



**ПЕТРОФИЗИКА (ПРЕЗЕНТАЦИЯ  
ЛЕКЦИЯ № 7)  
(ЭЛЕКТРОПРОВОНОСТЬ)**

Лектор: доцент Дахнов А.В.  
Кафедра исследования нефтегазовых пластовых  
СИСТЕМ

# ПЛОТНОСТЬ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

## По Максвеллу

$$J_{\text{полн}} = J_{\text{пр}} + J_{\text{см}}$$

$J_{\text{пр}}$ ,  $J_{\text{см}}$  — плотности тока  
проводимости и смещения

## Закон Ома

в дифференциальной форме:

$$J_{пр} = \sigma E,$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость среды;  
 $E$  – напряженность электрического тока

# ПЛОТНОСТЬ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

$$J_{\text{см}} = \partial D / \partial t = \varepsilon_a \partial E / \partial t, \text{ где}$$

$D = \varepsilon_a E$  – индукция электрического поля;

$\varepsilon_a$  = абсолютная диэлектрическая  
проницаемость среды

$$J_{\text{полн}} = \sigma E + \varepsilon_a \partial E / \partial t$$

# ПРОВОДИМОСТЬ

**ПРОВОДИМОСТЬ СРЕДЫ –**  
**СПОСОБНОСТЬ ПРОПУСКАТЬ**  
**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК**

**СОПРОТИВЛЕНИЕ –**  
**СПОСОБНОСТЬ ПРЕПЯТСТВОВАТЬ**  
**ПРОХОЖДЕНИЮ ТОКА**

# ПРОВОДИМОСТЬ И УД. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

УДЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
ПРОВОДИМОСТЬ СРЕДЫ  $\sigma$   
(Сим/м)

УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ  
СОПРОТИВЛЕНИЕ  $\rho$

$$\rho = 1/\sigma = RS/L \text{ (Ом*м)}$$

# ПРОВОДИМОСТЬ СРЕДЫ

Проводимость  
среды

Перенос электрических зарядов сквозным током

Вещества  
с электронной  
проводимостью  
(металлы,  
графит)

Диэлектрики  
(ионы)  
и полупроводники  
(дырочная  
проводимость)

Растворы  
электролитов  
(ионная  
проводимость)

# УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ $\rho$

ТВЕРДАЯ  
ФАЗА -  
МИНЕРАЛЫ

САМОРОДНЫЕ  
МЕТАЛЛЫ  
 $10^{-8} - 10^{-5}$  Омм

МИНЕРАЛЫ С  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
И ДЫРОЧНОЙ  
ПРОВОДИМОСТЬЮ  
(ГАЛЕНИТ, РУТИЛ,  
ПИРРОТИН И ДР.)  
 $10^{-6} - 10^8$  Омм

ДИЭЛЕКТРИКИ  
(КВАРЦ, КАЛЬЦИТ,  
ДОЛОМИТ, ГИПС  
И ДР.)  
 $5 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^{16}$  Омм



# МИНЕРАЛЫ

$\rho$  от  $10^{-6}$  до  $10^{15}$  Ом м

7 классов:

**I -  $< 10^{-6}$  Ом м** (самородные металлы: платина, золото, серебро, медь и др.)

**II – от  $10^{-6}$  до  $10^{-2}$  Ом м** (проводники пониженной проводимости: графит, антрацит, часть сульфидов и их аналоги)

**III - от  $10^{-2}$  до  $10^2$  Ом м** (полупроводники с повышенной электропроводностью: часть сульфидов и их аналоги и некоторые окислы)

# МИНЕРАЛЫ

**IV - от  $10^2$  до  $10^6$  Ом м** (полупроводники:  
окислы, гидроокислы, некоторые из сульфидов и их аналогов)

**V - от  $10^6$  до  $10^{10}$  Ом м** (некоторые из сульфидов, окислов, ванадатов, сульфатов)

**VI - от  $10^{10}$  до  $10^{14}$  Ом м** (изоляторы:  
кварц, полевые шпаты, кальцит)

**VII -  $>10^{14}$  Ом м** (совершенные изоляторы:  
слюды, галит, сильвин, и другие окислы, силикаты и т.д.)

# ЖИДКАЯ ФАЗА

## ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ СОЛЕЙ –

NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>,

NaHCO<sub>3</sub> и др.

$$\rho_{в.20} = 10/(u + v) C_v [\text{Ом} \cdot \text{м}]$$

$u, v$  – подвижности катиона и аниона

# ЖИДКАЯ ФАЗА

## МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТОВЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

NaCl – 359 г/л

CaCl<sub>2</sub>

более 560 г/л

$\rho_v = 10^{-2} - 10^3$  Омм

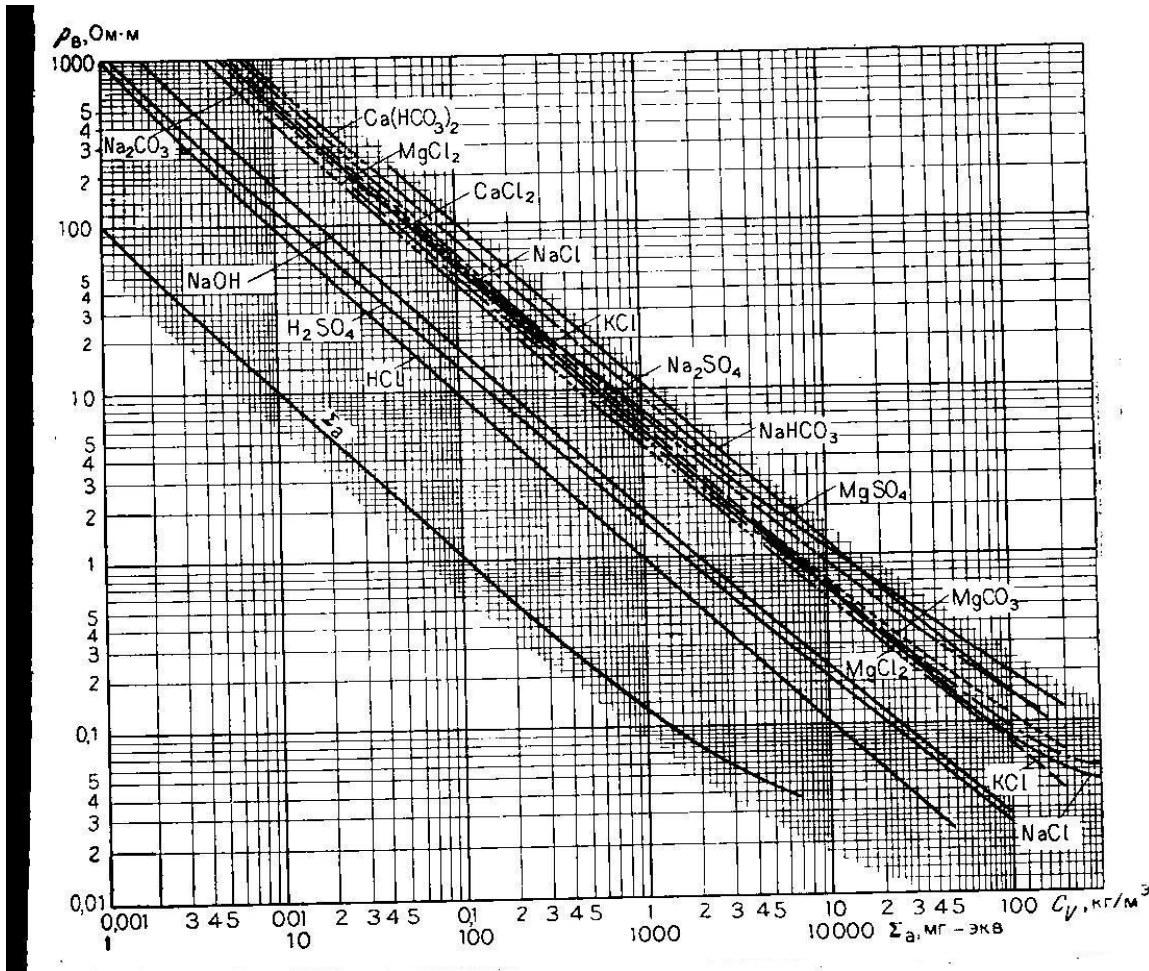
# ЖИДКАЯ ФАЗА

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

$$\rho_{в.Т} = \rho_{в.20} / [1 + \alpha_T (T - 20^\circ\text{C})],$$

$\alpha_T$  — температурный коэффициент  
электропроводности =  
0,021 – 0,023 [1/°C]

# ЖИДКАЯ ФАЗА



Зависимость  
удельного  
электрического  
сопротивления  $\rho_v$   
водных  
электролитов от их  
объемной  
концентрации  $C_v$   
при температуре  
20°C

# ЖИДКАЯ ФАЗА

$$\rho_{\text{в}} = 10 / \sum (C_{\text{а}} \nu f_{\text{а}} + C_{\text{к}} \iota f_{\text{к}}),$$

где  $C_{\text{а}}$  и  $C_{\text{к}}$  – число грамм-эквивалентов анионов и катионов в растворе;  $\nu$  и  $\iota$  – их электролитические подвижности;  $f_{\text{а}}$  и  $f_{\text{к}}$  – коэффициенты электропроводности, зависящие от концентрации растворенных солей и их химического состава.

# НЕФТЬ

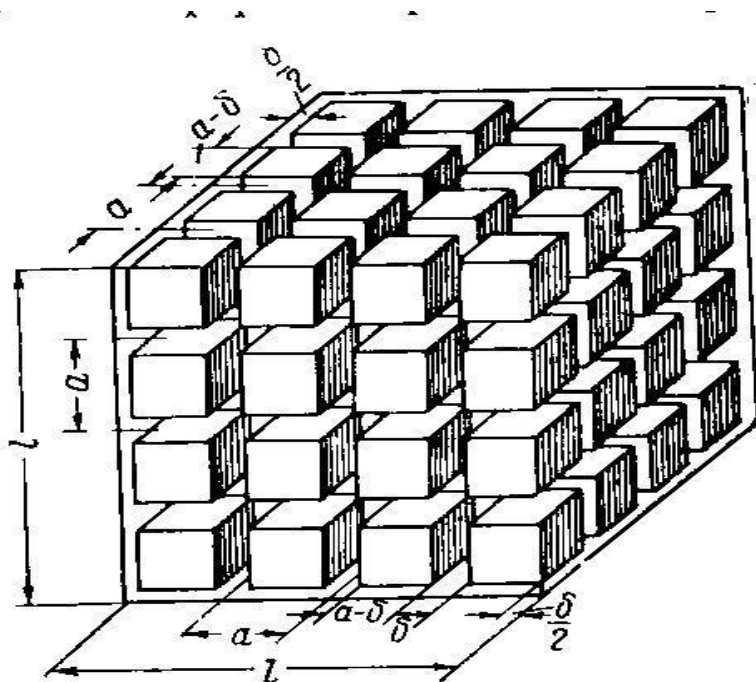
$$\rho_{\text{H}} = 10^{10} \div 10^{14} \text{ Омм}$$



# ГАЗЫ

$$\rho_r = \text{до } 10^{14} \text{ Омм}$$

# УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД



К выводу уравнения, определяющего электрическое удельное сопротивление бимодальной породы с кубическими включениями.

# УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

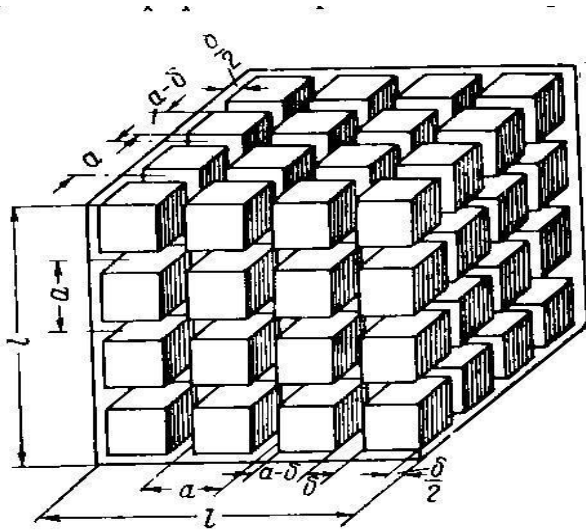
Условия:  $\rho_2 = \infty$ ;  $\rho_1$  проводник

$$\text{Для } 1\text{ м}^3 \quad R = \rho_{1,2} = \rho_1 l/s$$

$$l = 1 \text{ м}$$

$$S = \text{м}^2$$

# УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД



К выводу уравнения, определяющего электрическое удельное сопротивление биминеральной породы с кубическими включениями.

$$S = [a^2 - (a - \delta)^2]N = 2(\delta/a) - (\delta^2/a^2),$$

где  $a$  – сторона кубического включения, окруженного слоем заполняющего материала толщиной  $\delta/2$ , являющегося структурным элементом данной породы;  $N = 1/a^2$  – число структурных элементов, расположенных на площади  $1\text{ м}^2$ .

$$\rho_{1.2} = \rho_1 / [2(\delta/a) - (\delta^2/a^2)]$$

# УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

$$W = [a^3 - (a - \delta)^3] / a^3, \text{ а}$$

$$W \rightarrow K_{\text{п}}$$

$$\rho_{1,2} = f(K_{\text{п}} \text{ и } \rho_1)$$

# УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Для пучка параллельных цилиндрических капилляров постоянного сечения, полностью заполненных водой

$$\rho_{\text{в.п}} = \rho_{\text{в}} / k_{\text{п}}$$

# УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

$$\rho_{\text{в.п}} = T_{\text{эл}}^2 \rho_{\text{в}} / K_{\text{п}}$$
$$T_{\text{эл}} = I_{\text{к}} / I_{\text{обр}}$$

# ПАРАМЕТР ПОРИСТОСТИ

$$\rho_{в.п} = R_{п} \rho_{в}$$

По В.Н.Дахнову  $R_{п}$  – параметр пористости, зависящий от коэффициента пористости и геометрии пор

$$R_{п} = \rho_{в.п} / \rho_{в}$$

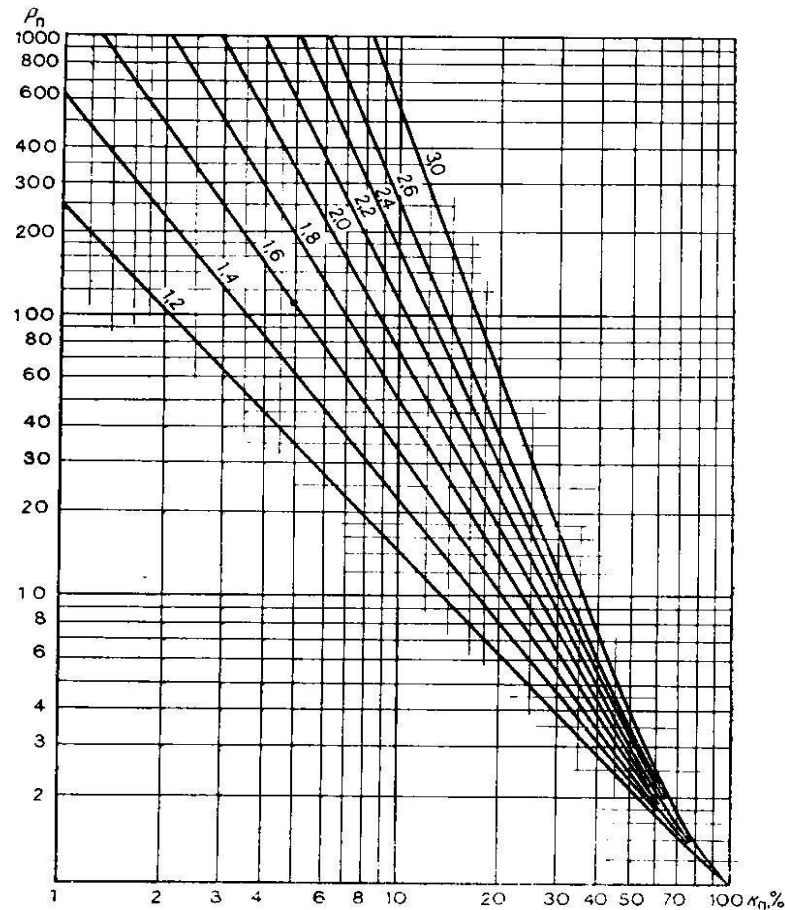


# ПАРАМЕТР ПОРИСТОСТИ

Характеристика коллектора	Теоретические данные			Экспериментальные данные	
	$m_0$	$m$	$a_{\Pi}$	$m$	$a_{\Pi}$
Пески и слабосцементированные песчаники . . . . .	1,2—1,75	1,15—1,85	0,94—0,66	1,2—1,7	0,9—0,75
Среднесцементированные песчаники . . . . .	1,75—2,0	1,65—2,14	0,78—0,58	1,5—2,1	0,9—0,5
Сильносцементированные песчаники . . . . .	2,0—2,5	1,96—2,72	0,74—0,44	>2	0,7—0,4
Ракушнякаи, рыхлые известняки и доломиты . . . . .	1,4—1,8	1,38—1,91	0,87—0,65	—	—
Плотные известняки и доломиты с межзерновой и трещинной пористостью . . . . .	1,8—2,2	1,77—2,36	0,76—0,52	1,7—2,4	0,75—0,4
Плотные известняки и доломиты с преимущественно каверновой пористостью . . . . .	2,2—2,6	2,15—2,8	0,67—0,34	>2,2	0,6—0,35

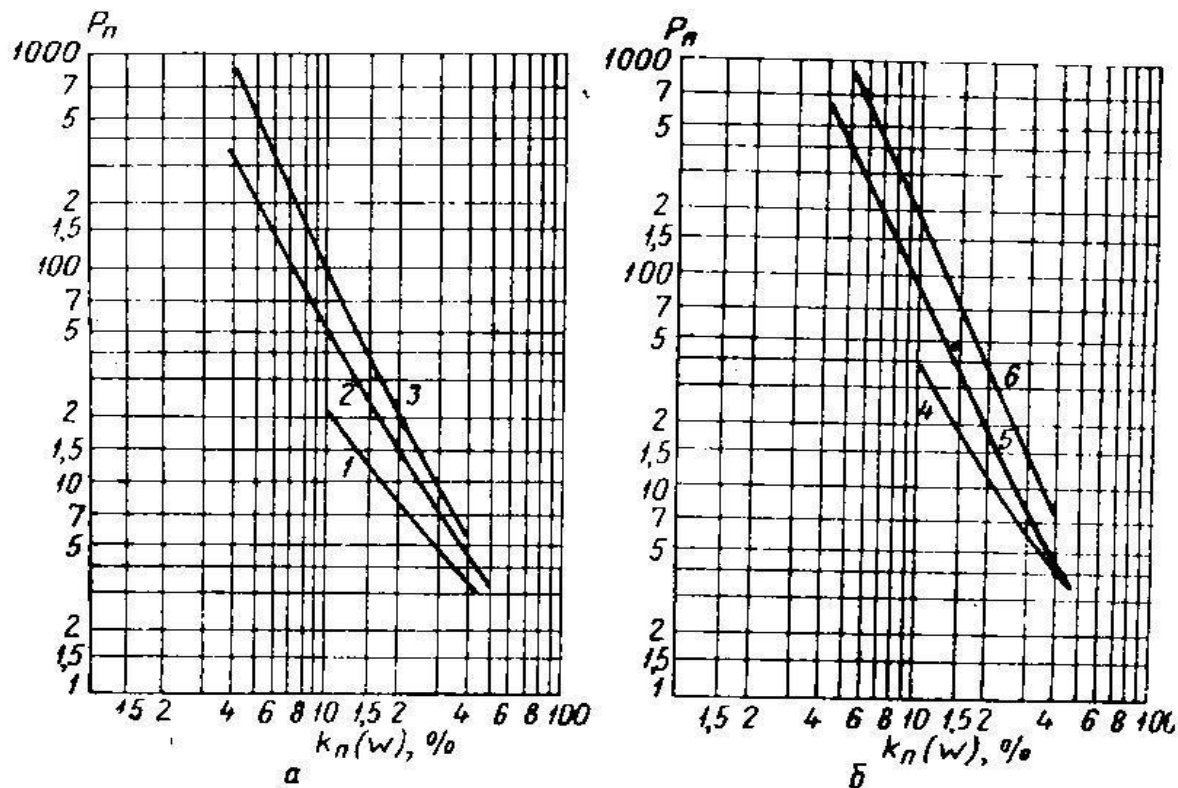
$$P_{\Pi} = a_{\Pi} K_{\Pi}^{-m}$$
 , где  $a_{\Pi}$  и  $m$  – константы, определяемые экспериментально для образцов.  $m$  называют показателем цементации породы.

# ПАРАМЕТР ПОРИСТОСТИ



ЗАВИСИМОСТЬ  
ПАРАМЕТРА  
ПОРИСТОСТИ ОТ  
КОЭФФИЦИЕНТА  
ПОРИСТОСТИ ДЛЯ  
РАЗЛИЧНЫХ  
ЗНАЧЕНИЙ  
СТРУКТУРНОГО  
ПОКАЗАТЕЛЯ  $m$

# ПАРАМЕТР ПОРИСТОСТИ



Зависимости параметра  $P_n$  от коэффициента пористости  $k_n$  (объемной влажности  $w$ ) (по В. Н. Дахнову).

**а** — песчано-глинистые породы; **б** — карбонатные породы. 1 — рыхлые пески; 2 — слабо сцементированные песчаники; 3 — средне сцементированные песчаники; 4 — ракушники и глинистые известняки; 5 — известняки и доломиты крупнокристаллические средней уплотненности; 6 — известняки и доломиты плотные тонкокристаллические.

# ПОВЕРХНОСТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ $\Pi$

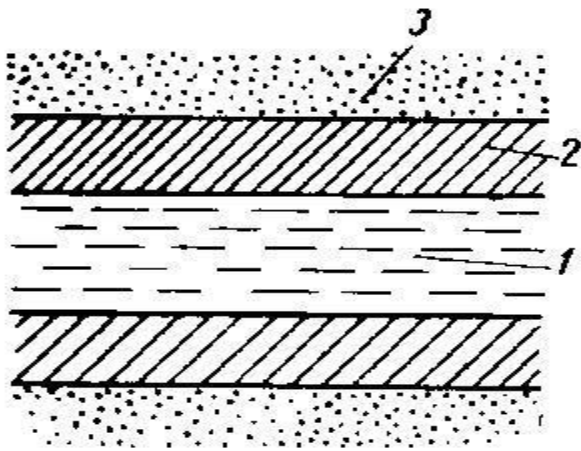


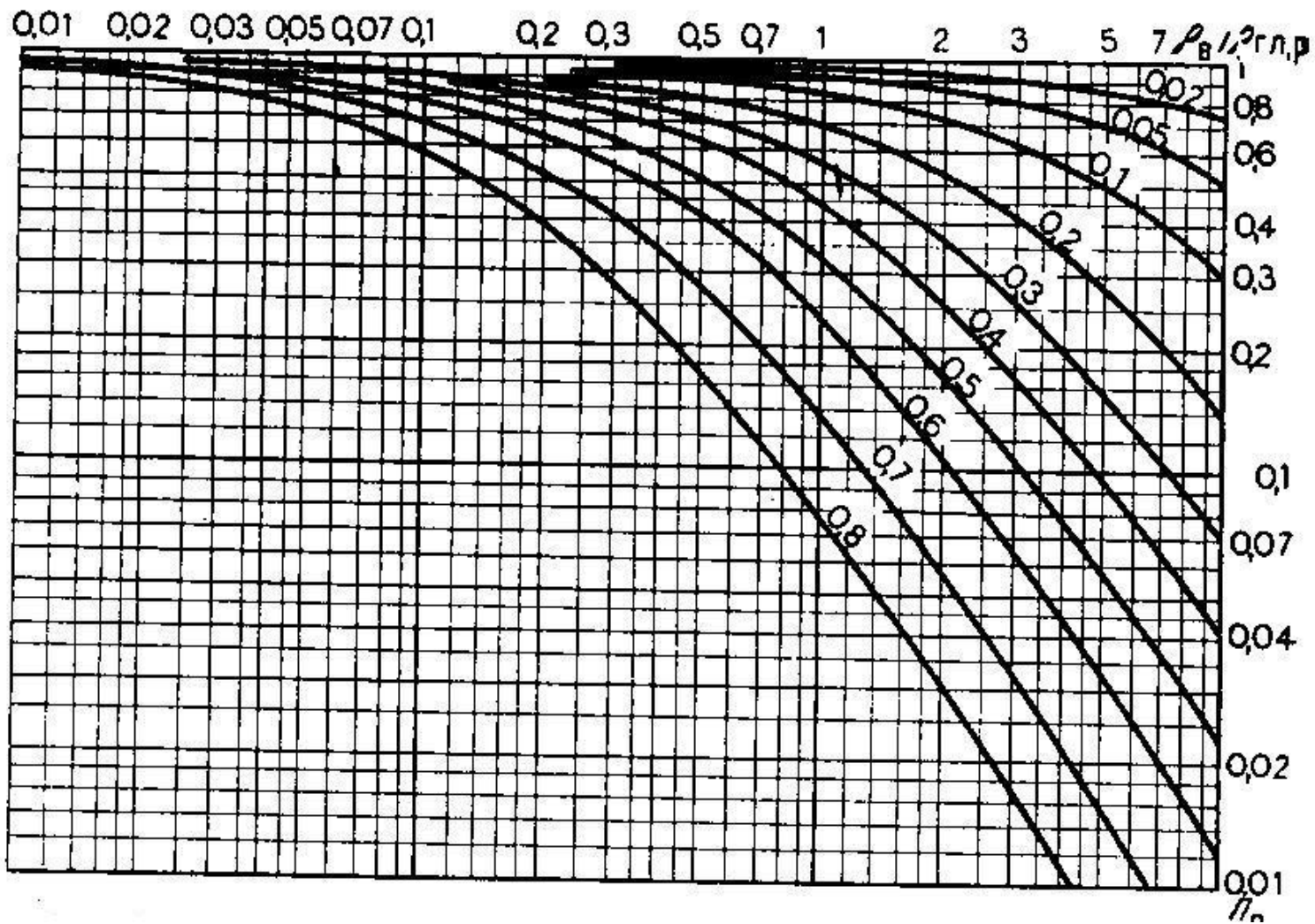
Схема расположения различных материалов в поровом пространстве сильно глинистых пород.

1 — электролит породы; 2 — глинистый цемент в поровом пространстве породы; 3 — псаммитово-алевритовый скелет породы.

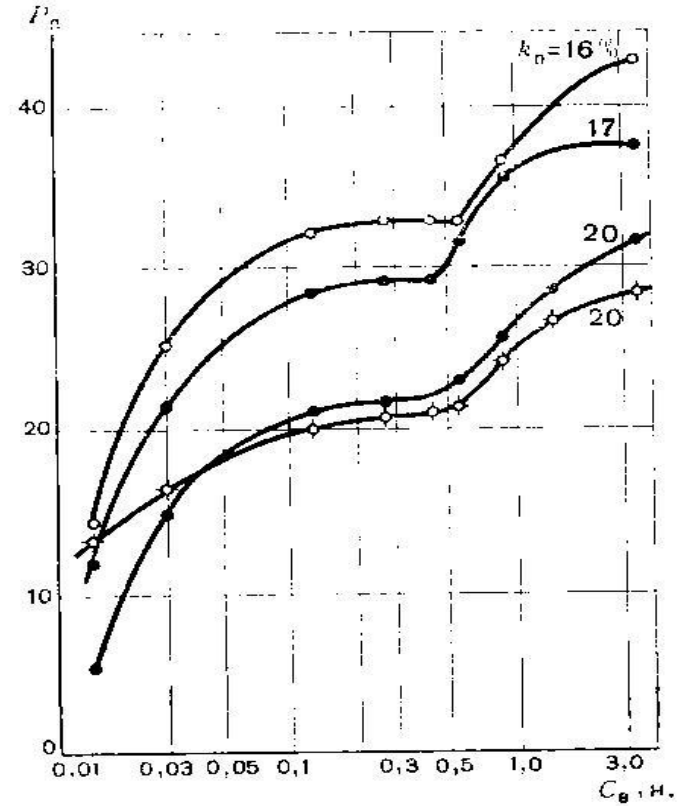
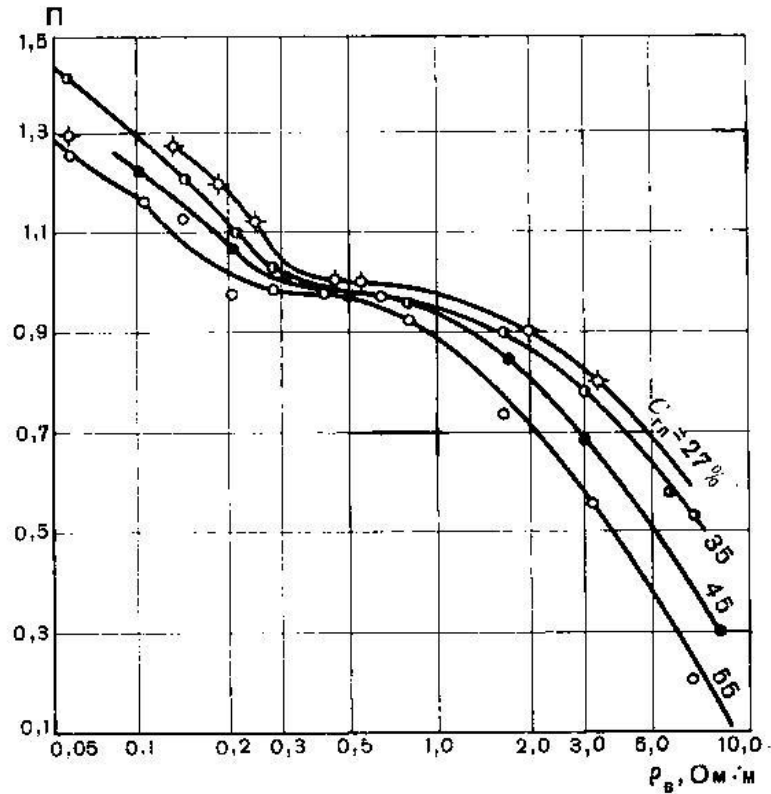
$$\Pi = R_{п,х} / R_{п.макс}$$

$R_{п,х}$  — значение параметра пористости при данной минерализации,  $R_{п.макс}$  — значение параметра пористости при максимальной минерализации

# ПОВЕРХНОСТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ $\Pi$



# ПОВЕРХНОСТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ $\Pi$



$$\rho_{н.п} = R_n \rho_{в.п}$$

По В.Н.Дахнову  $R_n$  – параметр насыщения и зависит от коэффициента водонасыщения и характера распределения в поровом пространстве воды, нефти и газа.

$$R_n = \rho_{н.п} / \rho_{в.п}$$

# удельное сопротивление нефтегазонасыщенных пород

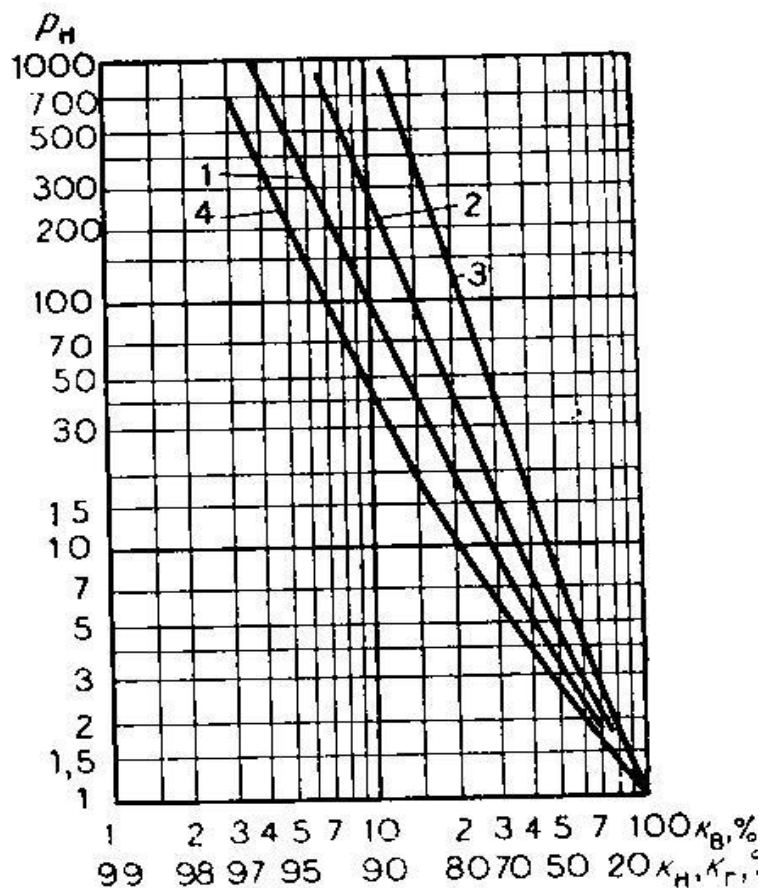
$$P_n = a_n K_v^{-n},$$

где  $a_n$  — коэффициент, варьирующий в узких пределах (от 0,6 до 1);

$n$  — показатель, изменяющийся от 1,73 до 4,33 и зависящий от степени гидрофильности или гидрофобности поверхности зерен коллектора, его структуры и наличия проводящих включений



# удельное сопротивление нефтегазонасыщенных пород



Зависимость параметра  $P_n$  насыщения от коэффициентов нефте-, водо- и газонасыщения породы.

1 - 3 – песчано-глинистые породы соответственно гидрофильные, слабогидрофобные и гидрофобные; 4 – карбонатные породы (по Г. Арчи)

# ВЛИЯНИЕ ПЛАСТОВЫХ УСЛОВИЙ

Пластовые условия –

$$P_{\text{гор}}, P_{\text{пл}}, (P_{\text{эф}} = P_{\text{гор}} - P_{\text{пл}}), T$$

$$\rho_{\text{п}}(P, T) / \rho_{\text{п}}(0) \sim K_1 * K_2 * K_3$$

$$K_1 = f(P_{\text{эф}})$$

$$P_{\text{эф}} \rightarrow \uparrow T_{\text{э}}, \downarrow K_{\text{п}}$$

# ВЛИЯНИЕ ПЛАСТОВЫХ УСЛОВИЙ

$$K_2 - f(P_{пл})$$

$$K_2 = 1 - K_{ТВ} p_{пл}$$

(для слабоглинистых терригенных коллекторов)

$$K_{ТВ} = 1,5 * 10^{-3} \text{МПа}^{-1}$$

# ВЛИЯНИЕ ПЛАСТОВЫХ УСЛОВИЙ

$$K_3 - f(T)$$

$$T \rightarrow \text{а) } \downarrow \rho_{\text{в}},$$

- б) изменение  $K_{\text{п}}$  и  $T_3$  в результате теплового расширения скелетных зерен,
- в) изменением соотношения проводимости связанной воды и свободного раствора

# ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Электропроводность и удельное электрическое сопротивление минералов и флюидов.
2. Удельное электрическое сопротивление водонасыщенной горной породы. Параметр пористости.
3. Удельное электрическое сопротивление частично водонасыщенной горной породы. Параметр насыщения.
4. Электропроводность водных растворов солей.
5. Влияние глинистости на величину удельного электрического сопротивления горной породы.
6. Влияние температуры и давления на электропроводность горных пород.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

internet: [www.vniigaz.ru](http://www.vniigaz.ru)  
intranet: [www.vniigaz.gazprom.ru](http://www.vniigaz.gazprom.ru)  
e-mail: [vniigaz@vniigaz.gazprom.ru](mailto:vniigaz@vniigaz.gazprom.ru)  
телефон: (+7 495) 355-92-06  
факс: (+7 495) 399-32-63