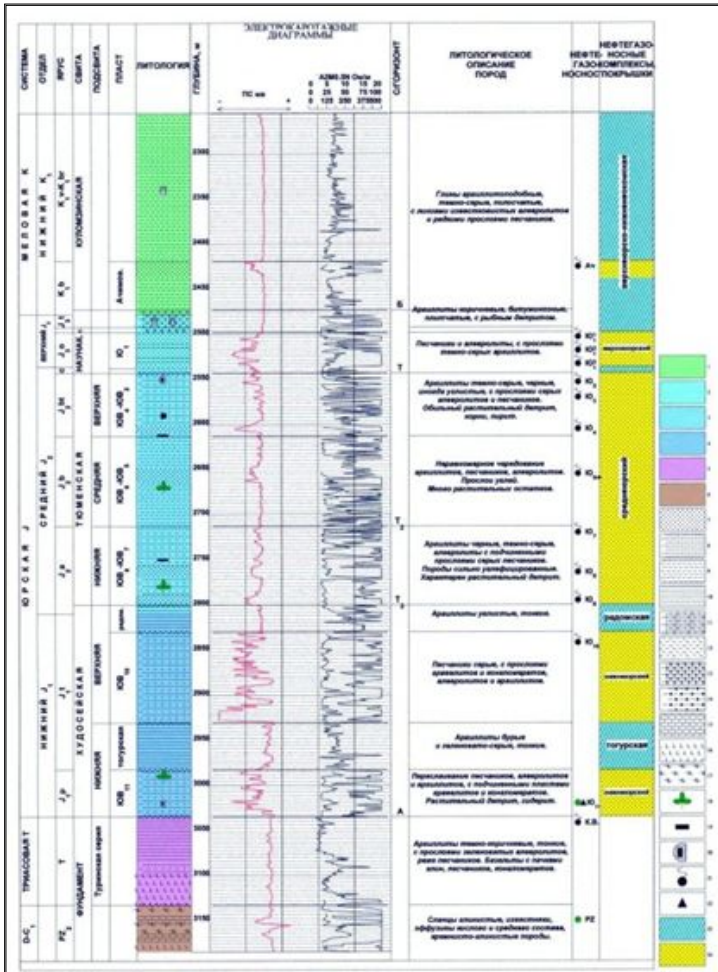


# «Петрофизика»



Лекционный курс по специальности  
«Технология геологической  
разведки»  
Физико-технический институт БашГУ  
Кафедра геофизики

## Модуль 1:

Предмет петрофизики.

Способы изучения – лабораторные,  
полевые.

Классификация петрофизических  
параметров.

Способы представления в виде таблиц,  
графических и функциональных  
зависимостей.

Основные петрофизические параметры  
горных пород.

# Что изучает ПЕТРОФИЗИКА?

- 1. Физические и физико-химические процессы, идущие в горных породах, при которых проявляются их физические свойства: пористость, плотность, упругие, электрические и магнитные свойства и др.
- 2. Петрофизические величины (коэффициент пористости, проницаемость, электропроводность ... ) отдельных образцов.
- 3. Вариация петрофизической величины в зависимости от условий залегания, геологические особенности породы.
- 4. Связь петрофизических величин м/у собой для построения корреляционных зависимостей.
- 5. Локальные и региональные особенности изменения петрофизических параметров породы.
- 6. Причины и законы изменения петрофизических величин по разрезу вертикально и горизонтально.
- 7. Петрофизическое районирование - установка границ по особенностям петрофизических величин горных пород.
- 8. Лабораторные и прямые методы оценки петрофизических величин

# Что для этого необходимо сделать?

**Результаты изучения необходимо классифицировать, например по следующим свойствам:**

- Емкостные (пористость, влагоемкость).
- Капиллярные (капиллярное давление, смачиваемость).
- Газо- и гидродинамические (проницаемость по фазам.)
- Плотностные (плотность твердой, жидкой и газовой фазы и пород в целом).
- Электрические (электропроводность, диэлектрическая проницаемость, электрохимическая активность).
- Тепловые (теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность.)
- Магнитные (намагниченность, магнитная восприимчивость).
- Ядерные (радиоактивность, взаимодействие с ионизирующим излучением).
- Упругие и прочностные (деформации, передачи и поглощения упругих колебаний) реакция на сжатие, разрыв, сдвиг, пластичность.

**Результаты изучения петрофизических величин и их коэффициентов используются для:**

- Классификации пород по их свойствам
- Построения разрезов и карт недр
- Установления множественных и парных связей

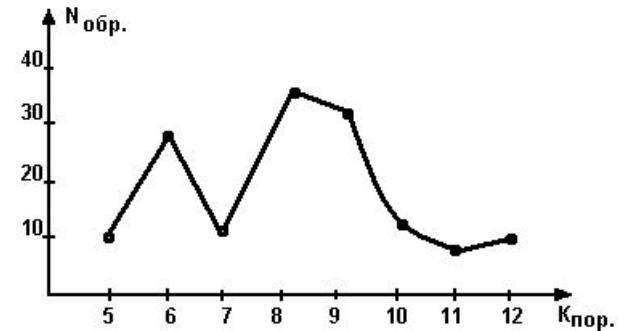
# Как это представляется?

В виде таблицы:

Объект	Число образцов	Плотность г/см.куб	Теплопроводность Вт/мК	Пористость %
С1	74	1.97	1.8	8.3
		1.32 - 2.12	1.1 - 2.4	3.2 - 12.5
С2	66	1.85	1.75	9.5
		1.40 - 2.05	1.05 - 2.2	6.5 - 13.2

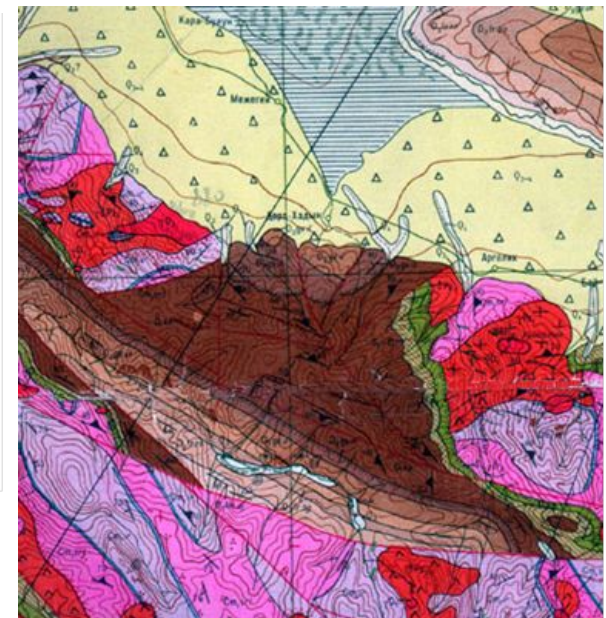
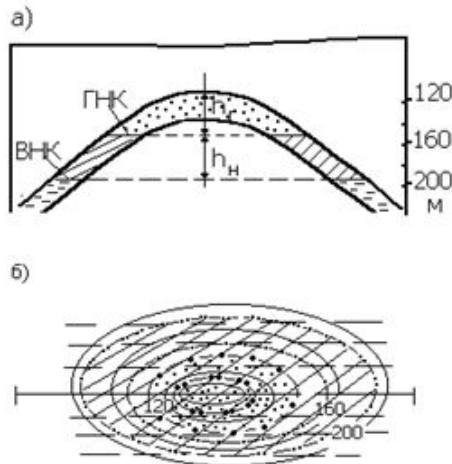
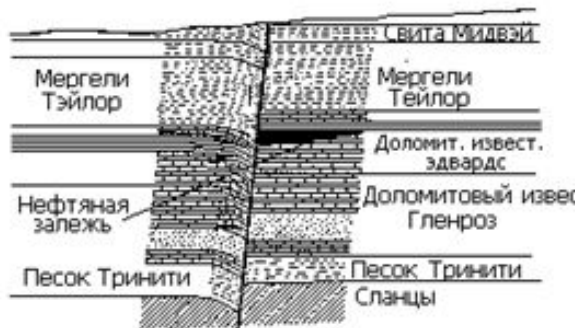
$N_{обр}$  – количество исследований образцов,  
 $\rho$  - плотность г/см<sup>3</sup>,  
 $\lambda$  - теплопроводность (Вт/к.м.),  
 $K$  – пористость (%)

В виде гистограммы:



В виде карты:

В виде разреза или схем



Форма представления определяется задачей  
 !!!

# Что в результате получается?

- Устанавливаются межпараметрические связи, позволяющие по результатам измерения отдельных параметров в скважине, например электропроводности и скорости упругих волн, оценить коэффициент пористости.
- Определяется зона распространения отдельного типа ГП и изменчивость его параметров как по вертикали, так и по простиранию (по площади).
- **Оценивается возможность содержания углеводородов в поровом пространстве и перспектива их добычи.**



# Неоднородность петрофизических параметров и геологических объектов

**В горной породе и геологическом объекте нет изотропии!**

Неоднородность наблюдается:

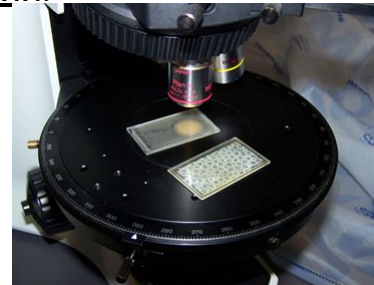
- а) по происхождению,
- б) по форме,
- в) по размерам,
- г) по составу,
- д) по структуре.

**1) Кристаллы** (монокристаллы минералов ).

Характерный размер  $r_x$  от  $10^{-9} \div 10^{-6}$  м.

Наблюдается структурная неоднородность внутри кристалла.

Изучают методами рентгеновской и электронной спектроскопии.



**2) Неструктурная неоднородность** - неодинаковый состав и строение отдельных частей минерального элемента.

$$r_x = 10^{-6} \div 10^{-1} \text{ м.}$$

Изучают методом световой и электронной



**3) Слоистая неоднородность.**

$$r_x = 10^{-2} \div 10 \text{ м.}$$

Характерна для осадочных пород, связанна с изменением условий осадконакопления и метаморфизации (наличие трещин, пор, цемента, заполнение порового пространства).

Изучают методами визуального наблюдения, микроскопирования, зондирования, отбора керна и лабораторных исследований.

# Неоднородность петрофизических параметров и геологических объектов

## 4). Площадная неоднородность.

$$r_x = 10 \div 10^3 \text{ м.}$$

Неоднородность в пределах единой площади (участка) месторождения. Связана с различием геологических условий в процессе формирования горных пород.

Изучают по образцам керна, по материалам ГИС, сейсмозондирования.

## 5). Региональная неоднородность.

$$r_x = 10^3 \div 10^6 \text{ м.}$$

Горные массивы, платформы, плиты, щиты.

Изучают методами обобщения результатов исследования отдельных площадей и участков.

## 6). Континентальная неоднородность.

Континенты с горными массивами...

$$r_x > 10^6 \text{ м.}$$

Изучают методами обобщения результатов исследования регионов, тектонических плит, щитов и платформ.



Разлом в отложениях, заполненный рыхлыми породами

Для описания этих неоднородностей требуются свои масштабы исследований и набор данных, соизмеримый с размерами неоднородностей и соответствующий решаемой задаче.

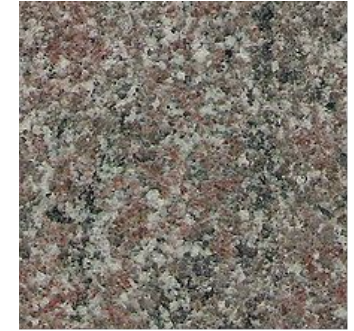


# Типы горных пород: основные, осадочные, метаморфические

**Основные или коренные:** базальты, граниты... - исходные горные породы, образовавшиеся в процессе формирования твердой поверхности Земли и остывания жидкой мантии при выходе магматических образований на поверхность



базальт



гранит

**Осадочные** - результат вторичного преобразования основных горных пород, осадконакопления на поверхности Земли.

**Метаморфические** – результат глубокой перестройки осадочных горных пород

*Карбонатные породы*



известняки



Доломит, кристаллы  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$



Пески, песчаники



Аргелиты, алевролиты, глины

*Терригенные породы*

**Метаморфизация**

Воздействие  $T, P$   
на больших  
глубинах в недрах  
Земли



Мрамор



## Контрольные вопросы по разделу №1:

- Что изучает предмет "петрофизика"?
- Формы представления петрофизических данных?
- Что необходимо знать для составления сводного разреза?
- Чем отличается "секущий профиль" от "сводного разреза"?
- Какие данные можно получить из геологической карты?
- По каким признакам определяется неоднородность петрофизического объекта?
- По какому признаку породы группируются в категорию "осадочные"?
- Что значит "терригенные горные породы"? Механизм их формирования?
- Механизм формирования "карбонатных пород"?

# Основные петрофизические параметры горных

## пород

### Пористость, глинистость, удельная поверхность:

**Емкость горных пород** характеризуемая пористостью или коэффициентом пористости. По сути это тот объем пустот, который может быть заполнен водой, нефтью или газом в условиях залегания.

**Различают пористость по :**

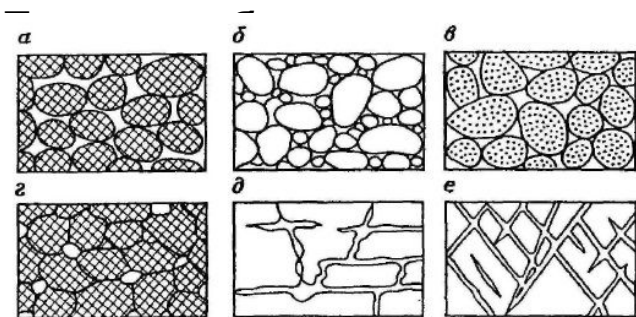
а) **по происхождению** – первичные и вторичные.

б) **по форме** – гранулярная, трещиновидная, щелевидная, капельная, кавернозная, пузырчатая. .

в) **по размерам** – когда определяющим критерием служит характер связи внутрипоровой воды со скелетом.

- Крупные, сверхкапиллярные (работают законы гидродинамики в трубах),  $d > 10^{-1}$  мм.
- Капиллярные (капиллярные эффекты),  $10^{-4} < d < 10^{-1}$  мм.:
- Субкапиллярные (связанная вода),  $2 * 10^{-6} < d < 10^{-4}$  мм.:
- Микropоры (вода в виде отдельных молекул сидит в структуре породы) характерный размер пор сопоставим с размером молекулы воды -  $d < 2 * 10^{-6}$  мм..

г) **по связи** с соседними породами - открытая и закрытая



**ределяется как сумма  $V_{пор} = V_{откр} + V_{закр.}$**

а – хорошо окатанный и отсортированный песок с высокой пористостью; б – плохо отсортированный песок с низкой пористостью; в – хорошо отсортированная порода, зерна которой также пористы; г – хорошо отсортированная порода, пористость которой уменьшена отложениями минерального вещества в пространстве между зернами; д – поровое пространство трещиноватых известняков, частично расширенное растворением; е – порода, ставшая пористой вследствие возникновения трещин.

# Основные петрофизические параметры горных

## пород

### Пористость эффективная и динамическая. Коэффициенты пористости и влагоемкости

**Пористость эффективная** - максимальный объем пор, в которых может находиться свободная (подвижная) жидкость.  $V_{\text{пор.эф.}} = V_{\text{пор.объе.}} - V_{\text{ов}}$ , где  $V_{\text{ов}}$  – объем пор, занятых остаточной водой.  $V_{\text{пор.объе.}}$  – общая пористость.

**Остаточная вода** – вода, которую невозможно извлечь без разрушения структуры породы, путем вытеснения, центрифугирования.

Следовательно  $V_{\text{пор.эф.}}$  - это максимальный объем пор, которые могут быть заполнены нефтью или газом при вытеснении воды в процессе формирования залежи. При этом,  $V_{\text{ов}}$  увеличивается с увеличением глинистости, что приводит к увеличению удельной поверхности твердой фазы, соответственно и площади скелета, связывающей воду за счет межмолекулярных сил.

Для удобства вводится коэффициент насыщения породы остаточной водой.

$$K_{\text{ов}} = V_{\text{ов}} / V_{\text{пор.объе}}$$

**Пористость динамическая** – объем ( $V_{\text{пор.д.}}$ ) пор, который занимает фильтрующаяся при определенном grad P жидкость.

$V_{\text{пор.д}}$  – величина переменная и зависит от grad P, состава жидкости, температуры и даже от последовательности фильтрации. Как правило  $V_{\text{пор.д}} < V_{\text{пор.эф.}}$ .

**В связи с этим вводятся понятия:**

- Коэффициент общей пористости  $V_{\text{пор.}} = K_{\text{п}} V_{\text{с'}}$
- Коэффициент открытой пористости  $V_{\text{пор.о}} = K_{\text{п.о.}} V_{\text{с}}$
- Коэффициент закрытой пористости  $V_{\text{пор.з}} = K_{\text{п.з.}} V_{\text{с}}$
- Коэффициент эффективной пористости  $V_{\text{пор.эф.}} = K_{\text{п.эф.}} V_{\text{с}}$

# Основные петрофизические параметры горных

## пород

**Плотность горной породы** – свойство породы иметь определенную массу единицы объема.

$\bar{\delta}_п = m_п / V_п$  где  $m_п$  - масса породы,  $V_п$  – объем породы.

$$\frac{m_г + m_ж + m_т}{V_п} = \frac{\delta_г V_г + \delta_ж V_ж + \delta_т V_т}{V_п}$$

В общем виде плотность горной породы определяется как  $\bar{\delta}_п =$

Где  $\delta_г, \delta_ж, \delta_т$  – плотность газа, жидкости и твердой породы;  $V_г, V_ж, V_т$  – объем занимаемый фазами. Переходя на коэффициенты  $K_п$  и  $\omega$ :

$$\bar{\delta}_п = (1 - K_п) \delta_г + \omega \delta_ж + (K_п - \omega) \delta_т \approx \delta_т + \omega \delta_ж$$

где  $\omega$  - коэффициент влагоемкости – показывающий, какая доля порового пространства заполнена водой (жидкостью),  $K_п$  – коэффициент пористости. В большинстве случаев при лабораторных исследованиях в нормальных условиях плотность газовой фазы принято считать пренебрежимо малой -  $\delta_г \approx 0$ .

### Справочно:

**Газовая фаза:** T=20 °C P= 0.1 МПа

$\rho_{возд.} = 0.0012 \text{ г/см}^3$  - воздух

$\rho_{углев.газ.} = 0.00715 \div 0.00317 \text{ г/см}^3$  - метан

### Минералы

$\rho_{скелет} = 1.0 \div 13 \text{ г/см}^3$

Средняя плотность 2.5 ÷ 40 г/см<sup>3</sup>

### Жидкая фаза

T=20 °C

P= 0.1 МПа

Таким образом, плотность

$\rho_{вода.} = 1.010 \text{ г/см}^3$  - пресная

$\rho_{вода.} = 1.240 \text{ г/см}^3$  - рап (предельный рассол)

$\rho_{нефть.} = 0.72 \text{ г/см}^3 \div 1 \text{ г/см}^3$  - поверхностная

$\rho_{нефть.} = 0.6 \div 1.05 \text{ г/см}^3$  - в недрах

горной породы можно оценить:

$$\bar{\delta}_{гп.} =$$

$$\sum_{i=1}^n$$



# Основные петрофизические параметры горных

## пород

Глинистость, поровый состав, поверхность порового пространства и удельная поверхность.

**Глинистость** – коэффициент, содержащий микрочастиц размером  $d < 0,01$  мм. в составе горной породы (осадочный).  $K_{гл.} = \frac{V_{гл.}}{V_{ск}}$  или в массовых долях  $K_{гл.} = \frac{m_{осп}}{m_{эф.}}$

**Поровый состав** – распределение по размерам. Изучают поровый состав с помощью микроскопа на шлифах и аншлифах путем капиллярного вдавливания ртути, воды, люминофора. Процесс сложный и неоднозначный. В большинстве случаев результат исследования зависит от качества подготовки образца, его истории после отбора, квалификации и опыта исследователя.

### Поверхность удельная и порового пространства.

Под поверхностью твердой фазы следует понимать сумму всех поверхностей твердого скелета горной породы, способных взаимодействовать с жидкостью или газом.

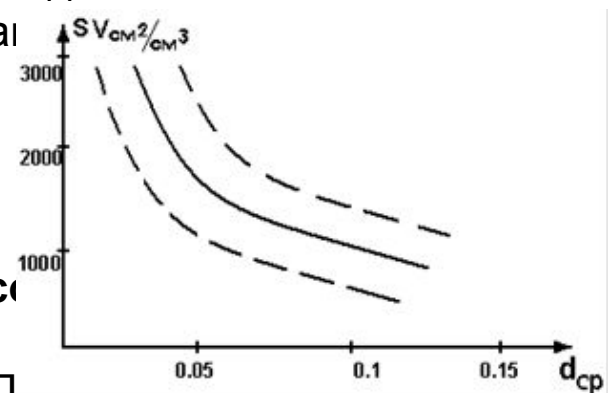
Поверхность твердой фазы с учетом поровых объемов  $S_v = \frac{S_{поп}}{V_{ск}}$ ; - объемная,  $V_{ск}$  – объем образца.

$S_m = \frac{S_{поп}}{m_c}$  - массовая,  $m_c$  - масса образца.

### Связь удельной поверхности с эффективным радиусом

Для чего нужно знать  $S_v$  ?

В зависимости от  $S_v$  меняются абсорбционный состав ГП, фильтрационные свойства, остаточная водонасыщенность.



## Контрольные вопросы по разделу №2:

- Что такое "пористость"? Единицы измерения?
- Что значит открытая пористость? Закрытая пористость?
- Что значит эффективная пористость?
- От каких внешних условий зависит "динамическая пористость"?
- Что значит "плотность горной породы"? От чего зависит плотность горной породы?
- Что значит глинистость? Какие параметры горной породы меняются при изменении глинистости?
- Что значит "удельная поверхность"? Как меняется величина удельной поверхности при изменении размера пор? При изменении коэффициента пористости?

# Основные петрофизические параметры горных

## Электрические характеристики горных пород:

**Поляризуемость или диэлектрическая проницаемость** – способность горной породы под действием внешнего электрического поля поляризоваться. (Сходна с диэлектрической проницаемостью диэлектриков)

Характеризуется коэффициентом диэлектрической проницаемости:

где  $E_o$  - напряженность электрического поля при отсутствии горной породы,  
 $E_{cp}$  – напряженность среды после внесения горной породы.

$$\varepsilon = \frac{E_o}{E_{cp}}$$

Если известна диэлектрическая проницаемость отдельных компонент слагающих ГП, то итоговая диэлектрическая проницаемость считае

$$\varepsilon_{г.п.} = \sum \varepsilon_i \cdot V_i$$

где  $V_i$  - объемная часть  $i$  – компоненты.

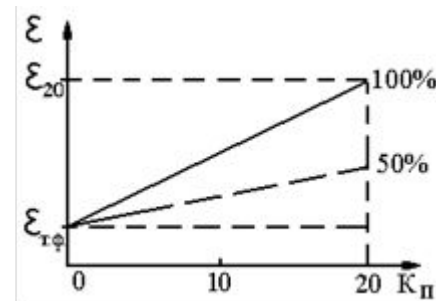
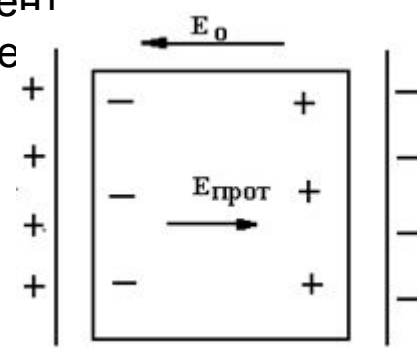
### Справочно:

Для минералов  $\varepsilon_{г.п.} \sim 4 - 16$

Нефти  $\varepsilon_H \sim 2 - 3$

Воды  $\varepsilon_B \sim 50 - 80$

Таким образом, диэлектрическая проницаемость горных пород в основном определяется объемом воды в поровом пространстве.



# Основные петрофизические параметры горных

**пород**  
Электрические характеристики горных пород:

Естественная поляризация (ПС – потенциал самополяризации).

За счет фильтрации растворов солей в пористой среде происходит разделение катионов и анионов. Как правило, анионы в процессе фильтрации абсорбируются на поверхности скелета и происходит обогащение раствора катионами.

При этом в горной породе с фильтрующимся раствором образуется разность потенциалов на пути фильтрации.

**Исследования показали:**

- Напряженность поля с увеличением проницаемости среды сначала увеличивается, потом падает.
- Наблюдается уменьшение напряженности с увеличением концентрации электролита.
- У трещиноватых пород при размерах трещины более 2-3 мм напряженность поля резко падает. При заполнении трещин песком – повышается.

**Эффект возникновения естественной поляризации в скважинной геофизике используется в виде кривой ПС для выделения проницаемых пород.**

**Как правило, чем больше аномалии ПС, тем выше проницаемость.**



# Основные петрофизические параметры горных

## Электрические характеристики горных пород:

**Электропроводность** следует рассматривать как способность горной породы проводить электрический ток при наличии внешних источников ЭДС. Электропроводность г.п. может быть **капиллярная** и **скелетная**.

При расчете удельного электрического сопротивления горной породы с известными значениями проводимости порового пространства и скелета следует учитывать как форму, так и размеры пор.

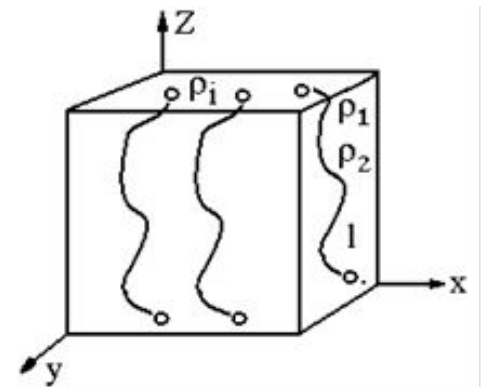
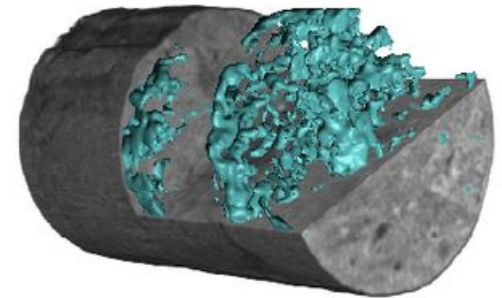
Для примера, оценка удельного электрического сопротивления образца горной породы с простейшими канальными порами проводится по следующей формуле:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 \rho_2}{(1 - Kn)\rho_2 + Kn\rho_1} Kl$$

где  $Kl$  – коэффициент извилистости.

Учитывая несимметричность расположения каналов по осям X/Y/Z, вводится понятие «коэффициента анизотропии»

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}}} \sim (1.09 \div 2.2 \text{ и более}).$$



Модель канальной проводимости

# Основные петрофизические параметры горных

## Электрические характеристики горных пород:

Значение  $\rho$  для горной породы не остается неизменным и зависит:

- -от состава порового пространства,
- -от частоты тока (подвижность ионов)
- - от направления
- - от  $K_{\text{пор}}$  и от открытости каналов.

Для горной породы с преобладанием закрытых пор удельное электрическое сопротивление однозначно больше, чем для породы с открытыми порами при прочих равных условиях.

Это становится понятно, если сопоставить характерные значения электрических параметров для порового флюида и скелета горной породы.

Эл. св-ва	Г.П. (тв.скелет)	Нефть	Газ	Вода пресн.	Вода минер.
$\epsilon$	4 ÷ 12	2 ÷ 3	1	50 ÷ 80	50 ÷ 80
$\rho$	до $10^8$	до $10^8$	$\infty$	0.5 ÷ 10	0.03 ÷ 0.5
$\nu$	до $10^{-8}$	до $10^{-8}$	$10^{-9}$	0.1 ÷ 2	2 ÷ 30 и более

***Электрические свойства пластовой воды существенно зависят от температуры и концентрации солей.***

### Единицы измерения:

$\epsilon$  - безразмерная величина

$\rho$  - удельное электрическое сопротивление, Ом\*м

$\nu$  – удельная электрическая проводимость, 1/ Ом\*м, См/м или мСм/м

## Контрольные вопросы к разделу №3:

- Механизм поляризации твердой и жидкой фазы в ГП?
- Суммарная поляризация? Диэлектрическая проницаемость горной породы?
- Как связаны диэлектрическая проницаемость и пористость ГП?
- Естественная поляризация ГП? Механизм возникновения потенциала самополяризации горных пород?
- Условия возникновения потенциала самополяризации?
- Механизм возникновения электрического тока в ГП? Электрический ток в скелете? Электрический ток в поровом пространстве?
- Суммарная электрическая проводимость горных пород? Связь проводимости с коэффициентом пористости?
- Коэффициент электрической анизотропии ГП? Механизм возникновения анизотропии?

# Основные петрофизические параметры горных

## пород

### Тепловые характеристики горных пород:

**Теплопроводность** – способность ГП проводить тепло при наличии градиента температуры.

Механизм передачи – кондуктивный и конвективный. Лучевая составляющая отсутствует.

$$\lambda_{\text{эф.}} = \lambda_{\text{ф.}} + \lambda_{\text{к.}} \text{ (Вт/м*К)}$$

где  $\lambda_{\text{ф}}$  - фононная, зависит от физических свойств породы;  $\lambda_{\text{к}}$  - конвективная, зависит от размеров пор, grad T, вязкости флюида  $\mu_{\text{ср.}}$ ; температуры среды T.

С увеличением размера пор и повышения подвижности среды, конвективная составляющая увеличивается.

**Теплоемкость горной породы** - способность накапливать тепловую энергию определяется суммой теплоемкостей составляющих

$$C_{\text{эф.}} = C_{\text{тв.ср.}} + C_{\text{ж.ср.}} + C_{\text{б.ср.}} + C_{\text{ср.пер.}} \text{ (КДж/кг)}$$

Наибольшее значение по удельной теплоемкости среди минералов занимает вода – неизменный компонент порового пространства осадочных горных пород. Теплоемкость твердой фазы имеет незначительный разброс и лежит в пределах 0.7 – 0.9 кДж/кг.

### Температуропроводность

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \text{ (м}^2\text{/сек)}$$

Характеризует скорость передачи температурного возмущения в горной породе.

Как правило, температуропроводность ГП мала и лежит в диапазоне:  $1 \div 10 * 10^{-10}$  (м<sup>2</sup>/сек)



## Контрольные вопросы к разделу №4

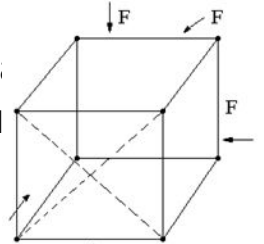
- Основной механизм теплопередачи в ГП?
- Какой механизм теплопереноса преобладает в плотном песчанике?
- Условие возникновения конвективного теплопереноса в ГП?
- Как рассчитать теплоемкость ГП, если известна теплоемкость скелета, коэффициент пористости и коэффициент водонасыщенности?
- Почему у кристаллических горных пород теплопроводность выше, чем у осадочных?
- Как изменится теплопроводность горной породы, если поры гранулярные, а поровое заполнение сменить с газа на воду?

# Основные петрофизические параметры горных пород

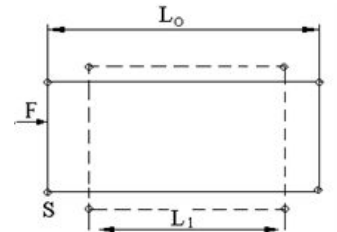
## пород

Упругие характеристики горных пород – это свойства горных пород менять форму и размеры под нагрузкой.

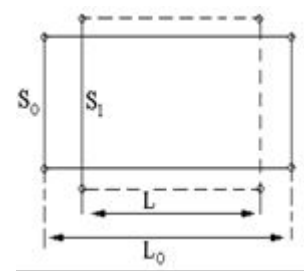
**Модуль всестороннего сжатия и растяжения:**  $K = \Delta V/V = [(0.25 \div 2.5) \cdot 10^{-11} \text{Па}]$   
Показывает, во сколько раз изменяются линейные размеры (объем) материал всестороннем сжатии / растяжении.



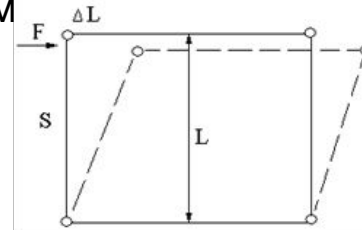
**Модуль продольной упругости (модуль Юнга):**  $E = \Delta L/L = F/S$ ,  
где  $L$  - линейный размер,  $F$  – нормальная сила,  $S$  – площадь воздействия.



**Коэффициент Пуассона:**  $\nu = \Delta S/S$  - относительное изменение площади сечения



**Модуль сдвига:**  $G = \Delta L/L = (0.1 \div 4) \cdot 10^{11} \text{Па}, \text{ н/м}^2$



При превышении напряжения выше любой из этих величин – наблюдается разрушение горной породы - **прочностная характеристика горной породы**

# Основные петрофизические параметры горных пород

## Скорость распространения звука в ГП.

В ГП могут распространяться  $U_p$  и  $U_s$  волны, продольные и поперечные. Скорость распространения **продольной волны**:

где  $K$  - модуль всестороннего сжатия,  
 $G$  - модуль сдвига,  $\rho$  - плотность ГП.

$$U_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

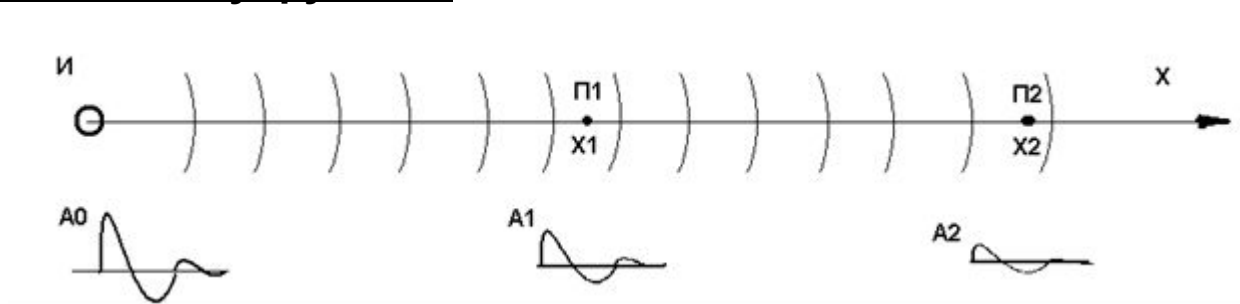
Продольные волны распространяются как в **твердой**, так и в **жидкой (газовой) фазе**.

Скорость распространения **поперечной волны**:

$$U_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Поперечные волны могут распространяться только в **твердой фазе**, т.е. в скелете ГП.

## Поглощение волн упругости.



$$A = A_0 \left( \frac{x}{x_0} \right)^{-n} e^{-\alpha(x-x_0)}$$

где  $n$  - амплитудный показатель расхождения волн от источника (зависит от типа волны, структуры породы),  $\alpha$  - амплитудный коэффициент поглощения

# Справочно: скорость упругих волн в ГП и минералах

Порода	Плотность минерала, г/см <sup>3</sup>	$V_p$ , м/с	$t_{ск p}$ , мкс/м	$v_s$ , м/с	$t_{ск s}$ , мкс/м	$v_p/v_s$
Песчаник крепко цементированный	2,65-2.71	3700-5500	170	2300-3400	260	1,5-1,6
Песчаник слабо цементированный (рыхлый)	2,65-2.71	2800-4500	182	1750-2800	290	1,6
Аргиллит, консолидированный (Н>2000 м)	2,3-2,74	3000-4200	270	-	-	1,7-1,9
Аргиллит(глина), плохо консолидированный (Н<2000 м)	1,2-2,4	1550-3000	330	-	-	-
Известняк	2,71	3800-6250	155	1950-3300	312	1,9
Доломит	2,87	4400-7400	142	2500-4100	256	1,8
Ангидрит	2,97-3,07	6000-5600	167	-	297	1,78
Гипс	2,32	5400-5600	178	-	334	1,87
Вода пресная	1,0-1,05	1550-	-	-	-	-
Вода минерализованная	1,05-1,24	-1720	-	-	-	-
Нефть	0,80-0,90	1290	800	-	-	-
Газ (метан)	1,29 10 <sup>3</sup>	2330	430	-	-	-



## Контрольные вопросы по разделу №5:

- Механизм распространения упругих волн в горной породе?
- Что значит продольная и поперечная волна? Где они распространяются?
- Почему скорость распространения упругой волны зависит от пористости ГП?
- Механизм снижения амплитуды упругой волны в ГП? Куда девается энергия упругой волны?
- Может ли в поровом пространстве ГП распространяться поперечная упругая волна? Почему?

# Основные петрофизические параметры горных пород

## Радиационные параметры горных пород:

**Радиоактивность** – свойство веществ создавать радиоактивное излучение в связи с самопроизвольной перестройкой их ядер.

**Естественная гамма активность ГП** – определяется радиоактивностью всех компонент, слагающих горную породу и генерирующих гамма излучение.

**Закон радиоактивного распада** - количество превращающихся ядер пропорционально имеющемуся количеству радиоактивных ядер.

Если в некотором объеме содержится  $N$  радиоактивных ядер, за время  $dt$  произойдет  $dN$  распадов:

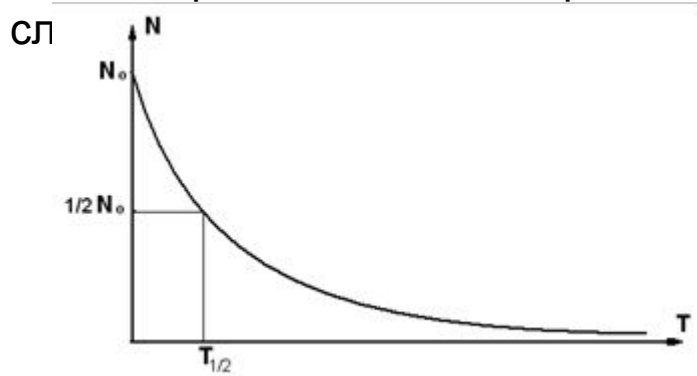
$$-dN = \lambda N dt,$$

где  $\lambda$  - коэффициент пропорциональности или постоянная распада.

Решение данного уравнения имеет вид:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где  $N_0$  - первоначальное число ядер в момент времени  $t_0 = 0$ ;  $N$  - количество ядер на момент времени  $t > 0$ . Это выражение представляется в графической форме в



**Период полураспада** равен времени, за которое половина начального числа ядер претерпевают радиоактивное превращение

$$N = N_0 / 2^n,$$

где  $n = t/T$  - время с момента начала наблюдения, измеренное в периодах полураспада.

# Основные петрофизические параметры горных пород

## Радиационные параметры горных пород:

### Естественная радиоактивность

Периоды полураспада наиболее распространенных в природе радиоактивных изотопов

Изотоп	Содержание в земной коре, %	Период полураспада, лет
${}_{92}^{238}\text{U}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$4,49 \cdot 10^9$
${}_{90}^{232}\text{Th}$	$11,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{10}$
${}_{19}^{40}\text{K}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^9$

Количественно скорость распада характеризует **радиоактивность вещества**.

За единицу радиоактивности, называемую **беккерель (Бк)**, принимается активность такого вещества, в котором происходит 1 расп/с.

Внесистемная специальная единица радиоактивности - **кюри (Ки)** которая равна  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк, и соответствует числу распадов в **1 грамме  ${}^{226}\text{Ra}$**  за 1 секунду.

В связи с этим, нередко используется термин **грамм-эквивалент радия** для характеристики радиоактивности произвольного вещества.

Наиболее распространенная единица - **микрорентген в час (1 мкР/час)** (принята и в геофизике). Это такое излучение, которое в купе со вторичным образует в  $1\text{см}^3$  сухого воздуха ( $T=0^\circ\text{C}$ ,  $P=760$  мм. рт. ст.)  $2,083 \cdot 10^3$  пар ионов за час.

# Основные петрофизические параметры горных пород

## Радиационные параметры горных пород:

Естественная радиоактивность, классификация по степени радиоактивности.

Группа	Содерж. %, массовое		Кларк концентрированный	
	U	Th	U	Th
Макс. радиоак. (уранов. и ториевые минералы)	50-85	20-40	>10000	>10000
Высокорadioактивна я	$400 \div 2000 \cdot 10^{-4}$	$(400 \div 1000) \cdot 10^{-4}$	100÷1000	10÷100
Повышенно - radioактивные (апатит, магнетит)	$(10 \div 100) \cdot 10^{-4}$	$(30 \div 200) \cdot 10^{-4}$	5÷30	2÷15
Слаборadioактивные (кварц, полев. шпат)	$1 \div 3 \cdot 10^{-4}$	$(2 \div 8) \cdot 10^{-4}$	0.5-1	0.2-0.5
Низкорadioактивные	$<0.1 \div 1 \cdot 10^{-4}$	$<0.1 \div 1 \cdot 10^{-4}$	<0.2	<0.2

**«Кларк концентрации»** – отношение содержания радиоактивного элемента в данной породе к его среднему содержанию в Земной коре

# Основные петрофизические параметры горных пород

## Радиационные параметры горных пород:

### Взаимодействие радиационного излучения с горной породой

#### Гамма кванты:

Процесс распространения гамма квантов в горной породе сопровождается следующими эффектами:

- **фотоэффект** –  $\gamma$ -квант поглощается, энергия расходуется частично на отрыв от атома одного из электронов, частично передается последнему в виде кинетической энергии
- **эффекта комптоновского рассеяния** - рассеяние  $\gamma$ -кванта электроном. Эффект характерен для энергий  $E_\gamma = 0,05-15$  МэВ. При этом, сечение взаимодействия пропорционально концентрации электронов.
- **эффект рождения электронно-позитронных пар** - наблюдается при энергии  $E_\gamma$  превышающей суммарную энергию покоя электрона и позитрона (= 1,02 МэВ). Вероятность эффекта образования пар зависит от заряда ядра.

Если на поверхность породы падает пучок параллельных частиц, поток которых равен  $N$ , число частиц, провзаимодействовавших на отрезке  $dx$  равно

$$dN = -\mu N dx,$$

где  $\mu$  - линейный коэффициент ослабления, или вероятность взаимодействия  $\gamma$  кванта с породой на единичном расстоянии.

Количество гамма квантов на любом расстоянии от поверхности породы будет равно:

$$N_x = N_0 e^{-\mu x}$$

**Эта зависимость - закон ослабления радиоактивного гамма излучения**

# Основные петрофизические параметры горных пород

## Радиационные параметры горных пород:

### Взаимодействие радиационного излучения с горной породой

#### Нейтроны:

Период полураспада  $T_{1/2} = 614$  сек. Время жизни в свободном состоянии:  $885,7 \pm 0,8$  с.  
Масса:  $939,565360(81)$  МэВ ( $1,6749485 \times 10^{-27}$  кг,  $1,00866491560(55)$  [a.e.m.](#)), что примерно на 0,14 % больше, чем масса [протона](#).

Схема распада нейтрона:  $n \rightarrow p^+ + e^- + \nu_{E=0.78\text{МэВ}}$

#### По энергетическим характеристикам нейтроны подразделяются:

Быстрые	$E > 2 \cdot 10^5$ эВ
Промежуточные	$1 \text{ эВ} < E < 0.1 \text{ МэВ}$
Резонансные	$E = 100$ эВ.
Медленные или тепловые	$E < 1$ эВ
Холодные	$E < 0.001$ эВ.

Энергия нейтрона в движении определяется исходя из его скорости и массы

Взаимодействие нейтрона с ГП идет путем:

- упругого соударения с потерей энергии,
- неупругого соударения при захвате нейтрона ядром с последующим его выбросом. При этом ядро остается в возбужденном состоянии и испускает гамма квант.
- поглощения медленного (теплого) нейтрона.

#### Основные нейтронные характеристики ГП:

- длина замедления нейтронов  $L_s$ . Чем больше легких ядер (водорода), тем меньше  $L_s$ .
- Среднее время жизни  $\tau$  или длина диффузии  $L_d$  до поглощения;
- Сечение захвата - определяется хлоро - и боросодержанием в ГП.



## Контрольные вопросы по разделу №6

- Что значит радиоактивность горных пород и от чего она зависит?
- Основные элементы, определяющие естественную радиоактивность горных пород?
- Закон радиоактивного распада и период полураспада?
- Распространение гамма квантов в горной породе? Механизм ослабления гамма излучения?
- От каких основных параметров горной породы зависит коэффициент ослабления гамма квантов?
- Классификация нейтронов по энергии?
- Особенность распространения нейтронов в горной породе?
- Какой элемент является наиболее хорошим замедлителем нейтронов в горной породе?
- Какие элементы в ГП являются аномальными поглотителями нейтронов?

# Основные петрофизические параметры горных пород

## пород

### Фильтрационные параметры горных пород:

**Проницаемость** – свойство породы проводить жидкость, газы и их смеси при наличии градиента давления.

Различают: абсолютную (физическую) и фазовую.

**Абсолютная проницаемость** (закон Дарси) определяют «продавливания» через породу сухой газ или однокомпонентную жидкость:

$$Q = K_{пр} \frac{\Delta P}{\Delta L} S \frac{1}{\mu} :$$

Где, Q - расход газа или однокомпонентной жидкости [м<sup>3</sup>/сек],

$\Delta P/P$  - перепад давления на единицу длины [Па/м],

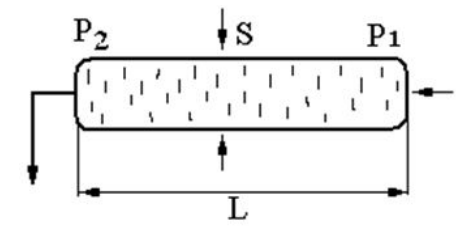
S - сечение образца, через который идет фильтрация (м<sup>2</sup>),

$\mu$ - динамическая вязкость фильтрующегося флюида, СИ [Па с], СГС [сПз] - сантипуаз,

$K_{пр}$  - коэффициент проницаемости [м<sup>2</sup>] - СИ. внесистемная единица проницаемости [ D ]- дарси.

Или в виде:  $Q = \frac{K}{\nu} \rho \frac{\Delta P}{\Delta L} S$

где  $\nu = \mu/\rho$  – кинематическая вязкость.



Проницаемость 1 D имеет образец сечением 1 см<sup>2</sup>, длиной 1 см., который при градиенте давления 0.1 МПа и вязкости 1 сПз обеспечивает фильтрацию жидкости V= 1 см<sup>3</sup> за 1 секунду.

**Перевод единиц:**

	СГСМ	СИ
1D	≈	10 <sup>-12</sup> м <sup>2</sup> = 1 мкм <sup>2</sup> ;

# Основные петрофизические параметры горных пород

## пород

### Фильтрационные параметры горных пород:

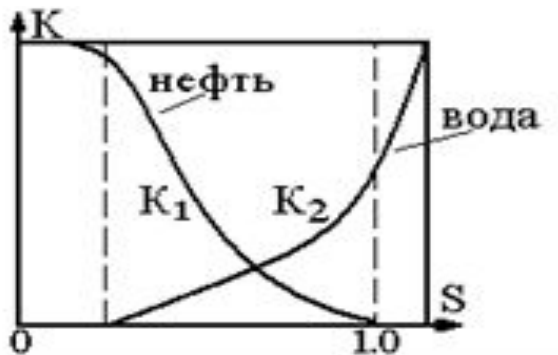
**Фазовая проницаемость** (обобщенный закон Дарси) определяют «продавливания» через породу смесь двух или более компонентов. При этом, вводится понятие скорости фильтрации

$$W = \frac{Q}{S} = \frac{K_{\phi}}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta L};$$

Где  $W=Q/S$  - скорость фильтрации

$K_{\phi}$  - коэффициент фильтрации.

Причем, для разных жидкостей они будут разными за счет разной вязкости, различия взаимодействия со скелетом ГП



$$K_1 = \frac{K_{\phi}^1}{K}; \quad K_2 = \frac{K_{\phi}^2}{K};$$

Кривые Вико-Бодсета, или кривые фазовых проницаемостей

$K$  – абсолютная проницаемость,

$S$  – насыщение порового пространства фильтрующей фазой.

При совместной фильтрации возможны случаи, когда одна из жидкостей не течет!!!

### **Классификация пород по проницаемости:**

**Проницаемые** - грубообломочные, рыхлые песчаники

$$K_{\text{пр}} = 10^{-2} \div 10^3 \text{ мкм}^2 = 0.01 \div 1000 \text{ D}$$

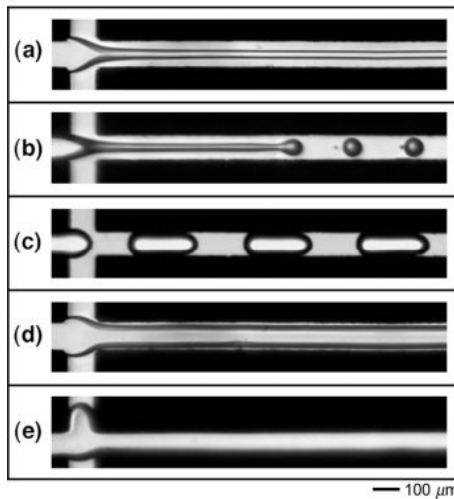
**Полупроницаемые** -  $K_{\text{пр}} = 10^{-4} \div 10^{-2} \text{ мкм}^2 = 0.1 \div 10 \text{ mD}$

**Непроницаемые глины, плотняки** -  $K_{\text{пр}} < 0.1 \text{ mD}$ .

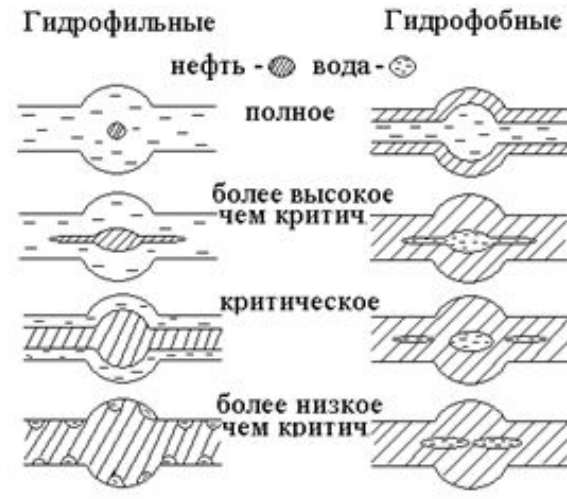
# Основные петрофизические параметры горных пород

## Фильтрационные параметры горных пород:

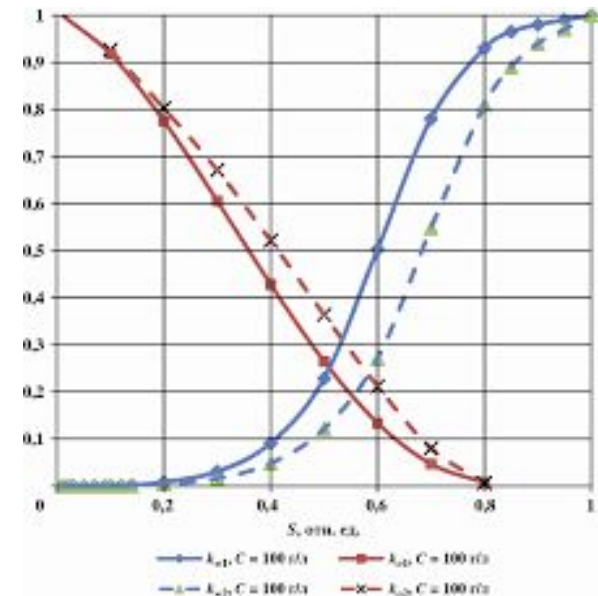
Природа двухфазной фильтрации объясняется различным типом взаимодействия флюида со скелетом горной породы и различием коэффициента поверхностного натяжения на границах сред.



- а - нитеобразное течение
- б - струйное течение
- с - капельное течение
- д - пленочное течение
- е - вязкое вытеснение



Двухфазное течение в каналах с переменным сечением



Изменение фазовых проницаемостей за счет применения добавок в состав флюида

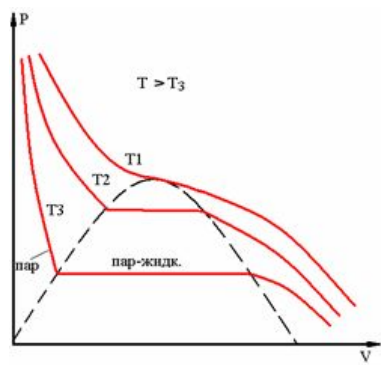
## Контрольные вопросы по разделу №7

- Дать определение термина «проницаемость»? Что характеризует и от каких параметров она зависит?
- Единицы измерения проницаемости?
- Закон Дарси для однофазного потока?
- Обобщенный закон Дарси для двухфазного потока?
- Что характеризуют кривые фазовых проницаемостей?
- От каких параметров зависит фазовая проницаемость?

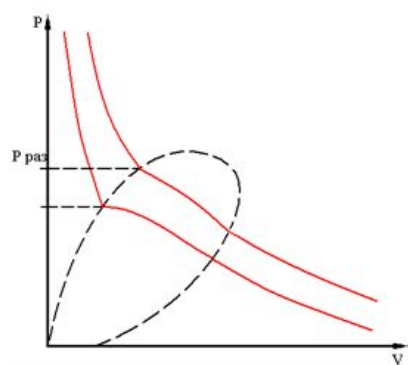
# Основные петрофизические параметры горных пород

## Физические свойства нефти, газа, воды и их смесей.

Изменение фазового состояния нефти и газа.



PVT однокомпонентного флюида



PVT нефти

## Фракционный состав по Т

КИПЕНИЯ	Название	Мол. вес
до 200°C	бензиновая	до 300°C
200÷315	керосиновая	300÷450
300÷450	тяжелая (мазут)	более 450

Газы	Название	Мол. вес	Т кип. (НУ)
$C_2H_4$	метан	до 98%	-161°C
$C_2H_6$	этан	до 25%	-88°C
$C_3H_8$	пропан	до 25%	-42°C
$C_4H_{10}$	бутан	до 10%	-0.5°C
$C_{15}H_{32}$	пентан	до 5%	+36.6°C

### Почему?

Нефть содержит множество компонентов от  $C_2H_4$  до  $C_{100}$  и более, причем, если легкие фракции, вплоть до  $C_4$  – газ при нормальных условиях, то фракции  $C_5$  и выше находятся в жидком состоянии, а тяжелые фракции – в растворенном.

В итоге для нефти:

$\rho \approx 0.82 \div 0.9 \text{ г/см}^3$  (НУ) и  $\approx 0.6 \div 1.06 \text{ г/см}^3$  - в пластовых

Изменение P и T приводит к постепенному переходу отдельных фракций из жидкого состояния в газообразное и наоборот.

**Газовый фактор:** содержание газа  $[m^3]$  растворенного в нефти  $[m^3]$  при нормальных условиях.

Единица измерения газового фактора ( $m^3/m^3$ ) колеблется от 0 до 200 и более.

В условиях Урало-Поволжья газовый фактор лежит в пределах  $(2 \div 10) m^3/m^3$   
Возможные варианты по новым месторождениям Восточной Сибири и Заполярья до 500 – 2000  $m^3/m^3$

# Основные петрофизические параметры горных пород

## Термодинамические свойства нефти, газа, воды и их смесей.

**Разгазирование, давление насыщения** – процесс выделения газа (кипение) из нефти при снижении давления ниже определенного значения.

Ясно, что  $P_{нас}$  зависит от состава растворенного газа, от температуры и состава нефти.

В реальных условиях при  $T_{пласт} \approx 80 \div 90^{\circ}$ ,  $P_{разг.} \approx 140 \div 180$  Атм.

Процесс разгазирования при снижении давления идет не сиюминутно, а продолжается в широком интервале давлений. Первоначально идет разгазирование легких газов, затем более тяжелых. Сам процесс выделения газа сопровождается охлаждением смеси.

**Дросселирование нефти** через пористую среду происходит при наличии перепада давления и сопровождается разогревом флюида. Величина разогрева определяется перепадом давления  $\Delta P$ :

$$\Delta T = \varepsilon * \Delta P, \quad \text{где } \varepsilon > 0 \text{ - коэффициент Джоуля – Томсона нефти}$$

**Дросселирование газа** через пористую среду сопровождается охлаждением, поскольку для газа  $\varepsilon < 0$ .

**Быстрое изменение давления для нефти и газа** без учета теплообмена с окружающей средой и без фазовых переходов также сопровождается изменением температуры:

$$\Delta T = \eta * \Delta P, \quad \text{где } \eta < 0 \text{ - адиабатический коэффициент.}$$

**Справочно:**

Коэффициент	Нефть	Газ	Вода
Джоуля-Томсона, $\varepsilon$ (К/атм)	0.04	- 0.4	0.02
Адиабатический, $\eta$ (К/атм)	0.014	- 0.4	0.003



## Контрольные вопросы по разделу №8

- В чем принципиальное отличие природной нефти от однокомпонентного флюида, например воды?
- Какими процессами сопровождается изменение давления для нефти, при её подъеме на поверхность из пластовых условий?
- Что такое газовый фактор и как он рассчитывается?
- Дайте определение термину – давление насыщения? От каких параметров оно зависит?
- Как меняется температура пластового флюида при её фильтрации по пласту?
- Как изменится температура пластового флюида при резкой смене давления в адиабатических условиях?

# Литература по модулю №1

- **Основная:**

- Яруллин Р.К. Петрофизика. Аппаратура и оборудование ГИС. Учебное пособие по петрофизике для геофизиков. / БашГУ, Электронное издание. 2010 г.
- Геофизические исследования и работы в скважинах. Исследование действующих скважин: в 7 томах. Том.3. Башнефтегеофизика, г.Уфа: Информрекламма, 2010 г.
- Лабораторный практикум по курсу "Петрофизика" [Электронный ресурс] : методические рекомендации / Сост. Р.К. Яруллин .— Уфа, 2013 .— Доступ возможен через Электронный читальный зал (ЭЧЗ) .— URL:<https://bashedu.bibliotech.ru/Account/LogOn>>.

- **Дополнительная:**

- Вахромеев Г.С. и др. Петрофизика. Аппаратура и оборудование ГИС, Томск, Изд-во Томского ун-та, 1997.
- Добрынин В.М. и др. Петрофизика. Аппаратура и оборудование ГИС. М., Недра, 1991.
- Петрофизика. Аппаратура и оборудование ГИС: Справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые. / Под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1992. – 391 с: ил
- Кларк С.П. (ред.) Справочник физических констант горных пород.
- Спутник нефтепромыслового геолога: Справочник/ под ред. И.П. Чоловского . М. Недра 1989 г.
- Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. Учебник для вузов. Изд. 3. М.. Недра, 1982
- Кобранова В.Н. Петрофизика. Аппаратура и оборудование ГИС. Учебник для вузов. Изд 2., М..Недра, 1986
- Николаев С.А., Николаева Н.Г., Саламатин А.Н. Теплофизика горных пород. КазГУ, Казань,1987
- Логвиненко Н.В., Сергеева Э.И. Методы определения осадочных горных пород. Учебное пособие для вузов. Л.,Недра, 1986
- Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах. М., Недра, 1978
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (Петрофизика. Аппаратура и оборудование ГИС). Справочник геофизика. М..Недра, 1984