

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

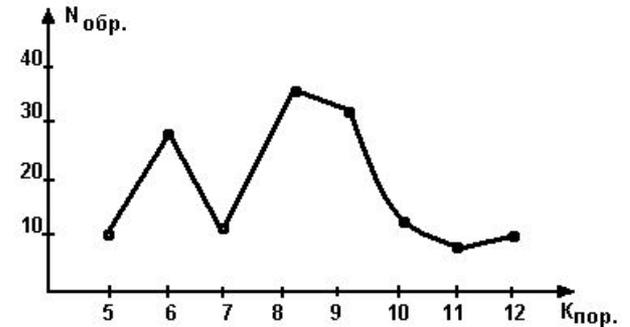
Как это представляется?

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 |

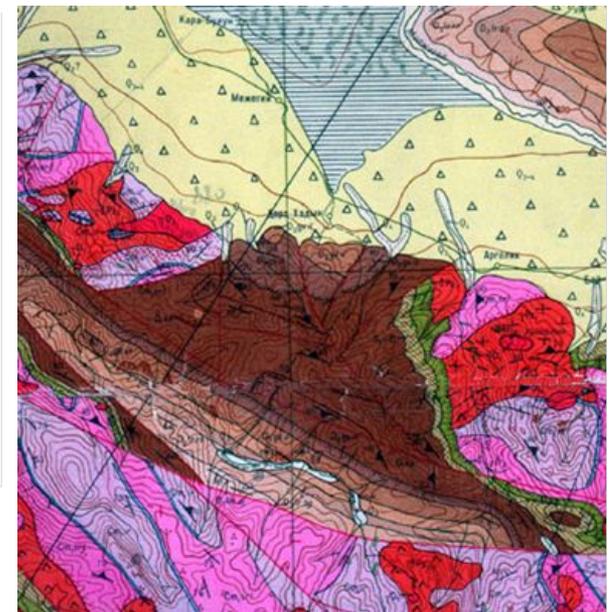
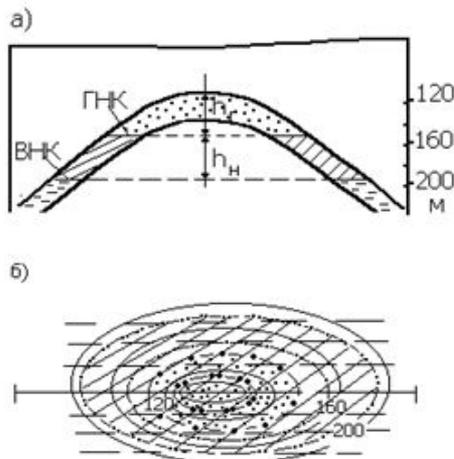
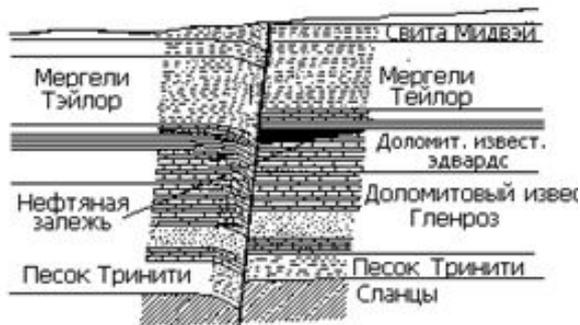
$N_{обр}$ – количество исследований образцов,
 ρ - плотность г/см³,
 λ - теплопроводность (Вт/к.м.),
 K – пористость (%)

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:

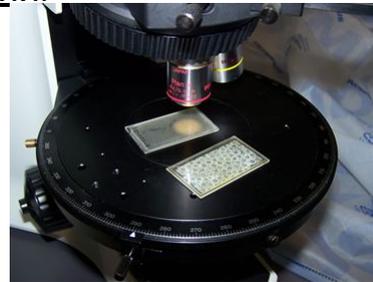
- а) по происхождению,
- б) по форме,
- в) по размерам,
- г) по составу,
- д) по структуре.

1) Кристаллы (монокристаллы минералов).

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

Наблюдается структурная неоднородность внутри кристалла.

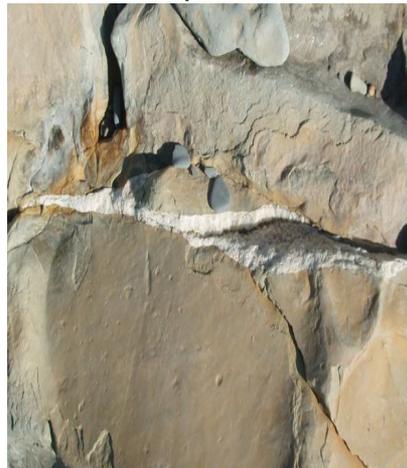
Изучают методами рентгеновской и электронной спектроскопии.



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

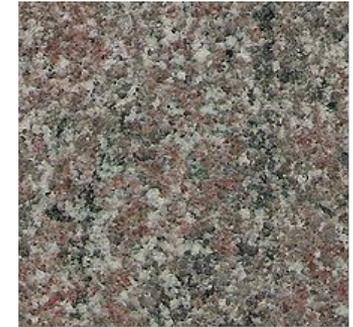
Для описания этих неоднородностей требуются свои масштабы исследований и набор данных, соизмеримый с размерами неоднородностей и соответствующий решаемой задаче.

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 :

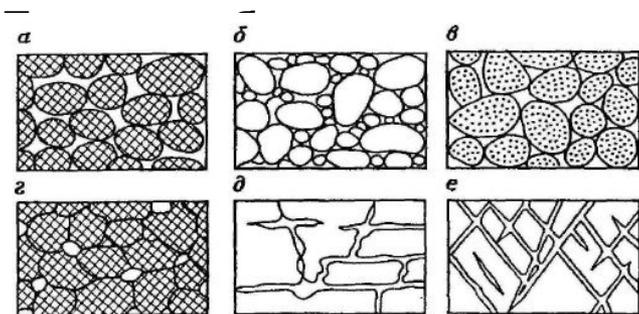
а) **по происхождению** – первичные и вторичные.

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

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 ω :

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

где ω - 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/см³

Жидкая фаза

T=20 °C

P= 0.1 МПа

Таким образом, плотность

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

горной породы можно оценить:

$\rho_{вода.} = 1.240 \text{ г/см}^3$ - 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

$$\bar{\delta}_{гп.} = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i / V_{гп.}$$

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.

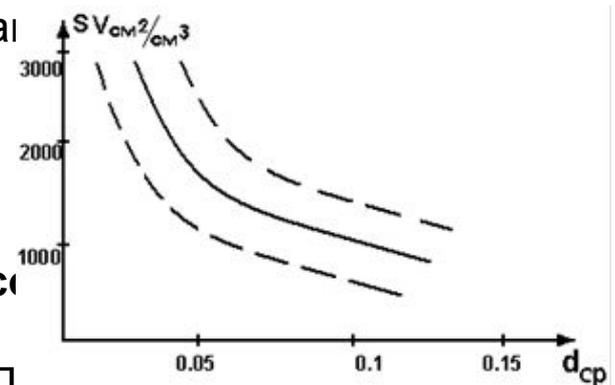
Поверхность твердой фазы с учетом поровых объемов $S_v = \frac{S_{поп}}{V_{ск}}$; - объемная, $V_{ск}$ – объем образца.

$S_m = \frac{S_{поп}}{m_c}$ - 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 пород

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 считается

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

где V_i - объемная часть i – компоненты.

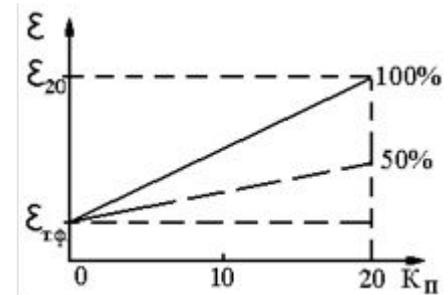
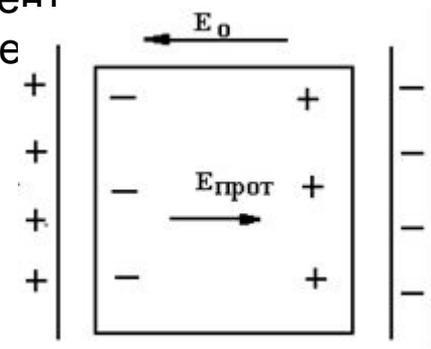
Справочно:

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.

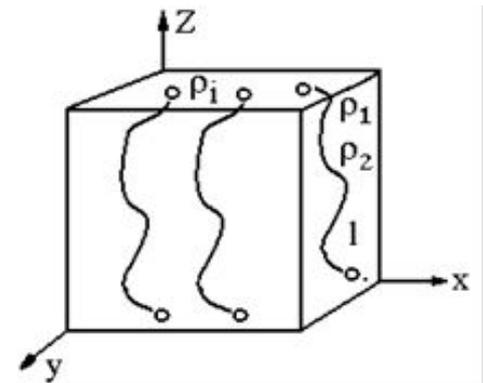
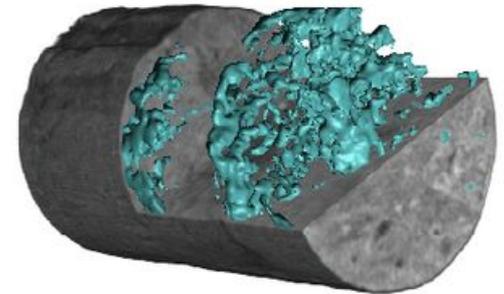
Для примера, оценка удельного электрического сопротивления образца горной породы с простейшими канальными порами проводится по следующей формуле:

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

где Kl – коэффициент извилистости.

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

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



Модель канальной проводимости

Основные петрофизические параметры горных

Электрические характеристики горных пород:

Значение ρ для горной породы не остается неизменным и зависит:

- -от состава порового пространства,
- -от частоты тока (подвижность ионов)
- - от направления
- - от $K_{пор}$ 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. |
|------------|------------------|--------------|-----------|-------------|----------------|
| ϵ | 4 ÷ 12 | 2 ÷ 3 | 1 | 50 ÷ 80 | 50 ÷ 80 |
| ρ | до 10^8 | до 10^8 | ∞ | 0.5 ÷ 10 | 0.03 ÷ 0.5 |
| ν | 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:

ϵ - безразмерная величина

ρ - удельное электрическое сопротивление, Ом*м

ν – 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: $1 \div 10 * 10^{-10}$ (м²/сек)

Контрольные вопросы к разделу №4

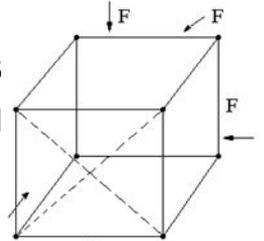
- Основной механизм теплопередачи в ГП?
- Какой механизм теплопереноса преобладает в плотном песчанике?
- Условие возникновения конвективного теплопереноса в ГП?
- Как рассчитать теплоемкость ГП, если известна теплоемкость скелета, коэффициент пористости и коэффициент водонасыщенности?
- Почему у кристаллических 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

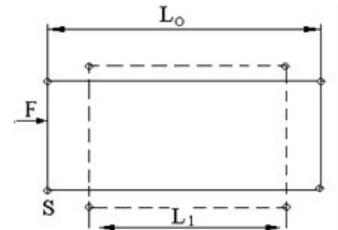
пород

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

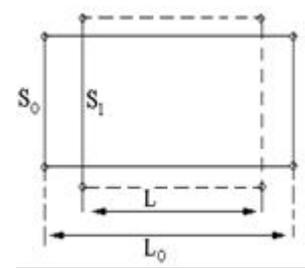
Модуль всестороннего сжатия и растяжения: $K = \Delta V/V = [(0.25 \div 2.5) \cdot 10^{-11} \text{ Па}]$
Показывает, во сколько раз изменяются линейные размеры (объем) материал всестороннем сжатии / растяжении.



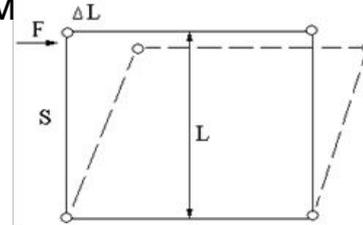
Модуль продольной упругости (модуль Юнга): $E = \Delta L/L = F/S$,
где L - линейный размер, F – нормальная сила, S – площадь воздействия.



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



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



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, ρ - плотность ГП.

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

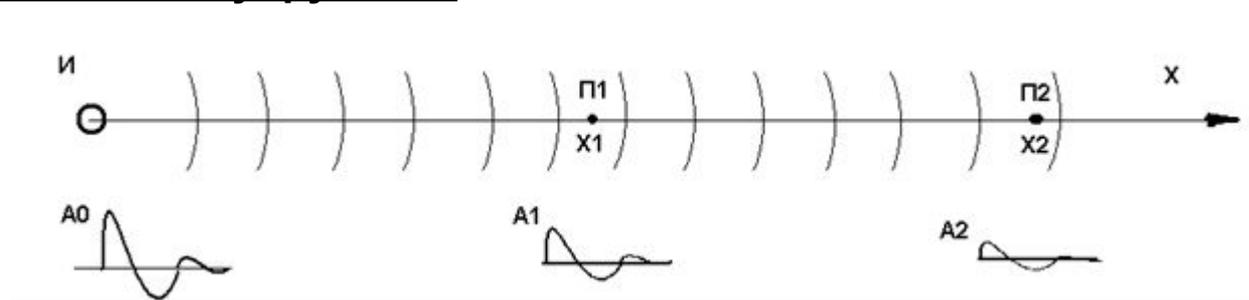
Продольные волны распространяются как в **твердой**, так и в **жидкой (газовой) фазе**.

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), α - амплитудный коэффициент поглощения

Справочно: скорость упругих волн в ГП и минералах

| Порода | Плотность минерала, г/см ³ | 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 (H>2000 м) | 2,3-2,74 | 3000-4200 | 270 | - | - | 1,7-1,9 |
| Аргиллит(глина), плохо консолидированный (H<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 ³ | 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:

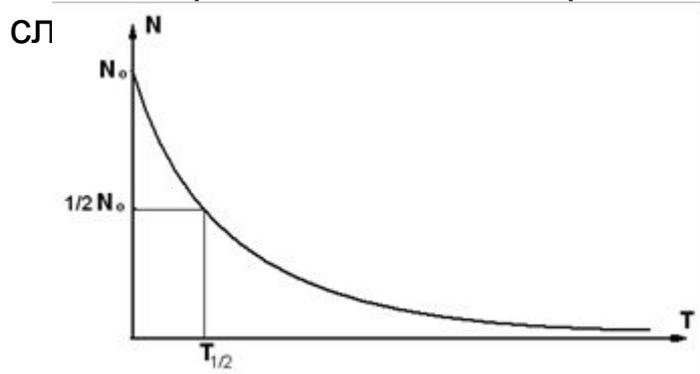
$$-dN = \lambda N dt,$$

где λ - 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 1см^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** – γ -квант поглощается, энергия расходуется частично на отрыв от атома одного из электронов, частично передается последнему в виде кинетической энергии
- **эффекта комптоновского рассеяния** - рассеяние γ -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_γ 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 μ - линейный коэффициент ослабления, или вероятность взаимодействия γ 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 τ 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 [м³/сек],

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

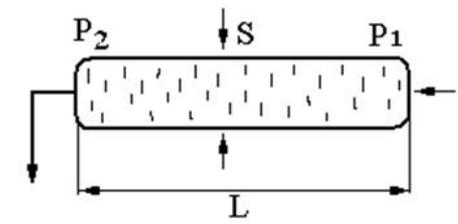
S - сечение образца, через который идет фильтрация (м²),

μ - динамическая вязкость фильтрующегося флюида, СИ [Па с], СГС [сПз] - сантипуаз,

$K_{пр}$ - коэффициент проницаемости [м²] - 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 см², длиной 1 см., который при градиенте давления 0.1 МПа и вязкости 1 сПз обеспечивает фильтрацию жидкости V= 1 см³ за 1 секунду.

Перевод единиц:

| | | |
|----|------|---|
| | СГСМ | СИ |
| 1D | ≈ | 10 ⁻¹² м ² = 1 мкм ² ; |

Основные петрофизические параметры горных пород

пород

Фильтрационные параметры горных пород:

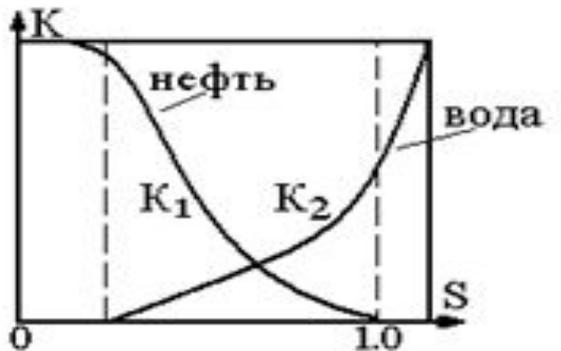
Фазовая проницаемость (обобщенный закон Дарси) определяют «продавливания» через породу смесь двух или более компонентов. При этом, вводится понятие скорости фильтрации

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

Где $W=Q/S$ - скорость фильтрации

K_{ϕ} - 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

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

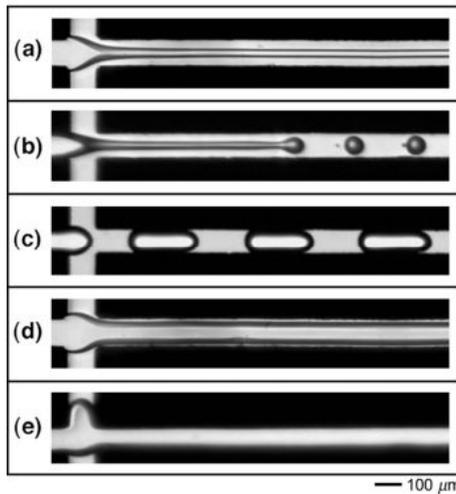
Полупроницаемые - $K_{\text{пр}} = 10^{-4} \div 10^{-2} \text{ мкм}^2 = 0.1 \div 10 \text{ mD}$

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

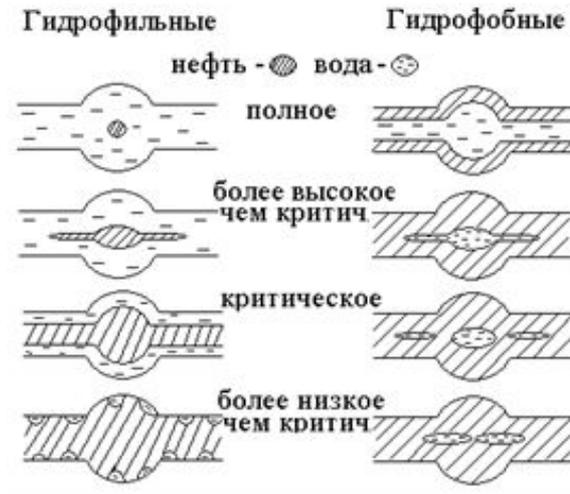
Основные петрофизические параметры горных пород

Фильтрационные параметры горных пород:

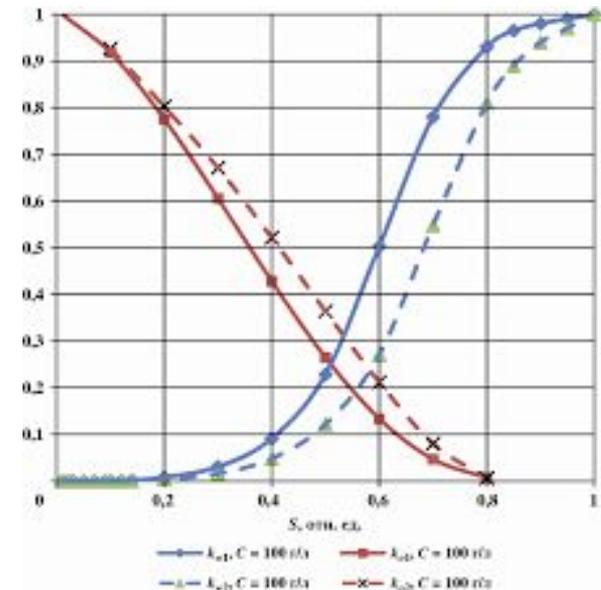
Природа двухфазной фильтрации объясняется различным типом взаимодействия флюида со скелетом горной породы и различием коэффициента поверхностного натяжения на границах сред.



- 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

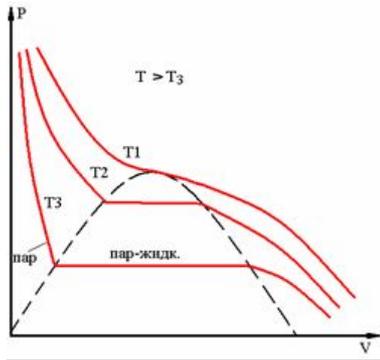
Контрольные вопросы по разделу №7

- 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?

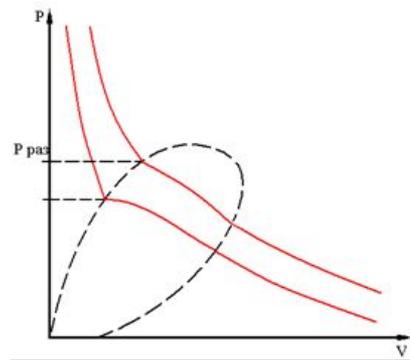
Основные петрофизические параметры горных пород

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 |
| $C_{15}H_{12}$ | 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÷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 ΔP :

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

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, ε (К/атм) | 0.04 | - 0.4 | 0.02 |
| Адиабатический, η (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