



ПАО «Газпром»

Российский государственный университет  
нефти и газа имени И. М. Губкина  
(Национальный исследовательский  
университет)



---

# **Презентационные материалы онлайн-курса «Основные технологические процессы Upstream-сектора нефтегазового комплекса»**

**Удельное электрическое  
сопротивление пород со сложной  
структурой порового пространства.  
Удельное электрическое  
сопротивление слоистых пород**

Коэффициент общей пористости  $K_{\Pi}$

$$K_{\Pi} = K_{\Pi.МЗ} \cdot (1 - K_{\Pi.ТК}) + K_{\Pi.ТК}$$

где  $K_{\Pi.МЗ}$  – коэффициент межзерновой пористости (пористости блоков  $K_{\Pi.бл}$ ), доли единицы;  $K_{\Pi.ТК}$  – коэффициент вторичной пористости, доли единицы.

Коэффициент вторичной пористости являющейся суммой коэффициентов трещинной  $K_{\Pi.тр}$  и кавернозной пористостей  $K_{\Pi.кав}$

$$K_{\Pi.ТК} = K_{\Pi.тр} + K_{\Pi.кав}$$

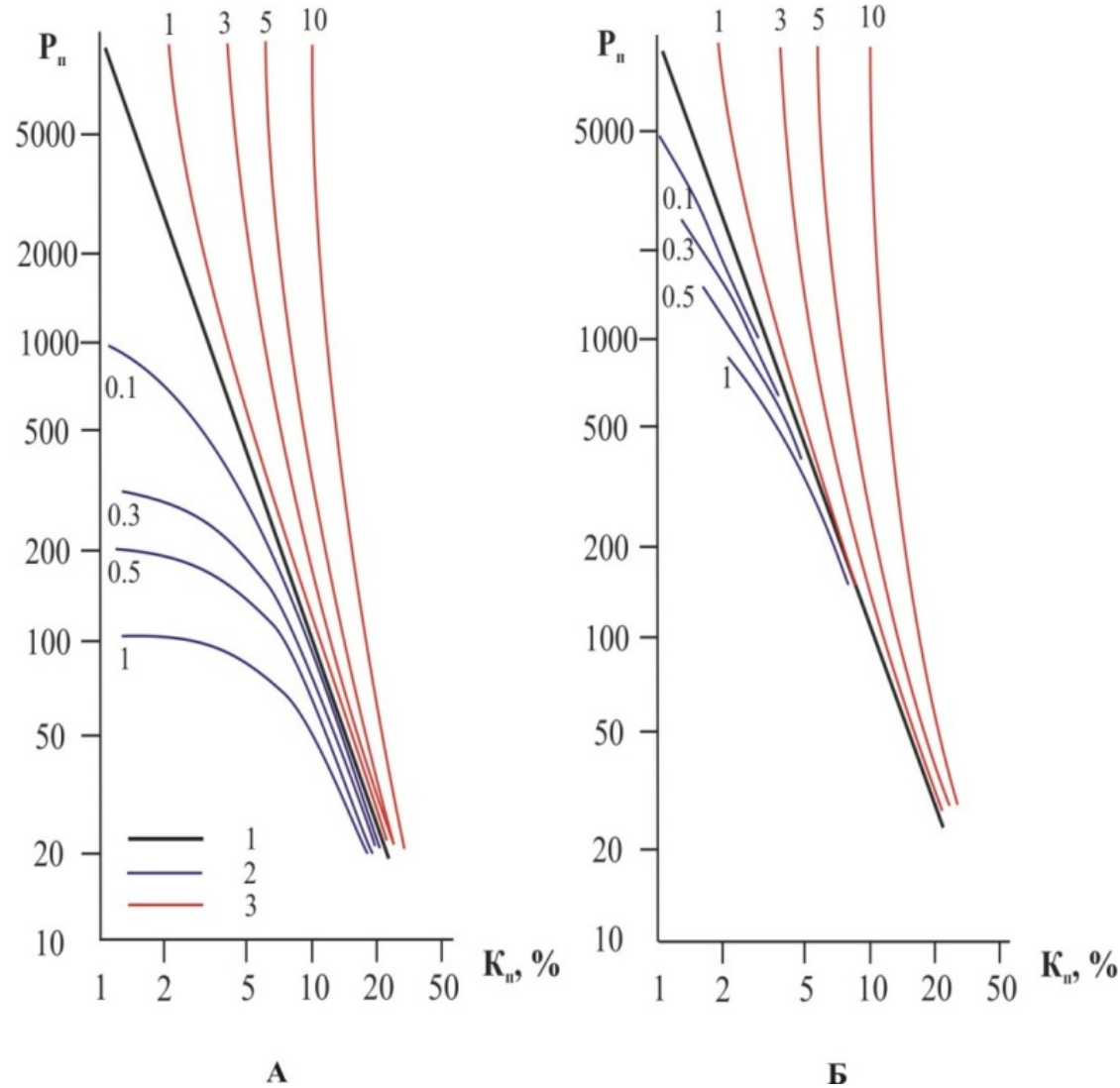
$$\rho_{\text{вп.т}} = P_{\text{п.т}} \cdot \rho_{\text{в}} = \frac{P_{\text{п.бл}} \cdot \rho_{\text{в}}}{A \cdot P_{\text{п.бл}} \cdot K_{\text{п.тр}} + 1}$$

где  $\rho_{\text{вп.т}}$  – удельное электрическое сопротивление трещинно-межзерновой породы, Омм;  $P_{\text{п.т}}$  – параметр пористости трещинно-межзерновой породы;  $\rho_{\text{в}}$  – удельное электрическое сопротивление пластовой воды, Омм;  $P_{\text{п.бл}}$  – параметр пористости блоков, определяемый для заданной пористости блоков;  $A$  – коэффициент, зависящий от ориентации трещин относительно направления, в котором ведется измерение удельного сопротивления;  $K_{\text{п.тр}}$  – коэффициент трещинной пористости, доли единицы.

Значения коэффициент А для трещинных пород с различным направлением трещин  
 [Вендельштейн Б.Ю., Резванов Р.А., 1978 г.]

А	Модель
1	2
0	Все трещины расположены перпендикулярно к направлению измерения $\rho_{\text{вп.т}} = \rho_{\text{бл}}$
1	Все трещины расположены параллельно к направлению измерения
0.5	Все трещины образуют две взаимно перпендикулярные системы. Одна система перпендикулярна к направлению измерения, другая – параллельна. Величина $K_{\text{п.тр}}$ распределена поровну между двумя системами.
0.63	Все трещины образуют три взаимно перпендикулярные системы. Величина $K_{\text{п.тр}}$ распределена поровну между тремя системами. Хаотическая трещиноватость.

# Зависимость параметра пористости от коэффициента общей пористости для трещинных и кавернозных пород [Латышова М.Г., 2007 г.]



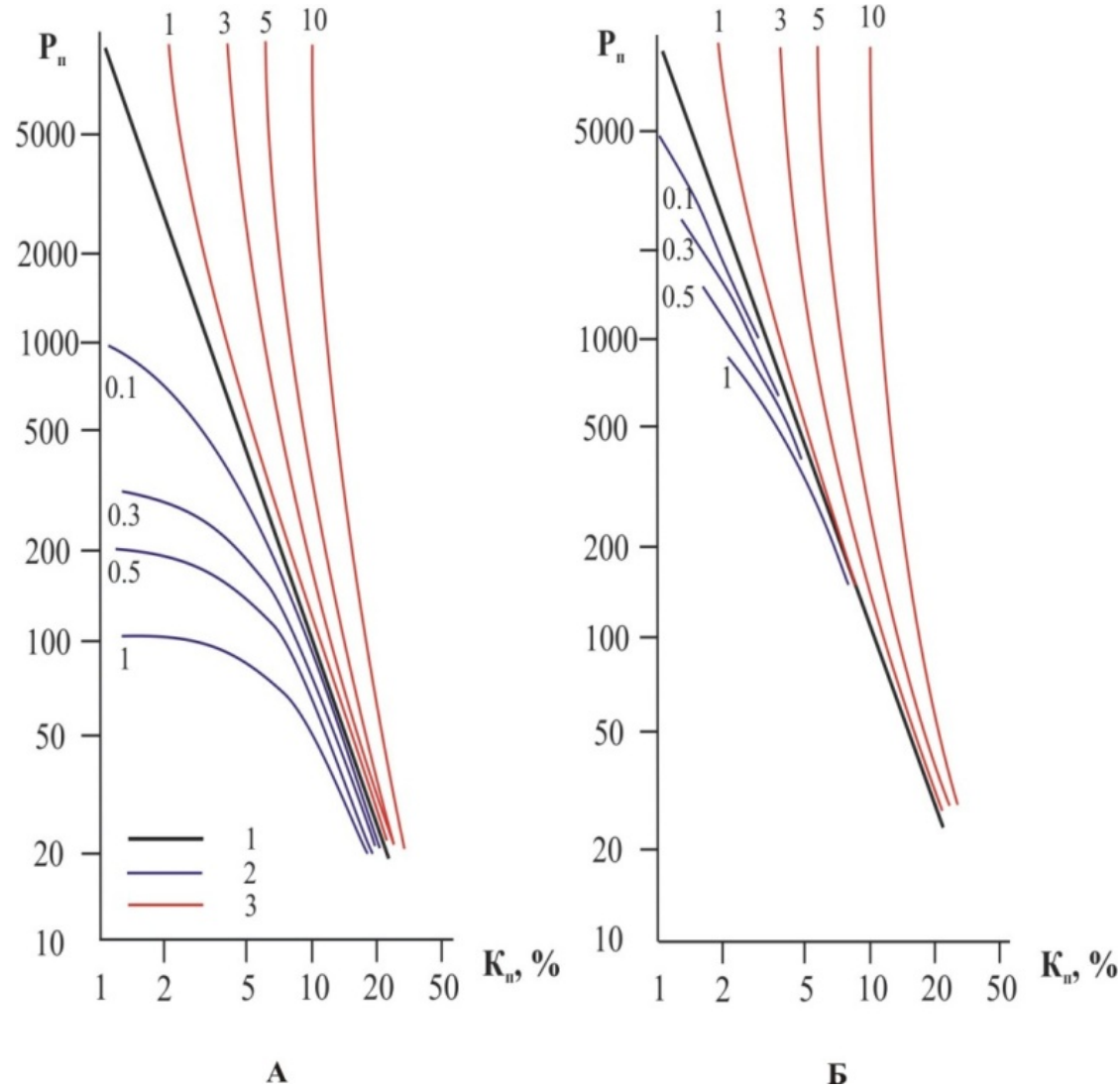
А – все поры заполнены пластовой водой;  
Б – вторичные поры заполнены фильтратом бурового раствора  $\rho_\phi=10\rho_B$ , межзерновые поры – пластовой водой.  
1 – зависимость  $P_n=f(K_n)$  для межзерновых коллекторов;  
2 – зависимость  $P_n=f(K_n)$  для трещинных коллекторов;  
3 – зависимость  $P_n=f(K_n)$  для кавернозных коллекторов. Шифр кривых  $K_{п.тр}$  и  $K_{п.кав}$  соответственно

$$\rho_{\text{ВП.К}} = \frac{P_{\text{п.бл}} \cdot (1 - K_{\text{п.кав}}) + K_{\text{п.кав}} + 2}{P_{\text{п.бл}} \cdot (1 + 2 \cdot K_{\text{п.кав}}) + 2 \cdot (1 - K_{\text{п.кав}})} \cdot P_{\text{п.бл}} \cdot \rho_{\text{В}}$$

$$\rho_{\text{ВП.К}} = P_{\text{п.к}} \cdot \rho_{\text{В}} = \frac{(1 - K_{\text{п.кав}})}{(1 + 2 \cdot K_{\text{п.кав}})} \cdot P_{\text{п.бл}} \cdot \rho_{\text{В}}$$

где  $\rho_{\text{ВП.К}}$  – удельное электрическое сопротивление кавернозно-межзерновой породы, Омм;  $P_{\text{п.к}}$  – параметр пористости кавернозно-межзерновой породы;  $P_{\text{п.бл}}$  – параметр пористости блоков, определяемый для заданной пористости блоков;  $K_{\text{п.к}}$  – коэффициент трещинной пористости, доли единицы;  $\rho_{\text{В}}$  – удельное электрическое сопротивление пластовой воды, Омм.

# Зависимость параметра пористости от коэффициента общей пористости для трещинных и кавернозных пород [Латышова М.Г., 2007 г.]



А – все поры заполнены пластовой водой;  
Б – вторичные поры заполнены фильтратом бурового раствора  $\rho_\phi = 10\rho_v$ , межзерновые поры – пластовой водой.  
1 – зависимость  $P_n = f(K_n)$  для межзерновых коллекторов;  
2 – зависимость  $P_n = f(K_n)$  для трещинных коллекторов;  
3 – зависимость  $P_n = f(K_n)$  для кавернозных коллекторов. Шифр кривых  $K_{п.тр}$  и  $K_{п.кав}$  соответственно



$$\rho_{\text{ВП.ТК}} = P_{\text{П.ТК}} \cdot \rho_{\text{В}} = \frac{(1 - K_{\text{П.КАВ}})}{(1 + 2 \cdot K_{\text{П.КАВ}})} \cdot P_{\text{П.Т}} \cdot \rho_{\text{В}}$$

$$\rho_{\text{ВП.ТК}} = P_{\text{П.ТК}} \cdot \rho_{\text{В}} = \frac{(1 - K_{\text{П.КАВ}})}{(1 + 2 \cdot K_{\text{П.КАВ}})} \cdot \frac{P_{\text{П.БЛ}}}{A \cdot P_{\text{П.БЛ}} \cdot K_{\text{П.ТР}} + 1} \cdot \rho_{\text{В}}$$

где  $\rho_{\text{ВП.ТК}}$  – удельное электрическое сопротивление трещинно-кавернозно-межзерновой породы, Омм;  $P_{\text{П.ТК}}$  – параметр пористости трещинно-кавернозно-межзерновой породы;  $P_{\text{П.Т}}$  – параметр пористости трещинно-кавернозно-межзерновой породы;  $P_{\text{П.БЛ}}$  – параметр пористости блоков, определяемый для заданной пористости блоков;  $A$  – коэффициент, зависящий от ориентации трещин относительно направления, в котором ведется измерение удельного сопротивления;  $K_{\text{П.ТР}}$  – коэффициент трещинной пористости, доли единицы;  $K_{\text{П.КАВ}}$  – коэффициент трещинной пористости, доли единицы;  $\rho_{\text{В}}$  – удельное электрическое сопротивление пластовой воды, Омм.

## Влияние структуры порового пространства на удельное электрическое сопротивление горных пород

$$\frac{K_{\text{п.кав}}}{K_{\text{п.тр}}} < 2$$

основное влияние на удельное электрическое сопротивление породы  $\rho_{\text{вп.тк}}$  оказывают трещины

$$\frac{K_{\text{п.кав}}}{K_{\text{п.тр}}} > 10$$

основное влияние на удельное электрическое сопротивление породы  $\rho_{\text{вп.тк}}$  оказывают каверны

$$2 < \frac{K_{\text{п.кав}}}{K_{\text{п.тр}}} < 10$$

зависимость параметра пористости трещинно-кавернозной породы от ее пористости  $P_{\text{п.тк}}$  мало отличается от зависимости  $P_{\text{п}} = f(K_{\text{п}})$  для пород только с межзерновой пористостью

## Коэффициенты нефтегазонасыщения горной породы со сложной структурой порового пространства

$$K_{\text{НГ}} = \frac{K_{\text{НГ.МЗ}} \cdot K_{\text{П.МЗ}} \cdot (1 - K_{\text{П.кав}} - K_{\text{П.тр}}) + K_{\text{НГ.ТК}} \cdot (K_{\text{П.кав}} + K_{\text{П.тр}})}{K_{\text{П}}}$$

где  $K_{\text{НГ}}$ ,  $K_{\text{НГ.МЗ}}$  и  $K_{\text{НГ.ТК}}$  – коэффициенты нефтегазонасыщения горной породы со сложной структурой порового пространства, доли единицы; межзерновых пор пронизываемого блока и системы трещин и каверн соответственно, доли единицы;  $K_{\text{П}}$  – общая пористость, доли единицы.

Примерами слоистых пород являются:

- пачка, представленная тонким чередованием песчаника и глины;
- глинистые и углистые сланцы;
- глины и т. п.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}}} > 1$$

где  $\lambda$  – коэффициент анизотропии;  $\rho_{\perp}$  – удельное электрическое сопротивление, измеренное перпендикулярно напластованию, Ом·м;  $\rho_{\parallel}$  – удельное электрическое сопротивление, измеренное параллельно напластованию, Ом·м.

Величина коэффициента анизотропии изменяется от 1.02 в слабослоистых глинах до 2.75 в графитовых и угольных сланцах (по В.Н. Дахнову).

$$\rho_{\text{п.ср}} = \sqrt{\rho_{\perp} \cdot \rho_{\parallel}}$$

где  $\rho_{\text{п.ср}}$  – среднее удельное сопротивление анизотропной горной породы, Омм;  $\rho_{\perp}$  – удельное электрическое сопротивление, измеренное перпендикулярно напластованию, Омм;  $\rho_{\parallel}$  – удельное электрическое сопротивление, измеренное параллельно напластованию, Омм.

## Удельное электрическое сопротивление пачки, представленной чередованием тонких прослоев песчаника и глины

$$\frac{1}{\rho_{\text{вп.пач}}} = \frac{\chi_{\text{гл}}}{\rho_{\text{гл}}} + \frac{1 - \chi_{\text{гл}}}{\rho_{\text{вп}}} = \frac{\chi_{\text{гл}}}{\rho_{\text{гл}}} + \frac{1 - \chi_{\text{гл}}}{P_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{в}}}$$

$$\frac{1}{\rho_{\text{нп.пач}}} = \frac{\chi_{\text{гл}}}{\rho_{\text{гл}}} + \frac{1 - \chi_{\text{гл}} - \chi_{\text{пл}}}{\rho_{\text{нп}}} + \frac{\chi_{\text{пл}}}{\rho_{\text{пл}}}$$

$\rho_{\text{вп.пач}}$  – удельное электрическое сопротивление водонасыщенной пачки, Омм;  $\rho_{\text{нп.пач}}$  – удельное электрическое сопротивление нефтенасыщенной пачки, Омм;  $\chi_{\text{гл}}$  – коэффициент слоистой глинистости (доля глинистых прослоев в пачке), доли единицы;  $\rho_{\text{гл}}$  – удельное электрическое сопротивление глин, Омм;  $\rho_{\text{вп}}$ ,  $\rho_{\text{нп}}$  – удельное электрическое сопротивление водо- и нефтенасыщенных пород соответственно, Омм;  $P_{\text{п}}$  – параметр пористости;  $P_{\text{н}}$  – параметр насыщения;  $\rho_{\text{в}}$  – удельное электрическое сопротивление пластовой воды, Омм.

Удельное электрическое сопротивление пачки, представленной чередованием тонких прослоев песчаника, глины и плотных пород

$$\frac{1}{\rho_{\text{вп.пач}}} = \frac{\chi_{\text{гл}}}{\rho_{\text{гл}}} + \frac{1 - \chi_{\text{гл}} - \chi_{\text{пл}}}{\rho_{\text{вп}}} + \frac{\chi_{\text{пл}}}{\rho_{\text{пл}}}$$

$$\frac{1}{\rho_{\text{нп.пач}}} = \frac{\chi_{\text{гл}}}{\rho_{\text{гл}}} + \frac{1 - \chi_{\text{гл}} - \chi_{\text{пл}}}{\rho_{\text{нп}}} + \frac{\chi_{\text{пл}}}{\rho_{\text{пл}}}$$

$\rho_{\text{вп.пач}}$  – удельное электрическое сопротивление водонасыщенной пачки, Омм;  $\rho_{\text{нп.пач}}$  – удельное электрическое сопротивление нефтенасыщенной пачки, Омм;  $\chi_{\text{гл}}$  – коэффициент слоистой глинистости (доля глинистых прослоев в пачке), доли единицы;  $\chi_{\text{пл}}$  – для плотных прослоев в пачке, доли единицы;  $\rho_{\text{гл}}$  – удельное электрическое сопротивление глин, Омм;  $\rho_{\text{пл}}$  – удельное электрическое сопротивление плотных прослоев, Омм;  $\rho_{\text{вп}}$ ,  $\rho_{\text{нп}}$  – удельное электрическое сопротивление водо- и нефтенасыщенных пород соответственно, Омм.