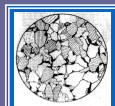


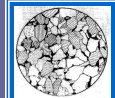
**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД**

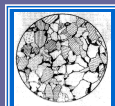




## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

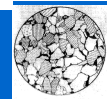
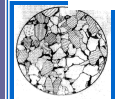
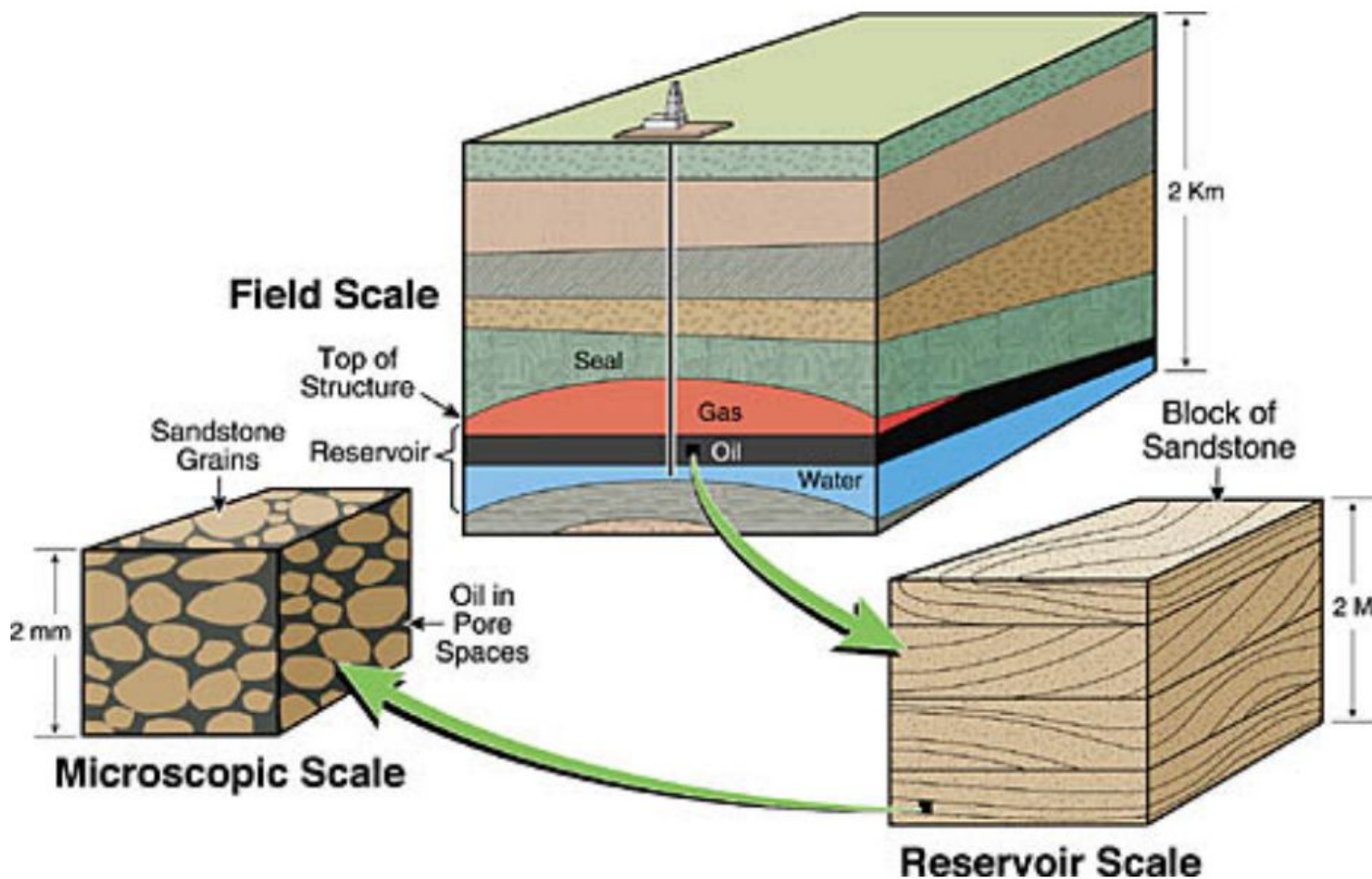
- 6.1. Напряженное состояние горных пород.
- 6.2. Упругие свойства горных пород.
- 6.3. Прочность и пластичность горных пород.
- 6.4. Твердость и крепость горных пород.
- 6.5. Набухание и размокание глинистых пород.
- 6.6. Классификация горных пород по механическим свойствам.

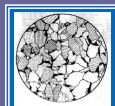




## Соотношение масштабов в нефтегазовых системах.

### Подход механики сплошных сред

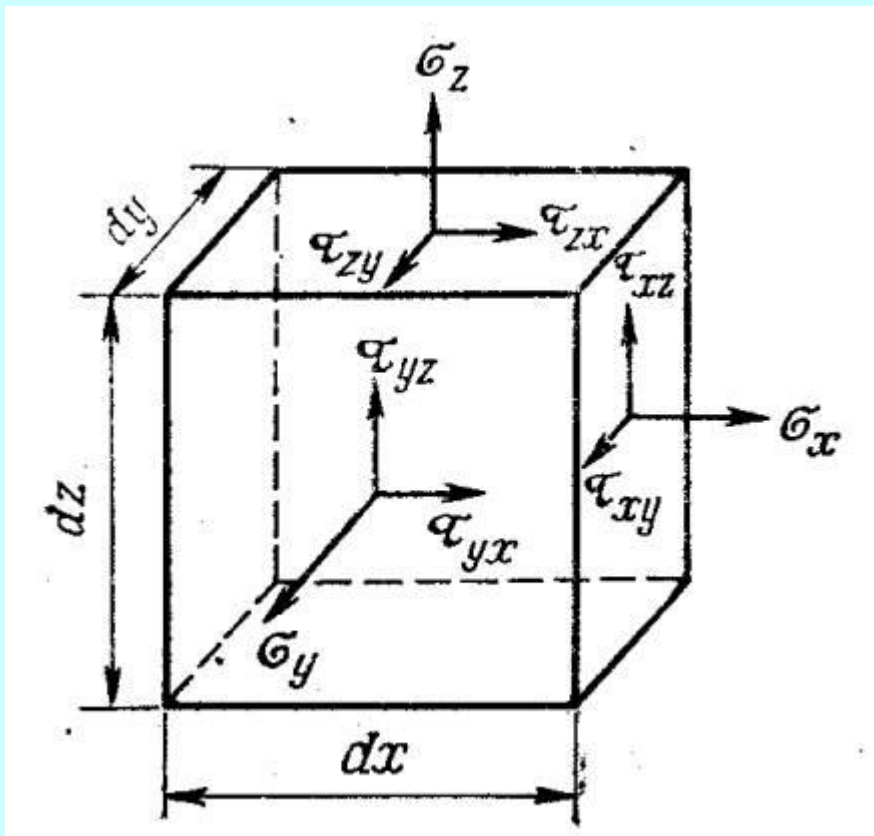




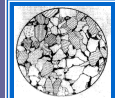
## 6.1. Напряженное состояние горных пород

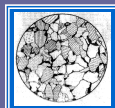
На породы в недрах Земли действуют следующие основные силы:

- 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.





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

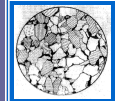
Свойства тензора напряжений:

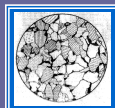
1. Тензор  $P$  - симметричный, т.е.  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$
2. Существуют три взаимно перпендикулярные главные оси тензора напряжений, относительно которых тензор имеет вид:

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

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

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





## Сдвиговые напряжения

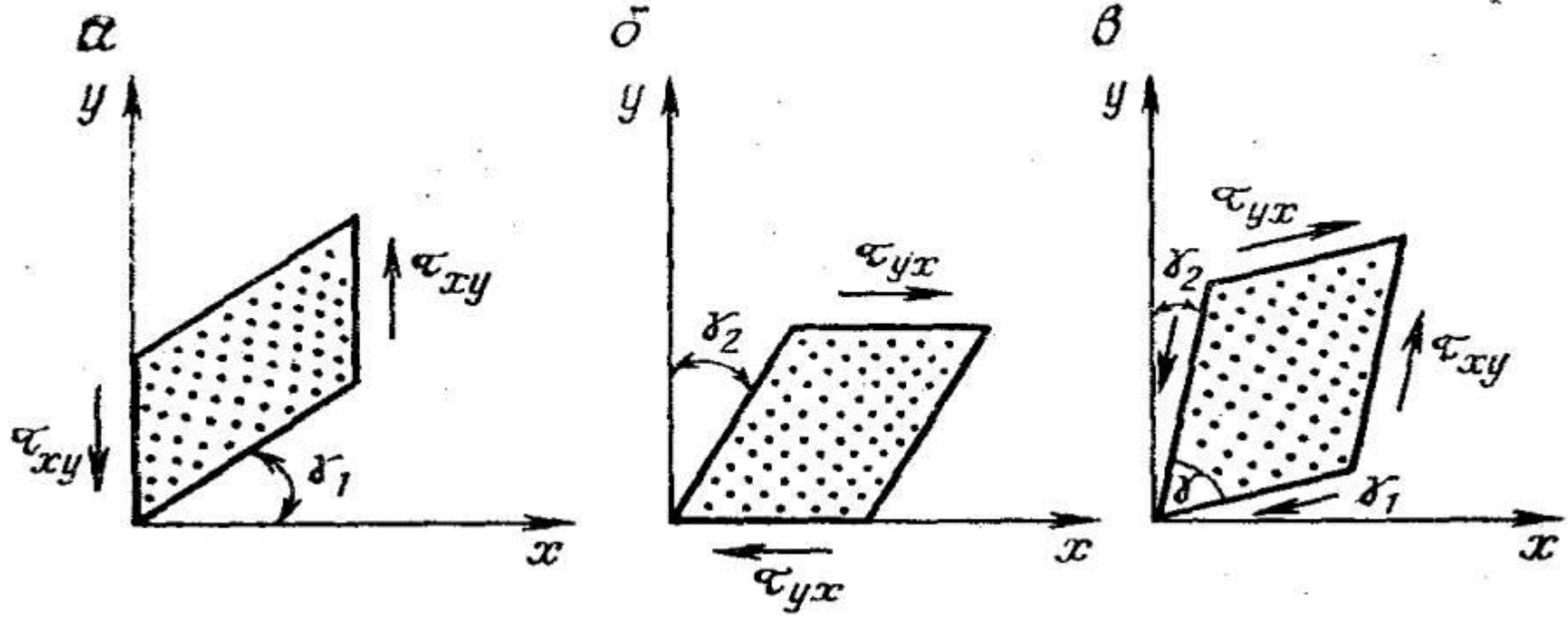
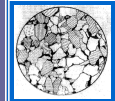
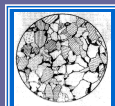


Схема сдвиговых деформаций грани  $xy$  под действием касательных напряжений.





## 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,

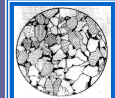
**$\nu$**  - коэффициент Пуассона - отношение поперечной деформации сжатия к продольной (0÷0,5).

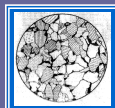
$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$$

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

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

**$G$**  - 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.

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

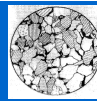
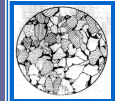
$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \frac{\sigma}{E} (1-2\nu) \quad (6.5)$$

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

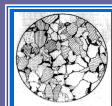
$$\frac{\Delta V}{V} = \beta_0 \sigma \quad (6.6)$$

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

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







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

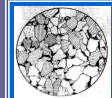
Для жидкости:  $\beta_{\text{жс}} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP}$  (6.11)

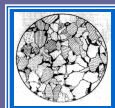
Для пресной воды:  $\beta_{\text{в}} = 4.5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ .

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

В теории упругого режима пласта:

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





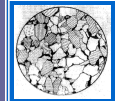
## Определение пористости образца горной породы в реальных условиях

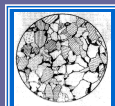
$$\beta_0 = \frac{1}{V_{\text{обр}}} \frac{dV_{\text{обр}}}{dP} \quad - \quad \text{коэффициент сжимаемости образца;}$$

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

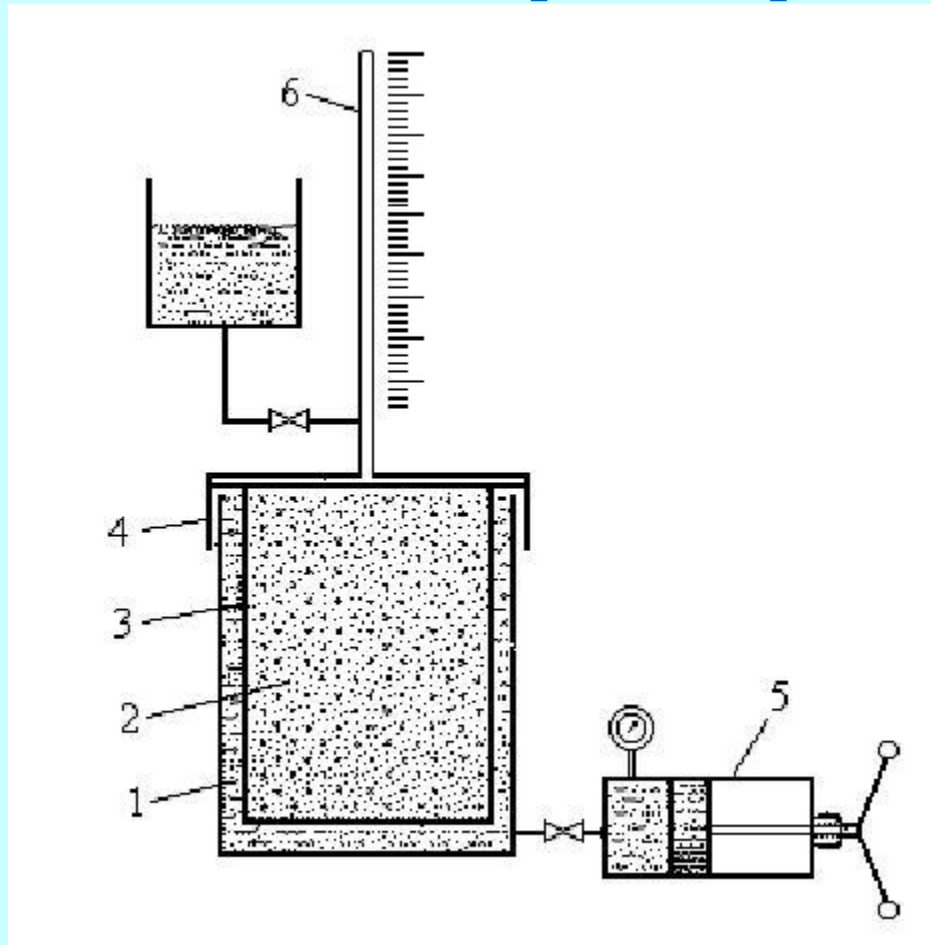
$V$  и  $V_0$  - значения объема образца при давлении  $p$  и  $p_0$ .

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

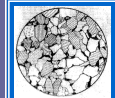


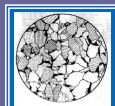


## Схема установки для определения коэффициента сжимаемости горных пород:

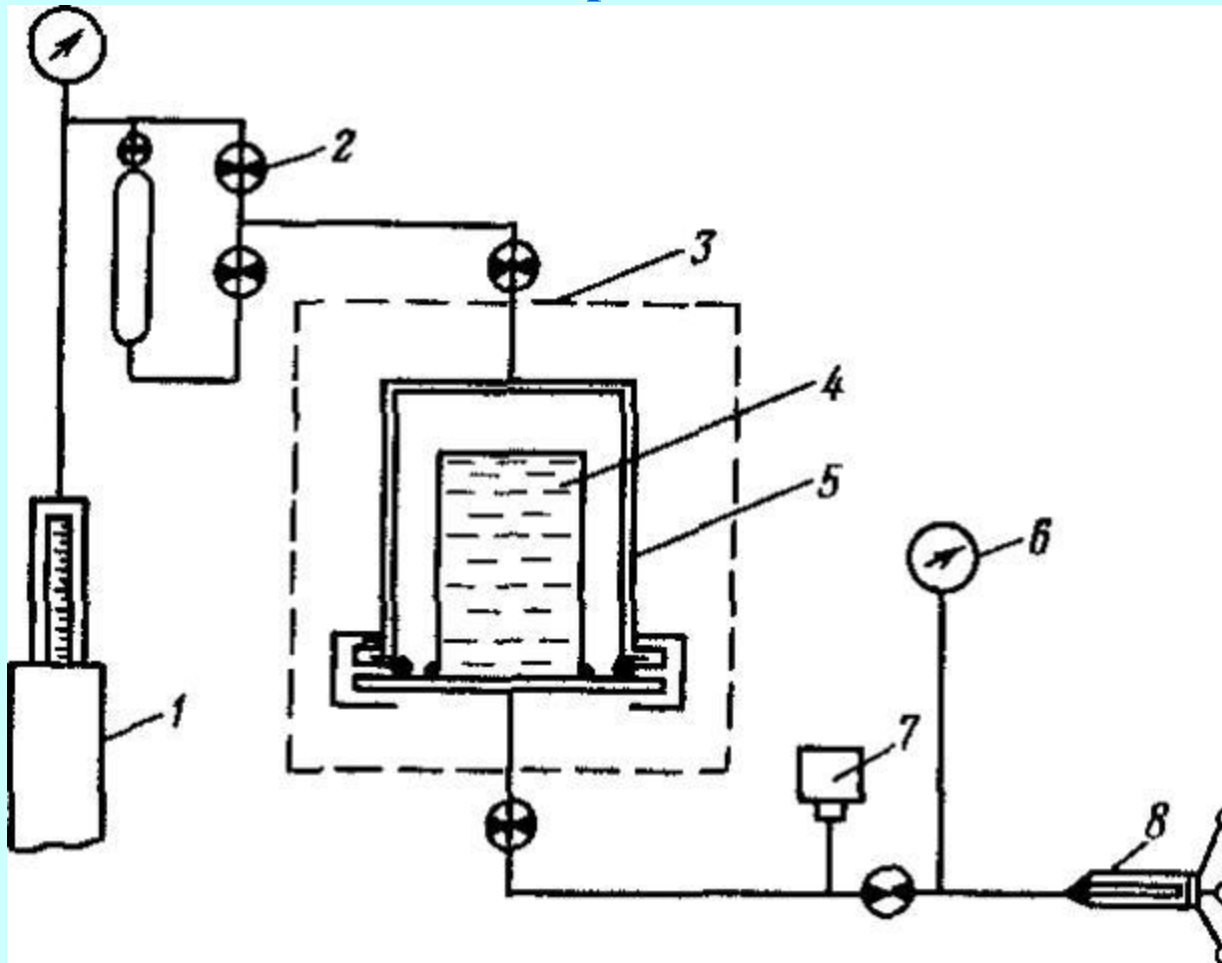


1-камера высокого давления, 2 – образец керна, 3 – эластичная непроницаемая оболочка, 4 – крышка, 5 – пресс для создания давления в камере образец, 6 – калиброванный капилляр для измерения объема жидкости, вытесняемой из сжимаемого образца.

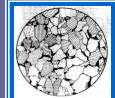


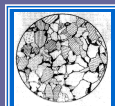


## Схема установки для определения коэффициента сжимаемости горных пород:



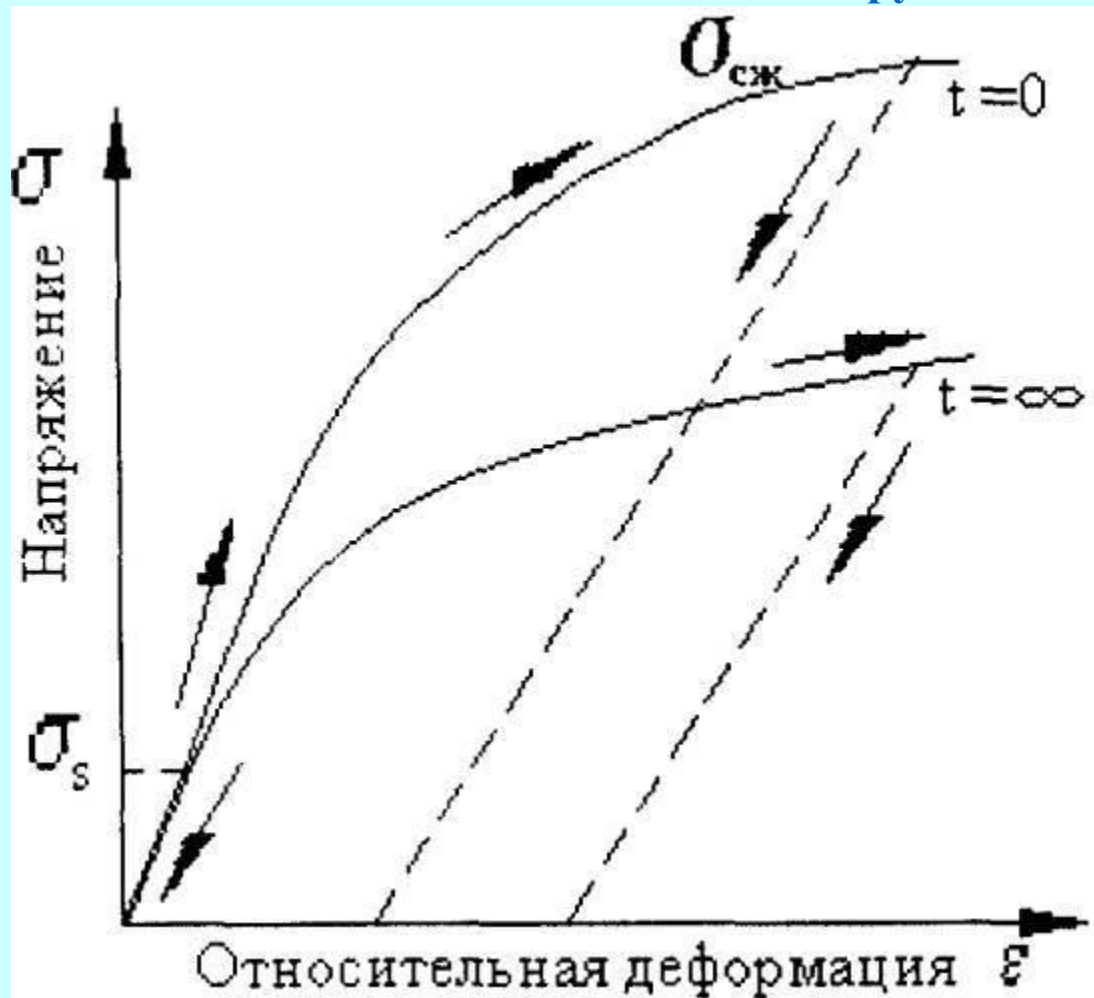
1- измерительный пресс, 2 - вентиль 3 – термостат, 4 – образец керна, 5 - кернадержатель, 6 - образцовый манометр, 7 - датчик давления, 8 – микропресс.





## 6.3. Прочность и пластичность горных пород

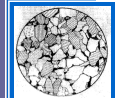
Зависимость напряжения горных пород от деформации при различной скорости нагружения.

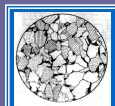


$\sigma_s$  – предел упругости;  
 $\sigma_{сж}$  – разрушающее напряжение

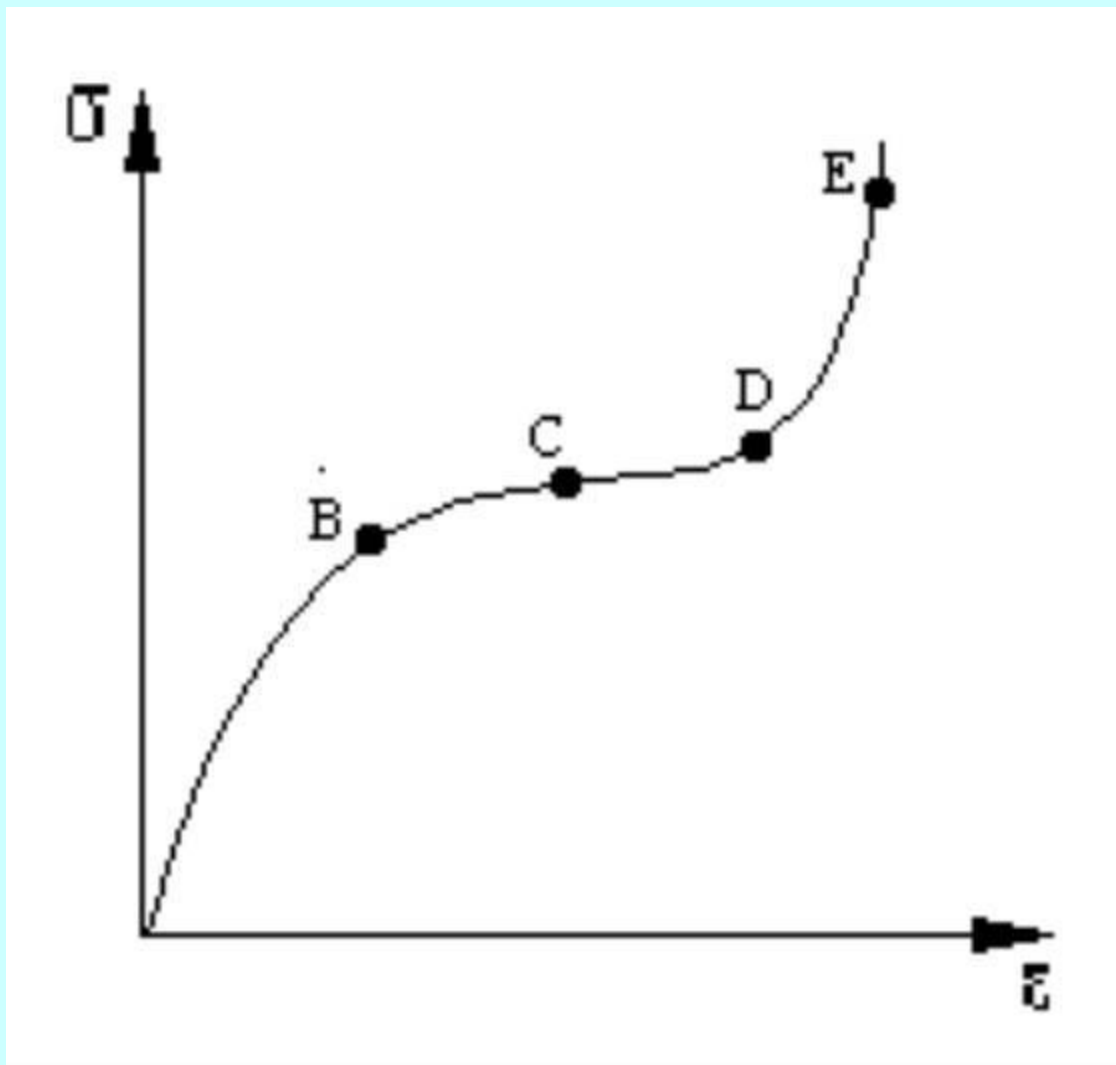
$t = 0$  — мгновенное нагружение,  
 $t = \infty$  — длительное.

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





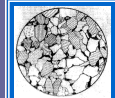
В общем случае кривая, характеризующая связь напряжений и деформаций, имеет вид, представленный на следующем рисунке:

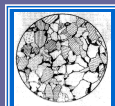


**Связь напряжений и деформаций горных пород с пределами:**

- 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.

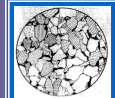
Такой большой диапазон обусловлен:

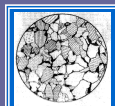
- кристаллической и агрегатной структурой горной породы,
- плотностью,
- составом,
- характером распределения цементирующего материала.

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.

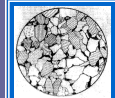
**Пластичность.** Почти все породы при различных условиях приложения нагрузки могут вести себя и как хрупкие, и как пластичные тела.

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

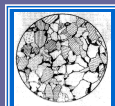
При **всестороннем сжатии** многие горные породы, хрупкие при простых деформациях, приобретают **пластические свойства** (однако, чаще горные породы ограниченно пластичны).

Механизм пластических деформаций:

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





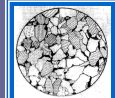


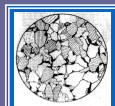
Значительные пластические деформации претерпевают **глины, глинистые породы, минералы типа каменной соли.**

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/мм<sup>2</sup>].

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

**Твердость горных пород зависит от:**

1) пористости

- с увеличением пористости уменьшается ,

2) глубины залегания

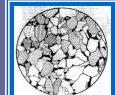
- увеличивается (в 2-2,5 раза с увеличением всестороннего давления до 1000атм),

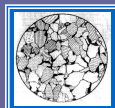
3) сцементированности породы

- 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**:

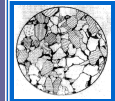
$$f = \frac{A}{V} \left[ \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \right]$$

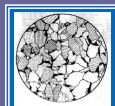
$A$  – работа разрушения горной породы,  $V$  – объем разрушения.

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).

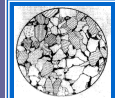
Глинистые породы при взаимодействии с водой набухают,

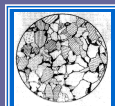
Способность к набуханию характеризуется:

- 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	$f_s < 100 \frac{кгс}{см^2}$ , (например: глинистые, песчаники, известняки).
Средние	$100 < f_s < 400 \frac{кгс}{см^2}$
твердые	$f_s > 400 \frac{кгс}{см^2}$ .

