



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_{Π}

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

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 $K_{\Pi.кав}$

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

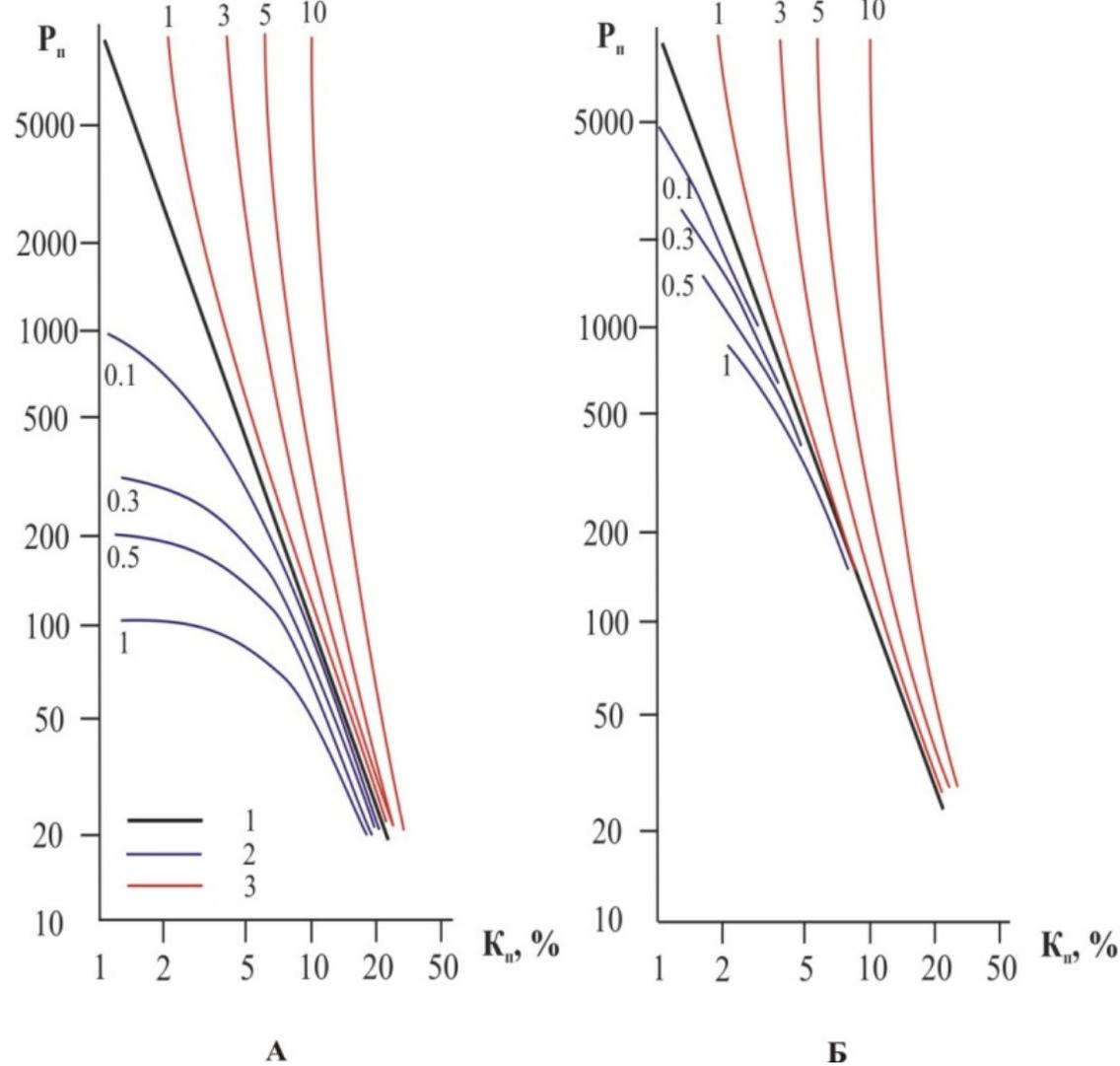
$$\rho_{\text{вп.т}} = P_{\text{п.т}} \cdot \rho_{\text{в}} = \frac{P_{\text{п.бл}} \cdot \rho_{\text{в}}}{A \cdot P_{\text{п.бл}} \cdot K_{\text{п.тр}} + 1}$$

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 $\rho_{вп.т} = \rho_{бл}$
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 $K_{п.тр}$ распределена поровну между двумя системами.
0.63	Все трещины образуют три взаимно перпендикулярные системы. Величина $K_{п.тр}$ распределена поровну между тремя системами. Хаотическая трещиноватость.

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



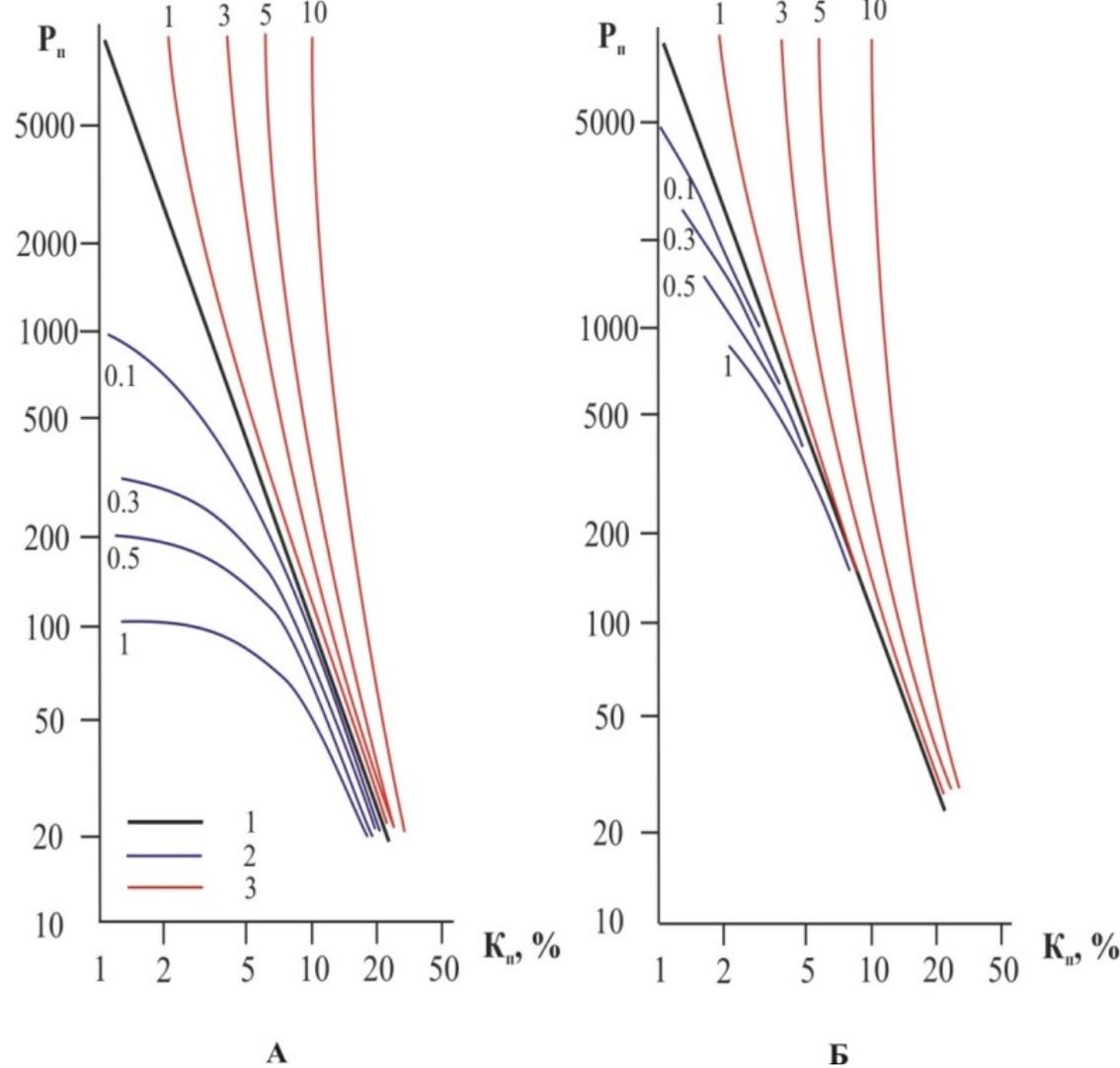
А – все поры заполнены пластовой водой;
Б – вторичные поры заполнены фильтратом бурового раствора $\rho_{\phi}=10\rho_{в}$, межзерновые поры – пластовой водой.
1 – зависимость $P_n=f(K_n)$ для межзерновых коллекторов;
2 – зависимость $P_n=f(K_n)$ для трещинных коллекторов;
3 – зависимость $P_n=f(K_n)$ 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 $\rho_{\phi}=10\rho_{в}$, 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

$$\frac{K_{п.кав}}{K_{п.тр}} < 2$$

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

$$\frac{K_{п.кав}}{K_{п.тр}} > 10$$

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

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

зависимость параметра пористости трещинно-кавернозной породы от ее пористости $P_{п.тк}$ мало отличается от зависимости $P_{п.тк} = f(K_{п.тк})$ 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 λ – коэффициент анизотропии; ρ_{\perp} – удельное электрическое сопротивление, измеренное перпендикулярно напластованию, Ом·м; ρ_{\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; ρ_{\perp} – удельное электрическое сопротивление, измеренное перпендикулярно напластованию, Омм; ρ_{\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.