

Физические свойства горных
пород и флюидов
Лабораторные исследования
керна

ООО «Газпромнефть НТЦ»
ДГиРТА
Митяев Максим Юрьевич
2016

Свойства горных пород

Свойства горных пород



- **Геологическая характеристика**
 - Литолого-минералогический состав
 - Структура и текстура
 - Условия осадконакопления
 - Вторичные изменения
- **Фильтрационно-емкостные свойства**
 - Пористость
 - Проницаемость
 - Флюидонасыщенность
 - Капиллярное давление
- **Физические свойства**
 - Плотность
 - Естественная радиоактивность
 - Акустические свойства Электрические свойства

Геологическая характеристика

её влияние на физические свойства

Геологическая характеристика

Обломочные породы

- Постоянный состав первичных минералов SiO_2
- Классифицируются на основе:
 - Размеру зерна
 - Минеральному составу

Карбонатные породы

- Преимущественно состоят из карбонатных минералов (группа CO_3^{-2})
 - Известняк – преимущественно кальцит (кальцит карбоната, CaCO_3)
 - Доломит – преимущественно доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

Химический, минералогический состав и плотность матрицы горных пород

Плотность, г/см ³	Минерал	Состав
2.65	Кварц	SiO ₂
2.55 - 2.63	Полевой шпат	(K, Na)(AlSi ₃ O ₈)
2.71 – 3.96	Карбонаты	(Fe)/(Ca, Mg)CO ₃
2.30 - 2.96	Сульфаты (гипс, ангидрит)	(Ca)SO ₄ (2H ₂ O)
2.40 – 2.77 – 3.30	Слюда	K ₂ Al ₄ [Si ₆ Al ₂ O ₂₀](OH,F) ₄

Главные компоненты песчаника

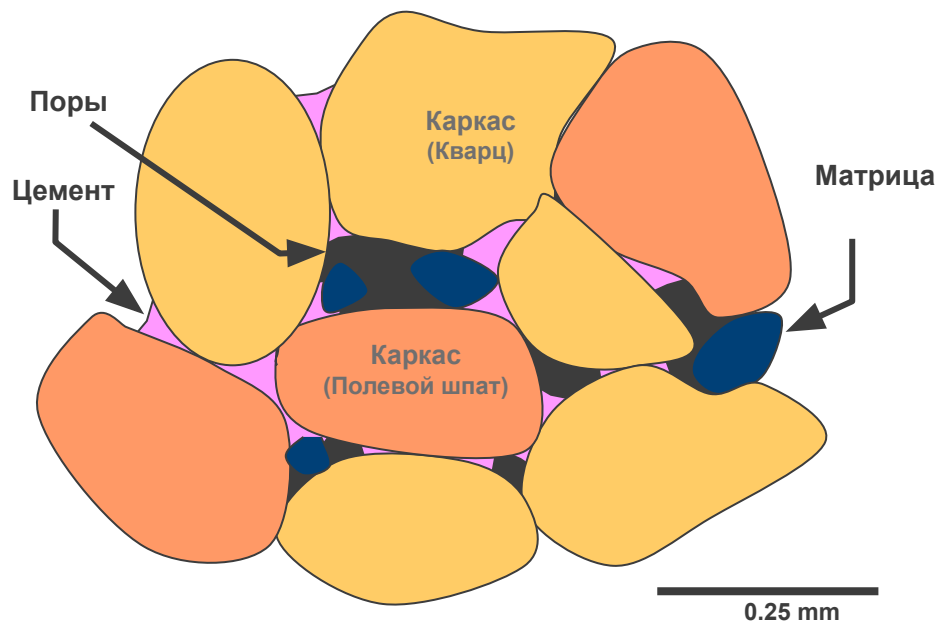
- Каркас
 - Остаточный размер зерен песчаника (или алевролита)
- Матрица
 - Остаточный размер алевролита или глин
- Цемент
 - Материал накопленный после седиментации или в процессе. Заполняет поровое пространство и каркас.
- Поры
 - Оставшееся свободное пространство

Химический, минералогический состав и плотность матрицы горных пород

Плотность, г/см ³	Минерал	Состав
1.0	Вода пресная	H ₂ O
1.0 -1.2	Вода соленая	H ₂ O
0.7 – 0.9	Нефть	C _n H _k
0.001 – 0.004	Газ	CH ₄

Главные компоненты песчаника

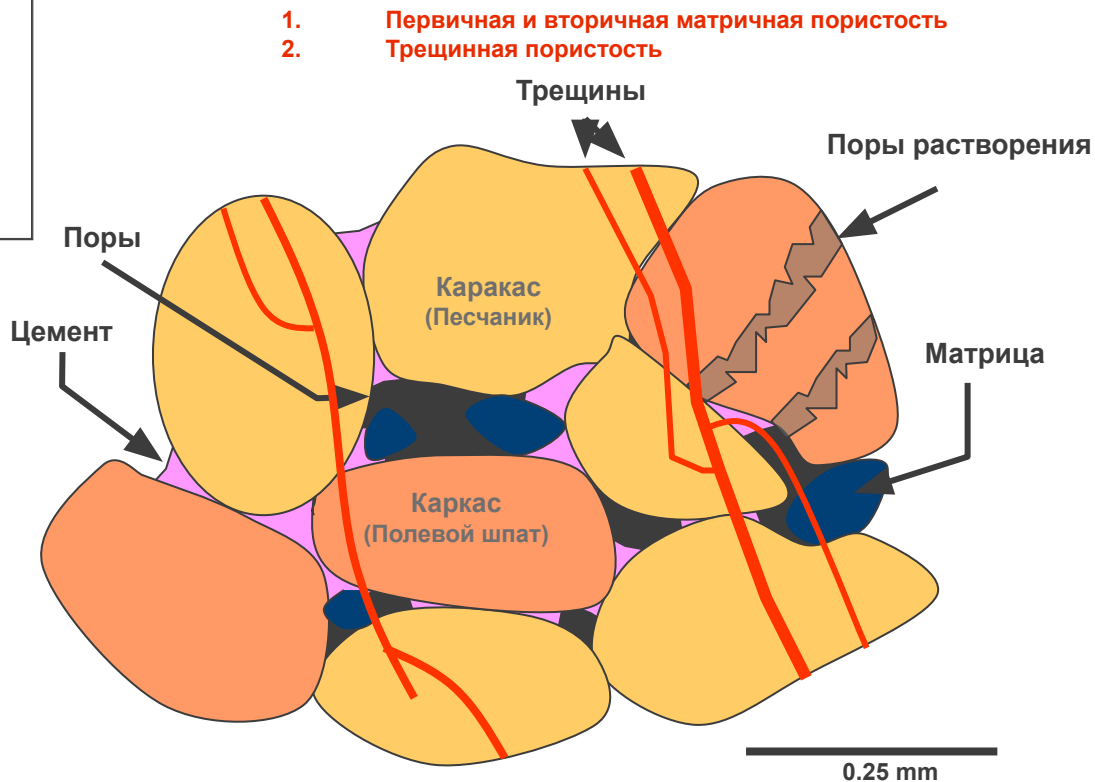
1. Каркас
2. Матрица
3. Цемент
4. Поры



Типы пор в песчанике

- Межзерновая (первичная)
 - Образующая пустотное пространство между зернами каркаса
- Микропористость
 - Небольшие поры, преимущественно между остаточным каркасом зерен или цемента
- Кавернозная
 - Частичное или полное растворение аутигенных зерен (также может встречаться внутри самих зерен)
- Трещинная
 - В областях растрескивания под влиянием напряженности

1. Каркас
2. Матрица
3. Цемент
4. Поры



- **Структура порового пространства зависит от:**
 - Сортировки частиц, слагающих горную породу
 - Упаковки зерен и формы межзерновых контактов
 - Формы и окатанности зерен скелета
 - Условий осадконакопления
 - Наличия и количества глинистого материала

Влияние глинистости на пористость и проницаемость



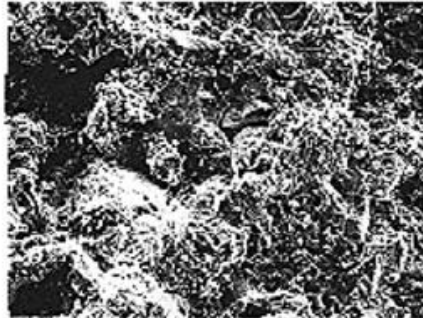
IA Porosity = 12.6%
Permeability = 127 md



IB Porosity = 11.0%
Permeability = 41.3 md



IC Porosity = 12.4%
Permeability = 9.7 md



ID Porosity = 9.9%
Permeability = 0.9 md

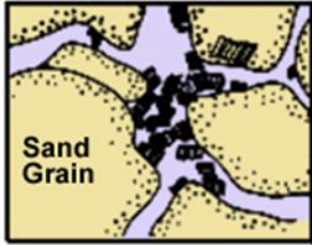
Хороший коллектор

Плохой коллектор

Химический, минералогический состав и физические свойства глинистых минералов

Плотность, г/см ³	Минерал	Состав	ЕКО, meq/100g
2.60 - 2.68	Каолинит	$\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$	3-15
2.60 - 3.30	Хлорит	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2}, \text{Fe}^{+3}, \text{Mn}, \text{Al})_{12}[(\text{Si}, \text{Al})_8 \text{O}_{20}](\text{OH})_{16}$	<10
2.60 - 2.90	Иллит	$\text{K}_{1.5-1.0} \text{Al}_4[\text{Si}_{6.5-7.0} \text{Al}_{1.5-1.0} \text{O}_{20}](\text{OH})_4$	10-40
2.00 – 3.00	Смектит	$(1/2\text{Ca}, \text{Na})_{0.7}(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_4[(\text{Si}, \text{Al})_8 \text{O}_{20}](\text{OH})_4 n\text{H}_2\text{O}$	80-150
2.00 – 2.30	Цеолит	$\text{K}_{x/n} \text{Al}_x \text{Si}_y \text{O}_{2(x+y)} z \text{H}_2\text{O}$	100-500

Влияние типа глин на пористое пространство



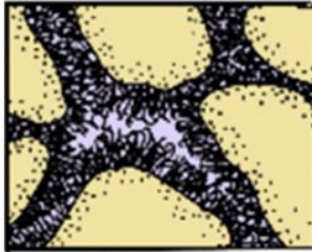
PORE-FILLING

Kalinite- dickite books
Chlorite rosettes and cabbageheads



PORE-LINING

Chlorite plates, honeycomb, rosettes and cabbageheads
Illite sheet with lath-like projections
mixed-layer illite/smectite
Smectite



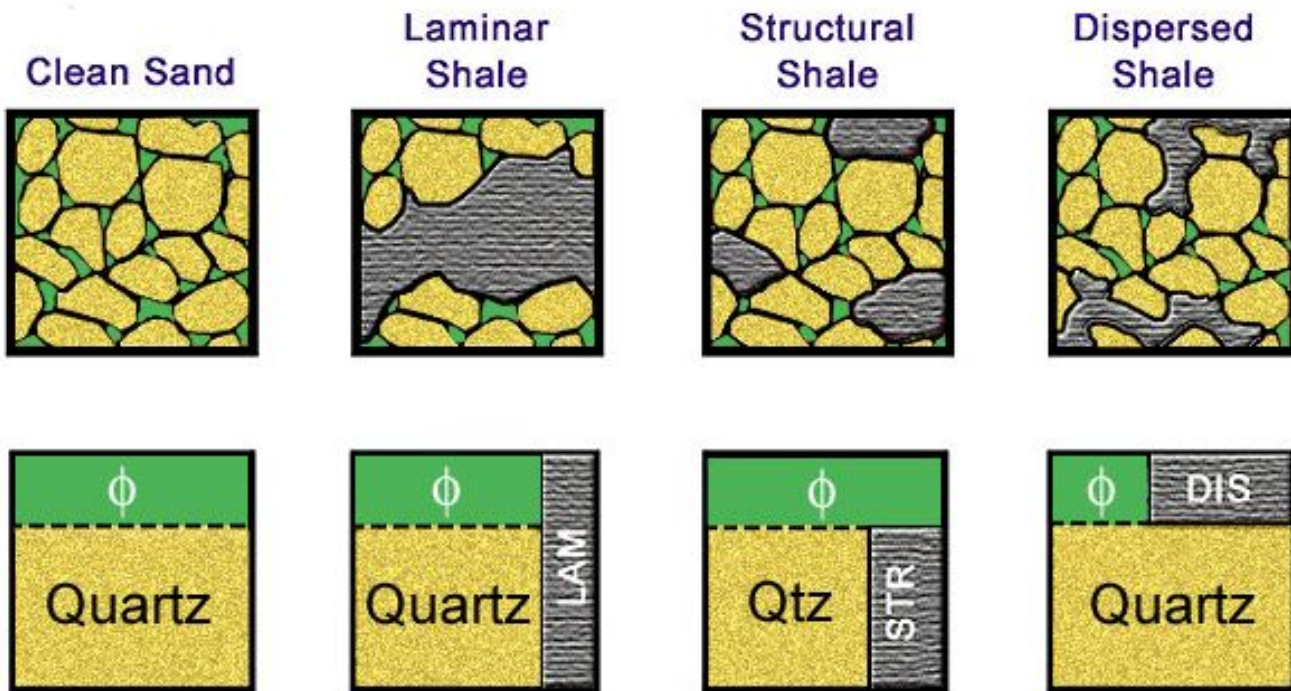
PORE-BRIDGING

Illite
Smectite
Mixed-layer Illite.smectite
Chlorite plates

(Modified from Neasham, 1979)

- **Агрегаты различных типов глина в поровом пространстве:**
 - Встречаются различные типы заполнения порового пространства в зависимости от типа глин
 - Наиболее благоприятен дискретный тип (**каолинит**) в отличие от волокнистого (**иллит**), заполняющего поры в виде перемычек между песчаными зернами.

Модели глинистого песчаника



After Schlumberger

Глинистость



Фильтрационно-емкостные свойства

Фильтрационно-емкостные свойства горных пород

```
graph TD; A[Фильтрационно-емкостные свойства горных пород] --- B[Пористость]; A --- C[Проницаемость]; A --- D[Насыщенность]
```

Пористость

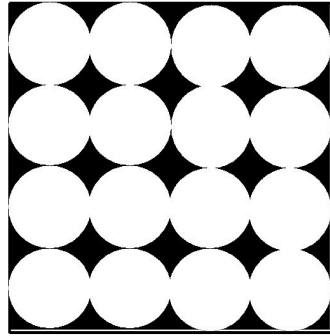
Проницаемость

Насыщенность

Фильтрационно-емкостные свойства горных пород

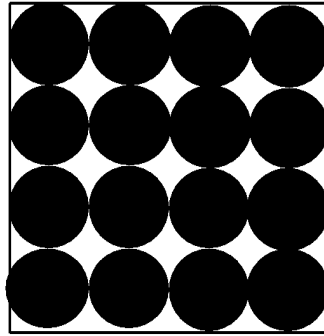
Пористость

Пористость



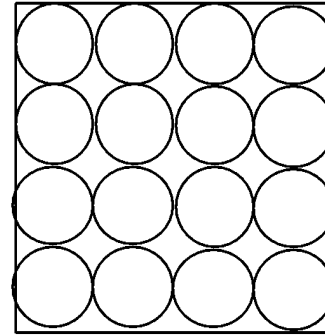
Объем зерен

+



Объем пор

=



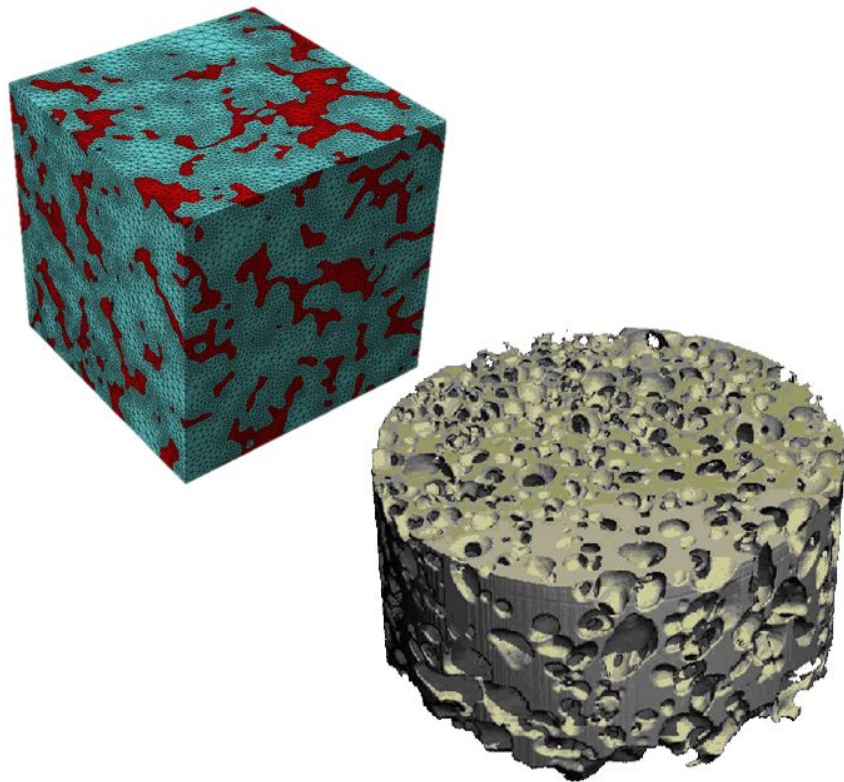
Общий объем

$$\text{Porosity, } \phi = \frac{\text{Pore Volume}}{\text{Bulk Volume}} \times 100$$

$$\text{Porosity, } \phi = \frac{\text{Bulk Volume} - \text{Grain Volume}}{\text{Bulk Volume}} \times 100$$

$$\text{Porosity, } \phi = \frac{\text{Pore Volume}}{\text{Pore Volume} + \text{Grain Volume}} \times 100$$

Пористость



- **Типы пористости:**

- **Общая пористость (Bulk porosity)**
 - Общий объем всех пор в породе
- **Эффективная пористость (Effective porosity)**
 - Объем сообщающихся пор

$$K_{п_{общ}} = \frac{V_{пор}}{V_{обр}} \times 100\%$$

$$K_{п_{эф}} = \frac{V_{сбщ.пор}}{V_{обр}} \times 100\%$$

Общая пористость VS. эффективная пористость

- Чистый песчаник:

$$\varphi_e \rightarrow \varphi_t$$

- Средне-, хорошо- сцементированный песчаник:

$$\varphi_e \approx \varphi_t$$

- Сильно – сцементированный песчаник и большинство карбонатов:

$$\varphi_e < \varphi_t$$

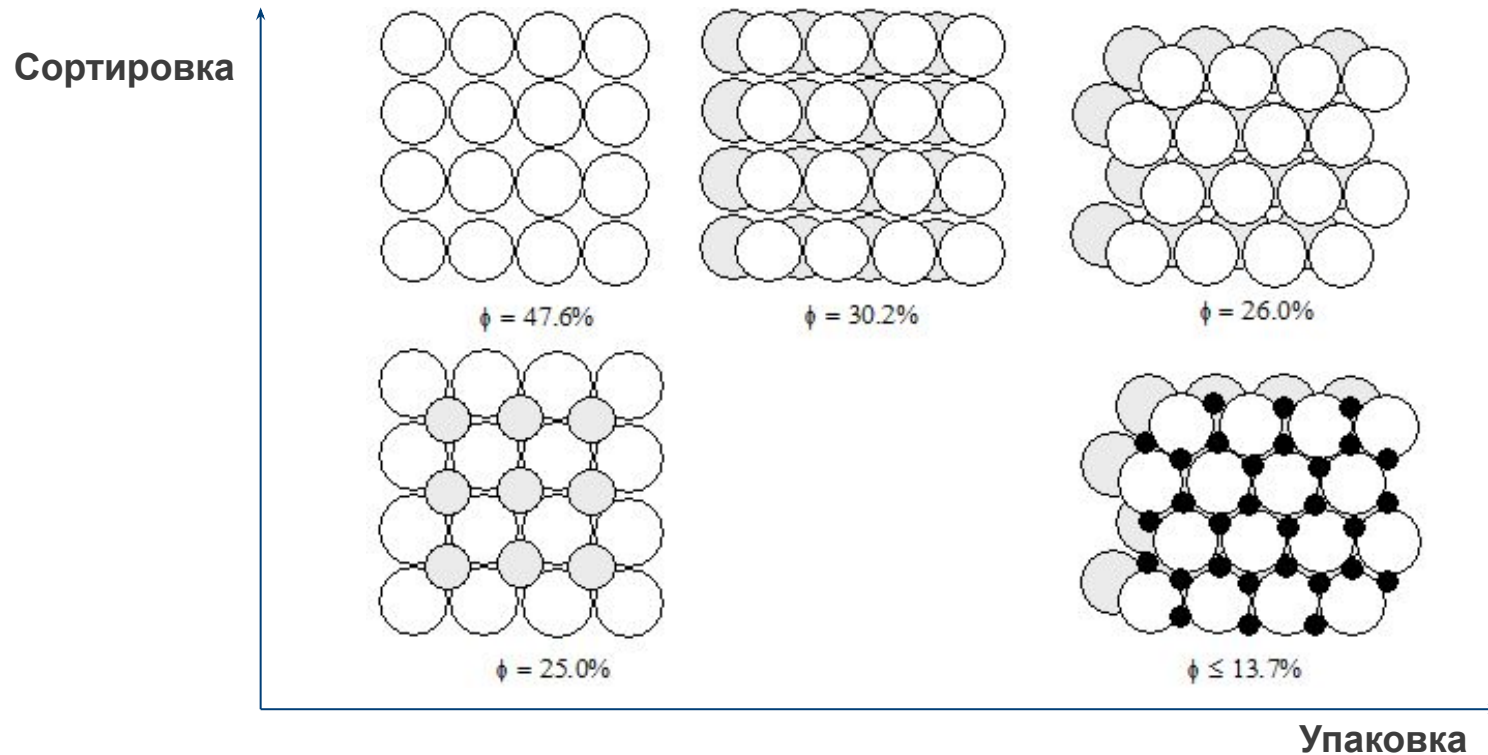
Факторы, влияющие на пористость



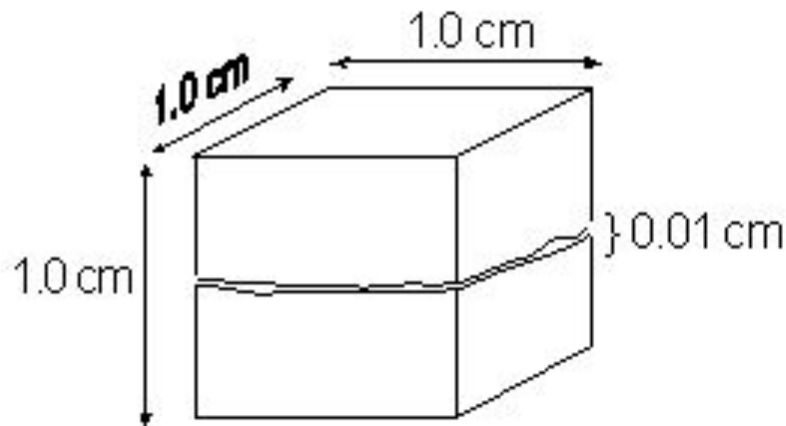
- Первичные факторы
 - Упаковка
 - Сортировка
 - Форма зерен

- Вторичные факторы
 - Механические (деформация, трещины,...)
 - Геохимические (изменение состава, растворение,...)

Сортировка и упаковка



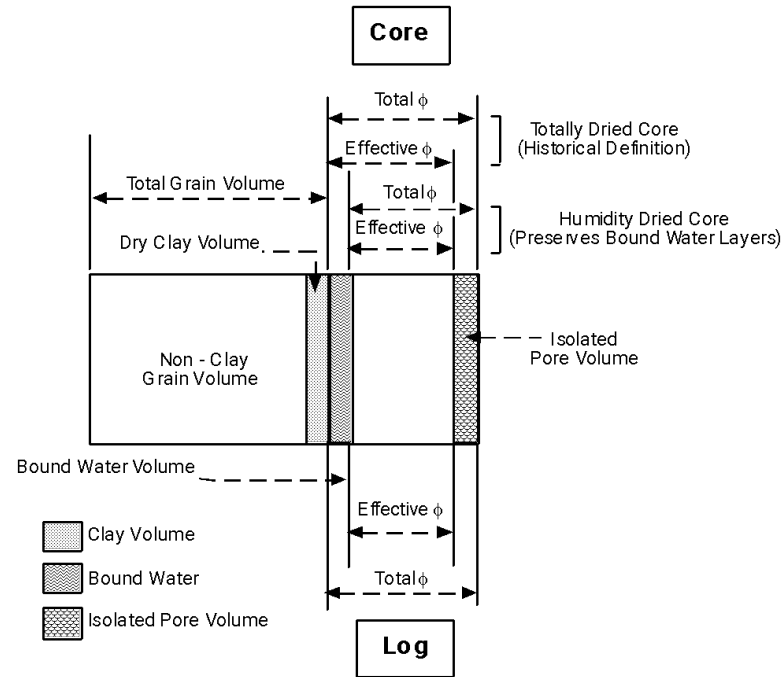
Трещинная пористость



$$\varphi = \frac{V_{poro}}{V_{bulk}} = \frac{(0.01 \times 1 \times 1)}{(1 \times 1 \times 1)} = 0.01$$

или 1.0%

Пористость



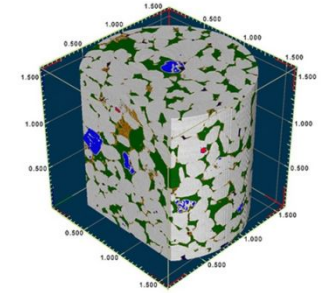
Total and Effective Pore Volumes
Defined in Core and Log Analysis

Примеры пористости различных пород

- Песчаник в пластовых условиях - 15-35%
- Глины - 0-45%
- Карбонаты - 5-10%
- Кавернозные карбонаты - 10-40%
- Доломит - 10-30%
- Гранит - <1%

Методы измерения пористости на керне

- Метод насыщения
- Метод плавучести
- Гелиевая порометрия
- Ртутная порометрия



Метод насыщения

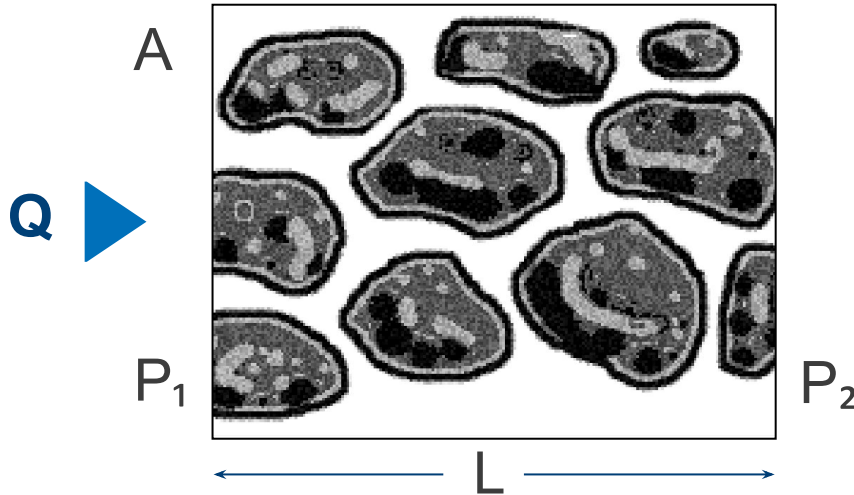
Величина	Обозначение	Значение
Вес образца, г	m_1	27,760
Вес насыщенного образца в воздухе, г	m_2	30,665
Вес насыщенного образца в рабочей жидкости, г	m_3	19,178
Плотность рабочей жидкости, г/см ³		0,828
Коэффициент открытой пористости насыщения, доли	K_p	?

Фльтрационно-емкостные свойства горных пород

Проницаемость

Проницаемость

Проницаемость (K) – свойство пород пропускать через себя жидкости, газы и их смеси при перепаде давлений (мера фильтрационной проводимости)



$$Q = \frac{k \cdot A \cdot \Delta P}{l \cdot \mu}$$

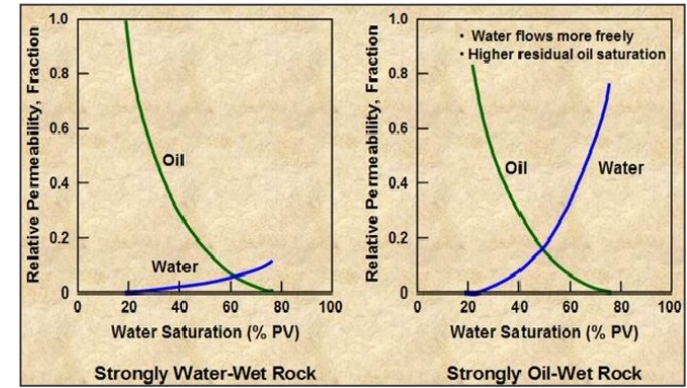
Граничные условия закона Дарси

- Ламинарный поток через пористую среду
- Отсутствие химических реакций между средой и фильтрующимся реагентом
- Однофазное насыщение среды
- Несжимаемая жидкость

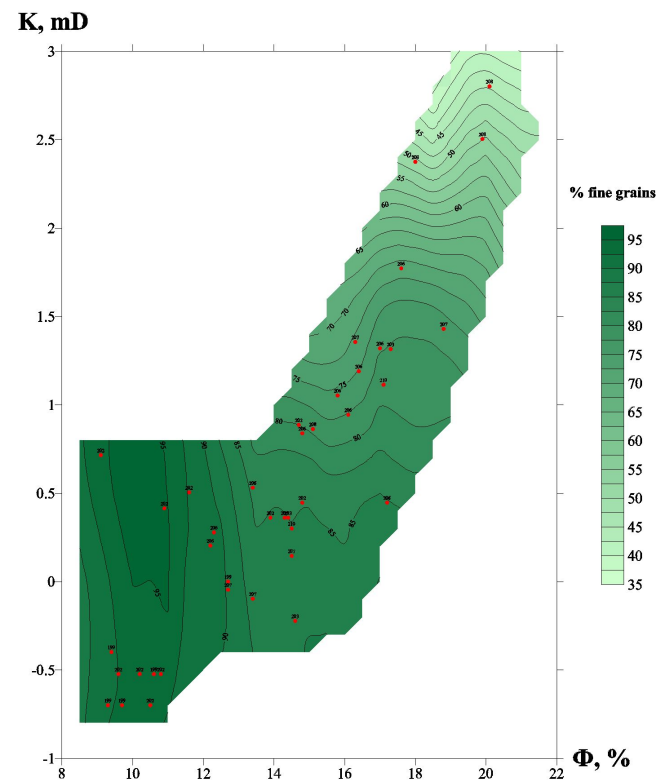
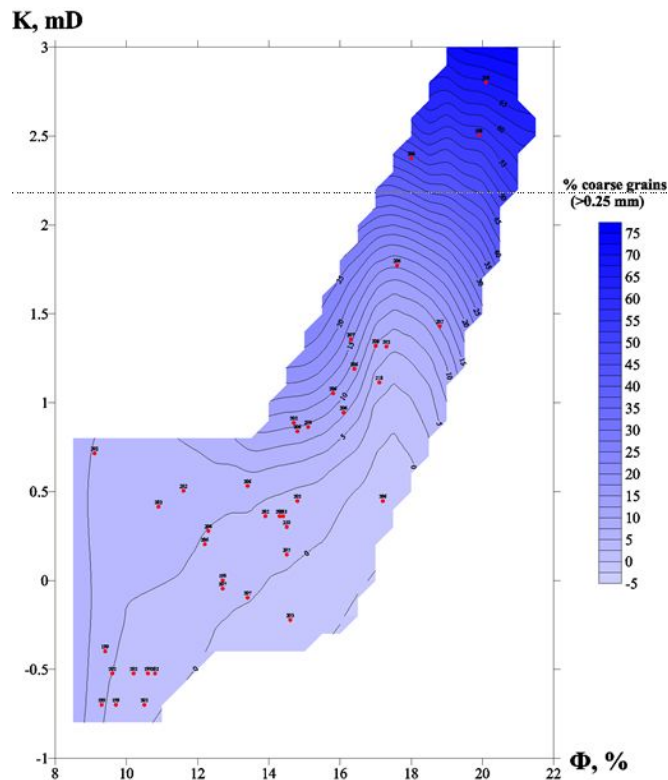
**[K] = m², mkm²,
дарси, миллидарси**

Влияющие факторы

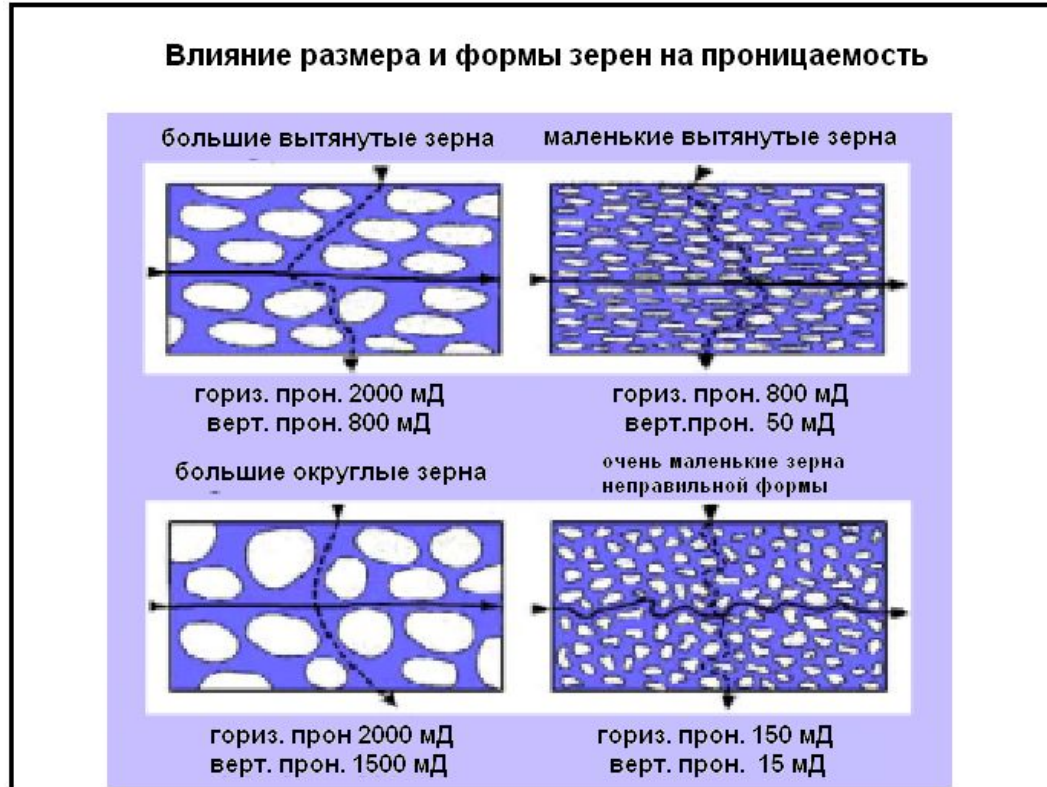
- Пористость (больше PNI – больше k)
- Размер пор (маленькие поры – меньше k)
- Размер зерен (большая площадь – больше трение – меньше k)
- Наличие более, чем одной фазы



Зависимость от гранулометрического состава



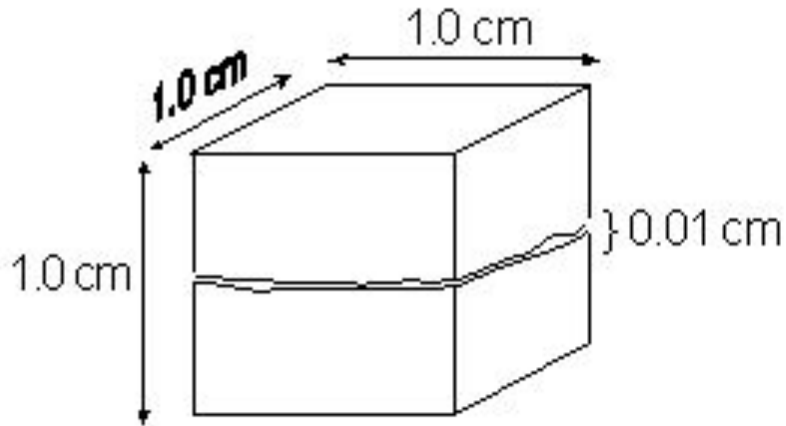
Влияние размера и формы зерен на проницаемость



Примеры значений проницаемости

- **0.001 мД** - неколлектор (глины, граниты)
- **1-10 мД** - средняя
- **10-100 мД** - высокая
- **100-1000 мД** - очень высокая
- **3 Д** - суперколлекторы

Влияние трещин на проницаемость горной породы

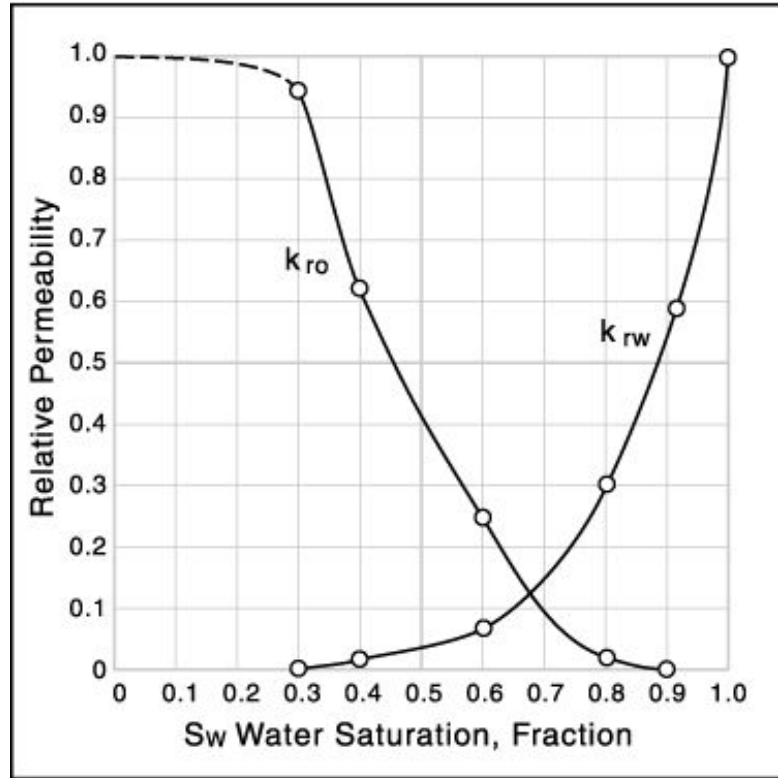


?

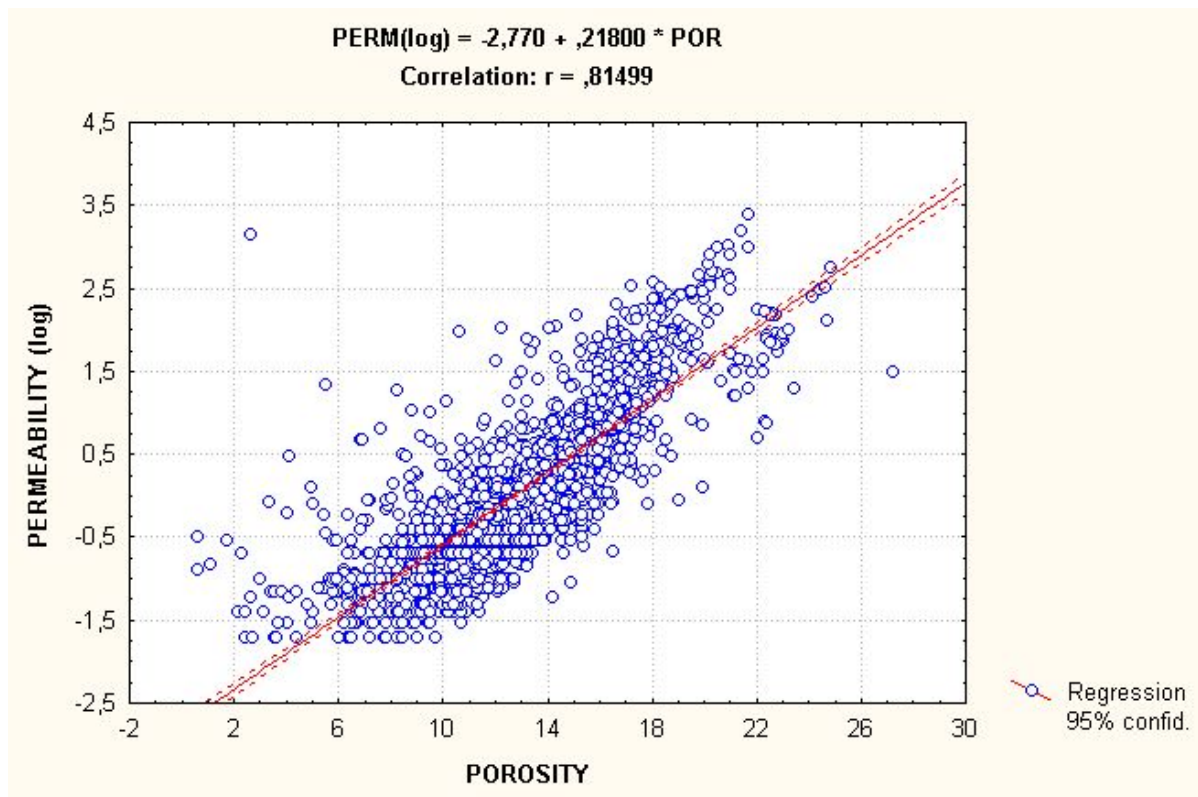
Виды проницаемости

- **Абсолютная проницаемость** – мера проницаемости, не зависящая от типа флюида (максимальная)
- **Эффективная (фазовая) проницаемость** - проницаемость одного флюида в присутствии одного или большего количества других флюидов ($<$ абсолютной)
- **Относительная проницаемость** - отношение эффективной проницаемости при насыщении одним флюидом к абсолютной проницаемости при 100 % насыщении

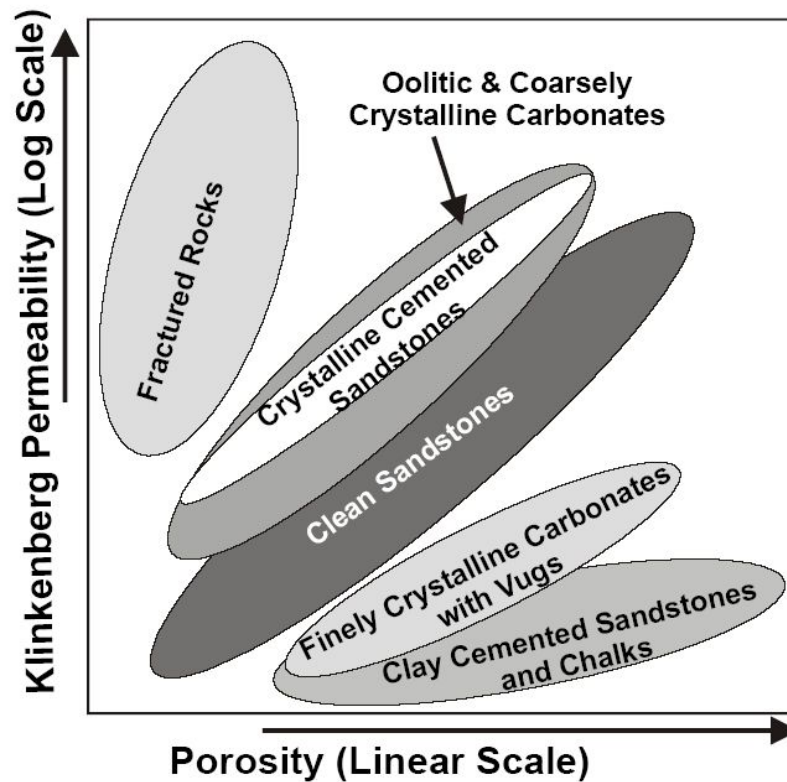
Относительная фазовая проницаемость



Связь пористость-проницаемость



Связь пористость-проницаемость

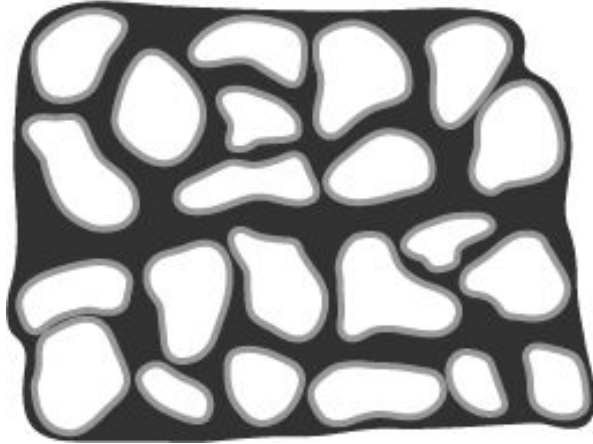


Фильтрационно-емкостные свойства горных пород

Насыщенность

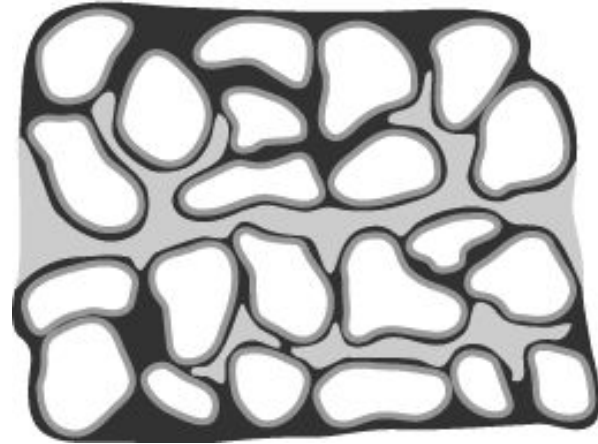
Насыщенность

■ Oil ■ Water



Пример двухфазного насыщения (вода, нефть)

■ Oil ■ Water ■ Gas



Пример трехфазного насыщения (вода, нефть, газ)

Насыщенность

- Флюидонасыщенность
 - Водонасыщенность
 - Связанная
 - Свободная
- Нефтенасыщенность
- Газонасыщенность

$$S_o = V_o/V_p$$

$$V_p = V_w + V_o + V_g$$

$$S_o + S_w + S_g = 1$$

Способы определения насыщенности

- Методы определения
 - Прямые
 - Анализ керна
 - Косвенные
 - Капиллярные кривые
 - Геофизические исследования скважин

Капиллярное давление

- Капиллярное давление в горных породах обусловлено следующими факторами:
 - Наличием гидрофильной или гидрофобной пористой среды, пронизанной капиллярами
 - Наличием флюида
 - Силами поверхностного натяжения между твердой фазой и флюидом (флюидами)
- Поверхностное натяжение – энергия на единицу площади (сила на единицу расстояния), действующая на поверхности между фазами
- Горные породы – твердые фазы.
- Вода, нефть и/или газ – флюиды.

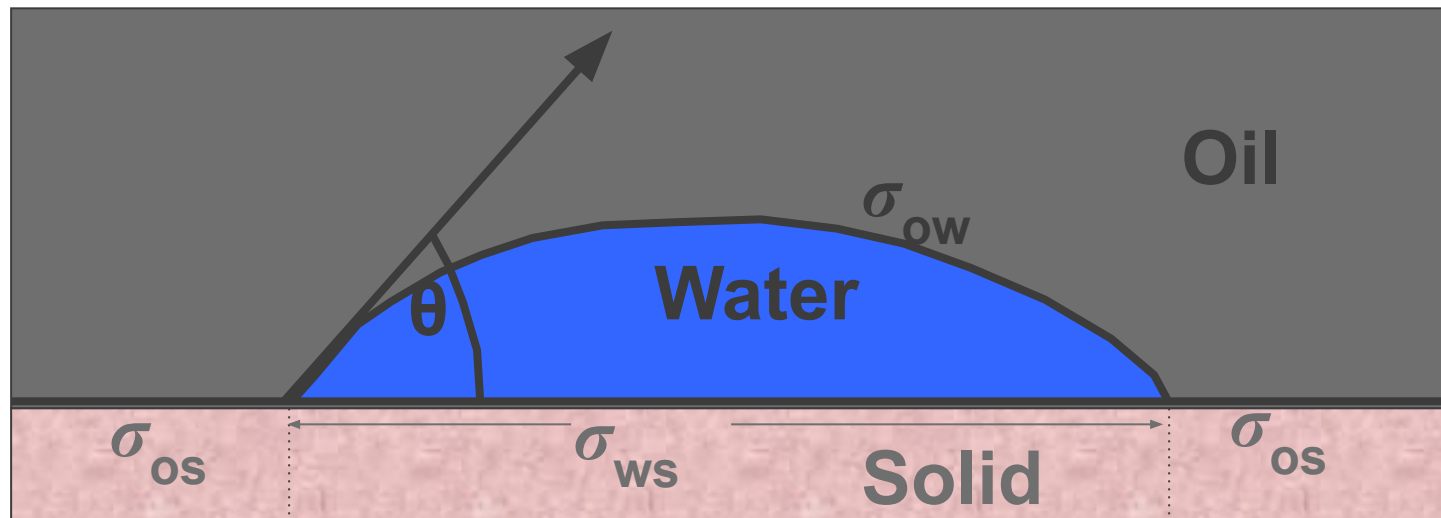
Сила поверхностного натяжения

- **Сила поверхностного натяжения** выражается, как разница сил различных фаз на границе порода-флюид

$$A_T = \sigma_{os} - \sigma_{ws} = -|\sigma_{ow}| \cos \theta$$

- Отрицательная сила поверхностного натяжения указывает на то, что более плотная фаза (вода) смачивает поверхность породы
- Если поверхностное натяжение = 0, это говорит, что обе фазы имеют одинаковое влияние на поверхность

Сила поверхностного натяжения

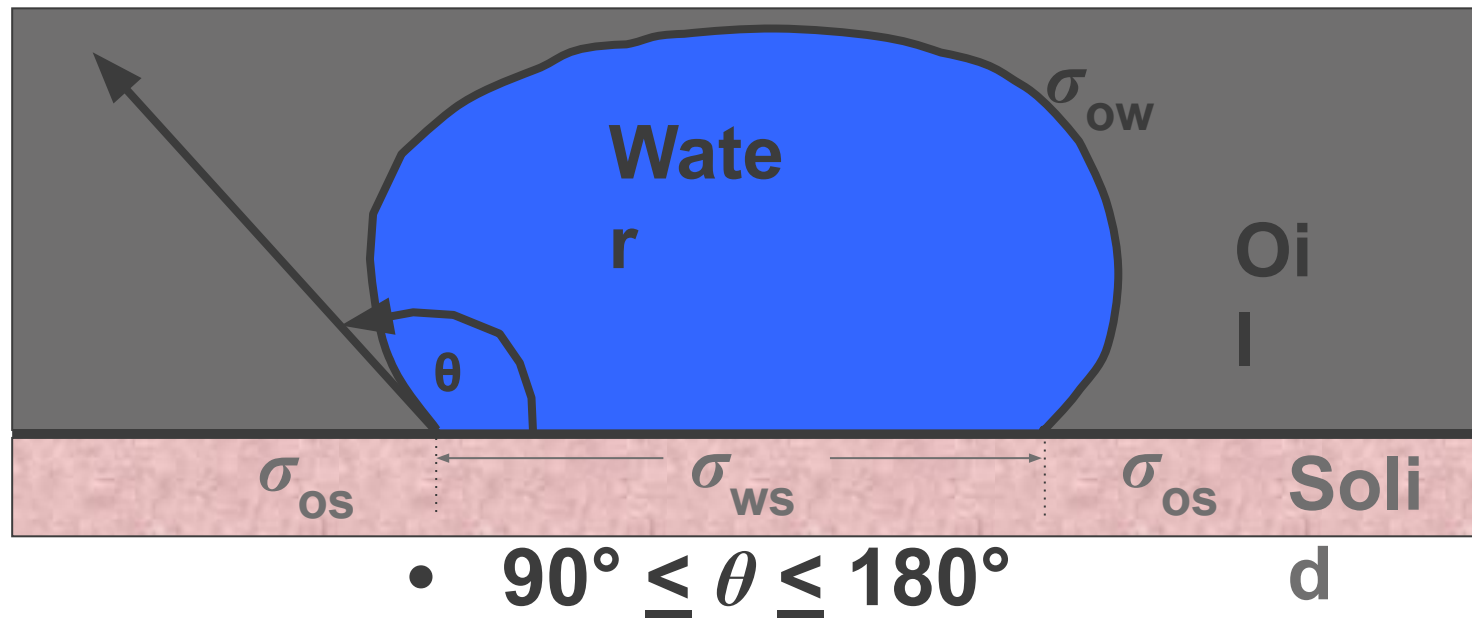


- $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

Сила поверхностного натяжения между водой и породой превышает силу между нефтью и породой

Гидрофильная порода

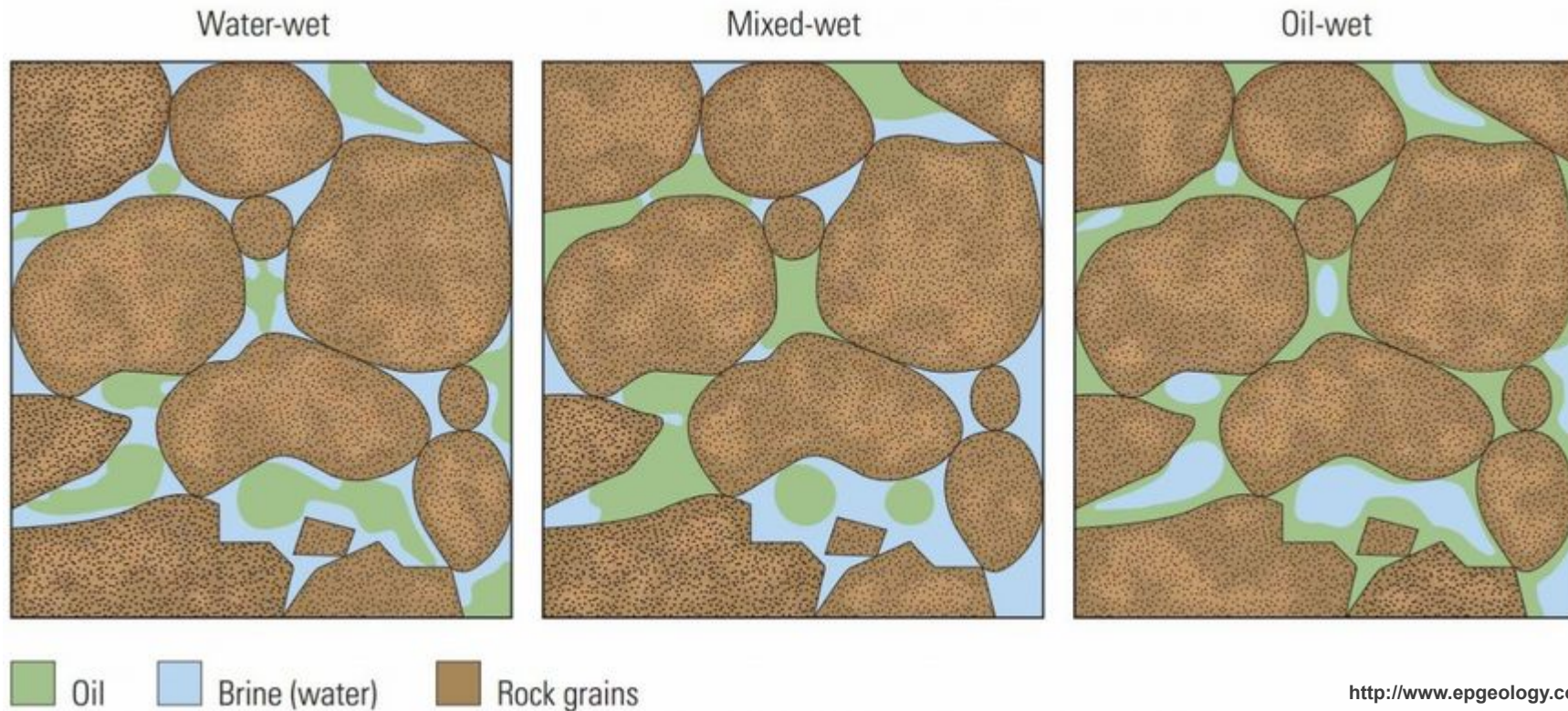
Сила поверхностного натяжения



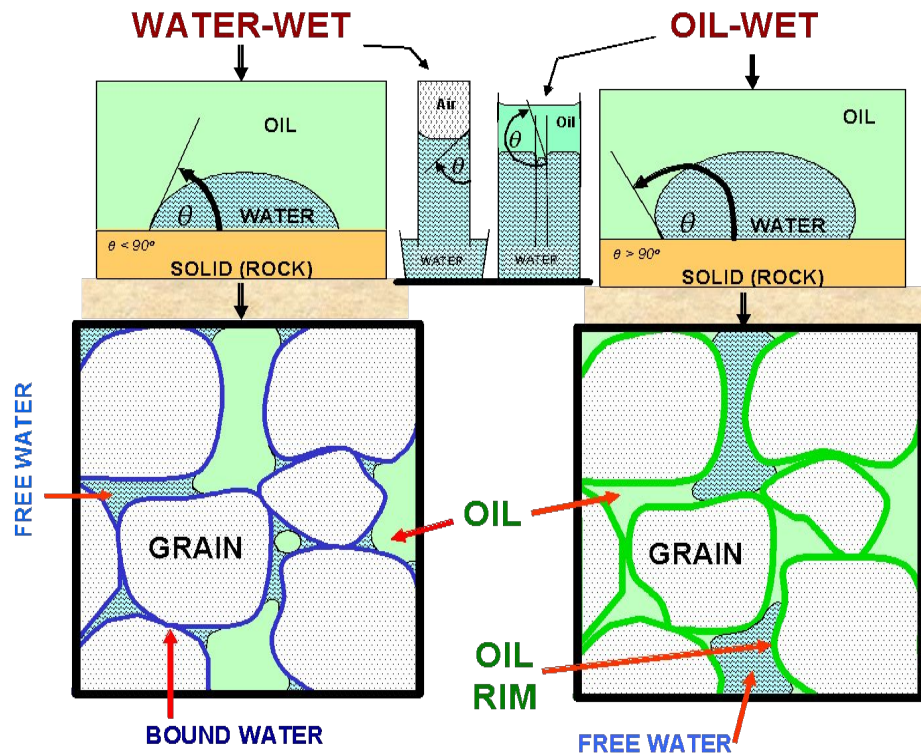
Сила поверхностного натяжения между водой и породой
меньше силы между нефтью и породой

Гидрофобная порода

Смачиваемость



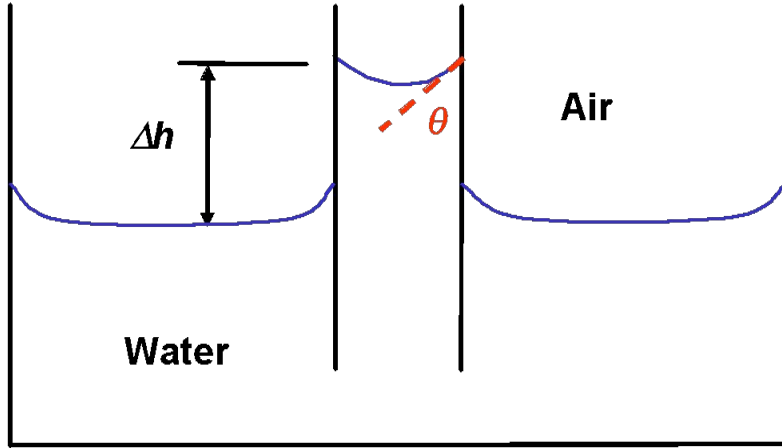
Смачиваемость



Ayers, 2001

<https://www.spec2000.net>

Капиллярное давление

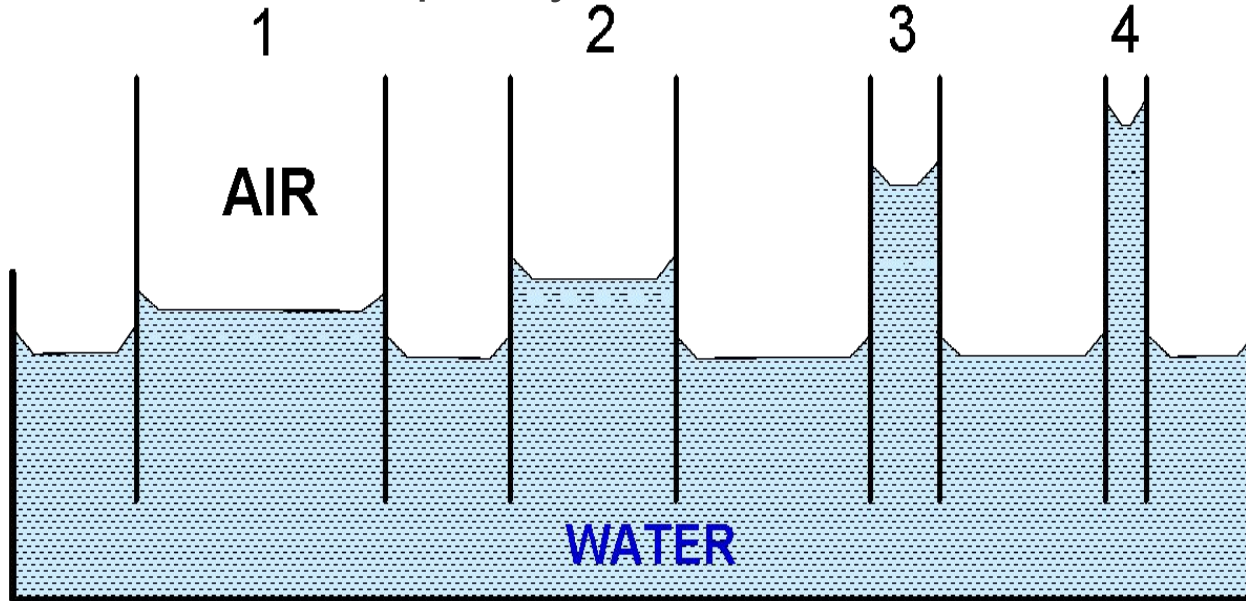


- Высота воды в капилляре функция от:
 - Силы поверхностного натяжения
 - Радиуса капилляра
 - Разницы плотностей флюидов

$$\Delta h = \frac{2 \times \sigma_{aw} \times \cos \theta}{r g \Delta \rho_{aw}}$$

Капиллярное давление

Изменение высоты смачивающей фазы в зависимости от
радиуса канала



Капиллярное давление

Капиллярное давление в системе воздух/вода

$$\Delta h = \frac{2 \times \sigma_{aw} \times \cos \theta}{r \times g \times \Delta \rho_{aw}}$$

$$P_c = \Delta \rho_{aw} \times g \times \Delta h$$


$$P_c = \frac{2 \times \sigma_{aw} \times \cos \theta}{r}$$

Капиллярное давление

Капиллярное давление в системе нефть/вода

$$\Delta h = \frac{2 \times \sigma_{ow} \times \cos \theta}{r \times g \times \Delta \rho_{ow}}$$

$$P_c = \Delta \rho_{ow} \times g \times \Delta h$$


$$P_c = \frac{2 \times \sigma_{ow} \times \cos \theta}{r}$$

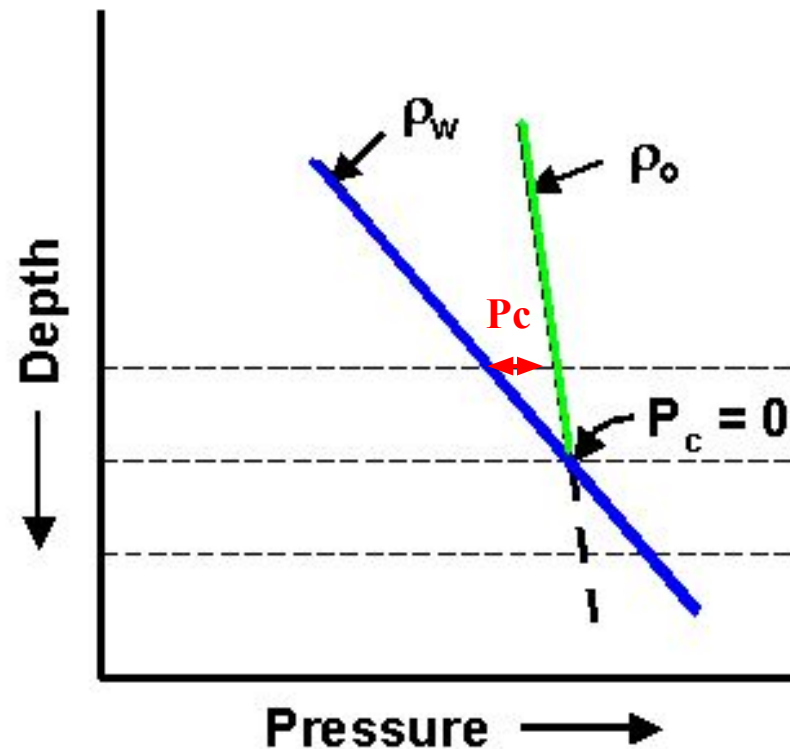
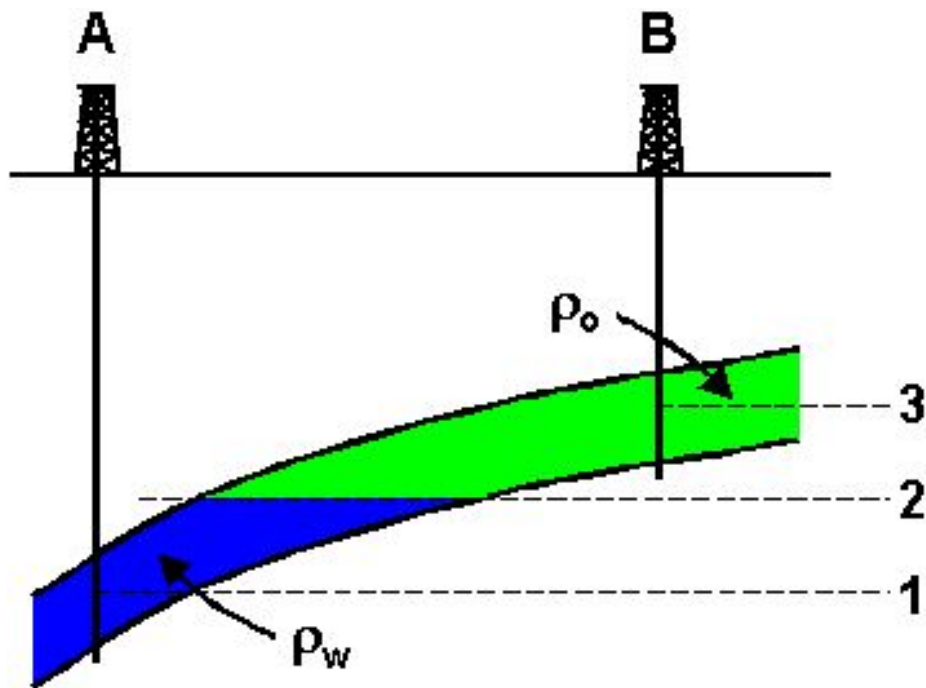
Капиллярное давление

Капиллярное давление — разница между давлениями на границе несмешивающихся жидкостей в капилляре (поровом пространстве)

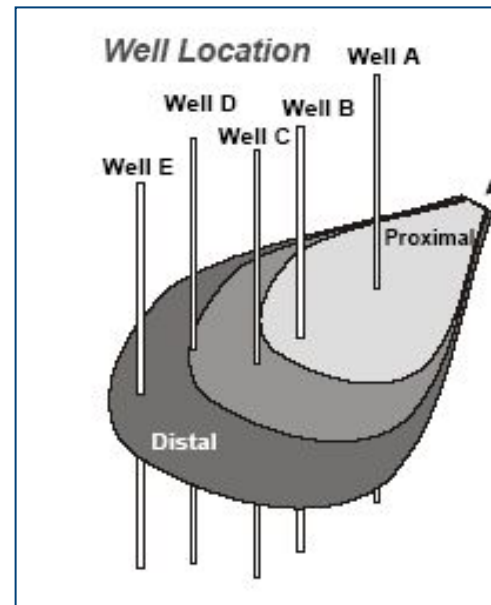
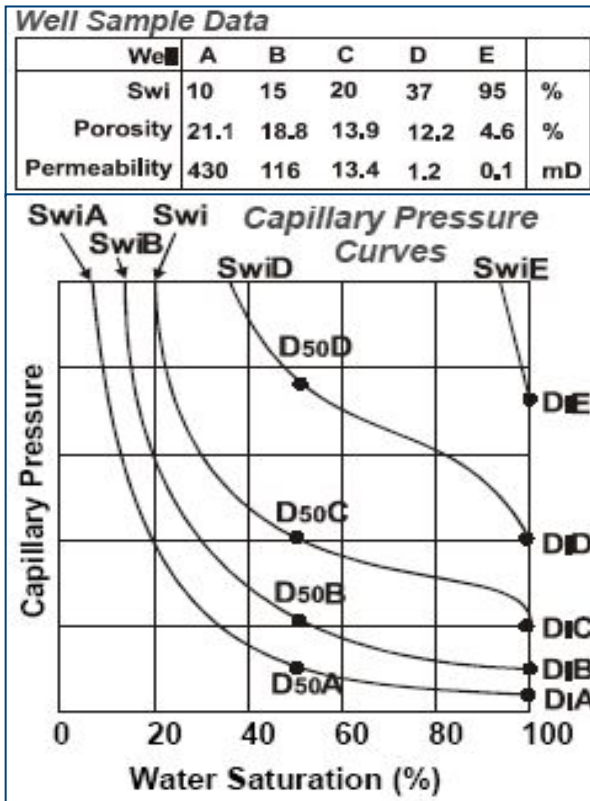
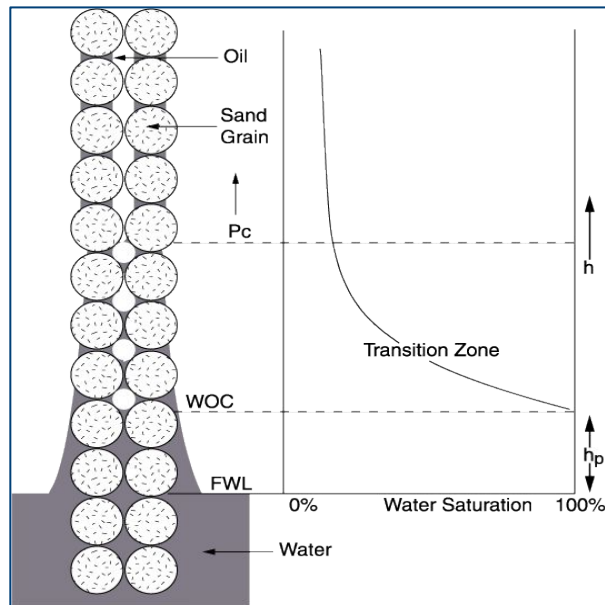
Рассчитывается как:

$$P_c = p_{nwt} - p_{wt}$$

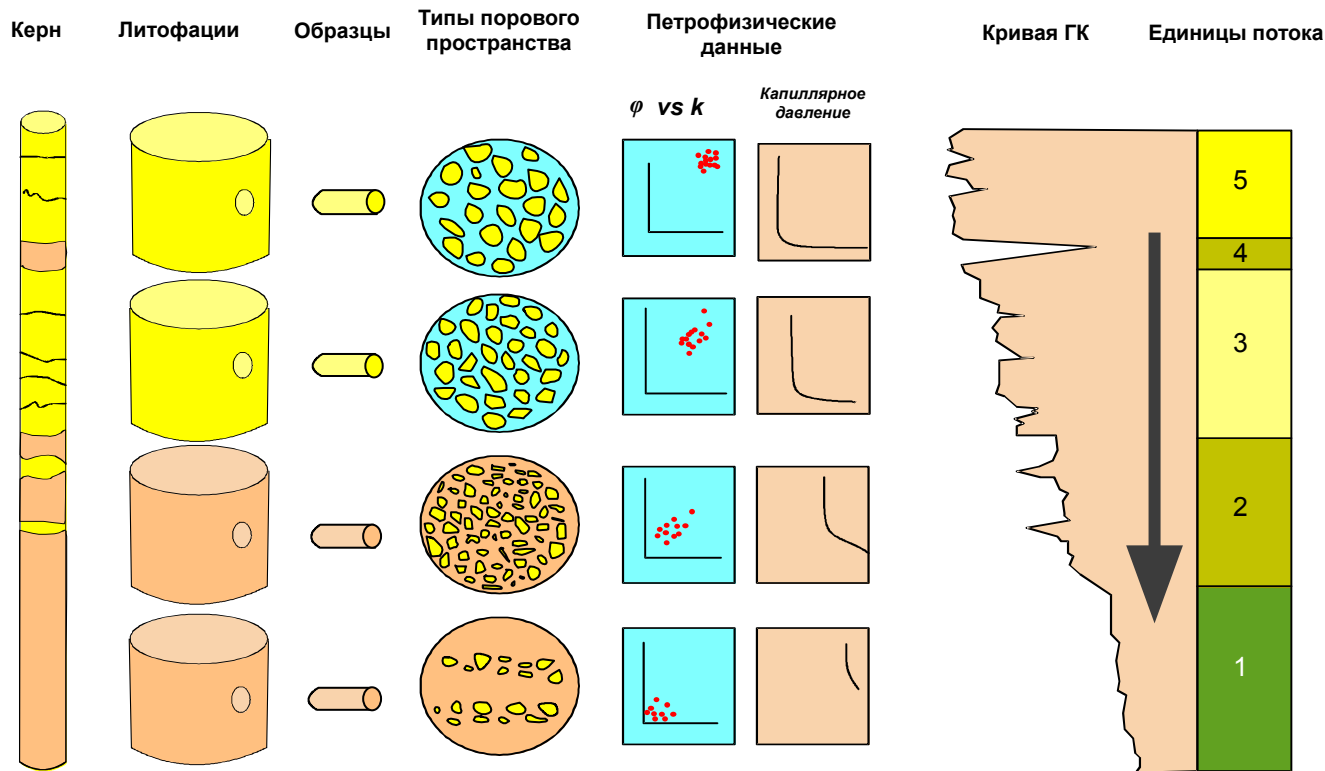
Капиллярное давление



Капиллярное давление



Капиллярное давление



Физические свойства пород

Плотность

Плотность

$$\rho = \frac{m}{(1 - \frac{V_1}{V_2})V_2}$$

V_1 - объем пор и пустот в горной породе, м³;

V_2 - общий объем породы (объем твердого минерального скелета в данном объеме) м³;

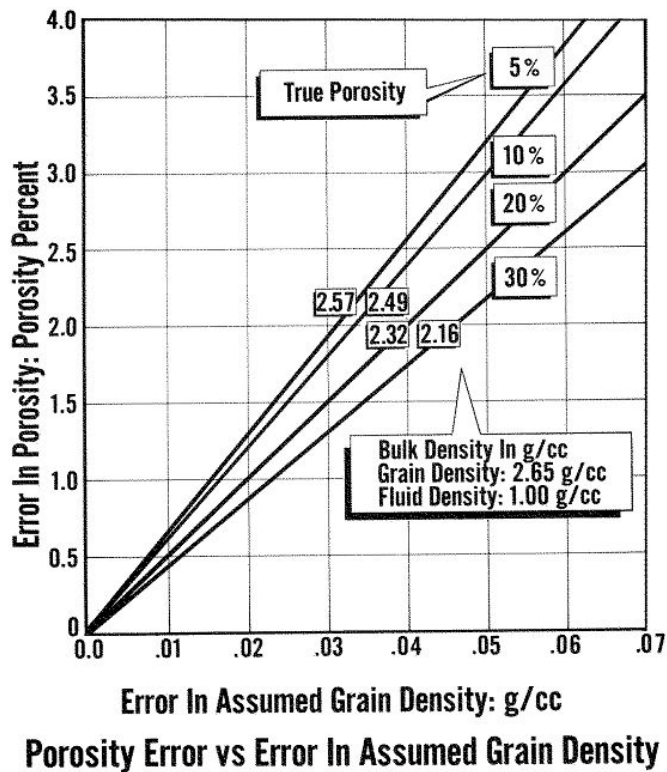
m - масса образца породы в чистом и сухом виде, кг

Плотность

**Гистограмма распределения
плотности скелета юрских
песчаников**

**Поле корреляции объемной
плотности и пористости юрских
песчаников**

Плотность



Плотность

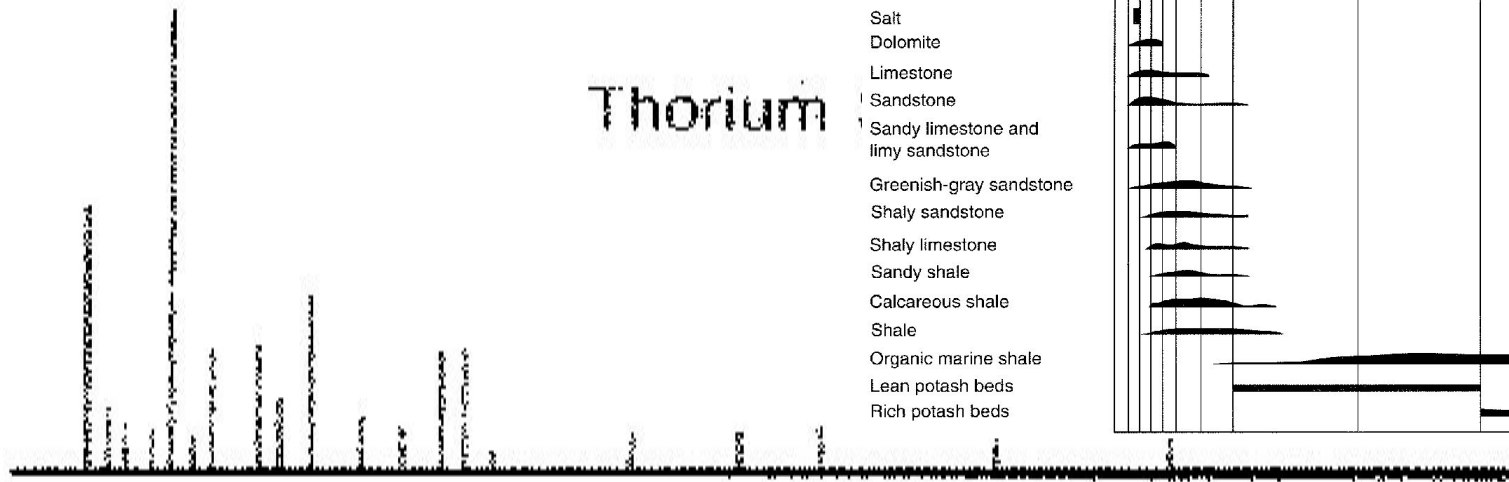
- **Естественная радиоактивность** – способность горных пород к самопроизвольному испусканию гамма-квантов различной энергии за счет превращения одного изотопа в другой – радиоактивного распада
- Радиоактивность горных пород обусловлена преимущественно содержанием в них радиоактивных изотопов K^{40} , U^{238} , Th^{232}
- Единицы измерения радиоактивности – грамм-эквивалент радия на 1 грамм породы – концентрация радиоактивных элементов в горной породе, при которой возникает гамма-излучение такой же интенсивности, как при распаде 1 г Ra (г-экв Ra/г, или пг-экв Ra/г). $1 \text{ пг-экв Ra/г} = 10^{-12} \text{ г-экв Ra/г} = 16.5 \text{ API}$
- Измерение интегральной радиоактивности – радиометрия, гамма-каротаж, измерение концентраций основных радиоактивных элементов – гамма-спектрометрия

Физические свойства пород

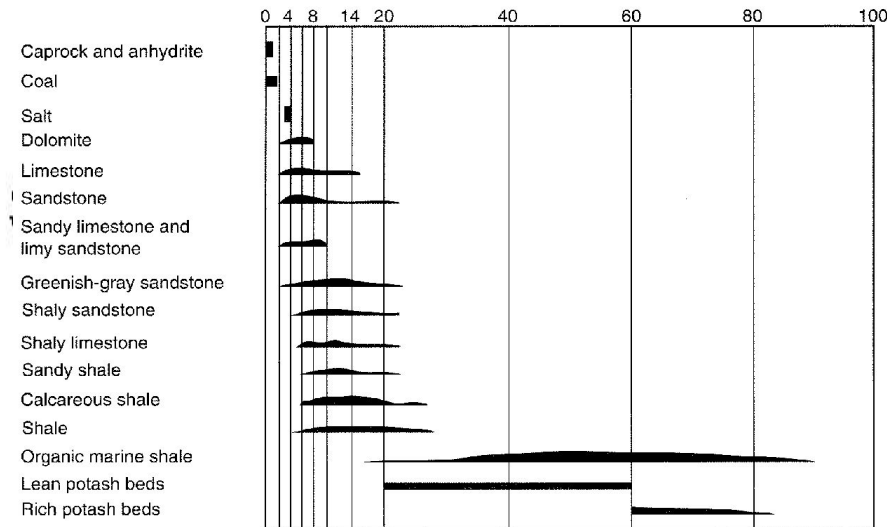
Естественная радиоактивность

Естественная радиоактивность

of Emission Per Disintegral

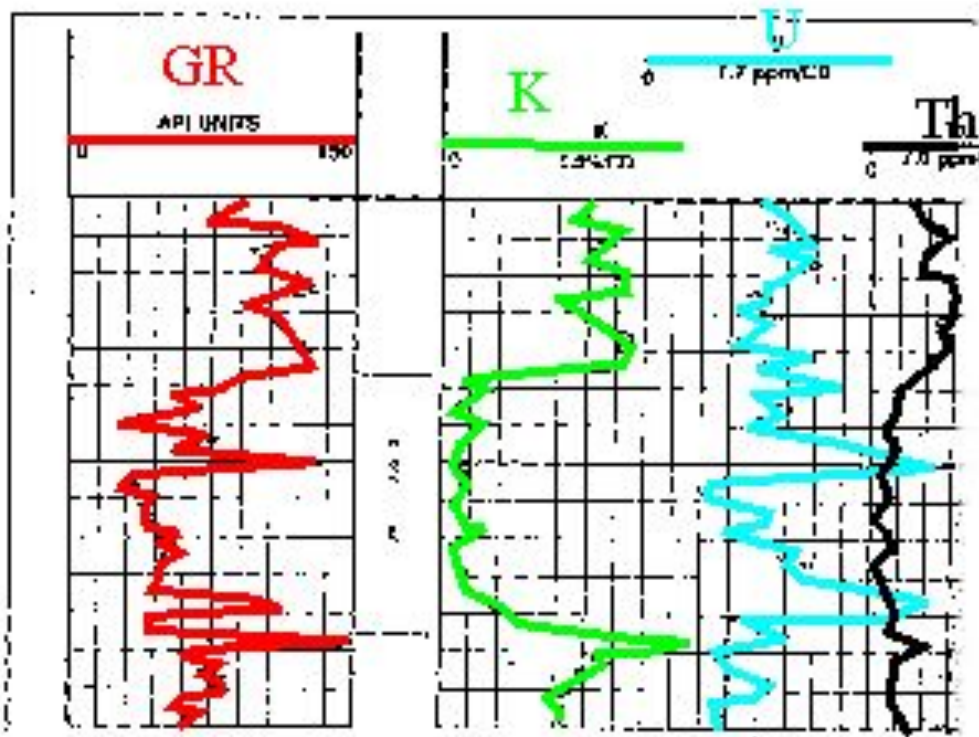


Спектр гамма излучения

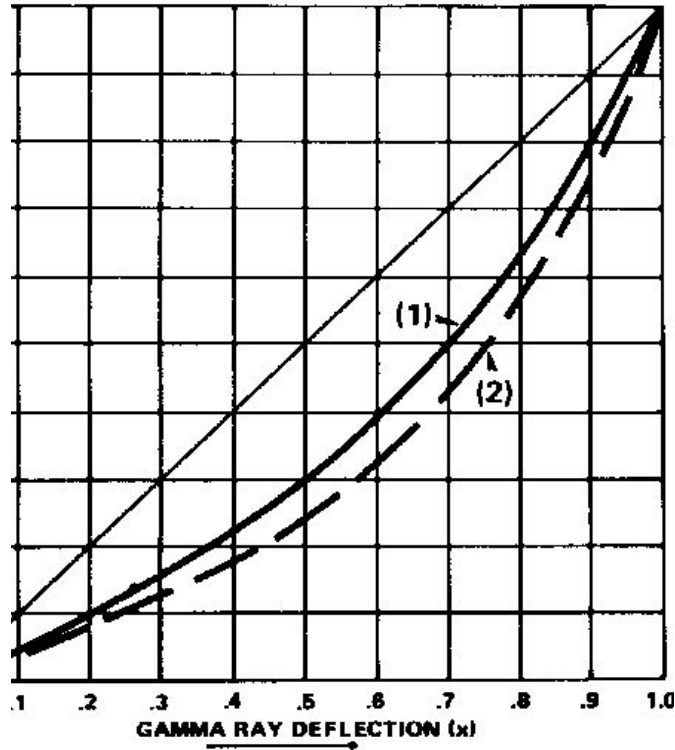


Спектры гамма излучения осадочных пород

Естественная радиоактивность



Естественная радиоактивность



$$I_{gr} = (GR - GR_{clean}) / (GR_{sh} - GR_{clean})$$

GR - измеренное гамма-излучение

GR_{cl} - гамма-излучение песчаника

GR_{sh} - гамма-излучение глин

$$V_{sh} = 0.33 \cdot (2^{2 \cdot I_{gr}} - 1) - Larionov$$

$$V_{sh} = 1.7 - (3.38 - (I_{gr} + 0.7)^2)^{0.5} - Clavier$$

$$V_{sh} = \frac{0.5 \cdot I_{gr}}{1.5 - I_{gr}} - Steiber$$

Физические свойства пород

Упругие свойства

Упругие свойства

$$V_b = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)}}$$

V_b = Velocity of bulk compressional waves

V_s = Velocity of shear wave

ρ = Density

E = Young's Modulus

μ = Poisson's Ratio

Упругие свойства

$$\frac{1}{v} = \frac{\varphi}{v_f} + \frac{(1 - \varphi)}{v_{ma}}$$

φ – пористость горной породы;

v – скорость упругих волн в горной породе;

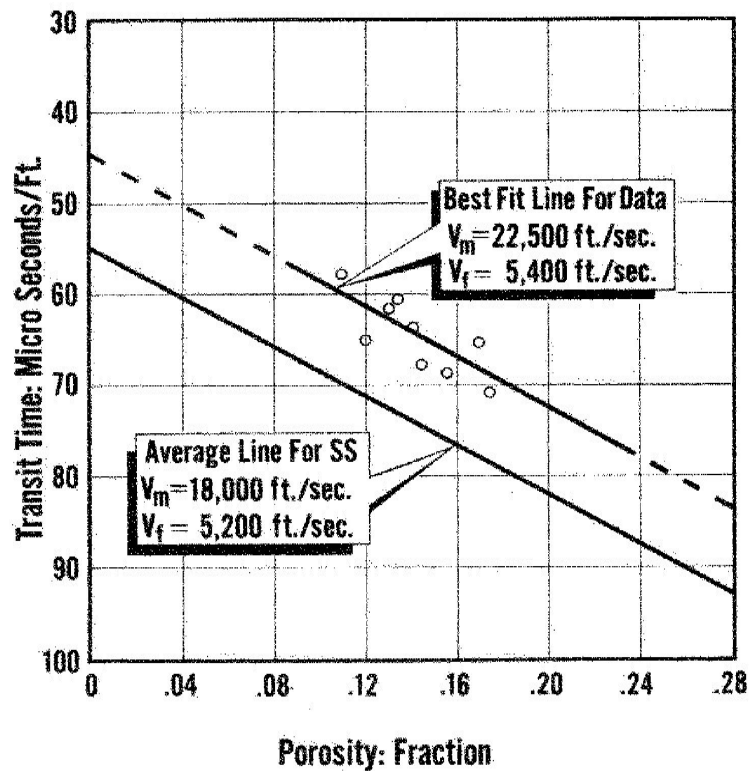
v_f – скорость упругих волн во флюиде;

v_{ma} – скорость упругих волн в скелете горной породы;

$$\Delta t = \Delta t_f \cdot \phi + \Delta t_m (1 - \phi)$$

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m}$$

Упругие свойства



Физические свойства пород

Электрические свойства

Электрические свойства

Electrical Properties

$$r \propto \frac{L}{A},$$

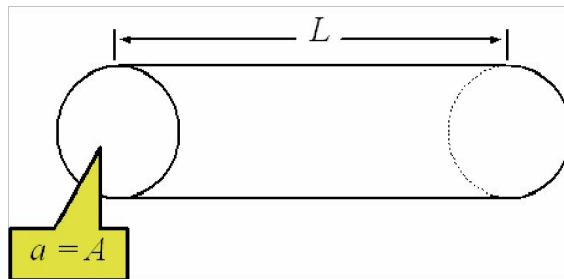
$$r = R \cdot \frac{L}{A},$$

$$R = r \cdot \frac{A}{L}.$$

Where:

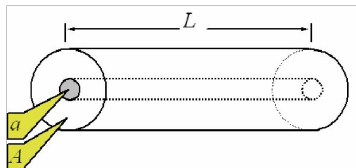
r = Resistance of element of any material of dimension A and L , ohm

R = Resistivity of any element, ohm-length



Электрические свойства

In a capillary tube model the equations are:



$$r_o = R_w \cdot \frac{L}{a},$$

$$R_o = r_o \cdot \frac{A}{L} = \frac{R_w \cdot \frac{L}{a} \cdot A}{L}$$

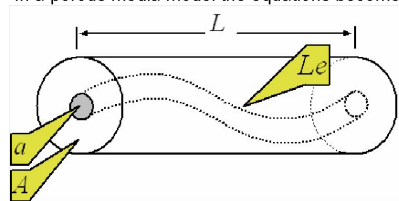
$$= \frac{R_w}{\frac{a}{A}} = \frac{R_w}{\phi}$$

R_w - Resistivity of brine, ohm-length

r_o - Resistance of brine saturated capillary or porous media model, ohm

R_o - Resistivity of brine saturated capillary or porous media model, ohm-length

In a porous media model the equations become:



$$r_o = R_w \cdot \frac{L_e}{a}$$

$$R_o = r_o \cdot \frac{A}{L} = \frac{R_w \cdot \frac{L_e}{a} \cdot A}{L},$$

$$R_o = \frac{R_w \cdot \frac{L_e}{L}}{\frac{a}{A}} \cdot \frac{L_e}{L} = \frac{R_w \left(\frac{L_e}{L}\right)^2}{\phi}$$

Salinity of water; Temperature; Porosity; Pore geometry; Formation stress;
Composition of rock

Электрические свойства

Formation Factor

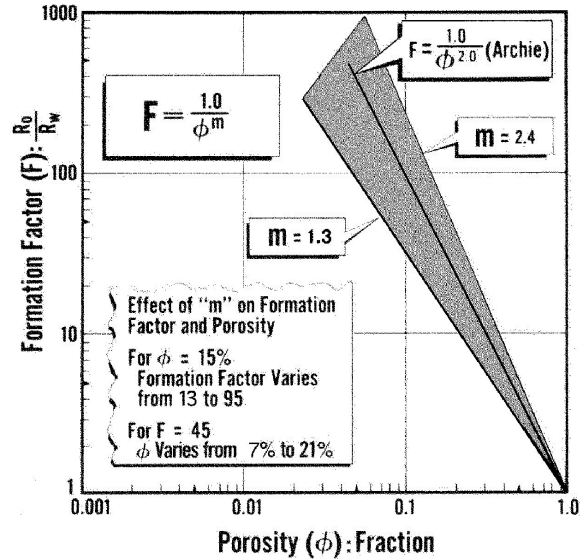
$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{\frac{R_w \left(\frac{Le}{L}\right)^2}{\phi}}{R_w} = \frac{\left(\frac{Le}{L}\right)^2}{\phi}$$

$$F \approx \frac{1}{\phi} = \frac{1}{\phi^2} = \phi^{-2}$$

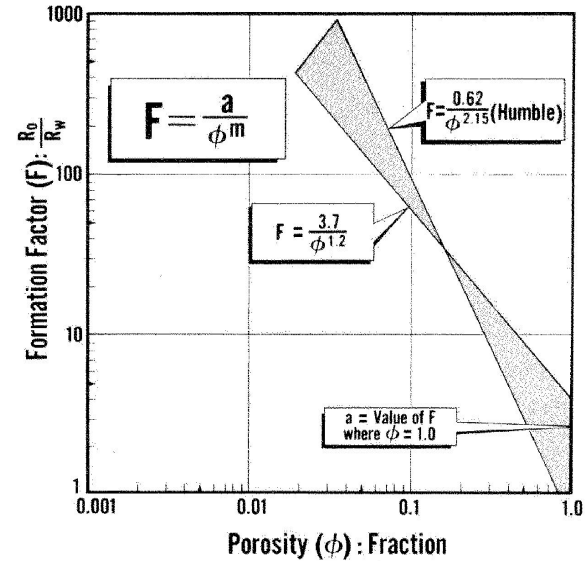
$$F = a\phi^{-m}$$

where 'a' and 'm' are unique properties of the rock.

Электрические свойства



Formation Factor vs. Porosity
Illustrating Variation in slope "m"



Formation Factor vs. Porosity
Illustrating Variation in intercept "a"

Уравнение Арчи

$$Rt = F \cdot Rw \cdot RI,$$

$$F = a\phi^{-m}, \text{ or } \frac{1}{\phi^m},$$

$$RI = \frac{R_t}{R_o} = S_w^{-n}, \text{ or } \frac{1}{S_w^n},$$

$$\text{So, } S_w = \sqrt[n]{\frac{F \cdot Rw}{Rt}}, \text{ and } \sqrt[n]{\frac{Ro}{Rt}},$$

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{a}{\phi^m} \cdot Rw \cdot \frac{1}{Rt}},$$

The General Form of the Archie Equation.

a - is the intercept of the F versus ϕ plot and is related to tortuosity,

m - is the Cementation exponent and is also tortuosity dependent,

n - is the saturation exponent and is saturation history, wettability and pore geometry dependent,

ϕ - is the measured porosity

Физические свойства пород

Свойства пластовых флюидов

Свойства пластовых флюидов

- Пластовая вода
 - **соленость**
 - **плотность**
 - **вязкость**
 - **удельное электрическое сопротивление**
- Углеводороды
 - **состав и молекулярная структура**
 - **плотность**
 - **вязкость**

Оценка сопротивления пластовых вод по химическому составу



Вычисление суммарной концентрации солей различных ионов в пластовых водах в пересчете на NaCl:

1. Имея данные по концентрациям ионов, — вычислить суммарную концентрацию
2. Отложить на номограмме полученную суммарную концентрацию и определить весовые коэффициенты пересчета по каждому виду ионов
3. Вычислить средневзвешенную суммарную концентрацию с учетом весовых коэффициентов
4. Полученный результат — соленость пластовой воды в пересчете на NaCl

Оценка сопротивления пластовых вод по химическому составу

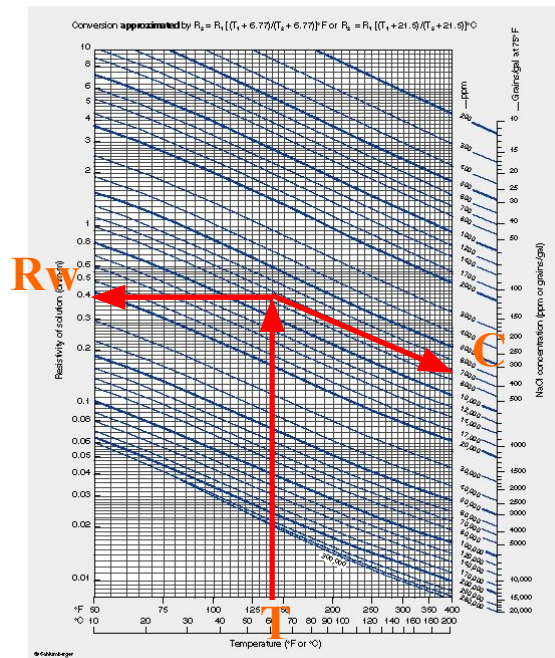
Resistivity of NaCl Solutions

Resistivity of NaCl Solutions

Schmiedeknecht

Gea-9

Gea



1-5

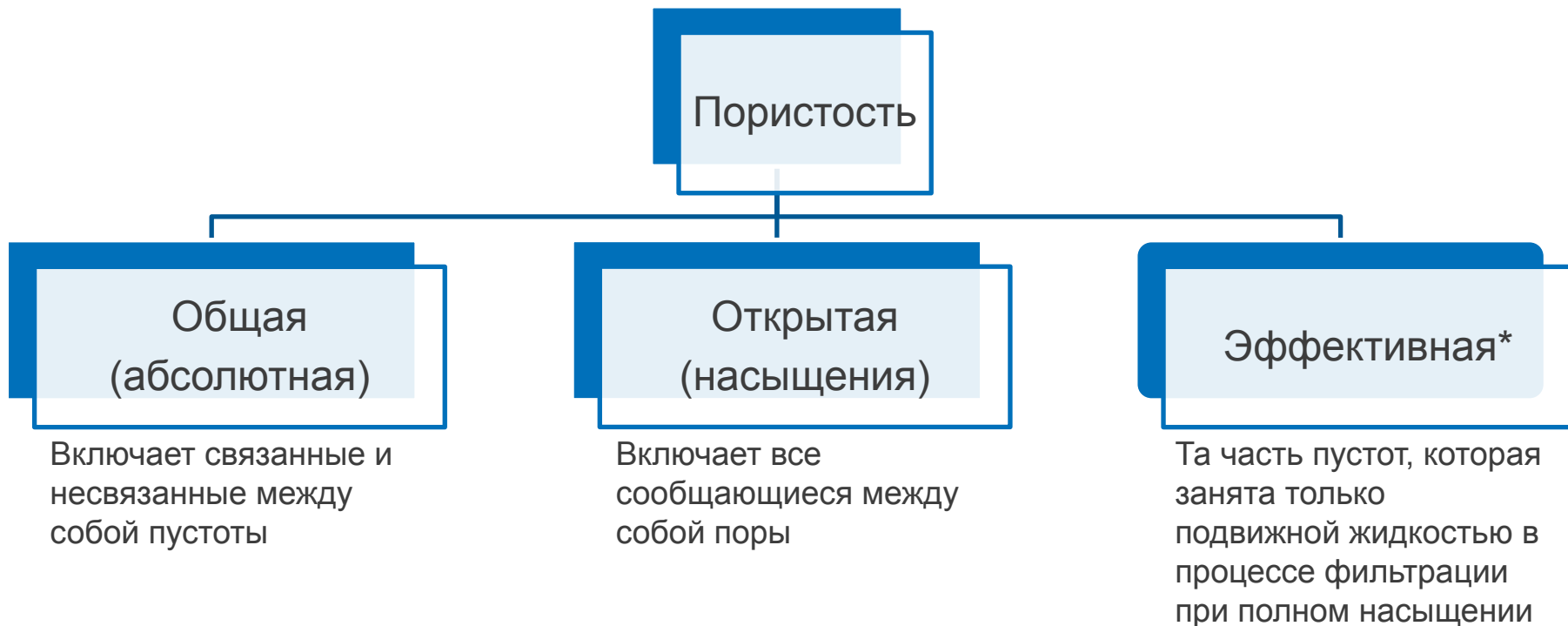
Оценка сопротивления пластовых вод по химическому составу:

Зная температуру T , при которой определен химический состав вод и общую концентрацию солей C , по номограмме определяем сопротивление пластовых вод R_w

Лабораторные исследования керна

Определение пористости горных пород

Пористость горных пород



*согласно учебному пособию МГУ им. М.В. Ломоносова «Петрофизические методы исследования кернового материала» Книга 2

Методы определения пористости горных пород

Взвешивание
насыщенного
жидкостью
образца

(метод И.А.
Преображенского)

Сушка

- Мойка образцов;
- Сушка:
 - $t=103-105^{\circ}\text{C}$
 - глинистые $t=70^{\circ}\text{C}$
- Эксикатор с поглотителем влаги (CaCl_2);
- Стабилизация массы.

Насыщение

- Определение размеров;
- Насыщение под вакуумом рабочей жидкостью (модель пластовой воды, керосин);
- $t_{\text{нас}} \approx 30$ мин. до удаления пузырьков газа.

Взвешивание

- Взвешивание насыщенного образца в жидкости;
- Взвешивание насыщенного образца в воздухе;

Методы определения пористости горных пород



Методы определения пористости горных пород

Использование
порозиметра

Сушка

- Мойка образцов;
- Сушка:
 - $t=103-105^{\circ}\text{C}$
 - глинистые $t=70^{\circ}\text{C}$
- Эксикатор с поглотителем влаги (CaCl_2);
- Стабилизация массы.

Насыщение

- Вакуумирование;
- Насыщение под вакуумом рабочей жидкостью (модель пластовой воды, керосин);
- $t_{\text{нас}} \approx 30$ мин. до удаления пузырьков газа.

Измерение

- Помещение насыщенного образца в порозиметр;
- Снятие значений значений;



Методы определения пористости горных пород



Взвешивание насыщенного жидкостью образца

- Определяется открытая пористость



Метод парафинирования образца

- Определяется общая пористость



Порозиметры

- Бывают жидкие и газовые. Определяется общая и открытая пористость



Пикнометр

- Определяется общая пористость

Определение водо- и нефтенасыщенности образцов горных пород

Общие сведения

- **Коэффициент водо- и нефтенасыщенности породы** - отношение объема содержащейся в ней воды/нефти к суммарному объему пор той же породы
- **Определение водо- и нефтенасыщенности породы с использованием аппарата Закса**

Определение водо- и нефтенасыщенности с помощью аппарата Закса

Экстрагирование образца керна

- Мойка образцов;
- Сушка:
 - $t=103-105^{\circ}\text{C}$
 - глинистые $t=70^{\circ}\text{C}$
- Эксикатор с поглотителем влаги (CaCl_2);
- Стабилизация массы.

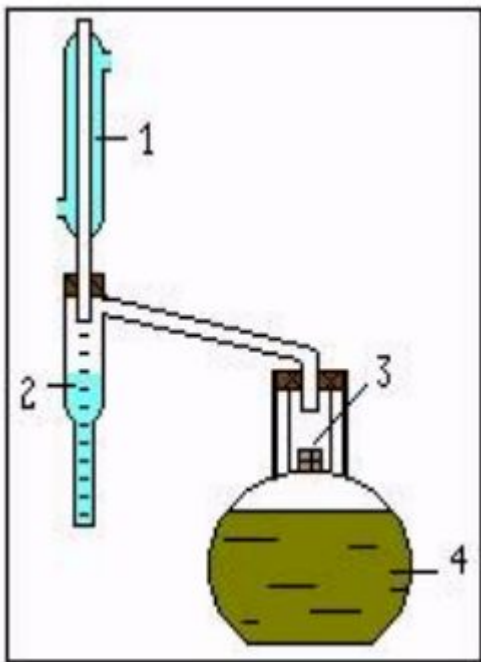
Насыщение

- Определение размеров;
- Насыщение под вакуумом рабочей жидкостью (модель пластовой воды, нефть);
- $t_{\text{нас}} \approx 30$ мин. до удаления пузырьков газа.

Измерение

- Нагревание колбы;
- Измерение количества выделившегося флюида;
- Дополнительная экстракция хлороформом.

Аппарат Закса



1 – холодильник, 2 –ловушка, 3 – цилиндр (фильтр), 4 - колба

Объем нефти в образце:

$$V_H = (m_1 - m_2 - V_B \rho_B) / \rho_H$$

Коэффициент нефтенасыщенности:

$$K_H = V_H \rho_O / K_{\Pi} m_2$$

Коэффициент водонасыщенности:

$$K_B = V_B \rho_B / K_{\Pi} m_2$$

V_H - объем нефти в образце, см³;

K_H - коэффициент нефтенасыщенности, д.е.;

K_B - коэффициент водонасыщенности, д.е.;

V_B - объем воды, выделившейся из образца, см³;

m_1 - масса образца, насыщенного нефтью, водой, г.;

m_2 - масса экстрагированного и высушенного образца, г.;

ρ_H - плотность нефти, г/см³.;

ρ_B - плотность воды, г/см³.;

ρ_O - объемная плотность породы, г/см³.;

K_{Π} - открытая пористость л е

Определение проницаемости горных пород

Общие сведения

Проницаемость – свойство пород пропускать жидкости, газы и их смеси при наличии градиента давления;

Проницаемость – параметр, характеризующий способность пород пласта пропускать флюид;

Проницаемость горных пород



* выделяется в самостоятельную, согласно учебному пособию МГУ им. М.В. Ломоносова «Петрофизические методы исследования керна» Книга 2

Оценка проницаемости

- **Типы пористости:**

- **Общая пористость (Bulk porosity)**
 - Общий объем всех пор в породе
- **Эффективная пористость (Effective porosity)**
 - Объем сообщающихся пор

$$K_{п\text{общ}} = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{обр}}} \times 100\%$$

$$K_{п\text{эф}} = \frac{V_{\text{сбщ.пор}}}{V_{\text{обр}}} \times 100\%$$

$$k = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{(P_1 - P_2) \cdot F}$$

Q - объемный расход жидкости в единицу времени;

μ - динамическая вязкость флюида;

F - площадь фильтрации;

P_1 - давление на входе;

P_2 - давление на выходе;

L - длина пористой среды.

Единица измерения Дарси [Д] или [м²]
 $1\text{Д} \approx 1 \text{ мкм}^2$

Проницаемость пород нефтяных и газовых пластов измеряется от нескольких мД до 2-3Д и редко бывает выше

* согласно учебному пособию МГУ им. М.В. Ломоносова «Петрофизические методы исследования керна» Книга 2

Метод стационарной фильтрации

Измерение
абсолютной
газопроницаемости

Сушка

- Мойка образцов;
- Сушка:
 - $t=103-105^{\circ}\text{C}$
 - глинистые $t=70^{\circ}\text{C}$

Предварительные
приготовления

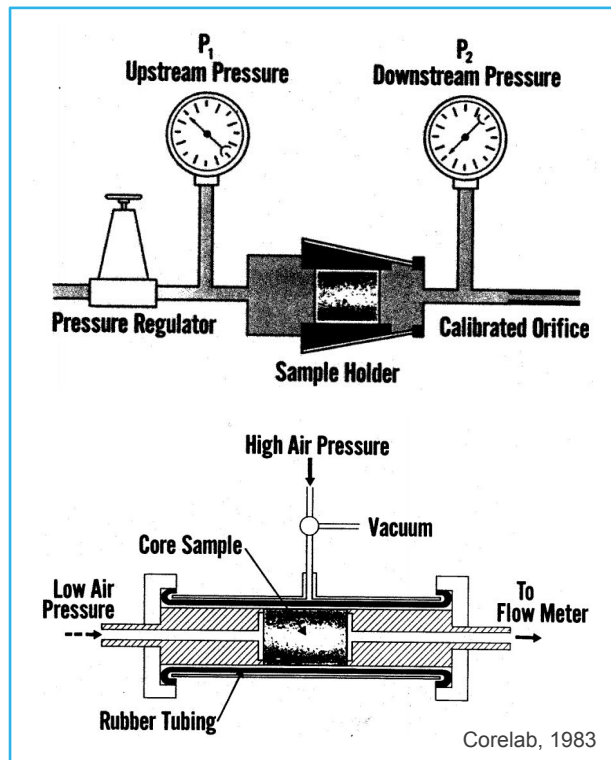
- Определение размеров с точностью до 0,1мм;
- Помещение в манжету;
- Создание давления в манжете
 - Больше давление проскальзывания

Измерение

- Оптимальное время измерения около 30-90 секунд;
- Может отличаться для высоко- и низкопроницаемых пород.

Типовые схемы установок для определения газопроницаемости

Установки типа Хасслера

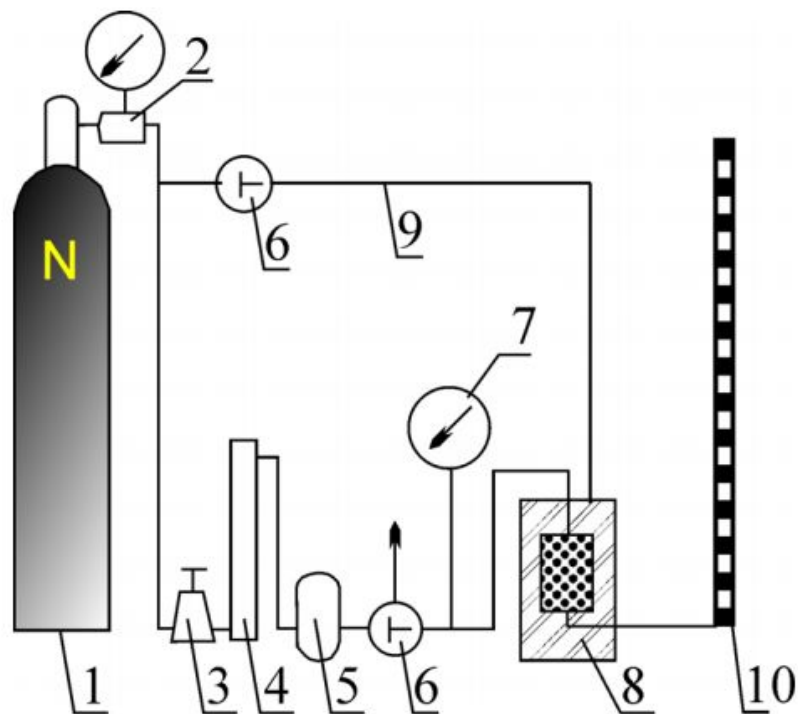


Пермеаметр



- + Позволяет оценить профиль $K_{пр}$ по всей длине скважинного керна;
- + Высокая скорость измерений;
- Низкая точность в низкопроницаемых коллекторах;
- Чувствителен к локальным неоднородностям в керне (включения, трещины каверны)

Типовые схемы установок для определения газопроницаемости



1. источник давления;
2. редуктор высокого давления;
3. редуктор низкого давления;
4. осушитель газа;
5. фильтр;
6. трехходовой кран;
7. манометр;
8. кернадержатель;
9. линия создания обжима;
10. градуированная трубка измерения расхода газа.

* МГУ им. М.В. Ломоносова «Петрофизические методы исследования керна горных пород» Книга 2