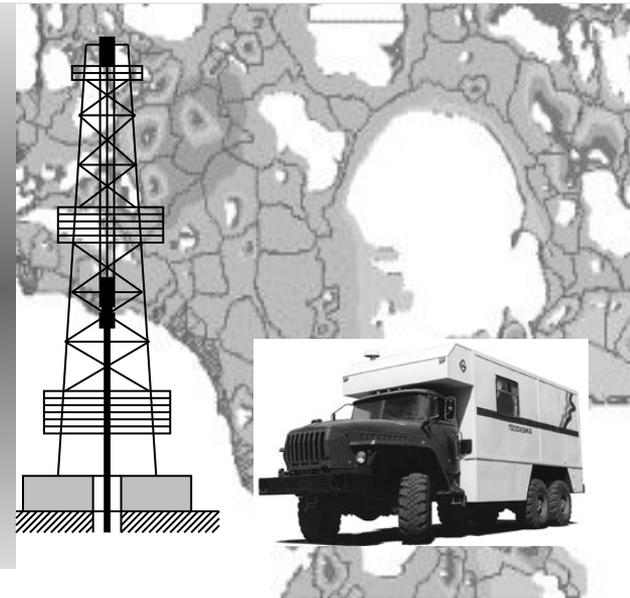


**Н.Г.**

## Модуль 2

*Номоконова Г.Г.*



## 2. Петрофизические модели коллекторов

- 2.1. Модели электропроводности
- 2.2. Модели электрической поляризации
- 2.3. Модель естественной радиоактивности
- 2.4. Модели нейтронной пористости
- 2.5. Акустическая пористость

## 2 модуль

Лекции _____	16 часов
Лабораторных _____	16 часов
Курсовая работа _____	48 часов
ИТОГО _____	80 часов

**Экзамен  
Диф. зачет**

- 2.1. Модели электропроводности
- 2.2. Модели электрической поляризации
- 2.3. Модель естественной радиоактивности
- 2.4. Модели нейтронной пористости
- 2.5. Акустическая пористость

**Лекции**

**Лабораторные**

1. УЭС пластовых вод
2. Модель электропроводности коллекторов
3. Модели коллекторов месторождений Западной Сибири
4. Качественный анализ петрофизических данных
5. Итоговая работ: Петрофизические модели коллекторов пласта Ю1 месторождений УВ Томской области

**Модель** – вещественный или идеальный (абстрактный) образ объекта (процесса, явления), адекватный ему в отношении каких-либо признаков  
(Энциклопедия)

**Избирательное подобие**

**Отражение наиболее существенных сторон**

**Соответствие цели исследования**

**Модель** – совокупность имеющихся об объекте сведений, способствующих решению поставленной геологической задачи и оптимальным образом для этого упорядоченных.  
(Боровко, 1979)

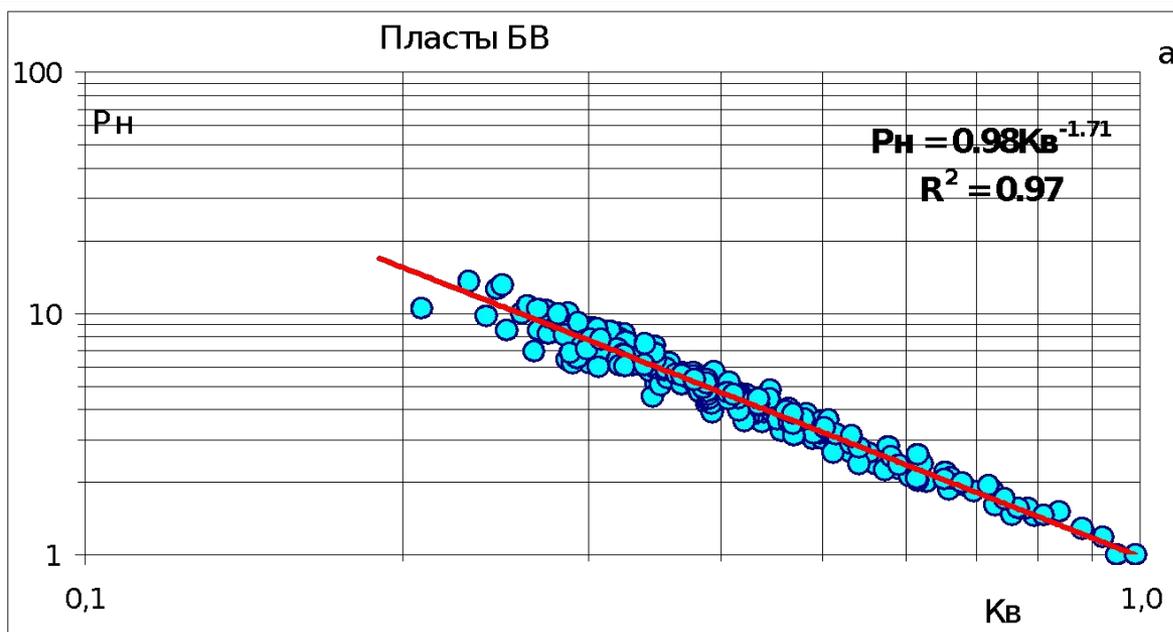
Модель – изображение в **удобной форме** многочисленной информации об объекте исследования.

(Шилов, Джафаров, 2001)

**Многообразие моделей** ↔ **Многообразие целей**

# Петрофизическая модель коллектора:

Теоретически или экспериментально установленная аналитическая зависимость между петрофизическими свойствами коллектора (определяемыми по данным ГИС), с одной стороны, и его литологическими, фильтрационно-емкостными свойствами и характером насыщения, с другой.



**Петрофизические модели**  
глинистости коллектора  
пласта Ю1 **Крапивинского**  
**месторождения**

$$K_{гг} = 1.055 - (1.14 - 1.111 \Delta J_y) 0.5;$$

$$K_{гг} = 0.4346 - 0.3846 a_{пс}$$

$\Delta J_y$  - разностный параметр  
радиоактивности  
 $a_{пс}$  - относительная  
амплитуда ПС

**Петроэлектрическая модель** водонасыщенности  
(нефтенасыщенности) коллектора **Южно-Покамасовского**  
**месторождения** (Западная Сибирь)

HF

## 2.1. Модели электропроводности

9

# Вспомним!

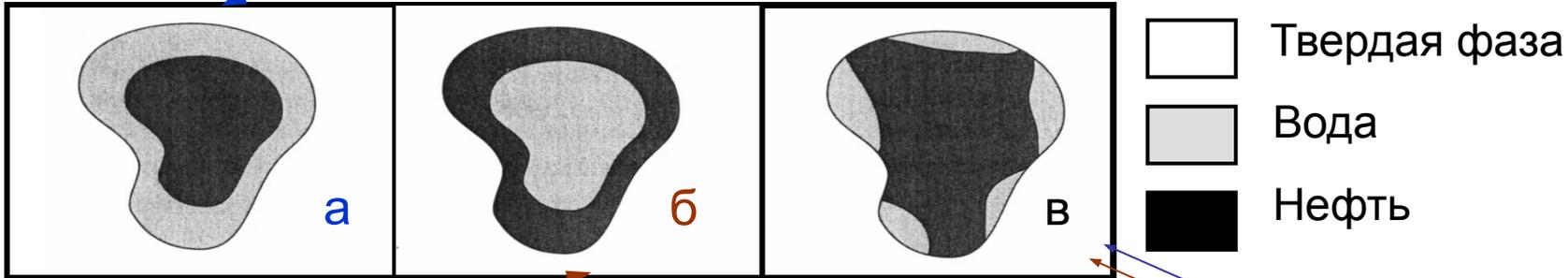
## Классификация минералов по электропроводности

Петрофиз. группа	Проводники	Полупроводники	Диэлектрики
$\rho$ , Омм	$<10^{-6}$	$10^{-6}-10^8$	$>10^8$
Носители тока	Электроны	Электроны (дырки)	Ионы
Зависимость от температуры	прямая	обратная	обратная
Группы минералов	Самородные металлы  <b>вода</b>	Сульфиды и оксиды металлов, графит, антрацит	Остальные минералы  <b>Нефть и газ</b>

НГ

$\Theta < 90^\circ$  - смачивание

**а - гидрофильная поверхность** (карбонаты, силикаты, сульфаты, кварц)



$\Theta > 90$  - несмачивание

**б- гидрофобная поверхность** (битумы, угли, графит, сульфиды, металлы)

в – избирательно-смоченная поверхность

# Вспомним!

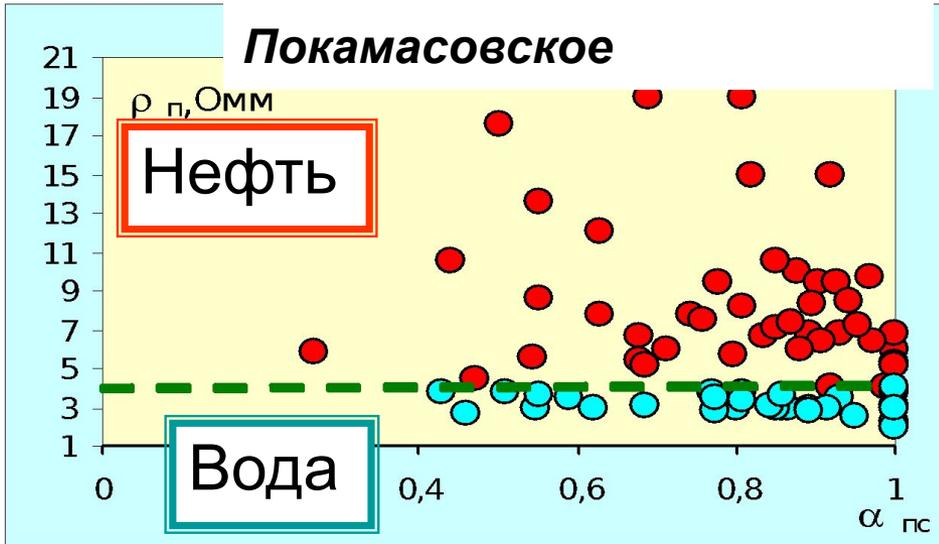
$\theta$  - краевой угол смачивания

**Смачивание** ► поверхностное явление, возникающее при соприкосновении твердого тела с двумя несмешивающимися флюидами и заключающееся в растекании одного из них по твердой поверхности

**(wettability)**

Пласт Ю1, Южно-

Покамасовское



Вспомним!

Коллекторы большинства месторождений Западной Сибири – гидрофильные

Флюид	$\rho, \text{Омм}$
Вода	$10^{-2}-10^5$
Лед	$7 \cdot 10^5$
Нефть	$10^9-10^{14}$
Газ	$>10^{14}$

		гидрофобные пласты	гидрофильные пласты
Небит-Даг	Нефть	2-20	0,2-5
Газли	Газ	50-60	5-6
Александровское	Газ	20-25	3-6
Охинское	Нефть	15-80	2-4
Пунгинское	Газ	1000	10
Жирное	Нефть	12-500	1,5
Самаролукский	Нефть	12-1000	0,5-2
Саратовский	Нефть	200	1-3

## **Исходные положения моделей:**

*а. Коллектор – двухкомпонентная среда:*

- 1.- непроводящий компонент (твердая фаза + углеводороды)*
- 2. – проводящий компонент (вода)*

*б. На электропроводность влияет только **открытая** пористость.*

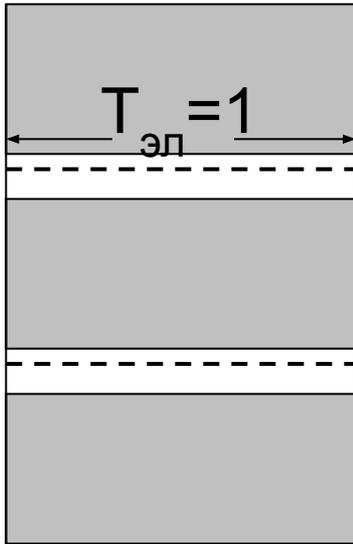
НГ

а

# Полностью водонасыщенная порода

## А. Чистые (неглинистые) коллекторы

Идеальный коллектор



$$\rho_{вп} = \frac{1}{Kn} \cdot \rho_v$$

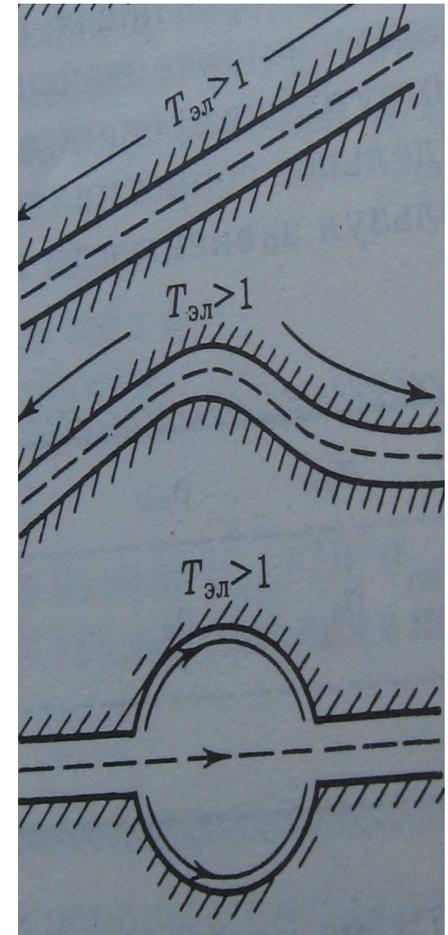
$$\rho_{вп} = \frac{T_{эл}^2}{Kn} \cdot \rho_v$$

$\rho_{вп}$  - удельное сопротивление водонасыщенной породы

$\rho_v$  - удельное сопротивление пластовой воды

$T_{эл} \geq 1$  - электрическая извилистость поровых каналов - показатель сложности геометрии поровых каналов

Реальный коллектор



**Теоретическая модель чистого водонасыщенного коллектора**

$$P_n = \frac{\rho_{вп}}{\rho_v} = \frac{T \Delta l^2}{K_n}$$

$P_n$  – параметр пористости (относительное сопротивление)

**Статистическая модель**

$$P_n = a \cdot K_n^{-m}$$

где  $a$  и  $m$  – экспериментально установленные коэффициенты

**$m$  - показатель цементации породы.** Чем сложнее геометрия поровых каналов, тем больше  $m$  отличается от единицы ( $m \geq 1$ )

Для неглинистых коллекторов - обобщенные значения параметра  $m$ :

-хорошо отсортированные пески и слабо сцементированные песчаники:  $m=(1.3-1.4)$ ;

-хорошо сцементированные терригенные и карбонатные коллекторы с пористостью:

межгранулярной ( $m=1.8-2.0$ );

трещинной ( $m<1.8-2.0$ ) и

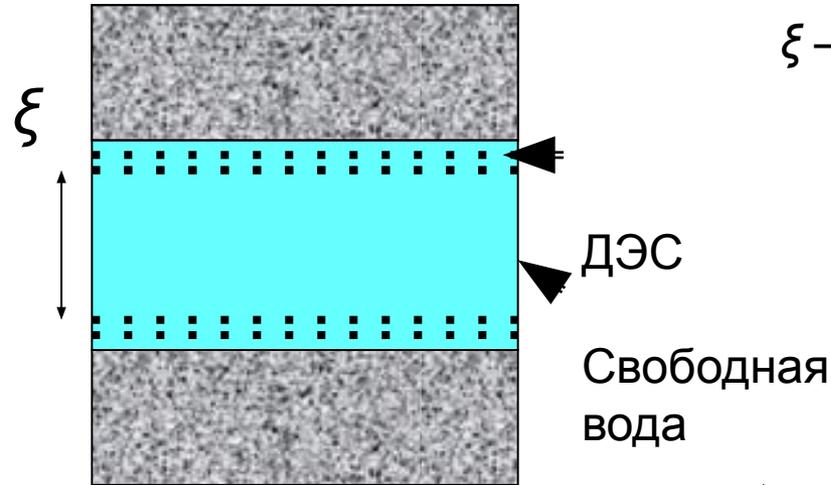
каверновой ( $m>2$ ).

**Ориентировочные значения**

## Б. Глинистые коллекторы

(на электропроводность влияет двойной электрический слой - ДЭС)

Модель порового канала



$\xi$  – доля порового канала, занятая свободной водой

$$\frac{1}{\rho_{кан}} = \frac{\xi}{\rho_v} + \frac{1-\xi}{\rho_{ДЭС}}$$

Электропроводность порового канала

$$\Pi = \frac{1}{\rho_v} / \left( \frac{\xi}{\rho_v} + \frac{1-\xi}{\rho_{ДЭС}} \right)$$

Коэффициент поверхностной проводимости

$$Pn^* = \frac{\rho_{вп}}{\rho_{кан}} \quad \text{- Параметр пористости}$$

$$Pn = \frac{\rho_{вп}}{\rho_v} = \Pi \cdot Pn^*$$

кажущийся параметр пористости

Обычно  $\rho_{\text{дэс}} < \rho_{\text{в}}$  ( $\Pi < 1$ ) и глинистые коллекторы более проводящие (при прочих равных условиях), чем безглинистые.

Частные случаи:

$r \gg \delta_{\text{дэс}}$   $\Pi = 1$  (песок)

1. Коэффициенты в уравнении  $R_{\text{п}} = f(K_{\text{п}})$  зависят как от **структуры порового пространства**, так и от **глинистости**
2. Разрезы, по которым **составлялось** петрофизическое уравнение, и разрезы, в которых оно **используется**, должны быть **аналогичны**.

Томская область  
Пласт Ю1

$$R_{\text{п}} = 1.493 \cdot K_{\text{п}}^{-1.602}$$

$$\text{БВ} - R_{\text{п}} = 1.1914 \cdot K_{\text{п}}^{-1.79},$$

Южно-Покамасовское

$$\text{Ач} - R_{\text{п}} = 2.8613 \cdot K_{\text{п}}^{-1.31},$$

$$\text{Ю1} - R_{\text{п}} = 2.3614 \cdot K_{\text{п}}^{-1.24},$$



# Частично водонасыщенный коллектор

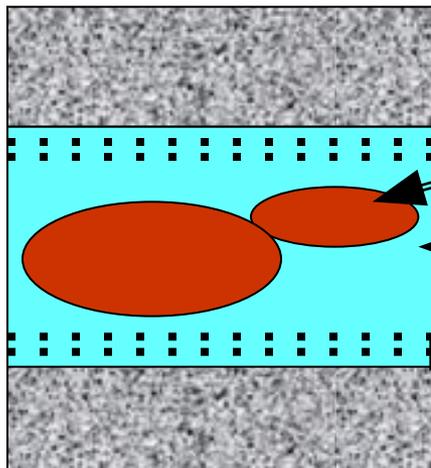
*Т.е. газонасыщенный или нефтенасыщенный*

$$R_H = \frac{\rho_{НП}}{\rho_{ВП}}$$

$R_H$  – **параметр насыщения** (коэффициент увеличения сопротивления)

$\rho_{НП}$  – удельное сопротивление нефтегазонасыщенной (частично водонасыщенной) породы

$\rho_{ВП}$  – удельное сопротивление той же породы, но при полном водонасыщении



Нефть  
Свободная вода  
ДЭС  
Модель идеального коллектора ▶

$$R_H = \frac{1}{K_B}$$

# Реальный коллектор

Теоретическая модель

$$P_H = \frac{\rho_{НП}}{\rho_{ВП}} = \frac{T_{ЭЛ}^2}{K_B}$$

Статистическая модель

$$P_H = a \cdot K_B^{-n}$$

Для пласта Ю1 месторождений  
Томской области:

$$K_B = 1.005 \cdot P_H^{-0.625}$$

$n$  - Показатель насыщенности

а) Межгранулярные коллекторы:

=1.3-1.6 (и ниже) глинистые

= 1.8-2.0 слабоглинистые  
терригенные и карбонатные

б) Коллекторы каверновые и трещинные :

=1.0-1.3 каверновые

>2 трещинные

в) Гидрофобные

>2

$$K_B = \left( \frac{a^* \cdot \rho_B}{K_n^m \cdot \rho_{НП}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Уравнение Арчи-Дахнова

Ориентировочные значения

## Порядок оценки нефтенасыщенности коллектора

1 . Необходимо знать:

Зависимости  $P_p=f(K_p)$ ,  $P_n=f(K_v)$

Сопротивление пластовой воды ( $\rho_v$ )

Коэффициент пористости ( $K_p$ )

2 . Измерить:

Удельное сопротивление пласта ( $\rho_{np}$ )  
в скважине одним из методов ГИС

3. Рассчитать:

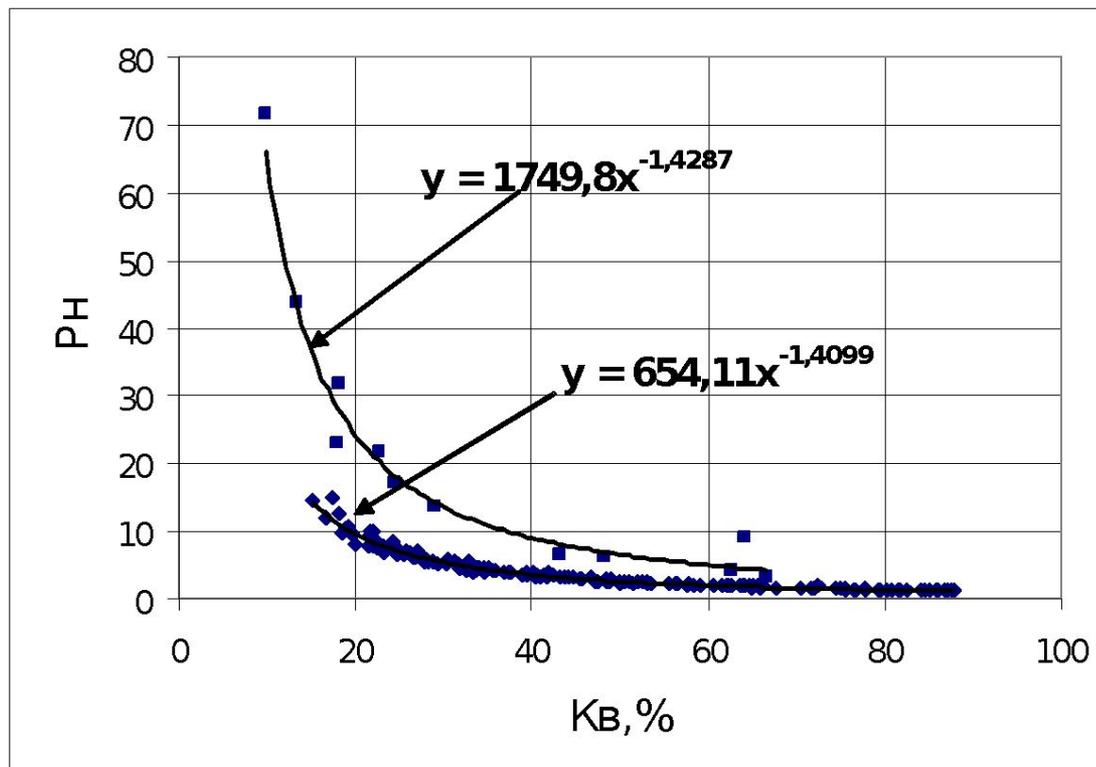
1.  $\rho_{vp}$  по зависимости  $P_p = \rho_{vp} / \rho_v = f(K_p)$ ,

2.  $P_n = \rho_{np} / \rho_{vp}$

4. Определить:

$K_v$  по зависимости  $P_n = f(K_v)$  и  
 $K_n = 1 - K_v$

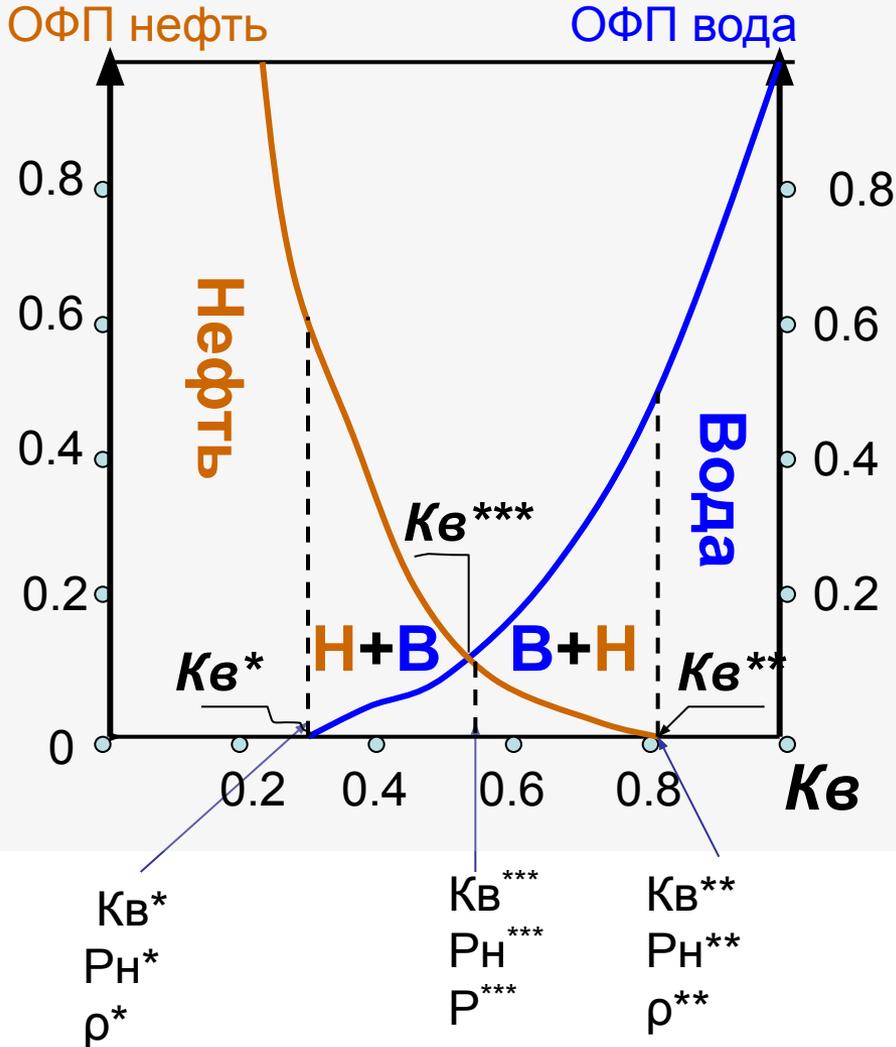
## Модель электрического параметра насыщения пласта Ю1 Покамасовского месторождения



# Определение граничных значений параметров коллектора по: Относительным фазовым проницаемостям

+

## Моделям параметра насыщения



$K_v > K_v^* (\rho < \rho^*)$

- область фильтрации воды

$K_v < K_v^{**} (\rho > \rho^{**})$

- область фильтрации нефти

$K_v < K_v^* (\rho > \rho^*)$  - выход нефти

$K_v^* - K_v^{**} (\rho^{**} - \rho^*)$  - выход нефть + вода

$K_v > K_v^{**} (\rho < \rho^{**})$  - выход вода

# Электрическая модель нефтяной залежи

ЗОНА (ВЫХОД)

ЗОНА ПРЕДЕЛЬНОГО НЕФТЕНАСЫЩЕНИЯ (остаточной водонасыщенности)

(НЕФТЬ)

Где ВНК?

(НЕФТЬ+ВОДА)

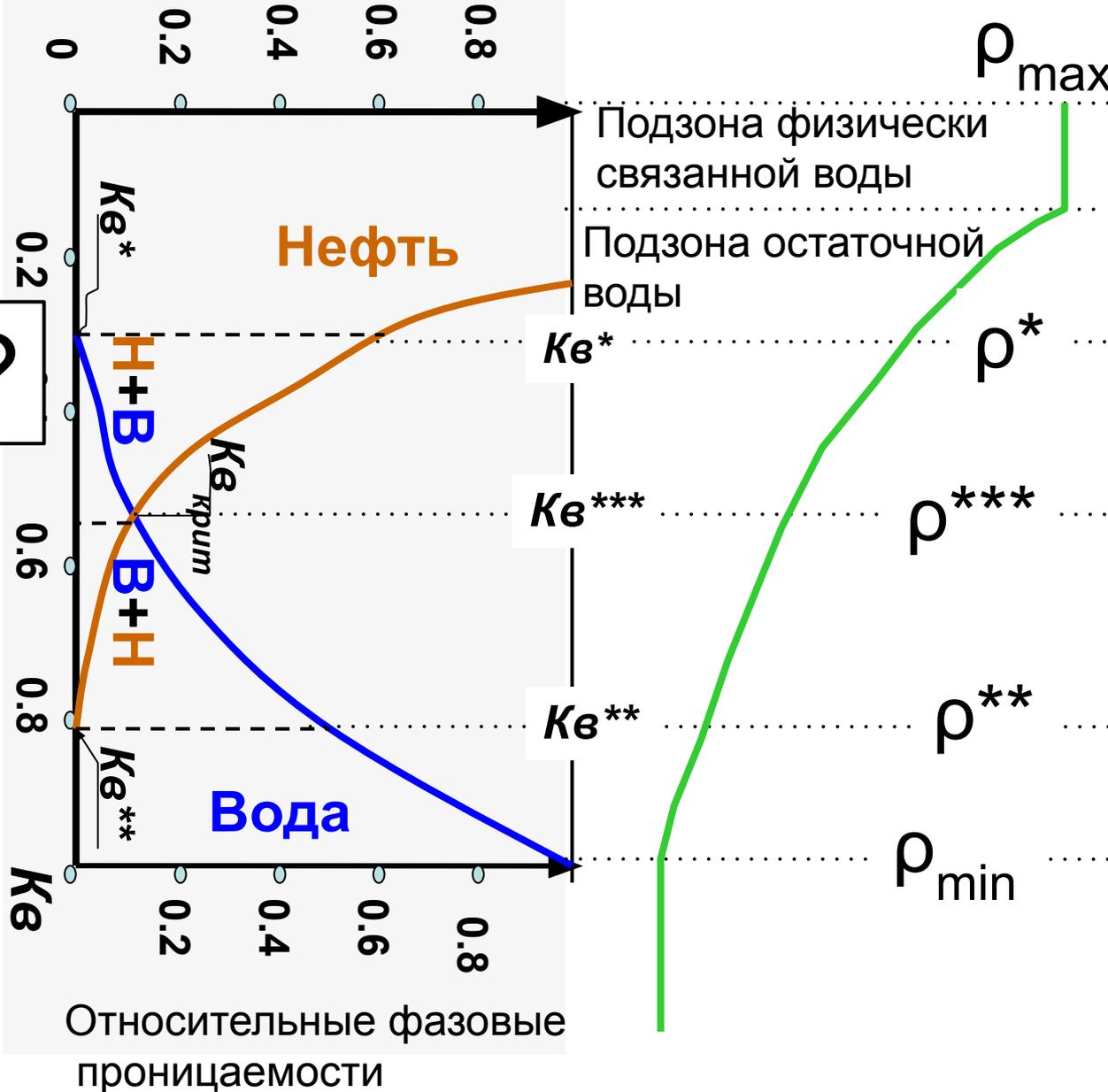
(ВОДА+НЕФТЬ)

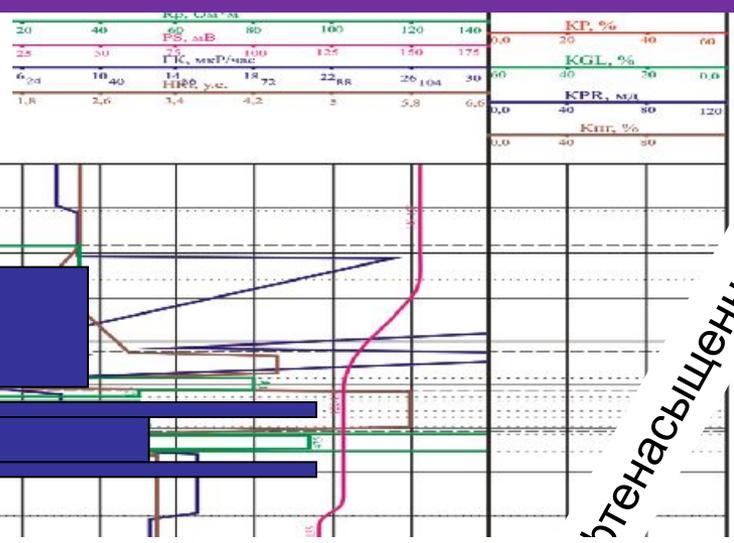
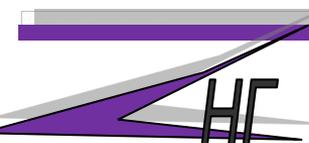
(зона остаточной нефтенасыщенности)

(ВОДА)

ВОДОНАСЫЩЕННАЯ ЗОНА

(ВОДА)





Петрофизическая модель продуктивной части Средненюрольского месторождения нефти



нефтенасыщенность

## Основная задача ГИС методом сопротивления - оценка нефтенасыщенности коллекторов



**Высокочастотные образования:**  
 Угли, карбонатные породы, аргиллиты баженовской свиты, нефтеносные песчаники.

**Низкокомные образования:**  
 Глины, водоносные песчаники

Удельное электрическое сопротивление

Рис. 12. Физико-геологическая модель продуктивной части Средненюрольского нефтяного месторождения.



**Студентам групп 2А090 и 2А290!**

**Срочно, до 13.00 1 февраля,  
согласовать темы ВКР с руководителями.**

**Опоздавшие будут допускаться к  
защите ВКР**

**в отдельном порядке.**



A photograph of a laboratory setup for electrical polarization measurements. In the center, a sample is held between two electrodes within a metal frame. To the left, a stainless steel cylindrical container sits on a power supply unit. To the right, a computer monitor displays a software interface with a graph showing two overlapping curves (one red, one blue) on a grid. The background features a control panel with several knobs and a large sheet of paper with technical diagrams or data. A desk lamp is visible in the upper right corner.

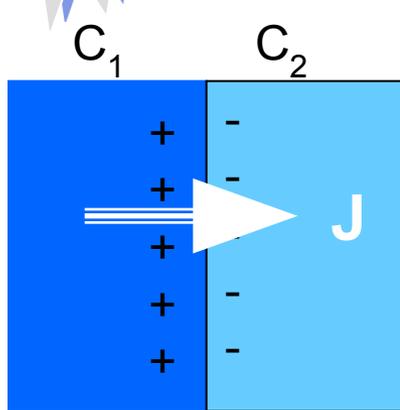
## 2.2. Модели электрической поляризации

# Диффузионная и диффузионно-адсорбционная поляризации

(связана с процессами в двойном электрическом слое)

## а Диффузионная поляризация

- возникает на контакте двух растворов с разной концентрацией (C)



J – диффузионный поток

$$E_{\partial} = \frac{R \cdot T}{m \cdot F} \cdot (n_{+} - n_{-}) \cdot \ln \frac{C_1}{C_2} \quad \text{Уравнение Нерста}$$

$E_{\partial}$  – диффузионный потенциал:  $R$  – газовая постоянная;  $F$  – число Фарадея;  $E$  – абсолютная температура;  $n_{+}$ ,  $n_{-}$  – числа переноса;  $m$  – заряд электролита; Числа переноса – доли электричества, переносимого ионами.  $n_{+} + n_{-} = 1$ .

Для **одновалентного электролита** и  $t=20^{\circ}\text{C}$

$K_{\partial}$  – коэффициент диффузионной ЭДС

$$E_{\partial} = 58(n_{+} - n_{-}) \cdot \lg \frac{C_1}{C_2} = K_{\partial} \cdot \lg \frac{C_1}{C_2}$$

Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> - Преобладающие ионы в пластовой воде и промывочной жидкости

$$n^-(\text{Cl}^-) = 0,6 \quad n^+$$

(Na<sup>+</sup>) = 0,4  
для раствора NaCl и t=20°C

$$E_{\delta} = -11,6 \cdot \text{Lg} \frac{C_1}{C_2}$$

1. Более разбавленный раствор заряжается отрицательно.
2.  $E_{\delta}$  – в чистом виде проявляется в идеально-пористых средах

Условие возникновения  $E_{\delta}$ :

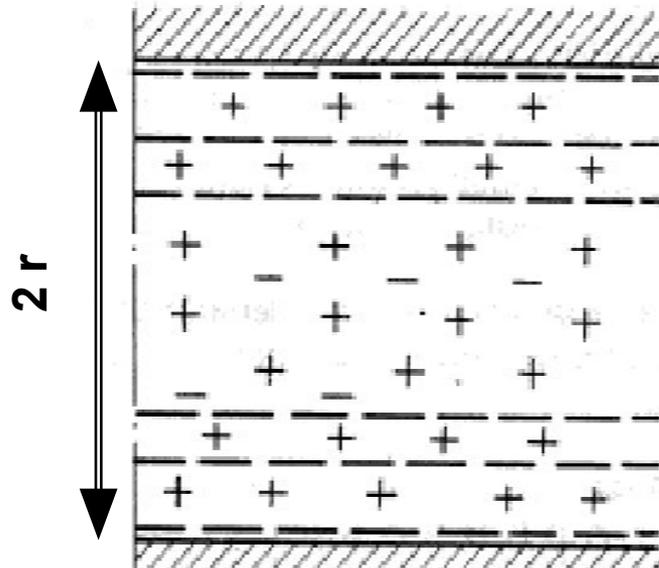
?

## 6 Диффузионно-адсорбционная поляризация

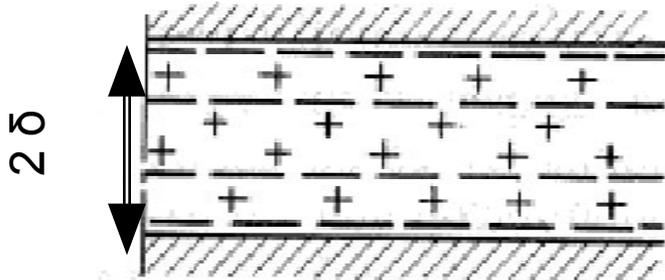
$r$  – радиус порового канала

$\delta$  – толщина двойного электрического слоя (ДЭС)

А. Строение капилляра

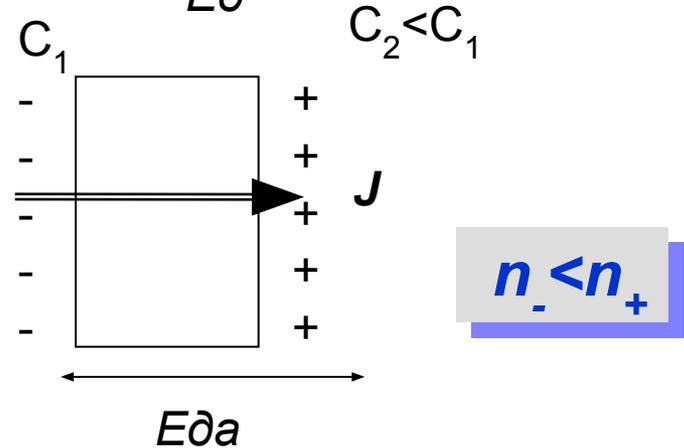
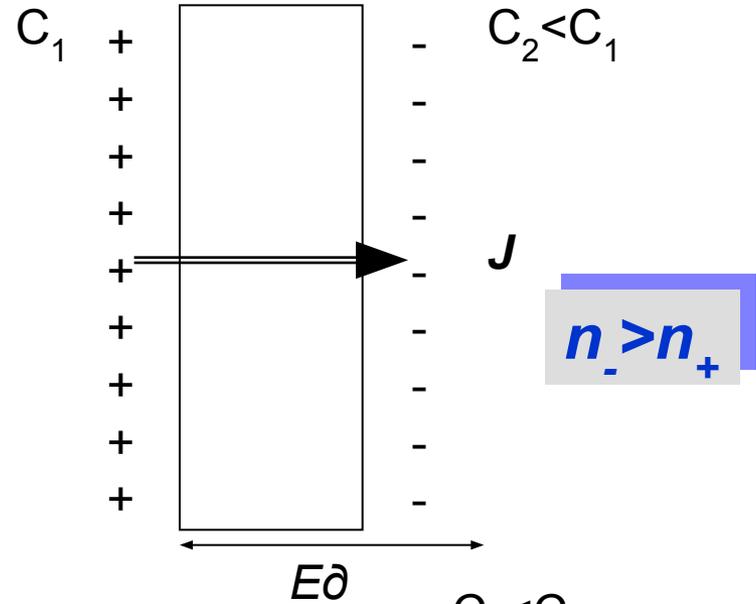


Широкий капилляр ( $r \gg \delta$ )



Узкий капилляр ( $r \sim \delta$ )

Б. Диффузия через породу с такими капиллярами



НГ

В породах с узкими капиллярами основная часть порового пространства занята ионами одного знака (катионами), поэтому их относительная подвижность при диффузии (числа переноса) возрастает.

$$E_{\text{да}} = 58 \cdot (n_+ - n_-) \cdot Lg \frac{C_1}{C_2} = K_{\text{да}} \cdot Lg \frac{C_1}{C_2}$$

$K_{\text{да}}$  – коэффициент диффузионно-адсорбционной ЭДС

$K_{\text{да}}$

-11.6 мВ ----- +58. мВ

Песчаники

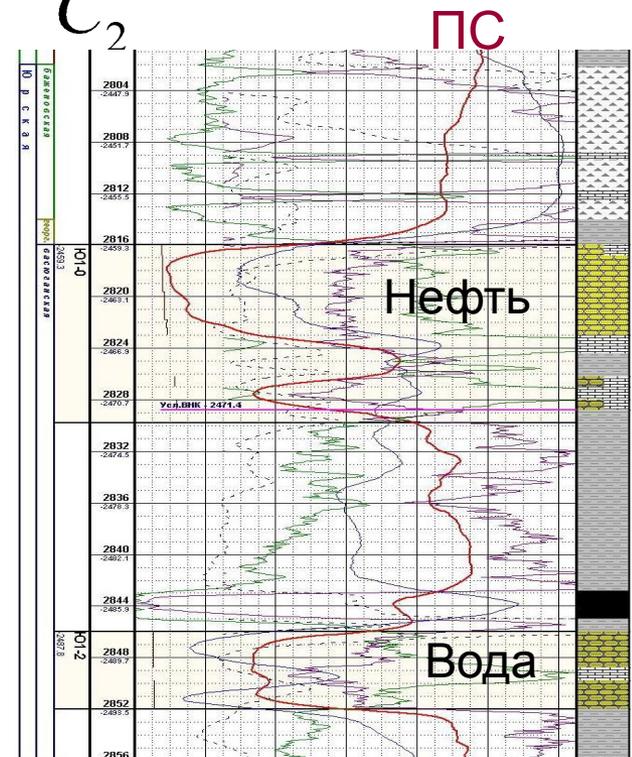
Глины



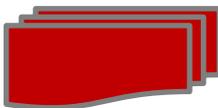
Песчанистость



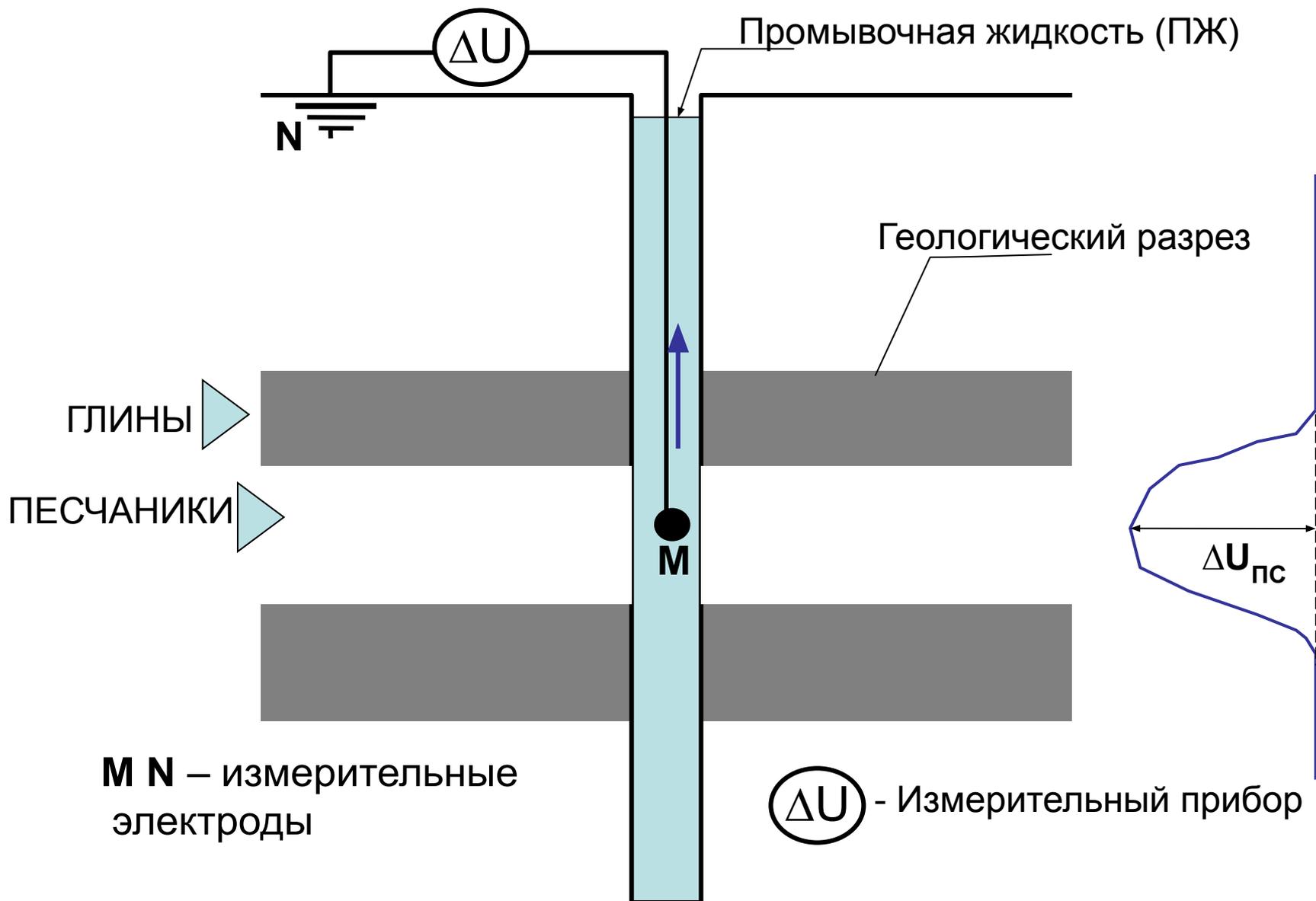
глинистость



ПС - метод самопроизвольной поляризации



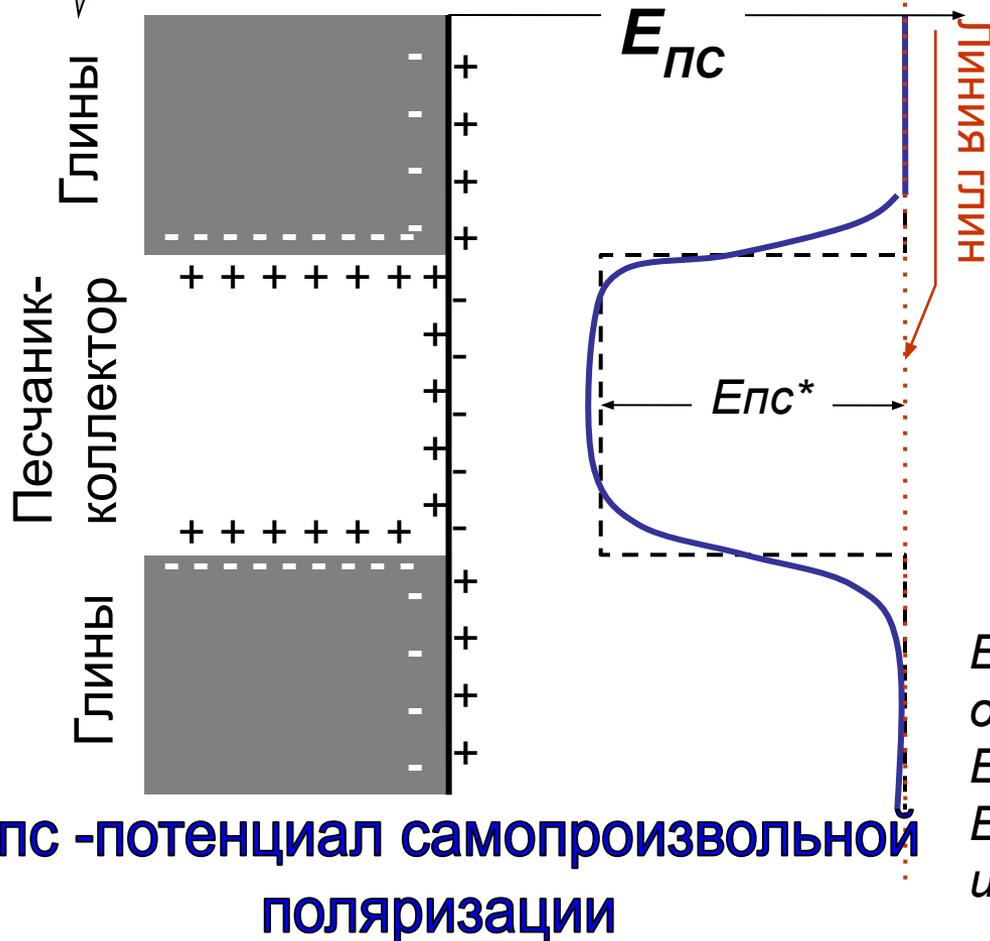
# Принципиальная схема измерения ПС





# Модель диффузионно-адсорбционной поляризации (ПС) коллекторов

## Относительная амплитуда ПС



$\alpha_{пс}$  – относительная амплитуда  $E_{пс}$

$$\alpha_{пс} = \frac{E_{пс}^*}{E_{пс}^*(max)}$$

$E_{пс}^*$  - амплитуда  $E_{пс}$  отсчитанная от «линии глин»

$E_{пс}^*(max)$  – максимальное значение  $E_{пс}^*$  для песчаников исследуемого интервала разреза



- Исходные положения:
1. Коллектор = неглинистый скелет + цемент (глинистый и карбонатный)
  2. Коллектор водонасыщенный

Модель пористости ПС = модель ПС + модель пористости

Модель  $\alpha_{ПС}$

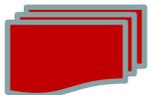
$$\alpha_{ПС} = 0$$

- \* Микропоры в глинистом цементе
- Макропоры, блокированные микропорами глинистого цемента

$$\alpha_{ПС} = 1$$

- Макропоры
- Макропоры, блокированные микропорами карбонатного цемента

С учетом доли порового пространства, занятого названными порами



$$\alpha_{ПС} = (1 - K_{B.CB}) \cdot \left( 1 - \frac{K_{B.CB(\Gamma)}}{1 - K_{B.CB}} \right) + K_{B.CB}(K)$$

Кв.св= Кв.св(г)+Кв.св(к) – коэффициент физически связанной воды

▶ (влияет на ФЕС коллектора)

Кв.св(г) – коэффициент адсорбированной на поверхности глин воды

▶ (влияет на ПС)

Кв.св(к)– коэффициент капиллярно удержанной воды в карбонатном цементе

Частные случаи:

1. Цемент отсутствует:

Кв.св(г)=0, Кв.св(к)=0,  $\alpha_{ПС}=1$ ;

2. Поровое пространство занято глинистым цементом:

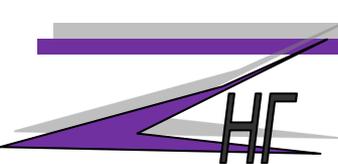
Кв.св(г)  $\rightarrow 1$ ;  $\alpha_{ПС} \rightarrow 0$ ;

3. Поровое пространство занято карбонатным цементом:

Кв.св(к) $\rightarrow 1$ ;  $\alpha_{ПС} \rightarrow 1$ .

!!!

Плотный пласт с карбонатным цементом может выделяться на кривой ПС так же, как хороший коллектор, не содержащий цемента вообще.

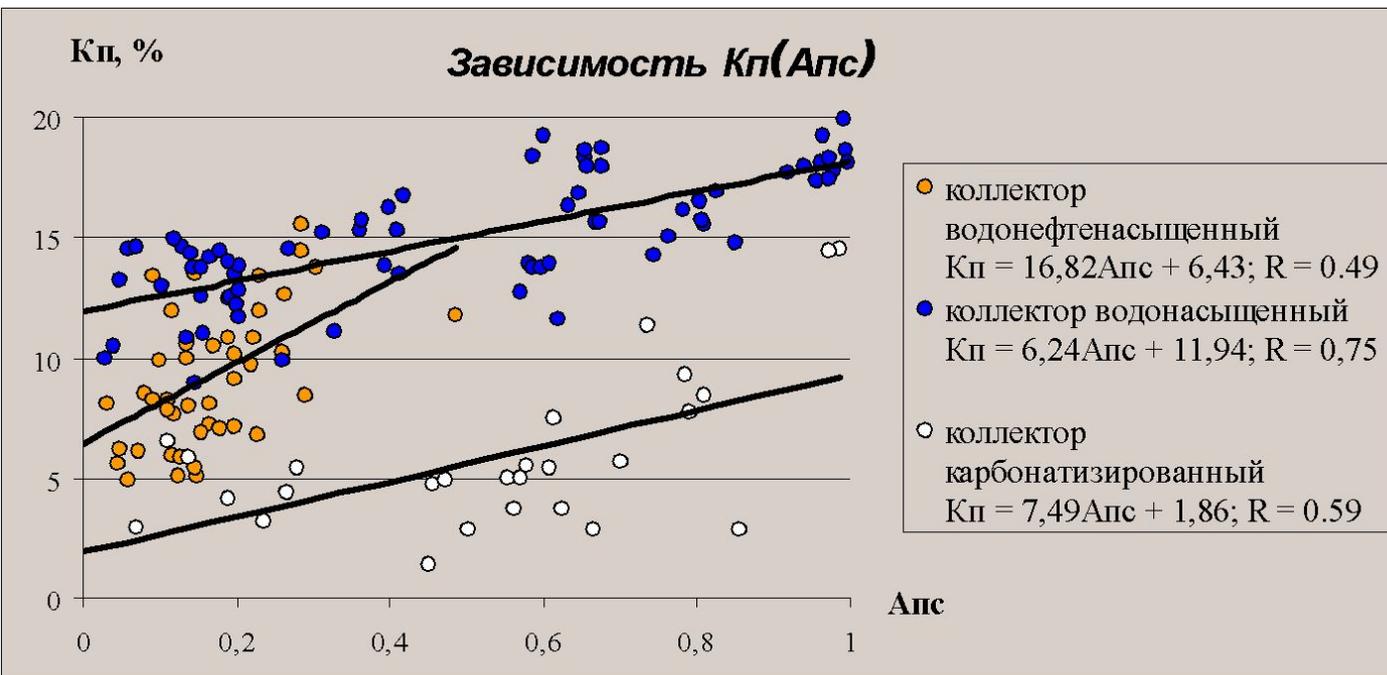


Условия применения

$\alpha_{ПС}$

для оценки пористости:

1. Изменение пористости коллектора связано с изменением его глинистости.
2. Минеральный состав цемента однородный.
3. Коллектор водонасыщенный



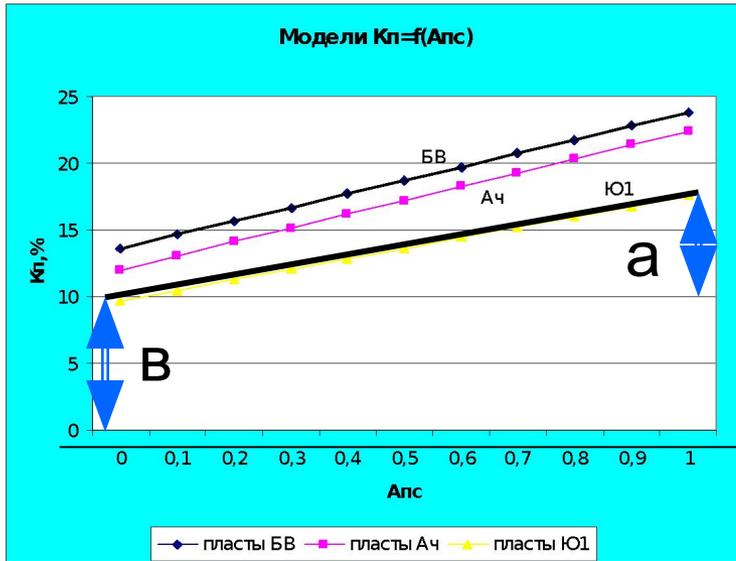
Пласт Ю1, Лантынь-Яхское  
месторождение



Различный тип глин и переменное количество карбонатного цемента ухудшают корреляционную зависимость  $\alpha_{пс} = f(K_p)$  и вносит ошибки в определения  $K_p$  по  $\alpha_{пс}$

## Модель пористости ПС:

$$Kп = a \cdot \alpha_{ПС} + в$$

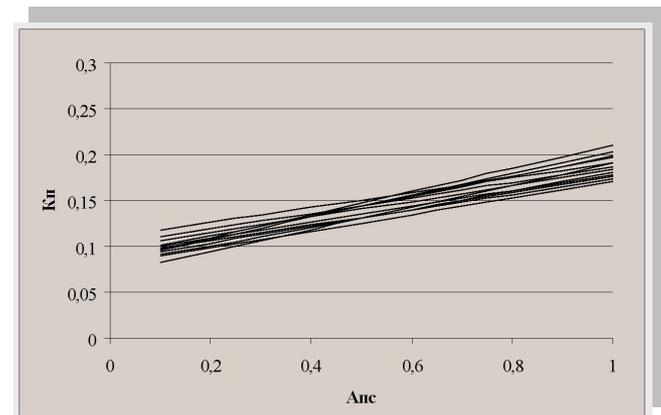


*a* - интервал изменения  $Kп$ , в котором на  $KП$  влияет глинистость

*в* - микропористость глин

*a + в* -  $Kп$ , выше которого на пористость влияют другие факторы (не глинистость)

пласты БВ	$Kп = 10.2 \cdot \alpha_{пс} + 13.6$
пласты Ач	$Kп = 10.4 \cdot \alpha_{пс} + 12$
пласты Ю	$Kп = 7.86 \cdot \alpha_{пс} + 9.7$



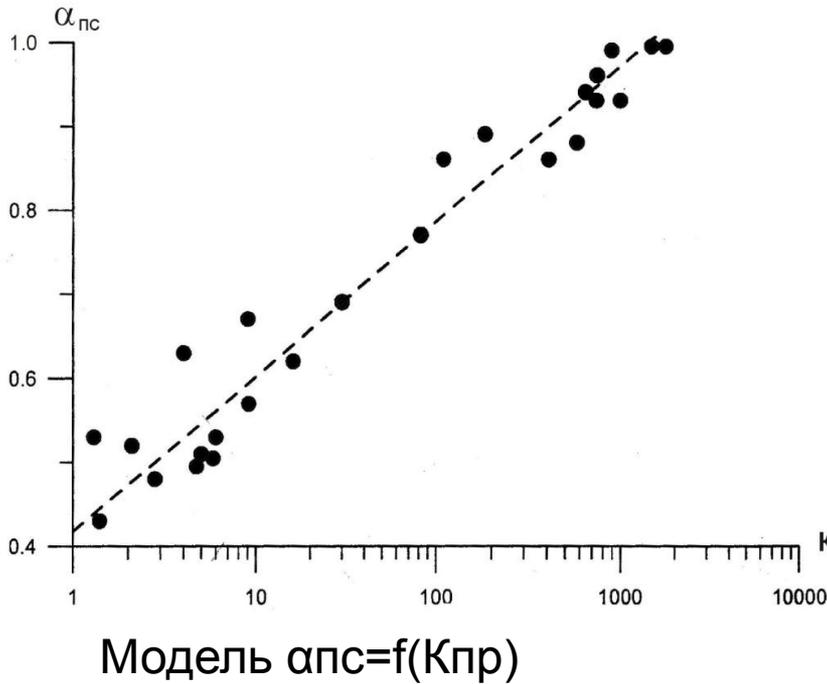
Месторождения  
Томской области

Южно-Покамасовское месторождение

$a = 0.08-0.126$     $в = 0.07-0.11$



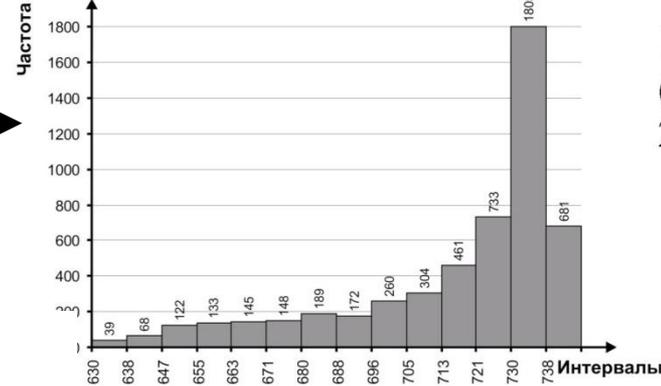
Различная ПС геологических разрезов разной продуктивности (Мыльджинское месторождение)



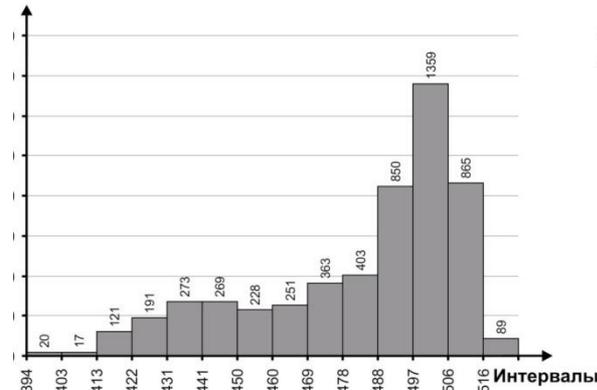
Наиболее тесные связи  $\alpha_{пс}$  – с проницаемостью и глинистостью ?

## ПС

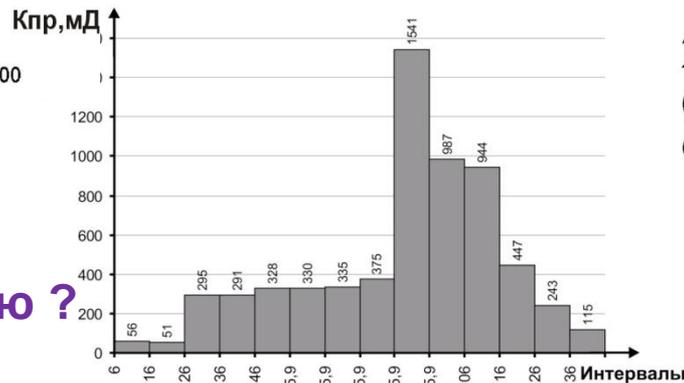
(скважины полностью)



**127 скв**  
(продуктивная)  
24451,8 м<sup>3</sup>/%<sup>2</sup>



**132 скв**



**208 скв**  
(слабопродуктивная)  
624 м<sup>3</sup>/%<sup>2</sup>



Статистическая модель

$$P_n = a \cdot K_B^{-n}$$

**n - показатель насыщенности**

а) Межгранулярные коллекторы:

=1.3-1.6 (и ниже) глинистые

= 1.8-2.0 слабоглинистые  
терригенные и карбонатные

б) Коллекторы каверновые и трещинные :

=1.0-1.3 каверновые

>>2 трещинные

в) Гидрофобные >2

Коэффициент водонасыщенности (нефтегазонасыщенности) определяют по электрическому параметру  **$P_n$** .

**Вопрос:**

Надежность определения  $K_B$  ( $K_n$ ) каких коллекторов будет выше:

Глинистых (1а) или безглинистых (1б)?

Трещинных (2а) или каверновых (2б)?

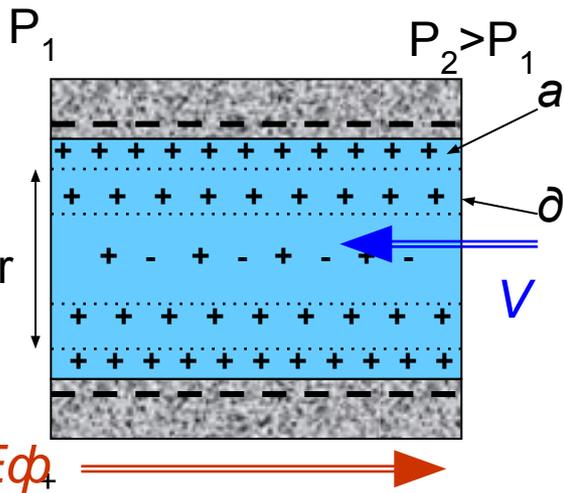
Гидрофильных (3а) или гидрофобных (3б)?

Ориентировочные значения

# Фильтрационная поляризация

Фильтрационная поляризация возникает в поровой среде при фильтрации через нее жидкости.

## Модель капилляра



$a$  – адсорбционная (неподвижная) часть ДЭС  
 $\delta$  – диффузная (относительно подвижная) часть ДЭС

Диффузная часть ДЭС увлекается движущейся жидкостью и поверхность пористой среды со стороны более высокого давления заряжается отрицательно.

Скорость течения: 
$$V = \frac{r^2}{8\mu} \cdot \Delta P$$

$$E\phi = \frac{\varepsilon \cdot \xi \cdot \rho_{\phi}}{4\pi \cdot \mu} \cdot \Delta P$$

Фильтрационный потенциал  
 (потенциал Гельмгольца)

$\varepsilon$  - Диэлектрическая проницаемость  
 $\xi$  - Электрокинетический потенциал – падение потенциала в подвижной части ДЭС

$\rho_{\phi}$  - Удельное электрическое сопротивление

$\mu$  - Вязкость

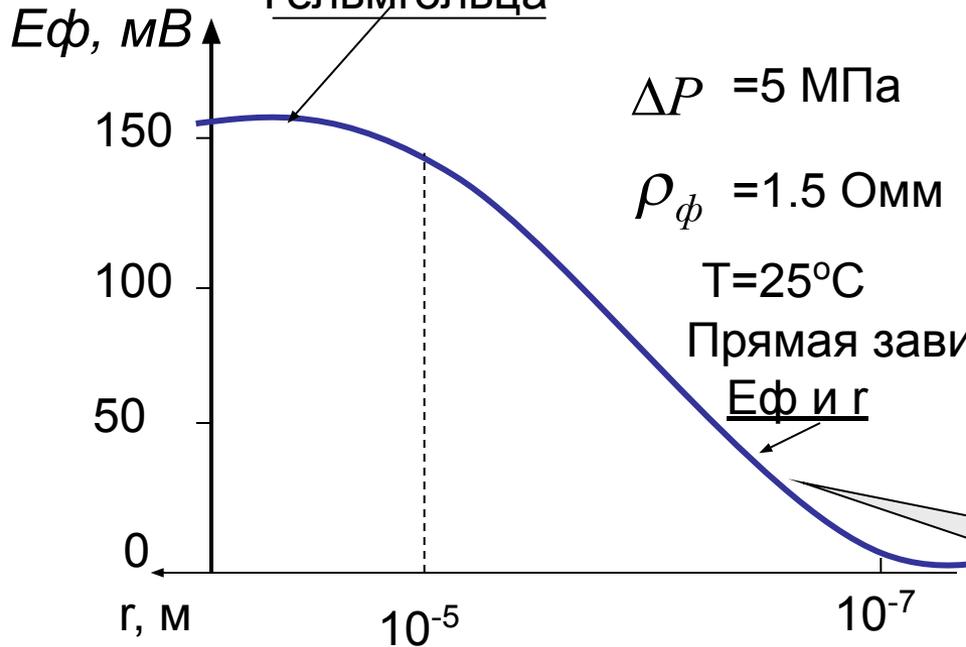
При фильтрации жидкости через проницаемые породы:

$$E_{\phi} = A_{\phi} \cdot \rho \cdot \Delta P$$

Справедливо уравнение Гельмгольца

$\Delta P$  – разность давлений в скважине и пласте, МПа

$A_{\phi}$  – коэффициент фильтрационной электрической активности (в мВ) численно равный фильтрационной ЭДС при  $\rho_{\phi} = 1$  Омм и  $\Delta P = 0.1$  МПа.



$A_{\phi}$  характеризует способность горной породы создавать разность электрических потенциалов при фильтрации жидкости через породы

Зависит от структуры порового пространства

Наличие потенциалов фильтрации приводит к искажению аномалии ПС в коллекторах и к ошибкам оценки их пористости по ПС.