

**ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра «СТРОИТЕЛЬНЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ»**

## **1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД**

**Краткий конспект лекций по курсу  
"Механика подземных сооружений"**

**МОДУЛЬ 1.**

*(Для студентов горных специальностей)*

Рекомендовано на заседании  
кафедры «Строительные геотехнологии»  
протокол N 2 от 23.01.2013.

Алчевск - 2013



## ВВЕДЕНИЕ

Механика подземных сооружений является базовой дисциплиной горного образования, которая находится в стадии становления. Ее разделы постоянно изменяются, дополняются, а некоторые из ее фундаментальных положений пересматриваются и обновляются. Целый ряд важных прикладных задач о взаимодействии подземных сооружений (крепей, отделок тоннелей и др.) с окружающим массивом горных пород не нашел решения удовлетворяющего запросы практики. Поэтому в настоящее время имеются различные концептуальные подходы по описанию причинно-следственных связей в сложных процессах статике и кинетике неупругого деформирования и разрушения горных пород вокруг подземных выработок. Многообразие расчетных методов, эмпирических зависимостей и закономерностей чрезвычайно затрудняет изучение этого сложного раздела горной науки для студентов.

В данных методических указаниях последовательно изложен учебный материал в том минимально необходимом объеме, который соответствует Типовой учебной программе студентов специальности 0904 дневной и заочной форм обучения "Шахтное и подземное строительство".

Данные указания пригодны не только для первичного ознакомления с курсом, но и могут быть использованы для модульного обучения студентов. С этой целью весь курс разделен на 5 модулей, которые соответствуют общепринятому членению учебного материала на достаточно самостоятельные разделы. Целью организации модульного изучения курса является повышение эффективности самостоятельной работы студентов, обеспечение индивидуализации и самостоятельности обучения, поощрение творческих и исследовательских проявлений при выполнении заданий, лабораторных и практических занятий в процессе систематической работы в течение всего периода обучения. Деление курса на модули и баллы для оценки знаний по каждому из них приведены в таблице.

Оценка по каждому модулю выставляется студенту после получения соответствующей суммы баллов за выполнение индивидуальных заданий, тестов первого и второго уровней, подготовку реферата, решение задач, сдачу коллоквиумов и

лабораторных работ, самостоятельное углубленное изучение различных разделов курса.

Таблица 1 - Разделы курса "Механика подземных сооружений"

Название модулей	Средний балл	Количество баллов (оценка)		
		3	4	5
1	2	3	4	5
1.Механические свойства горных пород	15	8-10	11-13	13-15
2.Напряженно-деформированное состояние горных пород	20	10-15	16-18	18-20
3.Устойчивость породных обнажений горных выработок	25	12-15	16-20	20-25
4.Взаимодействие крепи с массивом горных пород	25	12-15	15-20	20-25
5.Проявления горного давления и их прогноз	15	8-10	11-13	13-15
Итого	100	50-61	50-70	70-100

В балльной системе оценке знаний учитываются соблюдение сроков при выполнении заданий и степень самостоятельности, наличие элементов творчества, сложность и количество решенных задач.

Кроме того, студентам рекомендуется ознакомиться с содержанием научно-технических журналов, делая выписки, рефераты и систематически пополняя свой конспект лекций ("Уголь", "Уголь Украины", "Горный журнал", "Известия вузов", "Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых", Реферативный журнал "Горное дело" и др.). Выполнение упражнений индивидуальных заданий и решения задач студент должен оформлять в отдельной тетради.

## Тема 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Введение. Задачи курса и его связь со смежными дисциплинами**

Механика подземных сооружений - это прикладная дисциплина, которая на основе изучения механических процессов в массиве горных пород вокруг капитальных горных выработок разрабатывает научные основы проектирования и расчета подземных конструкций. Она является составной частью механики горных пород. Изучите ее объекты исследования по рис.1.1.



Рисунок 1.1 - Объекты исследования механики горных пород

Задачи механики подземных сооружений (прокомментируйте примерами):

изучение и прогнозирование проявлений горного давления в выработках;

разработка способов управления горным давлением для обеспечения эксплуатационной устойчивости горных выработок.

Связь со смежными дисциплинами изучите по рис. 1.2.

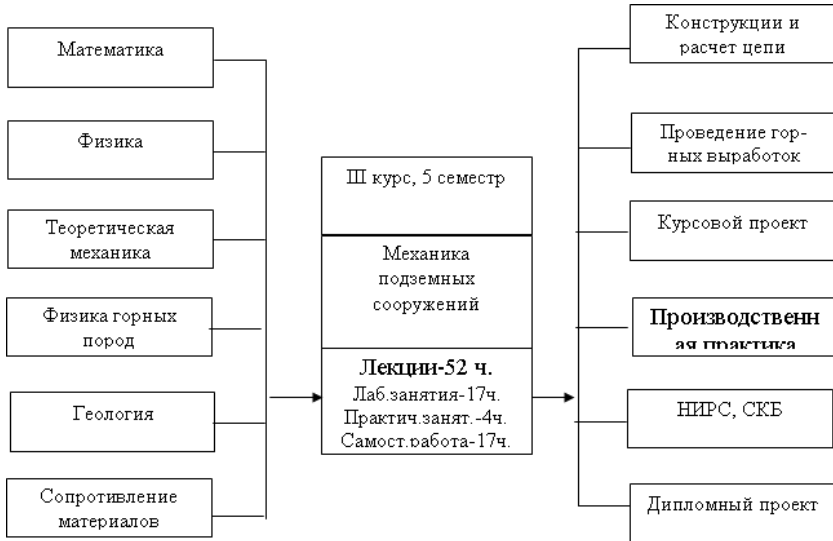


Рисунок 1.2 - Связь со смежными дисциплинами

Изучите основные понятия и определения: минерал, горная порода, горный массив, литологическая разность, образец горной породы, неоднородность, анизотропия, трещиноватость, пористость, проявления горного давления. (Обдумайте определения этих терминов, попытайтесь дать свою формулировку).

Ознакомьтесь с историей развития дисциплины, постарайтесь запомнить видных отечественных и зарубежных ученых, их вклад в основы теории и эксперимента механики горных пород.

## Тема 2. УПРУГИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Дайте определение понятию упругости. Приведите примеры.  
Изучите основные понятия упругости.

Параметры упругости:

модуль Юнга («жесткость» материала)

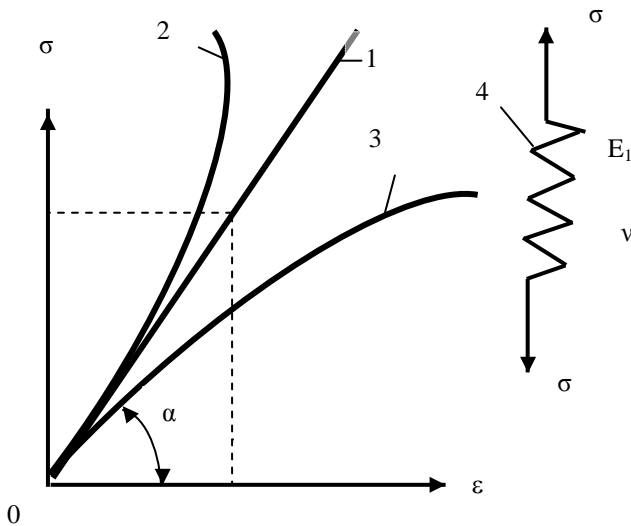
$$E = \operatorname{tg} \alpha = \sigma / \varepsilon = d\sigma / d\varepsilon, \quad E > 0; \quad (2.1)$$

коэффициент Пуассона

$$\nu = |\varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel}|; \quad (0 \leq \nu \leq 0.5). \quad (2.2)$$

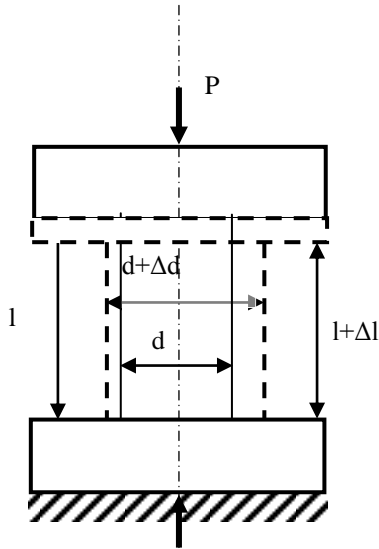
где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  - нормальное напряжение и относительная деформация.

Докажите, почему должно соблюдаться неравенство  $\nu \leq 0.5$  ?



- 1 - линейная упругость;
- 2, 3 - нелинейная упругость (гипер- и гипоупругость);
- 4 - структурная модель Гука - пружина.

Рисунок 2.1 - Диаграмма  $\sigma$ - $\varepsilon$  упругой породы



$$\sigma = \frac{P}{A}; \quad \varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta l}{l}; \quad \varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta d}{d}.$$

Рисунок 2.2 - Испытание образца на одноосное сжатие

Обобщенный закон Гука (написать после круговой перестановки индексов  $(i, j, k = x, y, z)$ ):

$$\varepsilon_i = E^{-1} [\sigma_i - \nu(\sigma_j + \sigma_k)], \quad (i, j, k = x, y, z); \quad (2.3)$$

$$\gamma_{ij} = \tau_{ij} / G; \quad (2.4)$$

$$G = E / [2(1 - \nu)]; \quad (2.5)$$

где  $G$  - модуль сдвига.



Дайте определение анизотропии и неоднородности горных пород, приведите примеры. Докажите формулу (2.3) путем суммирования деформаций от напряжений на разных гранях элемента.

### Напряжение на произвольной площадке

Уясните, как определяются знаки нормальных и касательных напряжений на гранях элементарного параллелепипеда (см. курс сопротивления материалов). Для случая плоского напряженного состояния выведите формулу для напряжений на произвольной наклонной площадке, используя уравнения равновесия для треугольной призмы (рис. 2.3).

Из уравнений равновесия всех сил (но не напряжений!) на оси координат

$$\sum X = 0, \sum Y = 0,$$

получите:

$$\sigma_n = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha; \quad (2.6.)$$

$$\tau_{nt} = 0.5(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha.$$

Найдите угол наклона главной площадки, положив во втором уравнении (2.6)  $\tau_{nt} = 0$ :

$$\operatorname{tg} 2\alpha_* = 2\tau_{xy} / (\sigma_x - \sigma_y). \quad (2.7)$$

Докажите из (2.7), что главные площадки расположены под углом  $\alpha_*$  и  $\alpha_* + \pi/2$  к оси абсцисс. Получите для деформаций формулы, подобные (2.6) и (2.7).

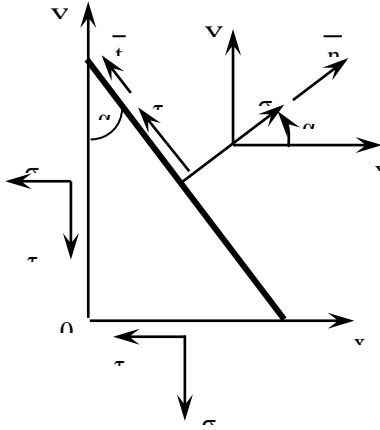


Рисунок 2.3 - Плоское напряженное состояние в точке

### Напряжения на диаграмме Мора

Из рис. 2.4. получите другой вид формул преобразования (2.8) и докажите их идентичность (2.6):

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x \\ \sigma_y \end{array} \right\} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha; \quad (2.8)$$

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

### Уравнения равновесия

Рассмотрите равновесие элементарного объема породы в прямоугольной и полярной системах координат и получите соответствующие дифференциальные уравнения равновесия для плоской задачи, учитывая, что запятая в индексе обозначает

дифференцирование по соответствующей координате, например  $\tau_{yx,x} = d\tau_{yx}/dx$ .

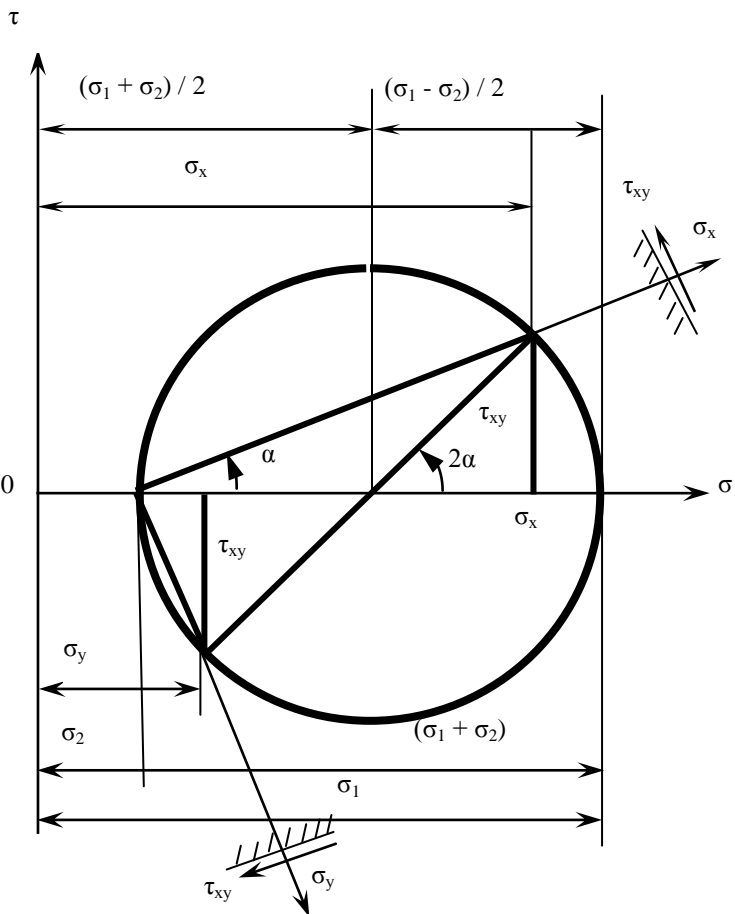
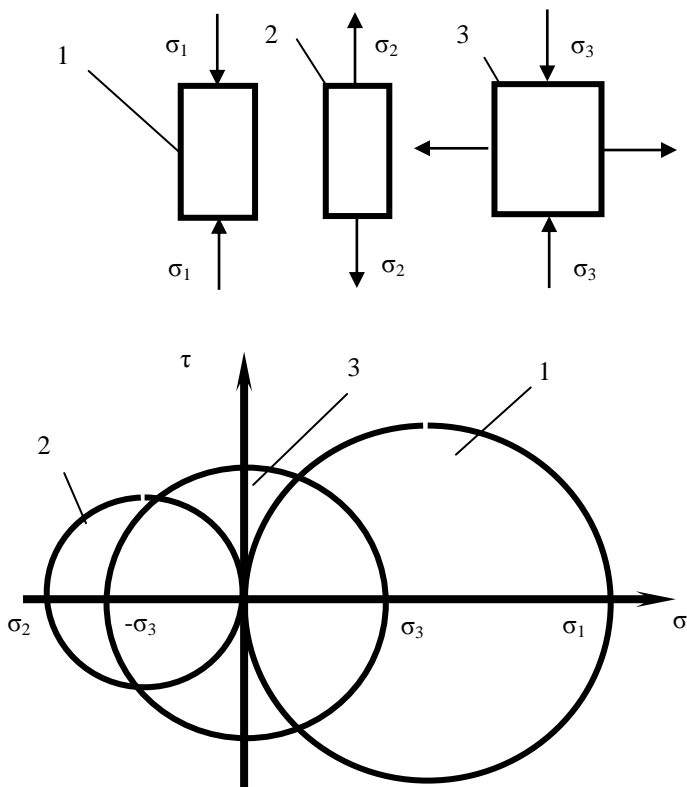


Рисунок 2.4 - Круг Мора



1, 2 –круги О.Мора для одноосных сжатия и растяжения;  
 3 – круг для чистого сдвига

Рисунок 2.5 - Простейшие нагрузки

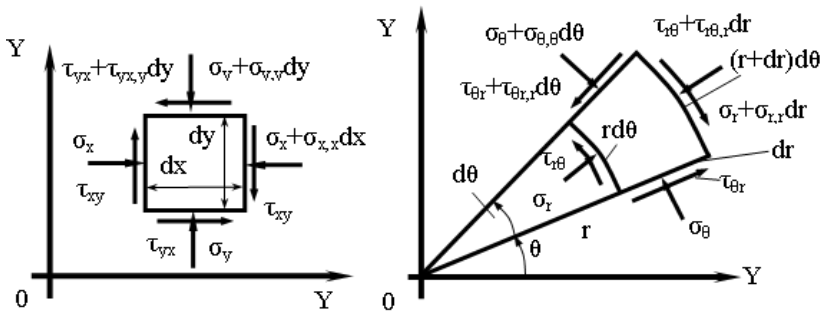


Рисунок 2.6 - Равновесие элементарного объема породы

Для прямоугольной системы координат

$$\sigma_{x,x} + \tau_{yx,y} = 0, \tau_{xy,x} + \sigma_{y,y} = 0. \quad (2.9)$$

Для полярной системы координат

$$\begin{aligned} r\sigma_{r,r} + \sigma_r - \sigma_\theta + \tau_{r\theta,\theta} &= 0, \\ r\tau_{r\theta,r} + \sigma_{\theta,\theta} + \tau_{r\theta} &= 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Запишите уравнения (2.10) для осесимметричного случая  $\tau_{r\theta} = 0$  в обычных обозначениях. Эти уравнения будут необходимы при решении задач горного давления.

### Тема 3. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Реология устанавливает связи между параметрами, характеризующими состояние породы, ее свойствами. К характерным реологическим свойствам пород относятся ползучесть, релаксация, упругое последствие, текучесть и т.п. Фактически реологические уравнения описывают не реальную породу, а ее модель - идеальное тело (материал). Число реологических моделей неограничено, однако, все они могут быть представлены комбинацией из трех простейших тел (моделей) - тела Гука (упругость), тела Ньютона (вязкость), тела Сен-Венана (пластичность).

Модель упругой породы - тело Гука (H) - рассмотрена в теме 2 (рис.1.1).

#### Ползучесть

Ползучесть - способность породы деформироваться во времени под действием напряжений (в идеальном случае - постоянных). Моделируется вязким элементом, предложенным Ньютоном (N): поршень в цилиндре с вязкой жидкостью (рис. 3.1-3.2).

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (3.1)$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости, размерность Па·с (пуаз)



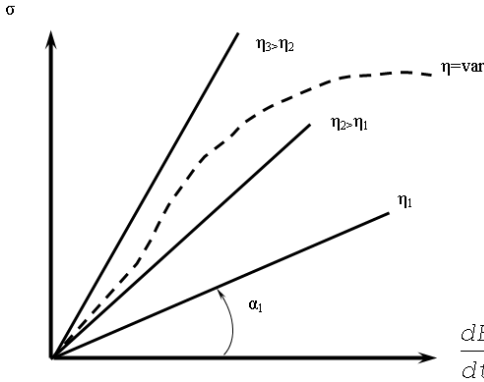


Рисунок 3.2 - Диаграмма  $\sigma - d\varepsilon/dt$  для определения вязкости.

### Релаксация

Релаксация - процесс изменения (снижения) напряжений во времени при постоянных деформациях. (Придумайте и приведите примеры из горной практики).

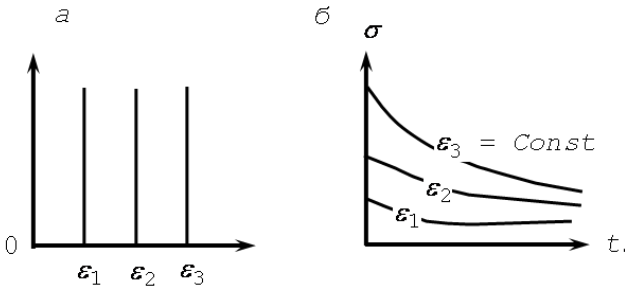


Рисунок 3.3 - Релаксация напряжений:  
 а - диаграмма  $\sigma - \varepsilon$ ;  
 б - диаграмма  $\sigma - t$ .

### Пластичность

Третьей простейшей структурной моделью является тело Сен-Венана (идеальная пластичность), которое является абсолютно твердым до достижения предела текучести, а при его достижении - пластически течет.

Условия пластического течения

$$\sigma_1 - \sigma_2 \geq 2K, \quad (3.2)$$

где  $K$  - предельное касательное напряжение, при котором начинается пластическая деформация.

Пластичность характеризует способность пород получать остаточные деформации без разрушения. Противоположное пластичности свойство - хрупкость (дайте ему содержательное определение самостоятельно).

Рассмотрите диаграмму  $\sigma$ - $\varepsilon$  для реальной породы и назовите характерные ее участки (рис. 3.4).

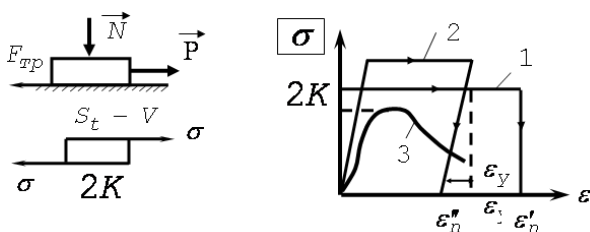


Рисунок 3.4 - Идеальная пластичность:

- а - механическая аналогия;
- б - элемент пластичности  $S_t - Vt$ ;
- 1, 2 - пластичность Сен-Венана и Прандтля;
- 3 - диаграмма  $\sigma$ - $\varepsilon$  породы с площадкой текучести

### Механические структурные модели породы

Соединяя различным образом элементы, соответствующие моделям Гука  $H$ , Ньютона  $N$  и Сен-Венана  $S_t - V$ , можно получить механические модели породы значительно более сложные по своим



свойствам. Соединение реологических элементов может быть параллельным и последовательным (рис. 3.5).

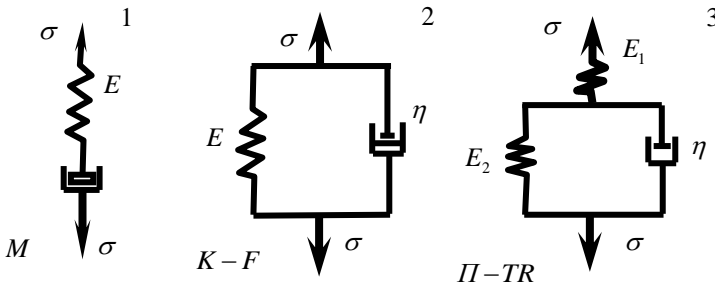


Рисунок 3.5 - Структурные механические модели пород:

1 - модель Максвелла;

2 - модель Кельвина (Фойгта);

3 - модель Пойтинга-Томсона (П - Th)

Помните, что при параллельном соединении скорости деформаций у элементов одинаковые, а нагрузка суммируется в общую, тогда как при последовательном соединении нагрузки у элементов одинаковые, а полная скорость равна сумме скоростей деформаций каждого элемента.

Исходя из этих положений, можно получить дифференциальные уравнения механических моделей. Например, для модели Максвелла при релаксации напряжений запишем для скоростей деформации.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_H + \dot{\varepsilon}_N = \frac{1}{E} \dot{\sigma} + \frac{1}{\eta} \sigma = 0,$$

где точка означает производную по времени (скорость).

Получаем дифференциальное уравнение

$$\dot{\sigma} / \sigma = -\frac{E}{\eta}$$

Интегрируя с учетом начальных условий: при  $t=0$ ,  $\sigma = \sigma_0$ , получим уравнение для релаксации напряжений в модели Максвелла:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right), \quad (3.3)$$

Величину  $T_p = \eta/E$  называют временем релаксации, за время  $t = T_p$  напряжение уменьшается в  $e$  раз. Чем больше  $T_p$ , тем сильнее "твердообразные" свойства породы, тем меньше ее «текучесть».

Для модели Кельвина-Фойгта (ползучесть) напряжение складывается из упругой и вязкой компонент:

$$\sigma_0 = \sigma_y + \sigma_B = \varepsilon E + \eta \dot{\varepsilon},$$

Для определения зависимости деформаций  $\varepsilon$  от времени  $t$  выполним интегрирование при начальных условиях  $t=0, \varepsilon=0$ , что дает

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_3}\right) \right]. \quad (3.4)$$

Величину  $T_3 = \eta/E$  называют временем запаздывания деформации (время ретардации), чем оно больше, тем ближе горная порода к вязкой жидкости.

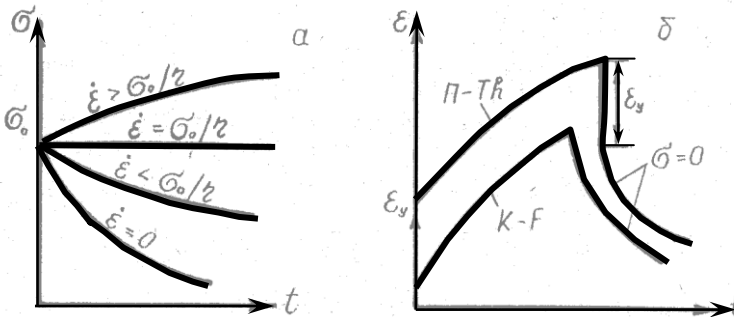


Рисунок 3.6 - Поведение реологических моделей пород:  
 а – ползучесть и релаксация в модели Максвелла при  $\varepsilon \geq 0$ ;  
 б - ползучесть и последствие в телах К-Ф и П-Тн

## Тема 4. ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

### Характер разрушения породы

Прочность - свойство породы сопротивляться хрупкому разрушению или неограниченному деформированию (течению).

Разрушение хрупкой породы происходит отрывом при растяжении или сдвигом (сколом) при сжатии (рис. 4.1). Сопротивление отрыву обеспечивается сцеплением при растяжении (когезией отрыва), а сдвигу противостоят две составляющие прочности: сцепление при сдвиге (когезия сдвига) и сопротивление от внутреннего трения (первая не зависит от нормального давления).

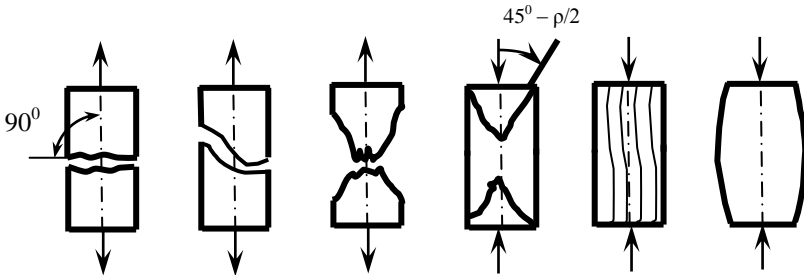


Рисунок 4.1 - Характер разрушения пород:

а - при растяжении (разрыв; разрыв со сдвигом; пластическая "шейка");

б - при сжатии (сдвиг; продольный разрыв; пластическая "бочка").

### Теория прочности Мора

Механические теории прочности связывают разрушение породы с ее напряженно-деформированным состоянием. Поведение горных пород при разрушении наиболее правильно описывает теория О.Мора, по которой сопротивление материала сдвигу  $\tau_{nt}$  зависит от нормальных напряжений  $\sigma_n$  на площадках сдвига

$$\tau_{nt} = F(\sigma_n) \quad (4.1)$$

Вся сложность построения «правильной» теории прочности состоит в раскрытие явного вида функции  $F(\sigma_n)$

В упрощенном случае эту функции принимают линейной

$$\tau_{nt} = F(\sigma_n) = K + f \cdot \sigma_n$$

где  $K$  - коэффициент сцепления, численно равен когезии сдвига  $\tau_0$ , Па;

$f$  - коэффициент внутреннего трения породы  $f = \text{tg} \cdot \rho$ ;

$\rho$  - угол внутреннего трения, град.

### Угол наклона площадки разрушения

Рассмотрим образец, подвергнутый объемному сжатию по главным площадкам 1 и 2 (рис. 4.2). Найдем угол наклона площадки разрушения, для чего в условие прочности (4.1) для произвольной наклонной площадки (рис. 4.2):

$$\tau_{nt} - (K + f\sigma_n) \leq 0,$$

подставим соотношения (2.6), учитывая, что  $\tau_{xy} = 0$ ,

$$\frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_1)\sin 2\alpha - [K + f(\sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha)] \leq 0$$

Находим экстремум этого выражения условия прочности по углу наклона площадки, для чего следует взять производную по  $\alpha$  и решить относительно  $\alpha_p$ :

$$(\sigma_2 - \sigma_1)\cos 2\alpha_p - f(\sigma_2 - \sigma_1)\sin 2\alpha_p = 0,$$

$$\text{tg} 2\alpha_p = \frac{1}{f} = \text{ctg} \rho = \text{tg}(90^\circ - \rho),$$

$$\alpha_p = 45^\circ - \rho/2. \quad (4.2)$$

Следовательно, площадка разрушения при сжатии наклонена к направлению главного напряжения  $\sigma_1$  под углом  $\alpha_p = 45^\circ - \rho/2$ .

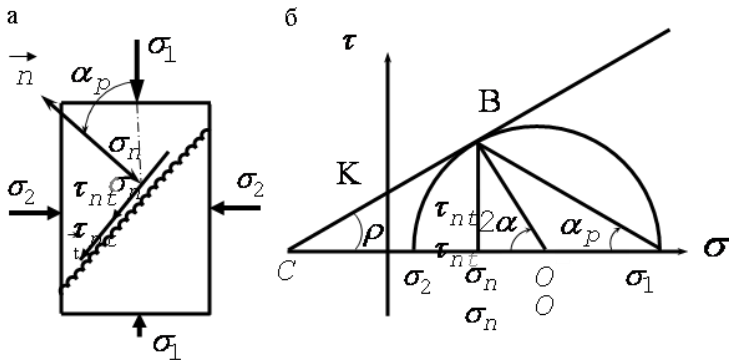


Рисунок 4.2 - Определение угла наклона площадки сдвига:  
 а - расчетная схема разрушения породы сдвигом;  
 б - диаграмма О.Мора и предельный круг разрушения

### Паспорт прочности породы

Условие прочности О.Мора (4.1), записанное в главных напряжениях, имеет вид

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = F \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right), \quad (4.3)$$

и представляет собой огибающую предельных кругов напряжений на диаграмме О.Мора (паспорт прочности). Предельную кривую получают экспериментально при лабораторных испытаниях горных пород в стабилOMETрах. Уравнение (4.3) показывает, что предельное состояние породы определяется радиусом предельного круга Мора (левая часть равенства 4.3) и положением его центра (аргумент функции  $F$  в правой части равенства 4.3).

Если предельную огибающую аппроксимировать прямой, то ее уравнение из  $\triangle OBC$  на рис. 4.2,б можно записать

$$\sigma_1 + C = A(\sigma_2 + C), \quad (4.4)$$

где  $A = (1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho)$  - параметр угла внутреннего трения;

$C$  - удельная сила сцепления породы, характеризует ее сопротивление всестороннему растяжению (рис. 4.3).

При  $C = 0$  получим из (4.4) предельную огибающую 2 (рис. 4.3,а) для сыпучей породы (песок):

$$\sigma_1 = A\sigma_2; \sigma_p = \sigma_{сж} = \sigma_{сд} = 0, \quad (4.5)$$

при  $\rho = 0$ ,  $A = 1$  огибающая 3 (рис. 4.3,а) характеризует идеально-пластичную породу:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (A-1) \cdot C; \sigma_p = \sigma_{сж}. \quad (4.6)$$

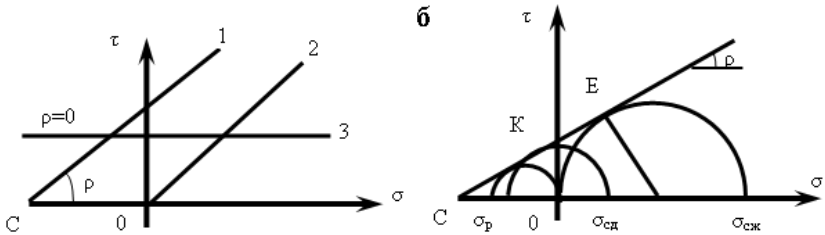


Рисунок 4.3 - Прямолинейные огибающие кругов О.Мора

Через параметры огибающей  $A$  и  $C$  (4.4) нетрудно выразить прочностные свойства породы (рис. 4.3,б):

одноосное сжатие  $\sigma_1 = \sigma_{сж}; \sigma_2 = 0;$

$$\sigma_{сж} = (A-1)C; \quad (4.7)$$

одноосное растяжение  $\sigma_1 = 0; \sigma_2 = -\sigma_p;$

$$\sigma_p = (A-1)C / A = \sigma_{сж} / A; \quad (4.8)$$

чистый сдвиг  $\sigma_1 = \sigma_{сд}; \sigma_2 = -\sigma_{сд};$

$$\sigma_{сд} = (A-1)C / (A+1) = \sigma_{сж} / (A+1). \quad (4.9)$$

Для уверенного в дальнейшем оперирования параметрами прямолинейной огибающей, потренируйтесь в выражении их через комбинацию двух любых заданных параметров.

### Паспорт прочности реальной породы

Помните, что прямолинейная огибающая является удобной моделью прочности и справедлива только на участке выше точки E (рис. 4.3, б, 4.4), остальная часть (от  $\sigma$  до E) является условной.

Поэтому формулы (4.8)-(4.9) дают значения условных прочностей, не совпадающих с реальными.

Однако, поскольку массив горных пород сжат, можно принимать часть линейной огибающей выше точки E, показанная штриховой линией.

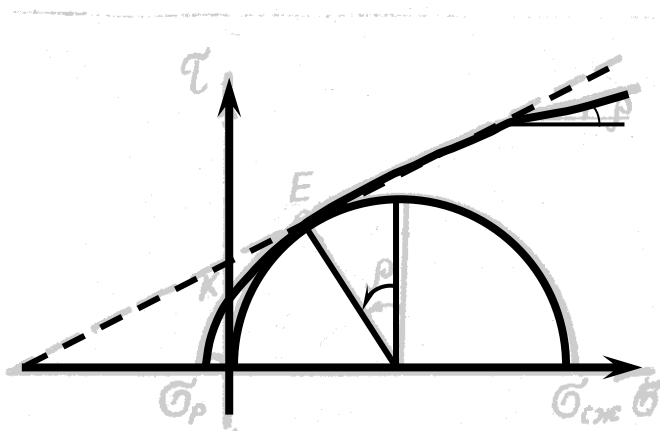
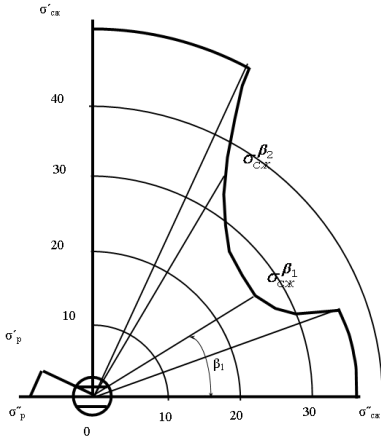


Рисунок 4.4 - Предельная огибающая реальной породы

### Полярная диаграмма прочности

Так как породы имеют слоистое строение, прочность образца зависит от направления сжатия (растяжения) относительно слоистости, что отражает полярная диаграмма прочности (рис. 4.5). Ее получают экспериментально при разрушении образцов под разными углами к слоистости и она характеризует прочностную анизотропию горных пород. Из рис.4.5 следуют соотношения



$$\sigma_{сж}^1 \geq \sigma_{сж}^2 ; \sigma_p^1 \leq \sigma_p^2$$

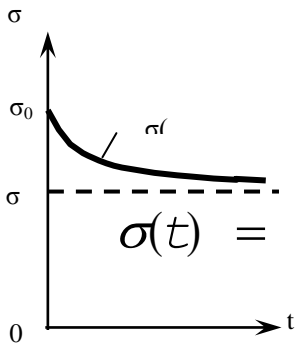
Дайте этим соотношениям физическую интерпретацию. Объясните форму полярной диаграммы прочности, исходя из условия Кулона-Мора (4.1).

Рисунок 4.5 - Полярная диаграмма прочности

### Длительная прочность

Разрушение горных пород является реономным процессом; в отличие от склерономных процессов, проходящих при фиксированных во времени связях, в реономных процессах связи меняются во времени. Поэтому разрушение рассматривается как кинетический процесс роста и залечивания поврежденности породы во времени.

Зависимость прочности породы от времени при постоянном напряжении (режим ползучести) удобно представить в виде формулы



$$\sigma(t) = \sigma_\infty + (\sigma_0 - \sigma_\infty) \exp(-\delta t)$$

где  $\sigma_0$  и  $\sigma_\infty$  - мгновенная и длительная прочность породы, Па;  
 $\delta$  - параметр скорости снижения прочности,  $C^{-1}$ ;  
 $t$  - время, с.  
 Обычно длительная прочность  $\sigma_\infty$  составляет 0,7...0,8  $\sigma_0$ , в расчетах горного давления следует учитывать  $\sigma(t)$ .

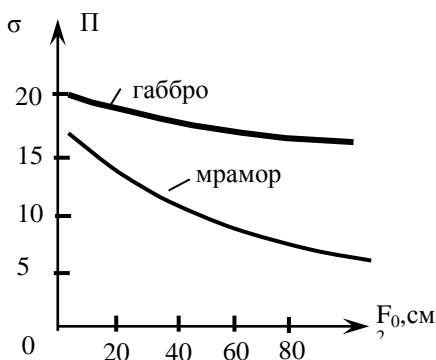
Рисунок 4.6 - Длительная прочность горной породы



## Масштабный фактор и прочность пород в массиве

Прочность породы в массиве меньше прочности в образце из-за масштабного фактора (рис.4.7), так как при увеличении размеров образца его прочность снижается, при этом коэффициент структурного ослабления породы

$$K_c = [1 + a \cdot \ln(H/h)]^{-1}, \quad (4.12)$$



где  $a$  - эмпирический коэффициент, возрастающий от 1 до 7 с увеличением  $\sigma_{сж}$  от 1 до 100 МПа;

$H$  - характерный размер исследуемого массива, м;

$h$  - средний размер структурных блоков массива.

Рисунок 4.7 - Влияние масштабного фактора на прочность

Прочность пород в массиве можно приближенно определить по формуле

$$\sigma^M = K_t K_c K_w \sigma^{об}, \quad (4.13)$$

где  $K_t = \sigma_\infty / \sigma_0 = 0,7 \dots 0,8$  - коэффициент длительной прочности;

$K_c$  - коэффициент структурного ослабления пород,

$$K_c = 0,2 \dots 1,0;$$

$K_w$  - коэффициент снижения прочности под действием влаги,

$$K_w = 0,1 \dots 1,0;$$

$\sigma^{об}$  - прочность образца породы при стандартных испытаниях, Па.

## Тема 5. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД

### Общие сведения

Данные о механических свойствах пород используются:

проектировщиками для принятия проектных решений и их корректировки в процессе строительства;

шахтостроителями для выбора технологии и механизации проходческих работ, нормирования трудоемкости и расхода материалов;

в процессе работы шахты для планирования, проектирования, нормирования и ведения горных работ.

К числу первоочередных показателей механических свойств относят пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении, модуль упругости, структурную ослабленность, влияние влаги (размокаемость) и некоторые другие. При определении свойств пород применяют полевые, лабораторные и натурные методы и средства испытаний.

### Определение механических свойств пород



Рисунок 5.1 - Определение механических свойств пород

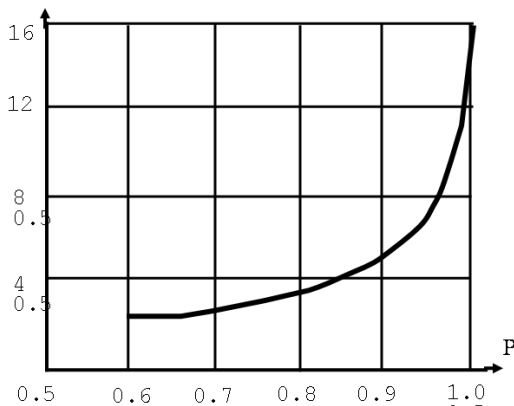


Рисунок 5.2 - Выбор числа образцов N по уровню надежности P (согласно Б.В.Матвееву)

Методы	Надежность
точные	0,95-0,97
нормальные	0,85-0,95
упрощенные	0,75-0,85
грубые	0,6-0,75

Рисунок 5.3 - Классификация методов испытаний по надежности

### Испытание пород при одноосном сжатии

Проводят путем разрушения цилиндрических (кернов) или призматических образцов 1 встречным нажатием на их плоские торцы стальными плитами 2 прессы 3 (рис. 5.4).

При наличии трения торцов образца о давящие плиты, образец деформируется бочкообразно (рис. 5.4,б), напряженное состояние его искажается, а явно зависит от формы образца, задаваемой отношением высоты образца к его диаметру  $h/d$  (рис. 5.5).

Рисунок 5.4 - Сжатие (а) и деформация (б)

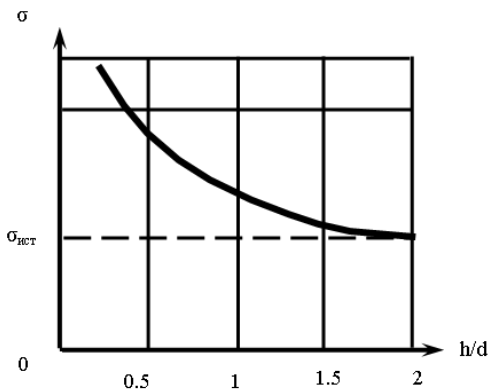


Рисунок 5.5 - Влияние формы образца (по Г.Н. Кузнецову)

Существуют следующие виды испытаний на одноосное сжатие: согласно ГОСТ 21153.2-75 (рис. 5.5), число образцов 4-6 при надежности 0,85-0.9;

метод сжатия 6-8 цилиндрических образцов 1 плитами 2 с точечными инденторами 3 (ВНИМИ), надежность 0.85-0.9, наборно-шариковые давяльные плиты 2 снижают требования к качеству поверхности торцов (рис. 5.6,а);

метод соосных пуансонов 2 (косвенный, предложен ВНИМИ) предлагает сжатие 8-10 плоских дисков 1, вырезанных из керна, между плоскими торцами 3 соосных цилиндрических пуансонов 2 (рис. 5.6,б) их диаметр меньше диаметра керна 1, надежность 0.75-0.85;

метод раздавливания 6-8 необработанных отрезков керна 1 плитами 2 с цилиндрической вытачкой 3 (ДГМИ), метод косвенный с повышенной доступностью и надежностью 0.8-0.9 (рис. 5.6,в);

метод сжатия (ДГМИ) 3-4 цилиндрических кернов 1 с нешлифованными торцами 2, пакетом игольчатых стержней 3, установленных в обойме 4 на вакуумную резину 5 через гибкую мембрану 6, метод точный с надежностью 0.95-0.97, понижены требования к точности обработки керна (рис. 5.6,г);

метод сжатия 4-6 отрезков кернов 1 в плитах 2 с прямоугольным вырезом 3 вдоль образующей, керна (косвенный, предложенный ДГМИ), надежность 0.85-0.95, высокая доступность и удобство испытаний (рис. 5.6,д).

Прочность породы на сжатие определяют по формуле

$$\sigma_{сж} = K_{и} \cdot P/A, \quad (5.1)$$

где  $P$  - разрушающее усилие, Н;

$A$  - площадь образца, перпендикулярная движению плит,  $m^2$ ;

$K_{и}$  - коэффициент, учитывающий условия и метод испытания.

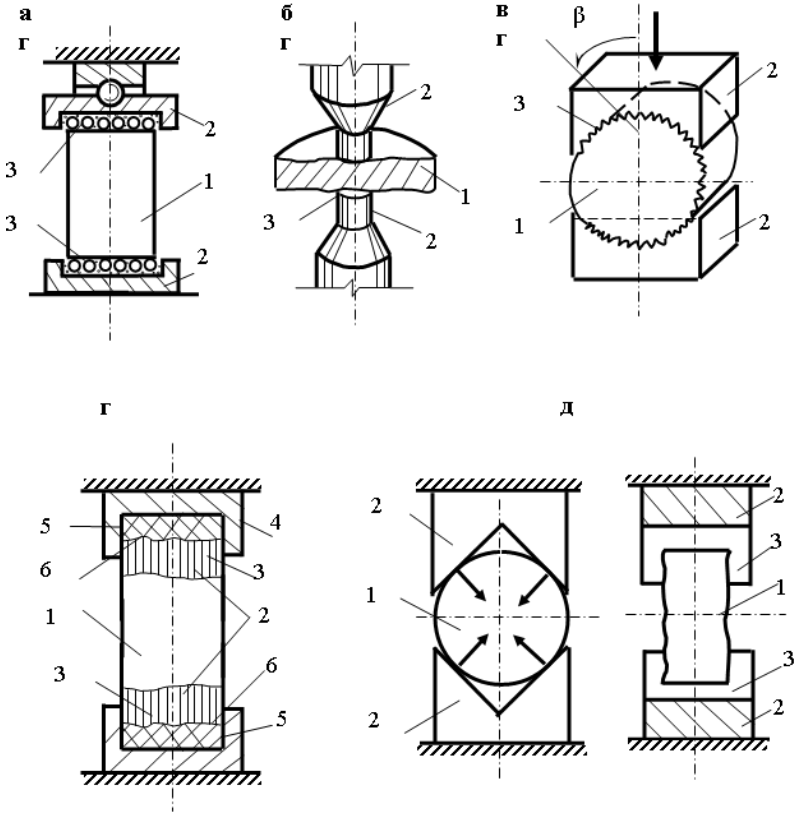


Рисунок 5.6 - Испытание пород на одноосное сжатие: а - шариковыми плитами; б - соосными пуансонами; в - плитами с цилиндрической вытяжкой; г - пакетом иглолок; д - плитами с прямоугольным вырезом

## Испытание прочности пород на одноосное растяжение

Прямые испытания пород на растяжение затруднены из-за концентрации напряжений в образце под захватами разрывной машины и наличия эксцентриситета приложения нагрузки. Поэтому получили распространение косвенные методы, основанные на принципе раскола образцов сосредоточенными нагрузками.

Наиболее распространены следующие виды испытаний на растяжение:

прецизионный метод (ДГМИ) прямого растяжения 3-4 породных кернов 1, на концах которого сделаны конические заплечики 2 из быстротвердеющей пластмассы, взаимодействующие через упругие кольца 3 с захватами 4, прикрепленными через шаровые опоры 5 к захватам разрывной машины, надежность метода 0.9-0.95 благодаря устранению эксцентриситета и концентрации напряжений (рис. 5.7,а);

метод раскалывания 8-10 кернов 1 по образующей (бразильский метод) встречно направленными усилиями, по плоскости раскола согласно задаче Герца возникают равномерно растягивающие напряжения 2 (рис. 5.7,б);

метод раскалывания сферическими инденторами 1 8-10 образцов 2 произвольной формы (разработан ВНИМИ), метод грубый с высокой доступностью и надежностью 0.6-0.8 (рис. 5.7,в);

метод поперечного раскалывания кернов (4-6 раз) клиньями 2 с прямоугольным вырезом (ДГМИ), ему присущи нормальная точность и высокая доступность, может быть применен как грубый, если образцы произвольной формы (рис. 5.7,г);

метод раскалывания породных плит 1 клиньями 2 (ИГД им. А.А.Скочинского), основан на "бразильском" методе, требует учета масштабного эффекта и тщательной подготовки поверхностей плит, надежность 0.8-0.9 (рис. 5.7,д).

Прочность породы на растяжение определяют по формуле

$$\sigma_p = K_y P / A, \quad (5.2)$$

где P - разрушающее усилие, Н;

A - площадь разрушения, м<sup>2</sup>;

K<sub>y</sub> - коэффициент, соответствующий методу испытания.

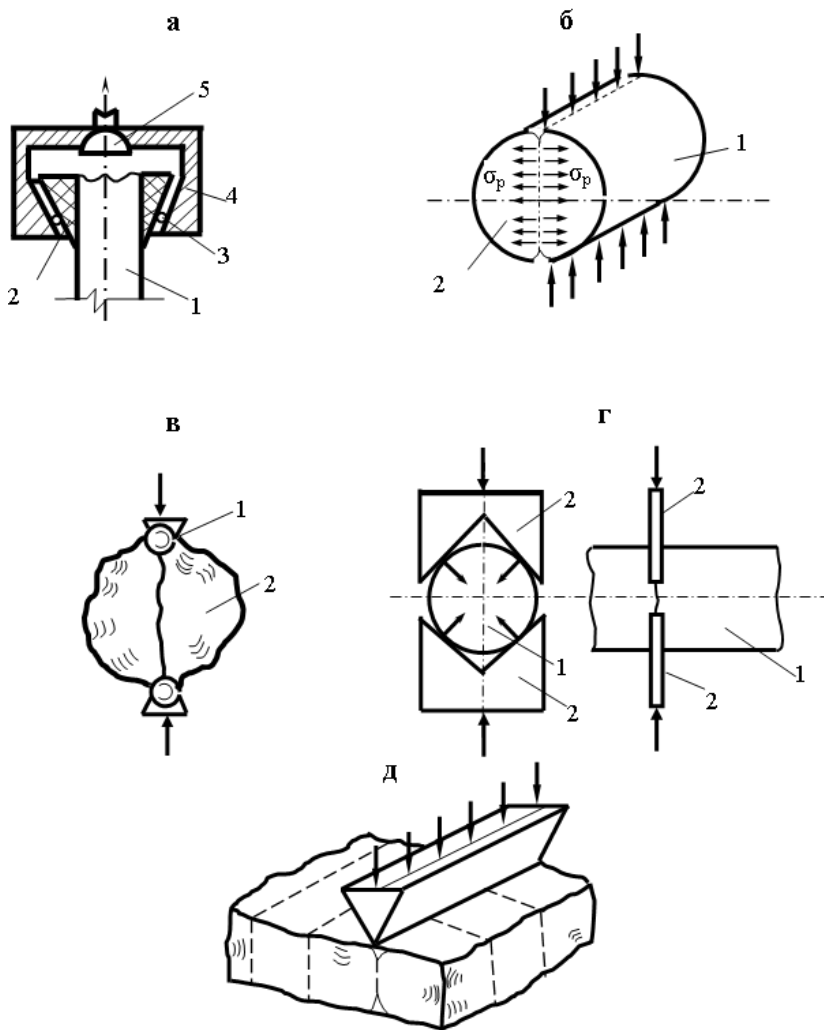


Рисунок 5.7 - Испытания пород:  
 а - метод самоцентрировки образца; б - продольное раскалывание кернов "бразильским" методом; в - раскалывание сферическими инденторами; г - поперечное раскалывание кернов; д - раскалывание породных плит клиньями.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

Изучите и законспектируйте следующие разделы учебника и дополнительной литературы:

[1, с. 3-66; 2, с. 3-40; 3, с. 3-20; 4, с. 148-164; 5, с. 3-126].

Проверьте свои знания, ответив на вопросы и выполнив контрольные задания:

1. В чем особенности классификации объектов исследования горной геомеханики? Какова связь курса со смежными дисциплинами?

2. Перечислите основные понятия и определения дисциплины, попытайтесь дать им свою формулировку.

3. Что вы знаете об истории развития горной науки? Какие ученые были ее творцами?

4. Как экспериментально определить модуль деформации и коэффициент Пуассона? Как записать обобщенный закон Гука, в чем его физический смысл?

5. Как определить угол наклона главной площадки аналитически и на диаграмме О.Мора?

6. Выведите уравнения равновесия (2.9) и (2.10).

7. Сопоставьте ползучесть и релаксацию (определения, графическую и аналитическую интерпретацию). В чем их отличие от пластичности?

8. Какие вы знаете структурные механические модели пород? Какие им соответствуют дифференциальные уравнения?

9. Охарактеризуйте характер разрушения пород. В чем сущность теории прочности О.Мора?

10. Запишите уравнения различных прямолинейных огибающих (паспортов прочности), дайте им физическое толкование.

11. Какие факторы влияют на прочность породы?



Выполните лабораторные работы:

1. Определение предела прочности породы при одноосном сжатии.

2. Определение предела прочности породы при одноосном растяжении.

3. Определение паспорта прочности горной породы.

Для углубления знаний самостоятельно изучите:

поведение горной породы при ее нагружении за пределом прочности (падающая ветвь диаграммы нагружения);

сущность наследственной теории ползучести;

основы кинетической теории прочности пород;

патентный фонд по определению одного из механических свойств горной породы;

физические основы механики разрушения пород.

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений. - М.: Недра, 1984. -415 с.
2. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механические процессы в породных массивах. - М.: Недра, 1986. -272 с.
3. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. - М.: Недра, 1989. -270 с.
4. Якоби О. Практика управления горным давлением. - М.: Недра, 1987. -566 с.
5. Витте В. Механика скальных пород. - М.: Недра, 1990. - 439с.
6. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу "Механика подземных сооружений" (для студентов специальности 0904) / Сост. Г.Г. Литвинский. - Алчевск: ДГМИ , 1994.-00 с.