрушение целика или краевой части массива, проявляющееся в виде выброса угля, руды или породы в подземные выработки с нарушением крепи, смещением машин, механизмов. Удар сопровождается резким звуком, сильным сотрясением горного массива, образованием пыли и воздушной волны.

**Горно-геологический удар** – мгновенное разрушение породы (руды, угля) в глубине массива, проявляющееся в виде толчка, вызывающее хрупкое разрушение в выработках и целиках в форме горного удара. Сопровождается сильным сотрясением массива, резким звуком, образованием пыли и воздушной волной. Определяется с помощью сейсмостанций, построенных на месторождениях.

**Микроудар** – проявляется в виде хрупкого разрушения угля, руды или породы с выбросом в горные выработки без нарушения

технологического процесса, сопровождается звуком, сотрясением массива и образованием пыли.

**Толчок** – проявляется в виде хрупкого разрушения угля, руды, породы в глубине массива без выброса в горную выработку и сопровождается звуком, сотрясание массива образованием пыли.

**Стреляние** – отскакивание от массива линзовидных и с острыми краями пластин различных размеров, сопровождаемое резким звуком.

К внешним склонностям массива к удароопасности относятся интенсивное заколообразование и шелушение пород.

**Интенсивное заколообразование** – возникновение заколов вслед за их оборкой. Оно происходит по ненарушенному массиву, не связано с его видимой трещиноватостью (слоистостью, сланцеватостью) и сопровождается звуком. При этом образуются от обнажения плиты, по форме повторяющие контур выработки.

**Шелушение** – возникновение разрушения породы по контуру выработки на отдельные пластины, имеющие чаще всего чечевицеобразную форму с заостренными краями.

В классификации предложенной комитетом по энергетике Европейской экономической комиссией (ЕЭК) в 1994 году подразделение динамических явлений производится по их энергетическому балансу. В классификации выделяются три класса явлений:

– горные удары – динамические явления, в баланс энергии которых входят энергия, накопленная самим разрушающимся элементом горного массива, и энергия, накопленная окружающими породами;

– выбросы газа – динамические явления, в баланс энергий которых входят упругая энергия угля, пород и газа. Имеется в виду, что послойное разрушение угля происходит под совместным воздействием горного и газового давлений, а разрушенный материал выносится за счет энергии расширяющегося газа;

– горно-тектонические явления – динамические явления, в формировании которых, кроме указанных выше видов энергии, участвует энергия сейсмических волн, выделяющаяся при толчкообразном деформировании горного массива.

Существует классификация горных ударов по энергетическому признаку – количеству сейсмической энергии, выделяющейся при ударе. По энергетическому признаку выделяют пять классов горных ударов.

Таблица 12.1

Класс горного удара	Сейсмическая энергия, Дж	Уровень сейсмичности в эпицентре, балл
1. Микроудары (стреляния, толчки)	$< 10$	$< 1$
2. Слабые	$10-10^2$	1–2
3. Средние	$10^2-10^4$	2–3,5
4. Сильные	$10^4-10^7$	3,5–5
5. Катастрофические	$> 10^7$	$> 5$

Под катастрофическими горными ударами понимают удары, при которых происходит спонтанное, в форме цепной реакции, разрушение ряда целиков, завал выработок в пределах целого участка или горизонта.

### 12.4 Прогноз горных ударов

Научный прогноз горных ударов предусматривает осуществление мероприятий, направленных на:

- установление удароопасности месторождений;
- региональный прогноз удароопасности в пределах шахтного поля;
- прогноз степени удароопасности участков угольной промышленности, рудного и породного массивов.

На этапе становления удароопасности месторождения оценка склонности горных пород к хрупкому разрушению осуществляется в лабораторных условиях или натуральных условиях с использованием следующих коэффициентов

$$K_1 = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_n}, \quad (12.4)$$

и

$$K_2 = \frac{E}{M},$$

где  $\varepsilon_y$  – упругая деформация;  $\varepsilon_n$  – полная относительная деформация;  $E$  – модуль упругости;  $M$  – модуль спада.

Если  $K_1 > 0,7$  и  $K_2 < 1$  порода является хрупкой и удароопасной.

Напряженное состояние пород в нетронутом массиве на стадии геологоразведочных работ определяется методом дискования керна. По толщине дисков по геологоразведочным скважинам на участке интенсивного дискования керна определяют действующие в массиве

напряжения. Месторождение относится к склонным к горным ударам, если уровень напряженности  $\sigma_{н.м} > \sigma_{сж}$  превышает 0,8, где  $\sigma_{н.м}$  – напряжения в нетронутом массиве,  $\sigma_{сж}$  – предел прочности горных пород на одноосное сжатие.

Региональный прогноз включает в себя:

- выявление блочной структуры горного массива в районе расположения месторождения по данным геоморфологии с выделением тектонических напряжений в зонах;
- установление динамики взаимодействия по тектонофизическим и геологическим данным;
- оценку удароопасности массива и его участков по структурному анализу.

Геодинамическое районирование дополняется системой контроля горного давления (СКТД), которая предполагает создание сети сейсмических пунктов, которые в свою очередь выявляют в пределах шахтного поля опасные по горным ударам зоны. Региональный прогноз удароопасности по данным СКТД включает:

- регистрацию количества сейсмических явлений, определение их координат и сейсмическую энергию;
- составление карт сейсмической активности, совмещенных с планами горных работ;
- определение зон, опасных по горным ударам.

Прогноз степени удароопасности отдельных участков массива пород вокруг выработок в настоящее время производится по соотношению величины нагрузки в максимуме опорного давления и расстояния до максимума от обнажения. По степени опасности участки горного массива вокруг выработки разделяют на две категории: «ОПАСНО» и «НЕОПАСНО».

Категория «ОПАСНО» соответствует напряженному состоянию массива в приконтурной части выработки, при котором может произойти горный удар. Такой участок выработки должен быть приведен в неудароопасное состояние. До этого ведение горных работ здесь запрещено.

Категория «НЕОПАСНО» соответствует неудароопасному состоянию и не требует проведения противоударных мероприятий.

Основными методами при прогнозе степени удароопасности на угольных шахтах признан метод выхода буровой мелочи, а на рудных шахтах – метод дискования кернов.

Для оценки удароопасности массива по основным методам существуют следующие номограммы.

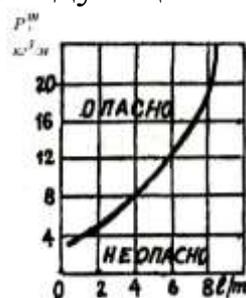


Рис. 12.2. По выходу буровой мелочи:  $P^M$  – выход буровой мелочи;  $l$  – расстояние от устья скважин до максимума опорного давления, м;  $m$  – мощность пласта, м

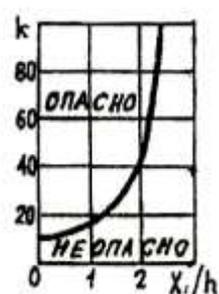


Рис. 12.3. По дискованию керна:  $k$  – число дисков керна с одного метра скважины в зоне максимальных напряжений;  $x_1$  – расстояние до зоны максимума опорного давления;  $h$  – высота выработки

## 13 ВНЕЗАПНЫЕ ВЫБРОСЫ ГОРНЫХ ПОРОД И ГАЗА

### 13.1 Условия возникновения внезапных выбросов

**Внезапный выброс** – газодинамическое явление, представляющее собой быстрое разрушение краевой части массива с выделением большого количества газа.

Газы угольных месторождений подразделяются на газы воздушного происхождения – углекислый газ, азот и инертные газы, проникающие в угольные пласты из атмосферы; и газы метаморфизма угля – метан, гомологи метана, водород, сероводород.

В недрах угольных месторождений газовая фаза не находится в состоянии покоя, газы метаморфизма угля и радиоактивного распада перемещаются из глубины недр вверх к земной поверхности, а газы воздушного происхождения и биохимического процесса – в обратном направлении.

Наибольшую опасность представляет метан ( $\text{CH}_4$ ) – газ без цвета, вкуса и запаха. Температура воспламенения метана 650–850 °С. Метан химически инертен.

В угле метан находится в трех агрегатных состояниях:

- газообразном – свободный газ, заполняющий объем угольных пор и трещин;
- жидком – сорбированный или связанный метан на поверхности угольных пор и в промежутках между макромолекулами;

– твердом – газогидратные соединения метана с водой в условиях многолетней мерзлоты.

### 13.2 Энергия внезапных выбросов

С глубиной погружения угольных пластов растет давление заключенного в них метана и соответственно повышается их метаносность. Давление изменяется почти по прямой линии, МПа

$$P = 0,01(H - H_0), \quad (13.1)$$

где  $H, H_0$  – исследуемая глубина погружения пласта и глубина зоны метанового выветривания, м.

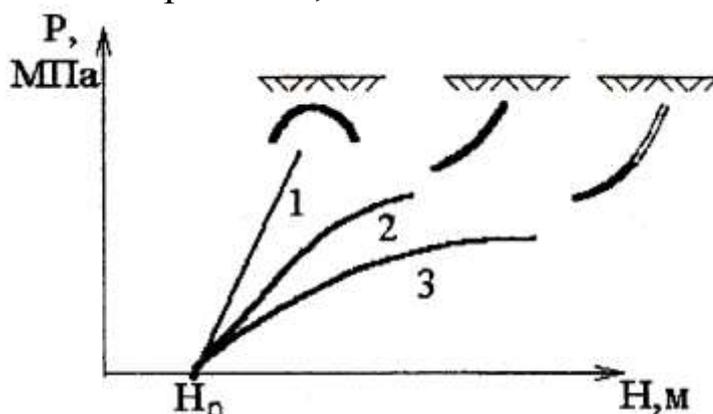


Рис. 13.1. Зависимость изменения давления метана от глубины: 1 – антиклиналь; 2, 3 – отработанный и неотработанный пласт многоклинального залегания

### 13.3 Классификация выбросов

Газовыделение в горную выработку бывает обыкновенное, суфлярное и внезапное. Опасность представляет внезапное выделение, которое подразделяется на:

- внезапные высыпания (обрушения) угля с повышенным газовыделением;
- внезапные выдавливания угля с повышенным газовыделением;
- внезапные разрушения пород почвы (кровли) с выносом метана и угля;
- внезапные выбросы угля и газа;
- внезапные выбросы породы и газа.

Внезапное высыпание (обрушение) угля с повышенным газовыделением представляет собой разрушение пород под действием собственного веса и частично под давлением газа нависающей при-

забойной части угольного массива, сопровождающееся загазированием выработки.

Внезапное выдавливание угля с повышенным газовыделением представляет собой быстропротекающий процесс отжима угля горными и газовыми давлениями из призабойной части пласта в выработку.

Внезапное разрушение пород почвы (кровли) с выносом метана и угля быстропротекающее разрушение пород почвы (кровли) выработки с интенсивным выделением газа.

Внезапный выброс угля и газа представляет собой быстропротекающий лавинообразный процесс разрушения угольного массива горным и газовым давлением и отброс тонкоизмельченного угля – «бешеной муки» газом.

Внезапный выброс породы и газа представляет собой явление, возникающее в песчаниках при взрывных работах за пределами непосредственного воздействия ВВ и характеризующееся быстроразвивающимся разрушением массива с отбросом породы и выделением газа.

В калийных рудниках газодинамические явления подразделяются на:

- газовыделения;
- выбросы соли и газа;
- обрушения пород и кровли;
- явления комбинированного типа.

Внезапный выброс соли и газа происходит из кровли забоя, боков и почвы выработки и представляет собой быстрый лавинообразный процесс выноса разрушенной породы с выделением газа в течение весьма короткого промежутка времени (от долей до нескольких секунд).

По интенсивности выбросы подразделяются на три типа:

- малой (до 1 т);
- средней (до 100 т);
- большой (более 100 т).

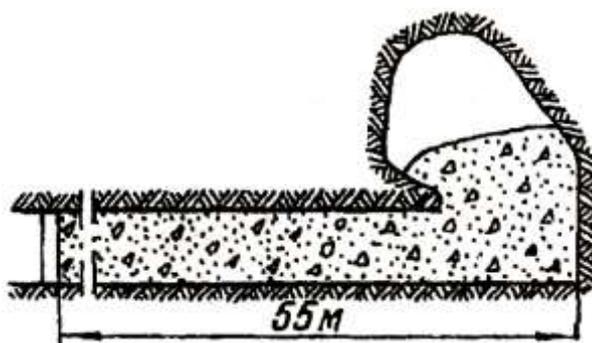


Рис. 13.2. Внезапный выброс соли и газа

Обрушение соляных пород происходит из кровли очистных и подготовительных выработок, является следствием проявления горного давления, может вызваться и взрывными работами. Этому явлению предшествует погиб кровли, потрескивание пород.

Полости вывала имеют сводчатую или трапециевидную форму. Обрушенная порода представлена обычно большими отдельными блоками и не отбрасывается от места обрушения.

Явление комбинированного типа происходит, как правило, в кровли горных выработок, когда обрушение соляных пород мощностью от нескольких десятков сантиметров до метра может вызвать внезапное обнажение выбросоопасных пород.

Газовыделение, обычное явление, происходит из кровли, почвы, забоя и боков выработки при ведении взрывных работ.

#### **13.4 Природа, механизм и баланс энергии внезапных выбросов угля и газа**

Возникновение и развитие всех газодинамических явлений обуславливается сочетанием основных геологических факторов:

- давление газа;
- горное давление;
- характеристики пласта и вмещающих пород;
- свойства угля.

Под влиянием этих факторов формируются силы, стремящиеся нарушить равновесное состояние угольного массива и силы, препятствующие развитию внезапного выброса. Активные силы – это силы газового и горного давления, пассивные – сопротивление угля отрыву.

Увеличение вероятности газодинамических проявлений зависит от следующих горнотехнических условий:

- глубина разработки;
- размер выработки;
- скорость и равномерность подвигания очистного забоя.

Механизм формирования и развития внезапного выброса угля и газа упрощенно можно представить следующим образом. По мере подвигания забоя раскрываются параллельные ему трещины. По ним из пласта выходит метан и давит на перемычку из угля между забоем и трещиной. Если перемычка не выдерживает, она взламывается по периметру, разрушается и отбрасывается в выработку. Затем взламывается вторая перемычка, третья и т. д. Этот процесс прекращается, когда полость выброса доходит до прочного угля.

Процесс выброса продолжается от нескольких секунд до двух минут с образованием полостей в угольном пласте, размер которых достигает нескольких тысяч квадратных метров.

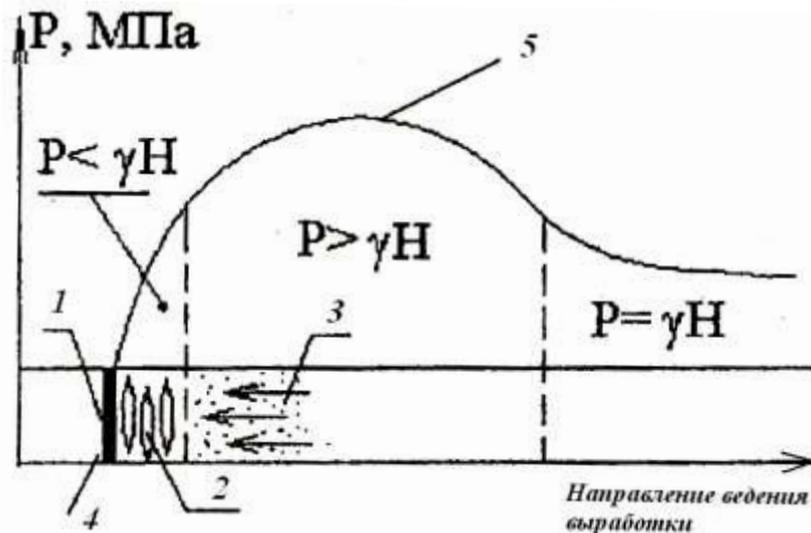


Рис. 13.3. Схема формирования и развития внезапного выброса угля и газа: 1 – забой; 2 – газонаполненные трещины; 3 – свободный метан; 4 – перемычка из угля; 5 – кривая горного давления;  $P$  – горное давление;  $\gamma$  – объемный вес вышележащих пород;  $H$  – глубина расположения выработки

Баланс энергии при внезапном выбросе угля и газа можно представить следующим равенством

$$W_{\Gamma} + W_{\text{M}} + W_{\text{П}} = W_{\text{р}} + W_{\text{к}} + W_{\text{б}} + W_{\text{с}}, \quad (13.2)$$

где  $W_{\Gamma}$  – энергия расширения газа;  $W_{\text{M}}$  – энергия упругих деформаций разрушаемого материала;  $W_{\text{П}}$  – энергия окружающих пород;

$W_p$  – энергия разрушения;  $W_k$  – кинетическая энергия разлета кусков;  $W_6$  – энергия, поглощаемая боковыми породами;  $W_c$  – энергия, расходуемая на сейсмические колебания (около 10 %).

Левая часть равенства характеризует выделяющуюся энергию, правая – ее поглощение.

### **13.5 Прогноз внезапных выбросов угля и газа.**

#### **Классификация**

По степени опасности угольные пласты подразделяют на:

- опасные;
- угрожаемые;
- неопасные.

К выбросоопасным углям относят пласты в пределах шахтного поля, на которых произошел внезапный выброс, или выбросоопасность установлена методами прогноза.

К угрожаемым по внезапным выбросам относят пласты, обладающие низкой прочностью, высокой газоносностью и залегающие иже критической глубины.

К особо выбросоопасным относят пласты со сложными условиями разработки, а также участки выбросоопасных пластов на период перехода зон опорного давления, стволов очистных работ, при работе встречными забоями в зонах геологических нарушений.

Прогноз внезапных выбросов делится на:

- региональный;
- локальный;
- текущий.

На стадии регионального прогноза устанавливают критические по газодинамическим явлениям глубины. Локальный прогноз выполняется на опасных и угрожаемых по внезапным выбросам угля и газа пласта перед их вскрытием.

Текущий прогноз осуществляется постоянно при проведении выработок и ведении очистных работ на опасных и угрожаемых по внезапным выбросам пластах.

Установление критической по внезапным выбросам глубины для строящихся шахт осуществляется следующим образом. При наличии закрытых антиклинальных складок или дизъюнктивов типа выбросов, надвигов и сдвигов, выбросы не могут появляться до глубины 150 м. При моноклиналином залегании пластов отсутствие внезапных выбросов угля и газа гарантируется до глубины 340 м.

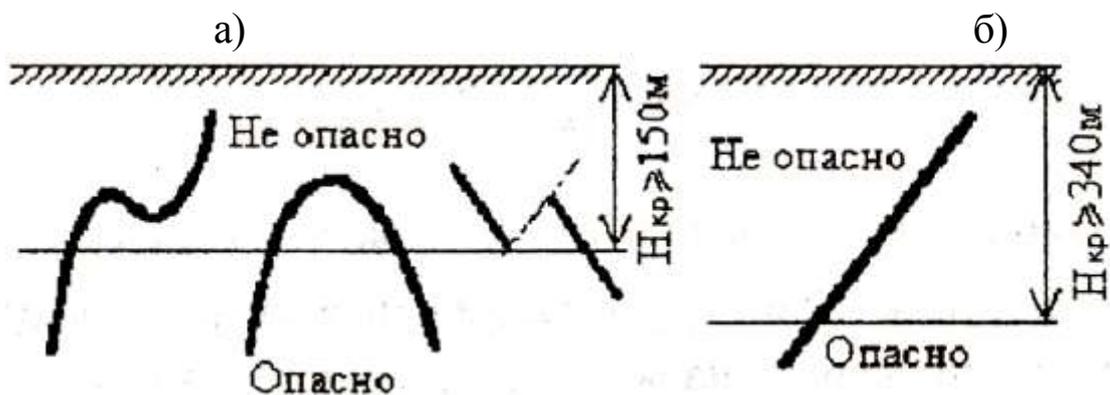


Рис. 13.4. Критическая глубина разработки  $H_{кр}$  пластов Кузбасса при наличии экранирующих антиклинальных складок и дизъюнктивов (а) и при моноклиальном залегании пласта (б)

Для нижних горизонтов при наличии карты прогноза газоносности пласта и данных о выходе летучих веществ из угля и содержания в нем наиболее мягкого и хрупкого ингредиента – фюзинита, критическая выбросоопасная глубина разработки пласта  $H_{кр}$ , м определяется по формуле

$$H_{кр} = H_6 + 8 \sqrt{\left(\frac{H_5}{gradx} - 10\right)^2} + 10 + \frac{1}{3} (V^{daf} - 22)^2 + \frac{300}{F + 20}, \quad (13.3)$$

где  $H_5$  – глубина изогазы 5 м<sup>3</sup>/т сухой бензольной массы (с.б.м.), м;

$gradx = \frac{10^3}{\Delta H}$  – градиент нарастания газоносности на 100 м от изогазы 5 м<sup>3</sup>/т с.б.м., м<sup>3</sup>/т с.б.м. на 100 м;  $\Delta H$  – приращение глубины залегания пласта между изогазы 5–15 м<sup>3</sup>/т с.б.м.;  $V^{daf}$  – среднее значение фюзинита в пласте, %.

Для выполнения локального прогноза выбросоопасности в месте вскрытия по пласту бурят разведочные скважины. Это осуществляется после определения  $H_{кр}$  по предыдущей методике. Отбирают угольные керны для определения коэффициента крепости слагающих пласт пачек угля. После чего замеряют давление газа исходящего из скважины.

В Кузбассе прогноз выбросоопасности пласта в месте вскрытия определяют по показателю  $\Pi_0$  из выражения

$$\Pi_0 = P_{r\max} - 14f_{\min}^2, \quad (13.4)$$

где  $P_{r\max}$  – наибольшее давление газа в пласте на данной глубине от земной поверхности, кгс/см<sup>2</sup>;  $f_{\min}^2$  – наименьшее значение коэффициента крепости угля по угольным пачкам.

При  $\Pi_0 \geq 0$  – опасный пласт.

Для выполнения текущего прогноза при проведении по пласту подготовительных выработок бурят контрольные шпуры (не менее двух) интервалами 1 м (исключение первый интервал – 0,5 м). После окончания бурения каждого интервала замеряют скорость газовыделения и выход штыба. По максимальным значениям начальной скорости газовыделения и выхода бурового штыба подсчитывают показатель  $R$  выбросоопасности

$$R = (S_{\max} - 1,8)(q_{н.\max} - 4) - 6, \quad (13.4)$$

где  $S_{\max}$  – максимальное значение выхода бурового штыба с/м шпура, л/мин;  $q_{н.\max}$  – максимальное значение начальной скорости газовыделения, л/(мин·м).

При  $R \geq 0$  – пласт выбросоопасный. Если  $R < 0$ , то пересекаемая выработкой зона пласта неопасная и забой можно продвинуть безопасно на 4–5 м.

## **14 УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В МАССИВАХ ПОРОД ВОКРУГ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК**

### **14.1 Общие положения**

**Управление геомеханическими процессами** – совокупность мероприятий по регулированию этих процессов в целях обеспечения необходимых производственных условий, повышения эффективности ведения горных работ и безопасности. Все эти мероприятия сводятся в основном к управлению горным давлением на выработки и породы массивов вокруг них.

По своей сущности все разработанные способы управления делятся на 5 групп:

- способы, направленные на сохранение естественного состояния и прочности пород массивов;
- способы по упрочнению породных массивов и повышению их устойчивости и несущей способности;
- способы по разгрузке массивов и снижению напряжений в них;

- способы управления грузонесущими и поддерживающими конструкциями (крепями);
- комбинированные из способов групп один-четыре.

#### **14.2 Способы повышения устойчивости подготовительных выработок, проводимых и поддерживаемых вне зоны влияния очистных работ**

В данных условиях основными способами управления механическими процессами в породных массивах вокруг подготовительных выработок и повышения их устойчивости являются:

- расположение выработок в прочных и очень прочных породах (по возможности);
- проведение выработок механизированным способом, преимущественно комбайнами, в два этапа, пластовых со смешанным забоем;
- с присечкой наиболее слабых боковых пород (кровли или почвы пласта);
- упрочнение пород твердеющими вяжущими материалами;
- разгрузка пород в окрестности выработки с помощью щелей и скважин;
- крепление выработок крепью.

Первый способ в основном применяется при проведении выработок с большим сроком службы (камеры, полевые штреки, главные квершлагги). Основная роль отводится в данном способе несущей способности окружающих выработку пород.

Известно, что при проведении выработок буровзрывным способом нагрузка, например, на анкерную крепь возрастает на 15–30 % в зависимости от количества одновременно взрывааемых зарядов. Поэтому наиболее благоприятно сказывается комбайновый способ поведения выработок на устойчивость породных обнажений при залегании в кровле слоистых и трещиноватых пород.

Одним из эффективных способов управления механическими процессами в породных массивах вокруг подготовительных выработок является проведение их в два этапа:

I этап – проводится передовая выработка;

II этап – выработка расширяется до проектных размеров, и возводится постоянная крепь.

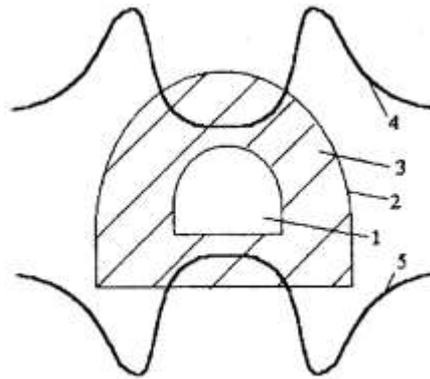


Рис. 14.1. Схема проведения выработки в два этапа: 1 – передовая выработка; 2 – контур проектной выработки; 3 – зона пород, испытывающих повышенные деформации под действием опорного давления в окрестности выработки 1; 4, 5 – кривая давления в породах кровли и почвы выработки

Сущность способа заключается в образовании вокруг передовой выработки (1) зоны (3), в которой происходят перераспределения напряжений и деформаций до расширения выработки до проектного контура (2). В этом случае смещение пород в пределах контура проектного сечения выработки проходят под защитой породной оболочки, ограниченной контуром передовой выработки. При правильно выбранных размерах передовой выработки основные деформации пород происходят в пределах проектного контура 2–1, т. е. в пределах участка между контурами сечений передовой и проектной выработки. При расширении деформированные породы удаляются, а контур проектного сечения остается в ненарушенном состоянии и его устойчивость повышается в 2–2,5 раза.

Основными недостатками данного способа являются:

- необходимость крепления передовой и проектной выработки крепями различных модификаций;
- низкие темпы проходки;
- необходимость использования различного проходческого оборудования.

Одним из эффективных способов повышения несущей способности слабых пород является их упрочнение цементно-песчаными, химическими и прочими вяжущими растворами. Для этого бурят скважины обычно длиной 2–2,5 м по закрепляемому контуру выработки. Через скважины под давлением подают раствор в массив.

Раствор, проникая в открытые поры и трещины, скрепляет породы в единое целое. В результате вокруг выработки формируется толща упрочненных пород способных воспринимать горное давление без проявления опасных деформаций.

Существенная разгрузка вмещающих пород достигается устройством щелей и бурением скважин по контуру выработок. При данном способе создаются условия, при которых наибольшая концентрация напряжений перемещается вглубь массива, где породы находятся в объемно-напряженном состоянии.

Оптимальная высота щели определяется из выражения

$$h_{щ} = 5r \frac{\gamma H}{E}, \quad (14.1)$$

где  $r$  – радиус выработки в проходке;  $H$  – глубина расположения выработки;  $\gamma$  – средний объемный вес пород над выработкой;  $E$  – модуль упругости.

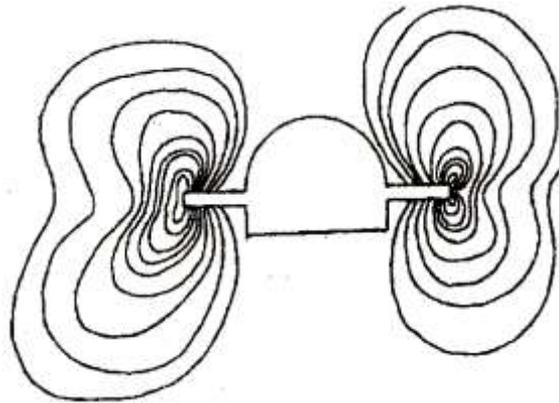


Рис. 14.2. Распределение изохром вокруг разгруженной выработки, разгрузочными щелями

Длина щели, как правило, достигает от 1 до 4 м, высота щели колеблется от 0,1–0,15 м.

Разгрузку массива также можно осуществлять бурением скважин в боках выработки на одинаковом уровне. Расстояние между скважинами  $L$  определяют из выражения

$$L = \frac{k_p \cdot r_{ск}^2}{1,6r_{ск} \frac{\gamma H}{E} + 0,63r_{ск}(k_p - 1)}, \quad (14.2)$$

где  $r_{ск}$  – радиус скважины;  $k_p$  – коэффициент разрыхления угля (породы).

Расстояние  $L$  принимается из условия, чтобы уголь (порода) между скважинами под действием опорного давления на бока выработки разрушался и образовалась податливая разгрузочная полоса за пределы которой перемещается повышенное давление вглубь массива.

Этот способ применяется для разгрузки массивов, склонных к горным ударам и внезапным выбросам.

Наиболее распространенный способ управления механическими процессами это поддержание породного контура выработки крепями различных конструкций. Для крепления подготовительных горизонтальных и наклонных выработок наиболее широко применяют металлические крепи арочной и трапециевидной форм из СВП. Важным условием работы этой крепи является единая система «крепь-массив».

Поэтому пространство, образовавшееся между крепью и массивом необходимо плотно забучивать. К наиболее прогрессивным крепям относится анкерная крепь. Сущность ее работы основана главным образом на использовании несущей способности пород массива вокруг выработки, не испытывающих опасных деформаций.

## **15 УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В МАССИВАХ ПОРОД ВОКРУГ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ**

### **15.1 Выработки, охраняемые в массиве и погашаемые за очистным забоем**

Подготовительные выработки, проводимые в нетронutom массиве и погашаемые за очистным забоем (выемочные штреки и другие выработки при разработке очистных пластов полезных ископаемых длинными столбами), испытывают влияние лишь опорного давления впереди очистного забоя. Управление геомеханическими процессами в породах вокруг этих выработок заключается в уменьшении концентрации опорного давления впереди очистного забоя.

Основные способы снижения опорного давления в подобных условиях – уменьшение зависания пород кровли пластов в выработанном пространстве на призабойную и краевые части массива путем принудительного обрушения их буровзрывным и другими спо-

собами, обработка пластов с труднообрушающейся кровлей с полной закладкой выработанного пространства, увеличение несущей способности крепи в очистной выработке и повышение скорости подвигания очистного забоя.

## 15.2 Выработки, охраняемые целиками

На угольных шахтах применяют следующие варианты проведения выработок на границе соседнего столба (составлением целика):

- выработку проводят после обработки соседнего столба;
- выработку проводят до обработки соседнего столба;
- выработку проводят позади очистного забоя соседнего столба;
- выработку проводят навстречу действующему очистному забою с оставлением целика между ней и встречной лавой по всей длине выемочного столба.

В связи с тем, что увеличение размеров целиков связано с ростом потерь угля и других полезных ископаемых, а также горными ударами, внезапными выбросами, пожарами и др., наиболее целесообразные способы управления, направленные на уменьшение опорного давления на краевые части отработанных пластов и целики.

Согласно геомеханической оценки вариантов, при первом варианте проходки деформации и смещения пород происходит под действием напряжений, обусловленных проходческими работами  $U_{\text{пр}}$ , остаточного опорного давления соседнего отработанного столба  $U_{\text{ост}}$ , и опорного давления впереди очистного забоя отработанного столба  $U_{\text{оп}}$ . Суммарная величина смещения пород  $U_{\text{об}}$  за срок службы выработки составит

$$U_{\text{об}} = U_{\text{пр}} + U_{\text{ост}} + U_{\text{оп}}. \quad (15.1)$$

Величина остаточного опорного давления  $U_{\text{ост}}$  в большей мере зависит от продолжительности разрыва между обработкой столба и проведением выработки в краевой части соседнего столба.

Много минусов имеет вариант, при котором подготовительная выработка проводится навстречу забою очистной выработки в соседнем столбе. При недостаточной ширине целика в зоне встречи забоев происходит наложение опорного давления подготовительной выработки на опорное давление впереди очистной выработки, а позади забоя очистной выработки – наложение опорного давления подготовительной выработки на боковое опорное давление на целик, краевую часть массива. Наиболее существенные деформации

проявляются на участке с 30–40 м впереди очистного забоя до 50–60 м за ним.

Наиболее благоприятный вариант, при котором выработка проводится после отработки соседнего столба и практически полной стабилизации опорного давления в краевой части столба на границе с выработанным пространством. В этом случае снижается смещение пород по сравнению с первым вариантом в 1,5–4 раза.

### 15.3 Способы управления пучением пород почвы подготовительных выработок

Устойчивость почвы зависит от соотношения длительной прочности пород массива вокруг выработки и действующих в них напряжений. Породы почвы выработки устойчивы при выполнении условия

$$k\gamma H < R_M, \quad (15.2)$$

где  $\gamma$  – средний объемный вес пород над выработкой до земной поверхности;  $H$  – глубина расположения выработки;  $k$  – коэффициент концентрации напряжений в породах почвы;  $R_M$  – длительная прочность пород массива в почве выработки.

Для предотвращения пучения пород почвы подготовительных выработок на угольных шахтах применяют:

- проведение выработок в ранее надработанных массивах и расположение их за пределами зоны влияния опорного давления под краевыми частями надрабатывающего пласта;
- разгрузка пород в боках и почве выработок путем устройства разгрузочных щелей, бурения скважин и взрывания камуфлетных зарядов;
- разупрочнение пород почвы с последующим упрочнением их вяжущими материалами;
- проведение выработок в краевых частях массивов после отработки соседних столбов и затухания в выработанном пространстве сдвижений и обрушений пород кровли, и стабилизации остаточного давления;
- выемка слабых маломощных слоев пород почвы пластов при проведении выработок;
- крепление выработок крепью с обратным сводом или кольцевой крепью.

Для разгрузки почвы подготовительных выработок взрывают камуфлетный заряд вблизи контура выработки в почве. При этом

создаются искусственные зоны разрыхленной породы из-за того, что максимальные напряжения перемещаются вглубь угольного массива за пределы зоны разрушенных пород. Кроме того, разрыхленные породы играют роль амортизирующей подушки, принимающей на себя давление пород почвы.

Для образования зоны разрыхленных пород из горной выработки под разными углами к горизонту пробуривают шпуров. Длину шпуров и массу зарядов подбирают таким образом, чтобы разрушительное действие взрыва не повлияло на нормальное состояние выработки и крепи. В зависимости от мощности пучащих пород и глубины их сдвига при пучении шпуров бурят в один или два ряда под углами 15–30° и 45–60° к горизонту. Разгрузочные зоны в почве выработок вблизи их контура создают до 2 м, а под целиками угля – до 3 м.

По мере уплотнения разрыхленных пород эффект разгрузки почвы выработок уменьшается.

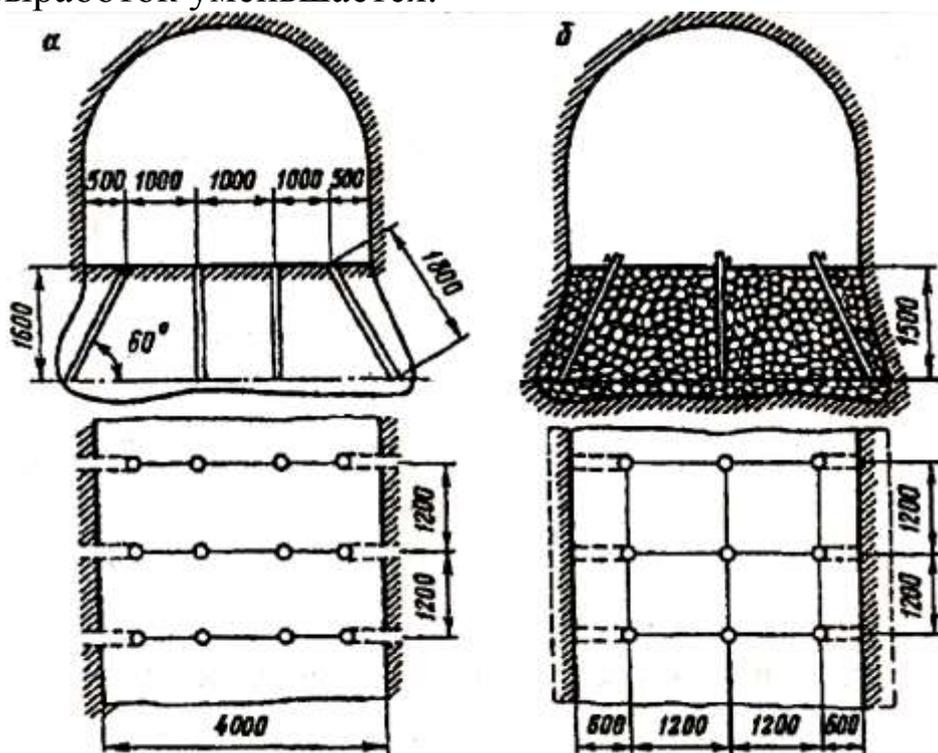


Рис. 15.1. Схема активной разгрузки пород почвы выработки (а) с последующим упрочнением пород (б)

Для предотвращения пучения разрушенных пород в выработку на почву укладываются лежни, на которые устанавливают чаще всего гидравлические стойки. Работы по взрыванию пород почвы

производят одновременно с проведением выработки или перед паданием выработки в зону влияния очистных работ.

Для предотвращения пучения пород почвы в выемочных штреках и в других выработках в зоне влияния очистных работ, преимущественно в зоне опорного давления впереди забоя лавы, бурят шпуры длиной до 1–1,5 м непосредственно в породы почвы и разупрочняют их камуфлетными взрывами.

## **16 УПРАВЛЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ПОРОДНЫХ МАССИВАХ ПРИ ВЕДЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ОЧИСТНЫХ РАБОТ**

### **16.1 Общие сведения**

При очистной выемке управление механическими процессами заключается в управлении данными процессами непосредственно в призабойной части и во вмещающих породах в выработанном пространстве.

Способы управления кровлей в выработанном пространстве разделяют на 4 группы:

- 1) поддержание кровлей за счет ее естественной устойчивости в обнажении и несущей способности;
- 2) полное обрушение пород кровли в выработанном пространстве;
- 3) частичное обрушение пород кровли в выработанном пространстве;
- 4) искусственное поддержание кровли в выработанном пространстве.

Наиболее эффективный и безопасный способ управления механическими процессами в массивах пород кровли пластов, как в призабойном, так и в выработанном пространстве – это отработка пластов углей и других полезных ископаемых с применением механизированных крепей.

### **16.2 Управление кровлей пластов полным обрушением пород в выработанном пространстве**

Сущность данного способа заключается в периодическом обрушении пород кровли по мере подвигания очистного забоя за пре-

делами призабойного пространства с целью уменьшения горного давления на забой и крепь призабойного пространства.

Полное обрушение проводят путем удаления призабойной и специальной крепи в той части призабойного пространства, где не требуется его поддержания для обеспечения нормальной работы людей и механизмов. Уменьшение поддерживаемого пространства и шага посадки (расстояние, через которое производится искусственное обрушение пород кровли) способствует значительному снижению давления на крепь и деформаций пород в забое.

При легко и средне обрушающихся породах кровли обрушение их происходит произвольно в выработанном пространстве за механизированной крепью по мере ее подвигания.

Для предотвращения зависания труднообрушаемой кровли в выработанном пространстве и исключения воздушных и динамических ударов на механизированный комплекс при одновременном обрушении зависших пород на большой площади разработан способ передового торпедирования пород кровли. Его суть состоит в том, что впереди движущегося очистного забоя в кровле бурят длинные скважины, в которых взрывают заряды ВВ. В результате труднообрушаемые породы разрушаются на блоки, обрушение которых происходит сравнительно спокойно без динамических проявлений.

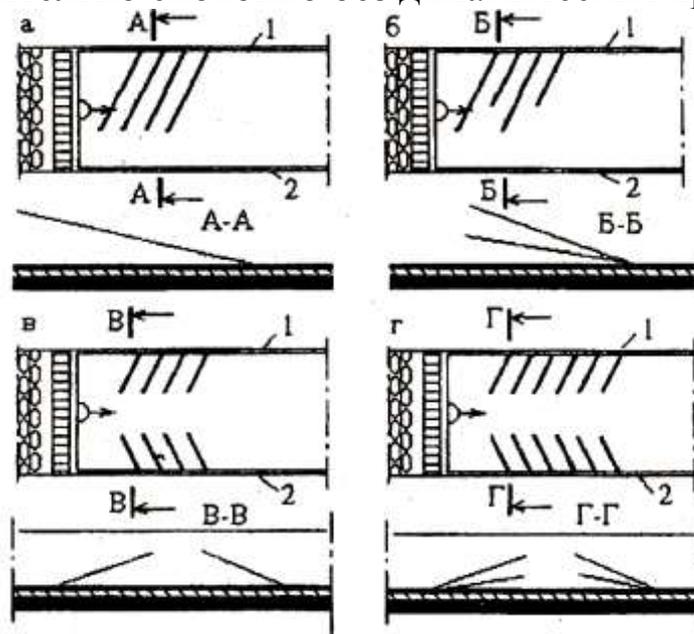


Рис. 16.1. Схема расположения скважин при передовом торпедировании и кровли: а) односторонняя одноярусная; б) односторонняя двухъярусная; в) двухсторонняя одноярусная; г) двухсторонняя двухъярусная; 1 – вентиляционный штрек выемочного столба; 2 – конвейерный штрек

Расстояние между скважинами (рядами скважин) в зависимости от типа кровли равно 14–27 м. Превышение забоя скважины над угольным пластом 10–20 м. Угол разворота оси скважины относительно линии забоя 6–17°. Опережение линии торпедирования над забоем должно быть не менее 10–12 м.

Скважины бурят из выемочных штреков, прилегающих к очистному забою, из них же взрывают и заряды ВВ.

Для каждого обрабатываемого пласта (столба) параметры способа, схему расположения скважин и величину зарядов ВВ следует принимать, исходя из конкретных условий:

- 1) прочности и мощности пород кровли;
- 2) мощности и угла падения пласта;
- 3) строения пород кровли;
- 4) длины очистного забоя.

Управление труднообрушающимися кровлями осуществляют также увлажнением и гидровзрывом пород массива. Эти способы снижают прочность пород и уменьшают шаг их обрушения в 1,5–1,8 раза. При этом нагрузка на призабойную крепь снижается в 1,2–1,4 раза. Продолжительность гидрозабойки породных массивов в большей мере зависит от пористости и проницаемости пород кровли.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геомеханика [Электронный ресурс]: учеб. пособие / П. В. Егоров, Г. Г. Штумпф, А. А. Ренев [ и др.]. – 3-е изд. – КузГТУ. – Кемерово, 2011. – 324 с. CD-ROM.

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90602&type=utchposob:common>

2. Геомеханика : учеб. пособие / Э. В. Каспарьян, А. А. Козырев, М. А. Иофис [и др.] – Москва : Высш. шк., 2006. – 503 с.

3. Геомеханика: учеб. пособие : цикл лекций / П. В. Егоров, Г. Г. Штумпф, А. А. Ренев [ и др.]. – Кемерово : Кузбассвузиздат, 2001. – 276 с.

4. Борщ-Компониец, В. И. Практическая механика горных пород / В. И. Борщ-Компониец. – Москва: Издательство «Горная книга», 2013. – 322 с.

5. Геомеханика : учебник для вузов / М. Е. Певзнер, М. А. Иофис, В. Н. Попов. – Москва : МГГУ, 2008. – 437 с.

<http://www.biblioclub.ru/book/79186/>

6. Баклашов, И. В. Геомеханика: в 2 т. Т. 1 : Основы геомеханики : [Электронный ресурс]: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Горное дело» и по специальностям «Физические процессы горного и нефтегазового производства» и «Шахтное и подземное строительство» направление подготовки «Горное дело» / И. В. Баклашов. – Москва : Издательство МГГУ, 2004. – 208 с.

<http://www.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=79181>

7. Баклашов, И. В. Геомеханика: в 2 т. Т. 2 : Геомеханические процессы : [Электронный ресурс] : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Горное дело» и по специальностям «Физические процессы горного и нефтегазового производства» и «Шахтное и подземное строительство» направление подготовки «Горное дело» / И. В. Баклашов. – Москва : Издательство МГГУ, 2004. – 249 с.

<http://www.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=791810>

8. СП 91.13330.2012. Подземные горные выработки. Актуализированная редакция. СНиП II-94-80. – Москва : Минрегиона России, 2012. – 53 с.

9. СП 103.13330.2012. Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод. Актуализированная редакция. СНиП 2.06.14-85. – Москва : Минрегиона России, 2012. – 60 с.