

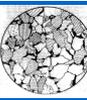
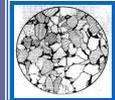
**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД**





ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

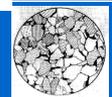
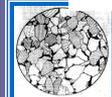
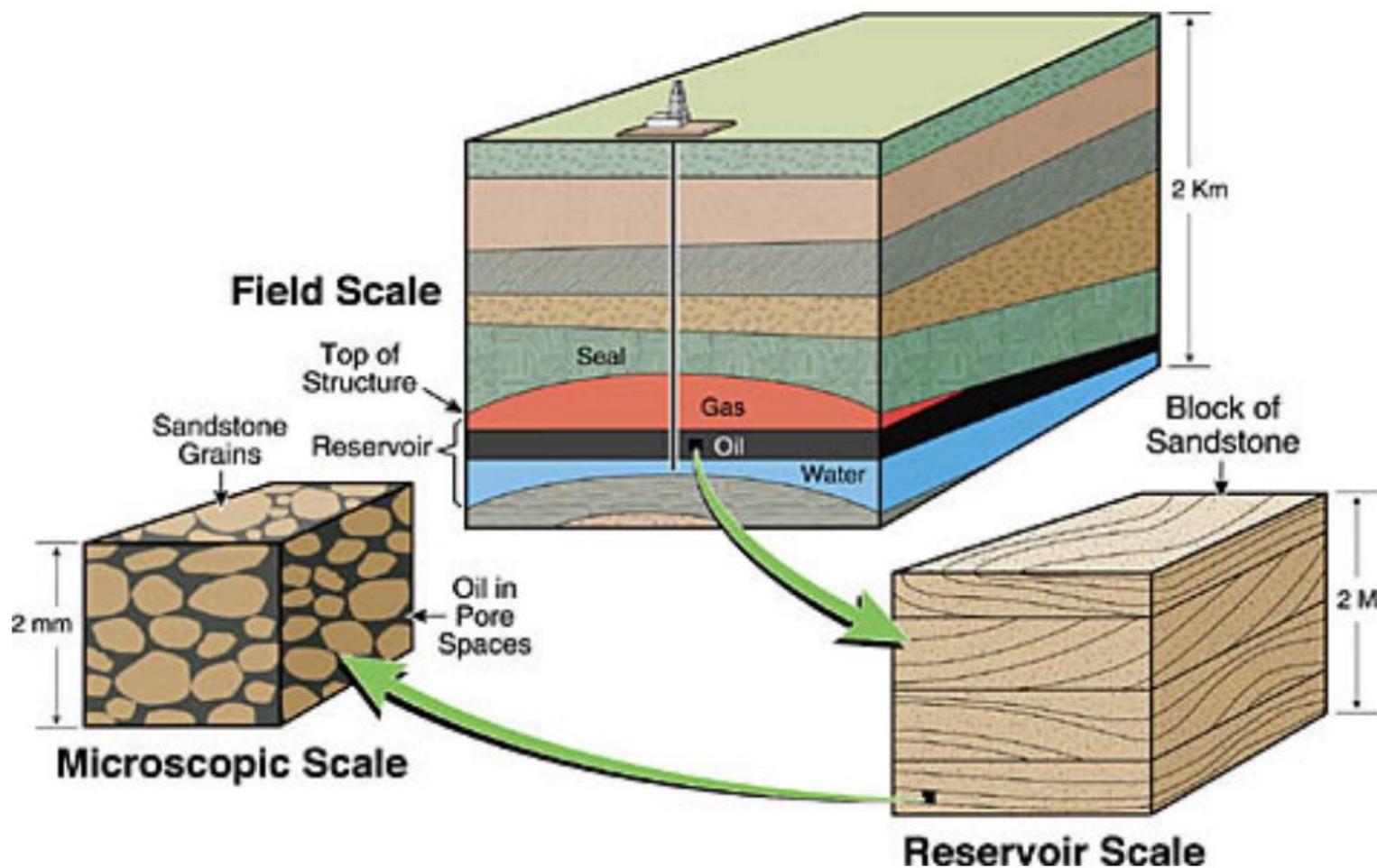
- 6.1. Напряженное состояние горных пород.
- 6.2. Упругие свойства горных пород.
- 6.3. Прочность и пластичность горных пород.
- 6.4. Твердость и крепость горных пород.
- 6.5. Набухание и размокание глинистых пород.
- 6.6. Классификация горных пород по механическим свойствам.

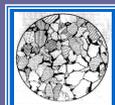




Соотношение масштабов в нефтегазовых системах.

Подход механики сплошных сред

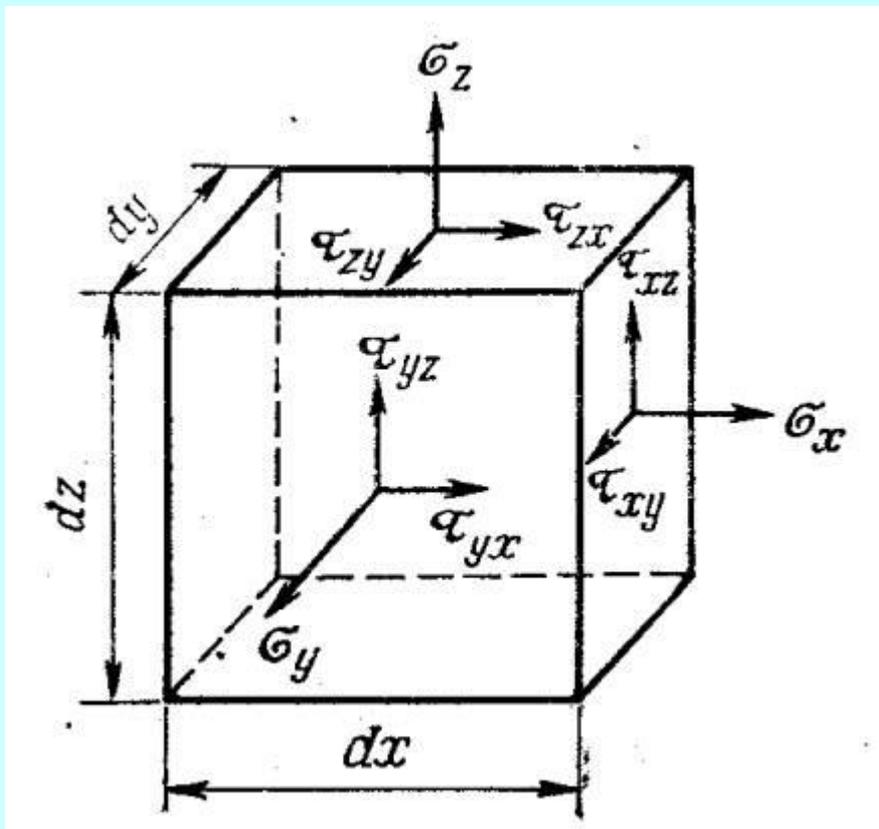




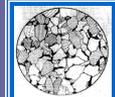
6.1. Напряженное состояние горных пород

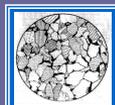
На породы в недрах Земли действуют следующие основные силы:

- Горное давление, обусловленное весом пород.
- Тектонические силы и внутрипластовое давление.
- Термические силы, возникающие под влиянием теплового поля Земли.



Компоненты напряжений, действующих на элемент горной породы.





$$P = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (6.1)$$

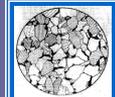
Свойства тензора напряжений:

1. Тензор P - симметричный, т.е. $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$
2. Существуют три взаимно перпендикулярные главные оси тензора напряжений, относительно которых тензор имеет вид:

$$P = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix} \quad (6.2)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные напряжения:

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$





Сдвиговые напряжения

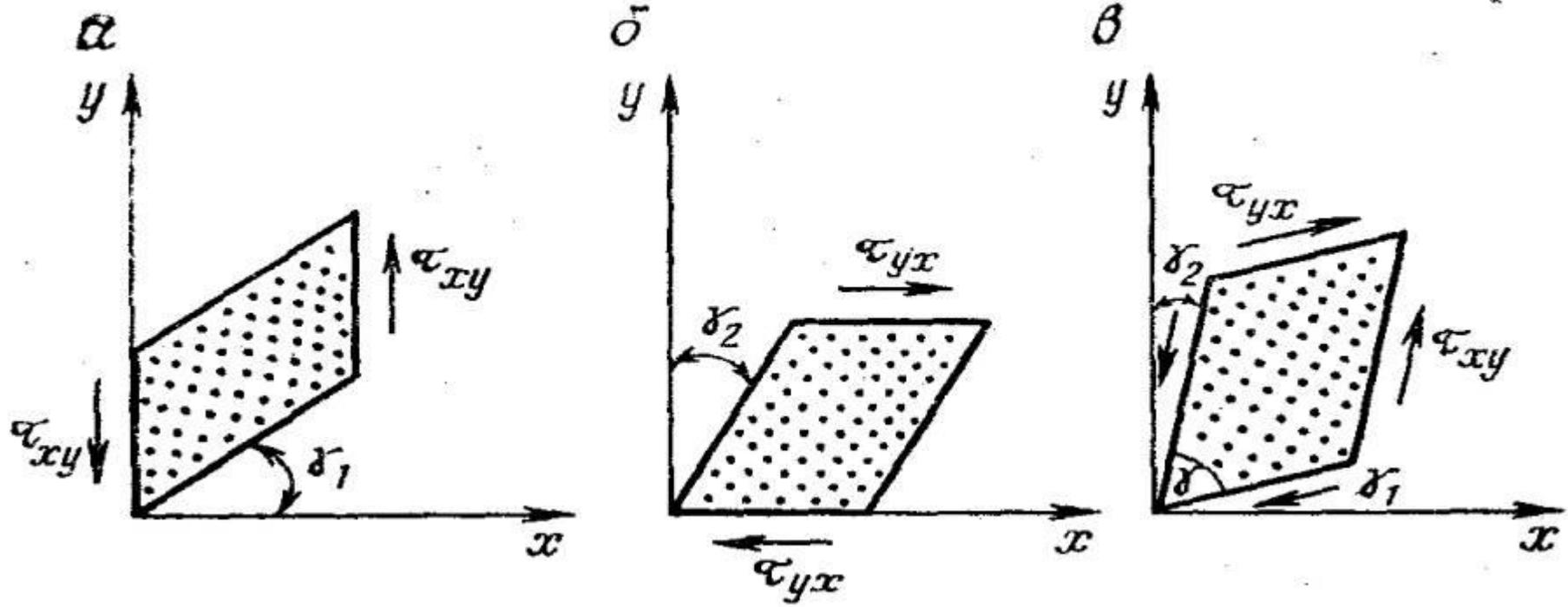
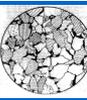
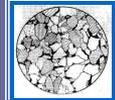
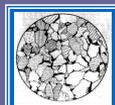


Схема сдвиговых деформаций грани xy под действием касательных напряжений.





6.2. Упругие свойства горных пород

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right] & \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z) \right] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu (\sigma_y + \sigma_x) \right]\end{aligned}\tag{6.3}$$

E - модуль Юнга (коэффициент продольной упругости);

G - модуль сдвига,

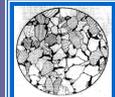
ν - коэффициент Пуассона - отношение поперечной деформации сжатия к продольной (0÷0,5).

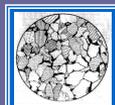
$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}$$

G - модуль сдвига,





Частные случаи:

1. Одноосное сжатие.

$$\varepsilon_z \neq 0; \varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.$$

$$\sigma_x = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z$$

$$n = \frac{\nu}{1-\nu} \text{ - коэффициент бокового распора.} \quad (6.4)$$

2. Всестороннее сжатие.

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma.$$

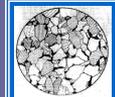
$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \frac{\sigma}{E} (1-2\nu) \quad (6.5)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{3\sigma}{E} (1-2\nu)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \beta_0 \sigma \quad (6.6)$$

$$\frac{3}{E} (1-2\nu) \sigma = \beta_0 \quad \text{- коэффициент объемного сжатия элемента горной породы.}$$

$$\frac{\Delta V_{обр}}{V_{обр}} = \beta_0 \Delta P \quad \Delta V_{обр} \text{ - изменение объема образца при изменении пластового давления на } \Delta P. \quad (6.7)$$





В.Н. Щелкачев:

1) $\beta_0 = -\frac{1}{V_{\text{обр}}} \frac{dV_{\text{обр}}}{dP}$ - коэффициент сжимаемости образца; (6.8)

2) $\beta_{\text{пор}} = -\frac{1}{V_{\text{пор}}} \frac{dV_{\text{пор}}}{dP}$ - коэффициент сжимаемости пор; (6.9)

3) $\beta_c = -\frac{1}{V_{\text{обр}}} \frac{dV_{\text{пор}}}{dP}$ - коэффициент сжимаемости среды. (6.10)

$$\beta_c = m\beta_{\text{пор}}$$

Для нефтесодержащих пород: $\beta_c = (0.3-2)10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

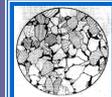
Для жидкости: $\beta_{\text{жс}} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP}$ (6.11)

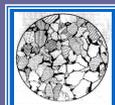
Для пресной воды: $\beta_{\text{в}} = 4.5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Для нефти в пластовых условиях: $\beta_{\text{н}} = (7-30)10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

В теории упругого режима пласта:

$$\beta^* = m\beta_{\text{жс}} + \beta_c \text{ - коэффициент упругоэластичности пласта.}$$





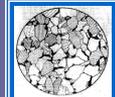
Определение пористости образца горной породы в реальных условиях

$$\beta_0 = \frac{1}{V_{\text{обр}}} \frac{dV_{\text{обр}}}{dP} \quad - \text{ коэффициент сжимаемости образца;}$$

$$V = V_0 e^{-\beta_0(p-p_0)}$$

V и V_0 - значения объема образца при давлении p и p_0 .

$$m = m_0 e^{-\beta_0(p-p_0)} \quad - \text{ формула В.Н. Николаевского.}$$



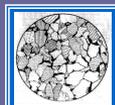
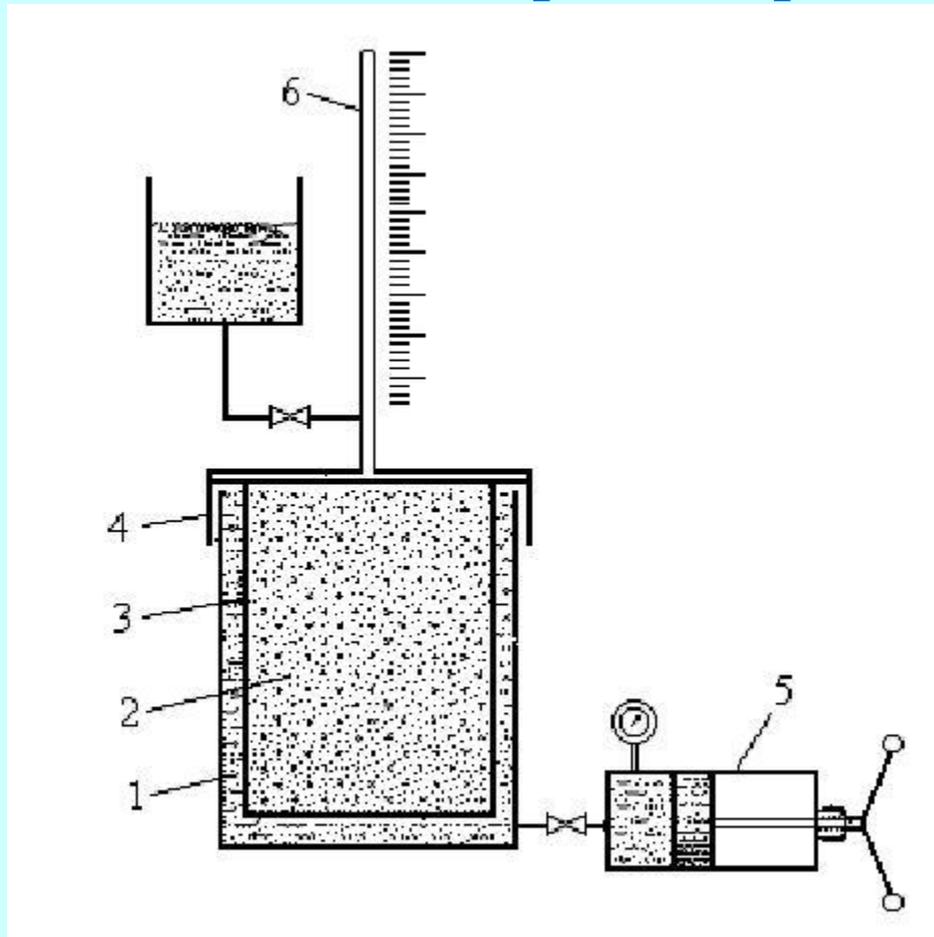


Схема установки для определения коэффициента сжимаемости горных пород:



1-камера высокого давления, 2 – образец керна, 3 – эластичная непроницаемая оболочка, 4 – крышка, 5 – пресс для создания давления в камере образец, 6 – калиброванный капилляр для измерения объема жидкости, вытесняемой из сжимаемого образца.

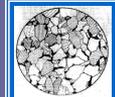
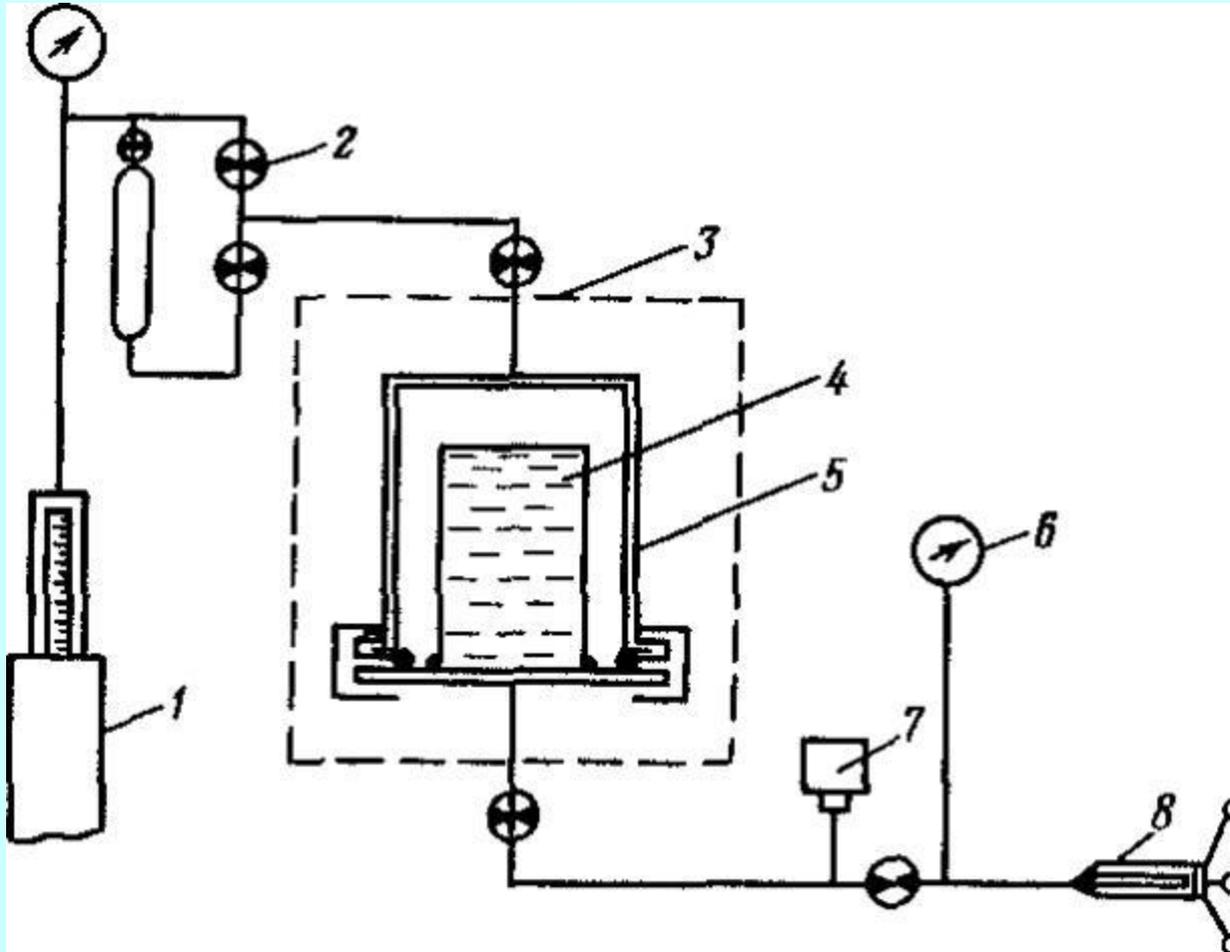
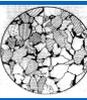
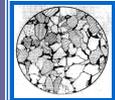


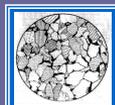


Схема установки для определения коэффициента сжимаемости горных пород:



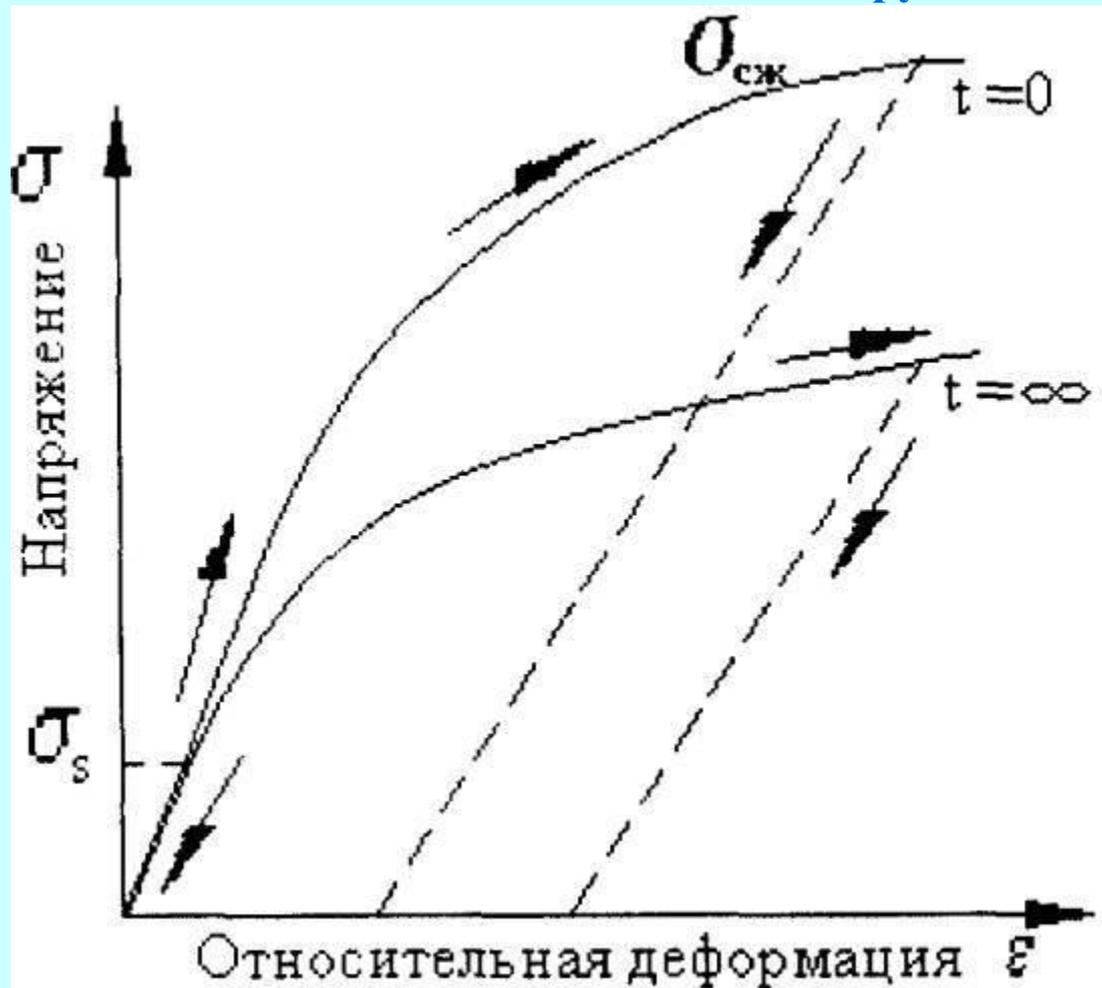
1- измерительный пресс, 2 - вентиль 3 – термостат, 4 – образец керна, 5 - кернадержатель, 6 - образцовый манометр, 7 - датчик давления, 8 – микропресс.





6.3. Прочность и пластичность горных пород

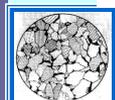
Зависимость напряжения горных пород от деформации при различной скорости нагружения.



σ_s – предел упругости;
 $\sigma_{сж}$ – разрушающее напряжение

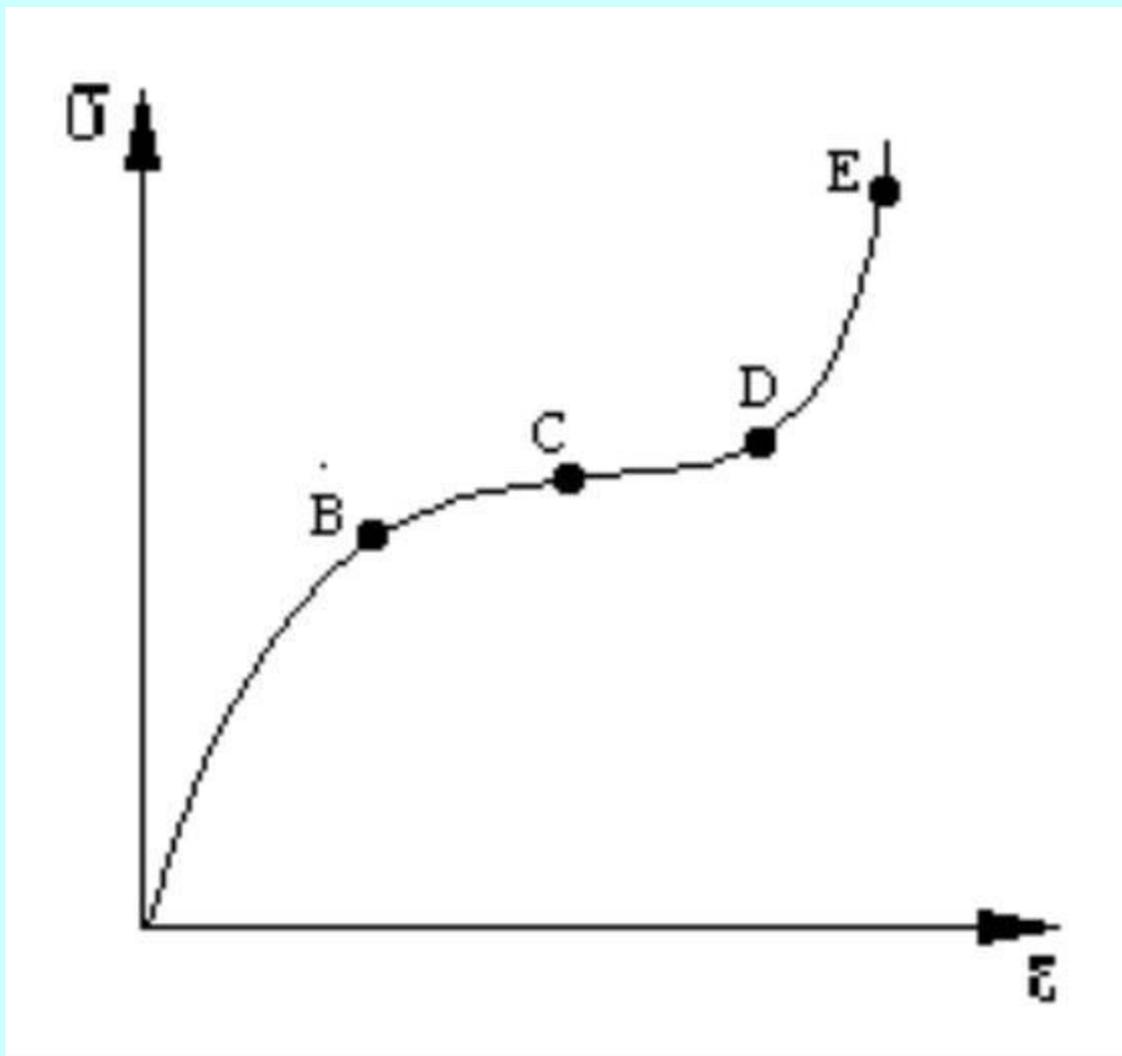
$t = 0$ — мгновенное нагружение,
 $t = \infty$ — длительное.

Глины: $\sigma_s = 10-15\% \sigma_{сж}$,
песчаники, доломиты,
известняки: $\sigma_s = 70-75\% \sigma_{сж}$.





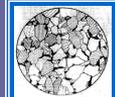
В общем случае кривая, характеризующая связь напряжений и деформаций, имеет вид, представленный на следующем рисунке:



Связь напряжений и деформаций горных пород с пределами:

- упругости (точка В);
- пластичности (точка Д);
- прочности (точка Е).

Точка С соответствует началу пластических деформаций на отрезке ВД.





Когда напряжение превышает предел упругости, тело Гука начинает разрушаться или пластически течь, переходя в тело Сен-Венана.

Сопротивление тела Гука разрушению и переходу в тело Сен-Венана, называют прочностью.

У песчаников прочность $\sigma_s = 500$ атм, известняков $\sigma_s = 3500$ атм.

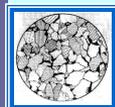
Такой большой диапазон обусловлен:

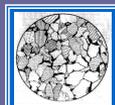
- кристаллической и агрегатной структурой горной породы,
- плотностью,
- составом,
- характером распределения цементирующего материала.

Один и тот же тип породы на разных глубинах и в разных географических районах может иметь разные механические свойства и прочность.

Горные породы оказывают:

- наибольшее сопротивление сжатию,
- наименьшее – растяжению (в 67 раз меньше, чем сжатию),
- изгибу – в 4-6 раз меньше,
- срезу в 2-4,5 раз меньше,
- разрыву в 10-100 раз меньше.





- Прочность горных пород на больших глубинах больше, чем при нормальных поверхностных условиях.
- Прочность известняков и песчаников после проникновения воды уменьшается на 25-30%.
- Мелкозернистые породы наиболее прочны, что необходимо учитывать при проектировании буровых, взрывных и других работ, связанных с разрушением породы.

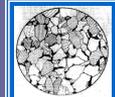
Пластичность. Почти все породы при различных условиях приложения нагрузки могут вести себя и как хрупкие, и как пластичные тела.

При **растяжении, изгибе, одноосном сжатии** пластические свойства почти **не проявляются**.

При **всестороннем сжатии** многие горные породы, хрупкие при простых деформациях, приобретают **пластические свойства** (однако, чаще горные породы ограниченно пластичны).

Механизм пластических деформаций:

- вследствие межзерновых движений и явлений перекристаллизации;
- отдельные зерна могут двигаться независимо друг от друга



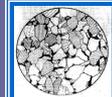


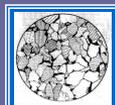
Значительные пластические деформации претерпевают **глины, глинистые породы, минералы типа каменной соли.**

В **песчаниках, известняках и доломитах** пластические деформации могут возникнуть из-за появления **микротрещин**, позволяющих отдельным участкам пластов скользить и перемещаться вдоль плоскостей трещин.

Какова бы ни была природа ползучести и пластических деформаций – это происходит даже на сравнительно небольших глубинах.

На практике – с течением времени нарушенное поле естественных напряжений вокруг горных выработок и скважин восстанавливается, и давление, например, на обсадные колонны после окончания бурения долго возрастает, что объясняется проявлением ползучести и пластичности горных пород.





6.4. Твердость и крепость горных пород.

Твердость - характеризует сопротивление породы режущему инструменту (твердость по Шору) [кгс/мм²].

На практике - для определения предельных нагрузок на долото при бурении.

Твердость горных пород зависит от:

1) пористости

- с увеличением пористости уменьшается ,

2) глубины залегания

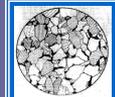
- увеличивается (в 2-2,5 раза с увеличением всестороннего давления до 1000атм),

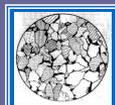
3) сцементированности породы

- с увеличением карбонатности увеличивается ,

4) водонасыщенности

- с увеличением в породе уменьшается .





Крепость – характеризует разрушение породы по отношению к конкретному виду воздействия:

- 1) внедрение долота;
- 2) скалывание;
- 3) резание;
- 4) дробление и т. д.

Все горные породы делятся по крепостям на 5 групп:

- 1) весьма крепкие,
- 2) крепкие,
- 3) ломкие,
- 4) мягкие,
- 5) рыхлые и сыпучие.

Численно крепость характеризуют **коэффициентом крепости**:

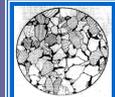
$$f = \frac{A}{V} \left[\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \right]$$

A – работа разрушения горной породы, V – объем разрушения.

В Башкирии, например, коэффициент крепости лежит в пределах:

$$0,2 < f < 15 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

Наиболее **крепкие** породы – **известняки** и **доломиты**, наиболее **рыхлые** – **песчаники**.





6.5 Набухание и размокание глинистых пород.

Прочность горных пород зависит от их влажности (водонасыщенности).

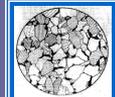
Глинистые породы при взаимодействии с водой набухают,

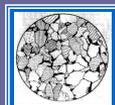
Способность к набуханию характеризуется:

- 1) увеличением объема образца (в % к начальному объему породы);
- 2) влажностью набухшего образца;
- 3) давлением, развиваемым набухшим образцом.

Набухание глинистых коллекторов приводит иногда к значительному снижению проницаемости.

В промышленной практике размокание глин может привести к обвалам, так как глины распадаются на мелкие чешуйки.





6.6. Классификация горных пород по механическим свойствам.

Классификация горных пород по механическим свойствам дает возможность нормировать выбор средств для разрушения горных пород, например, при бурении.

В настоящее время принята следующая классификация. Породы разделяют на:

- 12 категорий по твердости и пределу текучести.
- 8 категорий по удельной контактной работе (крепости) и модулю Юнга.
- 6 категорий по коэффициенту пластичности.

В целом все породы разделяют на три группы по их твердости и пределу текучести.

Классификация горных пород по твердости и пределу текучести

<u>Тип пород</u>	Твердость и предел текучести
Мягкие	$f_s < 100 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$, (например: глинистые, песчаники, известняки).
Средние	$100 < f_s < 400 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$
твердые	$f_s > 400 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$.

