

УДК 622.276:533

Влияние межзерновой пористости и трещинной пустотности на проницаемость

В.С. Жуков^{1*}, В.В. Моторыгин¹

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

* E-mail: V_Zhukov@vniigaz.gazprom.ru

Ключевые слова:

межзерновая пористость, трещинная пустотность, проницаемость, фильтрация флюидов, трещина, песчаник.

Тезисы. Проницаемость, определяющая возможность добычи нефти и газа, зависит от размеров и конфигурации порового пространства породы. Зачастую более пористые породы имеют и большую проницаемость. Но в связи со сложной структурой порового пространства нельзя полагаться на обязательно выраженную связь между проницаемостью и пористостью, и необходимо оценить влияние типа структуры порового пространства (межзерновая или трещинная) на проницаемость горных пород.

Рассмотрены используемые для межзернового типа пористости уравнения Козени – Кармана и Пуазейля, описывающие фильтрацию жидкости в трубках различных форм и сечений. При этом теоретически должна выполняться зависимость проницаемости от эффективной пористости, возведенной в 3-ю степень, т.е. при отсутствии остаточной воды проницаемость должна зависеть от значения пористости в кубе.

Проницаемость трещин оценивается из соотношения уравнений Букингема и Дарси при фильтрации порового флюида через трещину с очень малым раскрытием. При этом проницаемость трещины пропорциональна квадрату раскрытия трещины. Авторы определяли раскрытие трещины, заменяя все трещины одной пересекающей весь образец эффективной трещиной, объем которой равен суммарному объему всех имеющихся в образце трещин.

Для оценки межзерновой и трещинной проницаемости предложены уравнения, учитывающие результаты определения электрических параметров для учета извилистости каналов фильтрации и акустических параметров для расчета величины трещинной пустотности горных пород. На примере песчаников вендского и сеноманского возрастов показаны применимость предложенных уравнений для расчета межзерновой и трещинной проницаемостей и соответствие расчетных и фактических данных.

Результаты исследования образцов песчаника двух типов показали, что межзерновая пористость и трещинная пустотность по-разному влияют на их газопроницаемость. Установлено, что для обоих видов песчаника главную роль играет межзерновая проницаемость, а трещинная имеет второстепенное значение. Выявлено, что с ростом доли трещинной пустотности растет трещинная проницаемость, но при этом значительно быстрее снижаются межзерновая и общая проницаемости, что позволило сделать вывод о том, что выявленные авторами трещины не взаимосвязаны и не образуют единой сети фильтрации.

Как известно, свойство пород пропускать газы, жидкости и их смеси при наличии перепада их давления называется *проницаемостью* [1] и зависит от размеров и конфигурации порового пространства породы. Для хорошо отсортированного материала теоретически проницаемость не должна зависеть от пористости. Но в условиях реальных коллекторов более пористые породы имеют и большую проницаемость. «Проницаемость пористых сред, в том числе горных пород, зависит не только от пористости, но и от проточности, извилистости и главным образом от радиуса поровых каналов. Поэтому полагаться на обязательно выраженную связь между проницаемостью и пористостью особых оснований нет» [2, с. 128].

Межзерновая проницаемость. Теоретическая зависимость коэффициента проницаемости ($K_{пр}$) от эффективной пористости породы ($K_{п.эф}$), удельной поверхности и извилистости поровых каналов наиболее полно представлена формулой Козени – Кармана:

$$K_{пр} = \frac{K_{п.эф}^3}{f S_{ф}^2 T_r^2}, \quad (1)$$

где f – коэффициент, учитывающий форму поровых каналов (для трубок любых форм изменяется от 2 до 3, обычно $f = 2,5$); S_{ϕ} – удельная поверхность каналов фильтрации на единицу объема породы; $T_r = L_k/L$ – извилистость поровых каналов (L_k – среднестатистическая длина каналов, L – кратчайшее расстояние между началом и концом канала, или длина канала).

Это означает, что для межзернового типа пористости, когда используются уравнения Козени – Кармана и Пуазейля, описывающие фильтрацию жидкости в трубках различных форм и сечений, теоретически должна выполняться зависимость проницаемости от эффективной пористости в кубе. Для сухих образцов, т.е. при отсутствии остаточной воды, эффективная пористость будет равна открытой пористости горных пород и проницаемость должна зависеть от пористости в кубе.

Аналитически зависимость проницаемости оценивается из уравнений Пуазейля и Дарси. При этом идеальная пористая среда представляется в виде системы прямых трубок одинакового сечения длиной L , равной длине пористой среды, а в случае лабораторных исследований – длине образца. Проницаемость при этом будет зависеть от радиуса поровых (капиллярных) каналов (трубок).

Уравнение Пуазейля описывает объемную скорость (Q) течения жидкости через прямую трубку (капилляр):

$$Q = \frac{nr^4 F \Delta P}{8\mu L}, \quad (2)$$

где n – число пор на единицу площади фильтрации; F – площадь фильтрации; μ – вязкость фильтрующейся жидкости; ΔP – перепад давления.

Подставляя в формулу (2) выражение для коэффициента пористости K_n

$$K_n = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{обр}}} = \frac{nFr^2L}{FL} = nr^2, \quad (3)$$

где $V_{\text{пор}}$ – объем порового пространства; $V_{\text{обр}}$ – объем образца; r – радиус поровых (капиллярных) каналов, м, получим уравнение Пуазейля в виде

$$Q = F \frac{K_n r^2 \Delta P}{8\mu L}. \quad (4)$$

Уравнение Дарси можно записать в виде

$$Q = FK_{\text{пр}} \frac{\Delta P}{\mu L} \quad (5)$$

и, приравняв правые части уравнений (4) и (5), получить взаимосвязь проницаемости и пористости для идеальной пористой среды

$$K_{\text{пр}} = \frac{K_n r^2}{8}$$

или, выражая r в сантиметрах,

$$K_{\text{пр.мз}} = 12,5 \cdot 10^6 \cdot r^2 K_n, \quad (6)$$

где $K_{\text{пр.мз}}$ – межзерновая проницаемость.

Уравнение (6) отражает зависимость межзерновой проницаемости от квадрата радиуса одного эквивалентного канала фильтрации идеальной межзерновой пористости. Если проницаемость выразить в микрометрах в квадрате, то радиус эквивалентного порового канала $R_{\text{эф}}$ в микрометрах будет определяться выражением

$$R_{\text{эф}} = 2,86 \sqrt{\frac{K_{\text{пр}}}{K_n}}. \quad (7)$$

Ф.И. Котяхов [2] предложил использовать для реальных условий эмпирическое уравнение

$$R_{\text{эф}} = \frac{2}{7 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{K_{\text{пр}}^{\phi}}{K_n}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{эф}}$ – эффективный радиус пор; ϕ – структурный коэффициент, описывающий извилистость порового пространства. Значение ϕ можно получить, используя результаты измерений электрического сопротивления горных пород по формуле

$$\phi = \sqrt{K_n P_n}, \quad (9)$$

где $P_n = \frac{УЭС_{\text{внп}}}{УЭС_{\text{H}_2\text{O}}}$ – параметр пористости, или

относительное сопротивление водонасыщенной породы ($УЭС_{\text{внп}}$ – удельное электрическое сопротивление породы, насыщенной пластовой водой; $УЭС_{\text{H}_2\text{O}}$ – удельное электрическое сопротивление воды, насыщающей горную породу).

Добавим коэффициент f , учитывающий форму каналов фильтрации, и, заменяя радиус пор r на его эффективное значение $R_{\text{эф}}$, получим

$$K_{\text{пр.мз}} = 12,5 \cdot 10^6 \cdot f \cdot R_{\text{эф}}^2. \quad (10)$$

В качестве коэффициента f в дальнейшем будем использовать или среднее значение извилистости каналов фильтрации, рассчитанное по формуле (9), или эмпирически подобранное значение. Формула (10) позволяет оценить

межзерновую проницаемость с использованием данных об удельном электрическом сопротивлении образца и сравнить ее с фактически полученными значениями проницаемости (см. далее рис. 3–6).

Трещинная проницаемость ($K_{\text{тр.тр}}$). Оценка проницаемости через трещины выполняется исходя из соотношения уравнений Букингема и Дарси. Так, потери давления ΔP при фильтрации жидкости через трещину с очень малым раскрытием h описываются уравнением Букингема:

$$\Delta P = \frac{12\mu\nu L}{h^2}, \quad (11)$$

где ν – линейная скорость фильтрации.

Подставляя это выражение в уравнение Дарси (5), получим $K_{\text{тр.тр}} = h^2/12$ или, учитывая, что h измеряется в сантиметрах, а проницаемость $K_{\text{тр.тр}}$ – в миллидарси,

$$K_{\text{тр.тр}} = 84,4 \cdot 10^5 \cdot h^2. \quad (12)$$

Следует отметить, что уравнение (12) справедливо только когда трещина полностью открыта и свободна, т.е. нет остаточной водонасыщенности. Проницаемость при этом будет иметь малые значения; так, расчет по уравнению (12) дает значения 0,844 мД для трещины с раскрытием 0,1 мм и 84,4 мД при $h = 1$ мм. С учетом сложного строения трещины и наличия в ней остаточной воды Дж. Тиабом и Эрлом Ч. Доналдсоном [3] уравнение (12) предлагается в виде

$$K_{\text{тр.тр}} = 8,444 \cdot 10^6 \cdot (1 - S_{\text{в.о}}) K_{\text{п.тр}} \cdot h^2, \quad (13)$$

где $S_{\text{в.о}}$ – остаточная водонасыщенность, при лабораторных исследованиях проницаемости сухих образцов керна она обычно равна нулю; $K_{\text{п.тр}}$ – трещинная пустотность, %.

В.Н. Кобранова [1] считает, что для расчета коэффициента трещинной проницаемости $K_{\text{тр.тр}}$ сухих образцов может быть использована формула, не учитывающая $S_{\text{в.о}}$:

$$K_{\text{тр.тр}} = 8,45 \cdot 10^6 \cdot K_{\text{п.тр}} \cdot h^2. \quad (14)$$

Авторами настоящей статьи $K_{\text{п.тр}}$ определялась по данным измерений скорости упругих волн, тогда как В.Н. Кобранова [1] предлагала определять $K_{\text{п.тр}}$ по шлифам.

Раскрытие трещины авторы определяли, заменяя все трещины одной пересекающей весь образец эффективной трещиной с раскрытием h и длиной $d/2$, равной половине диаметра образца. Объем эффективной трещины равен суммарному объему всех имеющих в образце трещин:

$$K_{\text{п.тр}} = \frac{V_{\text{тр}}}{V_{\text{обр}}} = \frac{hL \frac{d}{2}}{2\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 L},$$

где $V_{\text{тр}}$ и $V_{\text{обр}}$ – объем трещин и объем образца соответственно; L – длина образца. Тогда

$$h = K_{\text{п.тр}} \frac{\pi d}{2}. \quad (15)$$

Обсуждение результатов экспериментальных исследований. Для выявления влияния различных типов пористости авторами сопоставлены данные о фильтрационно-емкостных свойствах пород-коллекторов двух типов: с наличием трещинной пустотности (Чаяндинское месторождение, рис. 1) и с преобладанием межзерновой пористости (Семаковского месторождение, рис. 2). В отношении исследованной коллекции 19 образцов вендского возраста из Чаяндинского месторождения (см. рис. 1) ни линейная, ни степенная аппроксимации зависимости проницаемости от пористости не обладают достаточной достоверностью по причине сложного характера порового пространства [4]. Наилучшим образом эта зависимость описывается экспоненциальным уравнением (см. рис. 1), но, к сожалению, достоверность аппроксимации невысокая ($R^2 = 0,14$ при эффективном давлении $P_{\text{эф}} = 1,0$ МПа и $R^2 = 0,61$ при $P_{\text{эф}} = 37$ МПа).

В качестве пород, наиболее точно отражающих особенности межзерновой пористости, авторами исследован керн одной из скважин Семаковского месторождения, пробуренной на сеноманские отложения, и получена степенная зависимость проницаемости от пористости (см. рис. 2). Для сеноманских отложений Семаковского месторождения получены зависимости между газопроницаемостью и пористостью с более высокой достоверностью ($R^2 = 0,86 \dots 0,92$).

И в первом случае, когда исследовались образцы с наличием трещинной пустотности (до 1,1 %) в образцах горных пород Чаяндинского месторождения [4], и во втором

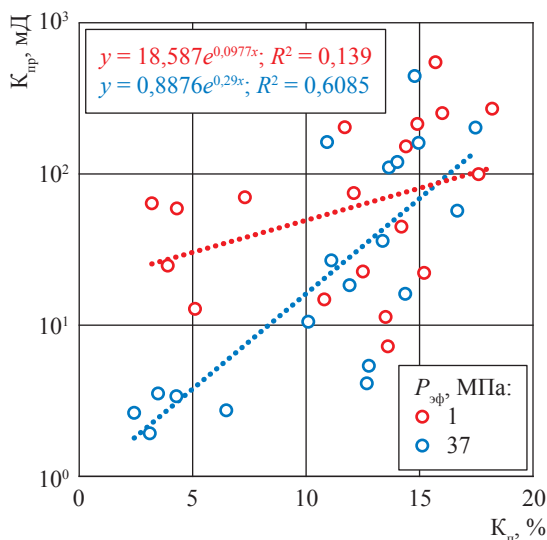


Рис. 1. Зависимость газопрооницаемости коллекции образцов вендских отложений Чайндинского месторождения от пористости

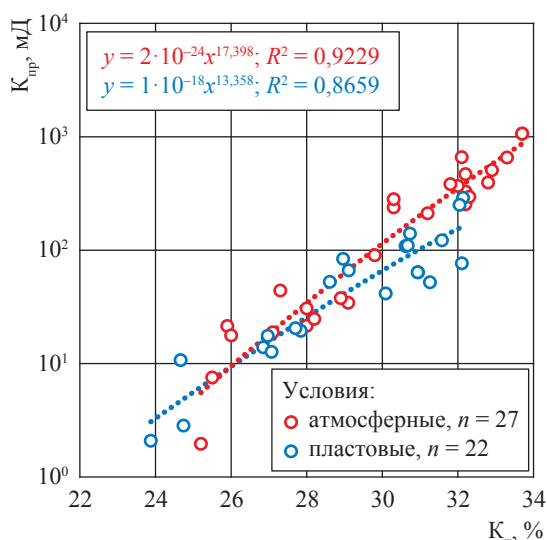


Рис. 2. Зависимость газопрооницаемости образцов сеноманских отложений Семаковского месторождения от пористости: n – количество образцов

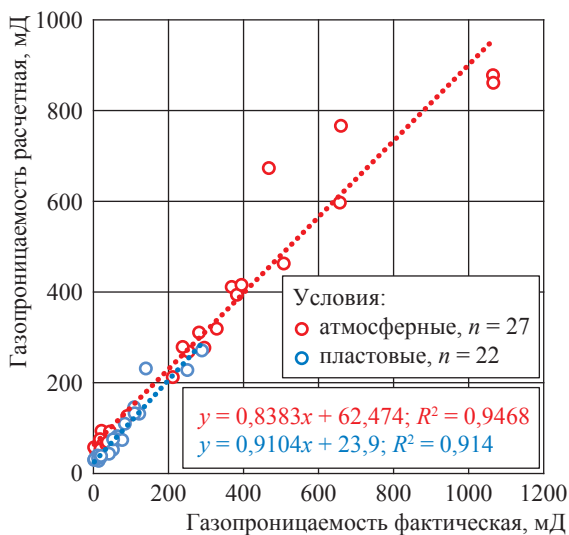


Рис. 3. Сопоставление расчетной и фактической газопрооницаемости образцов сеноманских отложений

случае, когда исследовались сеноманские отложения Семаковского месторождения с минимальной трещинной пустотностью, фактические зависимости проницаемости от пористости не совпадают с теоретическими предположениями (1) и (10) для межзерновой среды.

В связи с этим для каждого образца по формулам (10) и (14) были рассчитаны суммы значений $K_{пр.мз}$ и $K_{пр.тр}$ и сопоставлены с фактическими данными (рис. 3). Для расчета $K_{пр.мз}$ коэффициент f принимался как среднее

значение извилистости каналов фильтрации, равное 1,87 в атмосферных условиях и 1,95 в пластовых. Рис. 3 демонстрирует хорошее согласие расчетных и фактических данных для горных пород с преобладающей межзерновой пористостью, каковыми являются сеноманские отложения.

На рис. 4 видно, что главную роль играет $K_{пр.мз}$, а $K_{пр.тр}$ в этом случае не превышает 26 мД, или 25 % от общей проницаемости. И только для двух образцов, имеющих трещинную пустотность $K_{п.тр} > 0,5 \%$ (см. стрелку), $K_{пр.тр}$ достигает 80 мД, или 85 % общей проницаемости этих образцов (рис. 5, см. также рис. 4). Следует отметить, что указанные два образца имели открытую пористость 25...26 %, и доля трещинной пустотности составляла более 2,0 %, а также низкую проницаемость 2,1...2,8 мД, но наибольшую извилистость порового пространства f . С ростом $K_{п.тр}$ растет $K_{пр.тр}$, но значительно быстрее снижаются $K_{пр.мз}$ и общая проницаемость $K_{пр}$, что позволяет сделать вывод о том, что трещины в данном случае не взаимосвязаны, не образуют единой сети фильтрации и, возможно, частично заполнены глинистыми минералами.

Применимость уравнений (10) и (14) для расчета $K_{пр.мз}$ и $K_{пр.тр}$ рассмотрим также на примере результатов исследования ядра Чайндинского месторождения. Так, $K_{пр.мз}$ рассчитана по уравнению (10) с подбором эмпирического значения $f = 7,5$; $K_{пр.тр}$ рассчитана

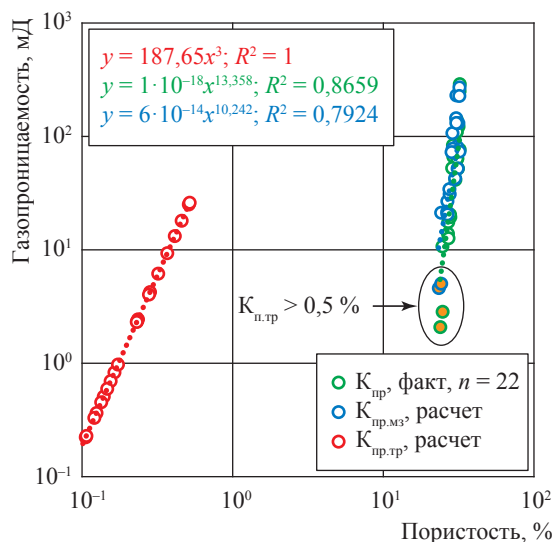


Рис. 4. Зависимость межзерновой и трещинной компонент проницаемости и фактической газопроницаемости от общей пористости и ее компонент для образцов сеноманского возраста Семаковского месторождения при моделировании пластовых условий

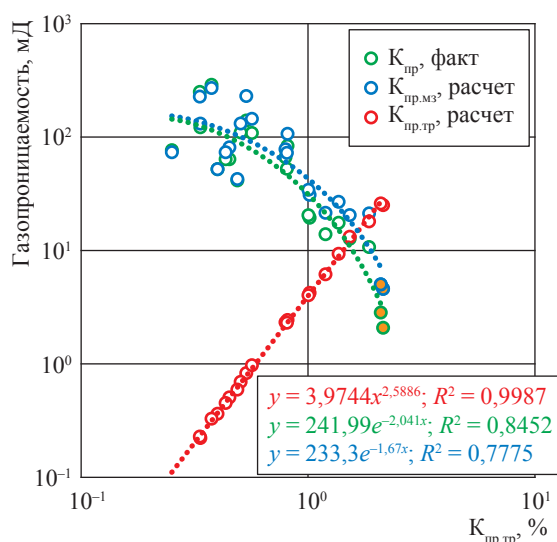


Рис. 5. Влияние доли трещинной пустотности на межзерновую и трещинную расчетные компоненты проницаемости и фактическую газопроницаемость образцов сеноманского возраста Семаковского месторождения при моделировании пластовых условий

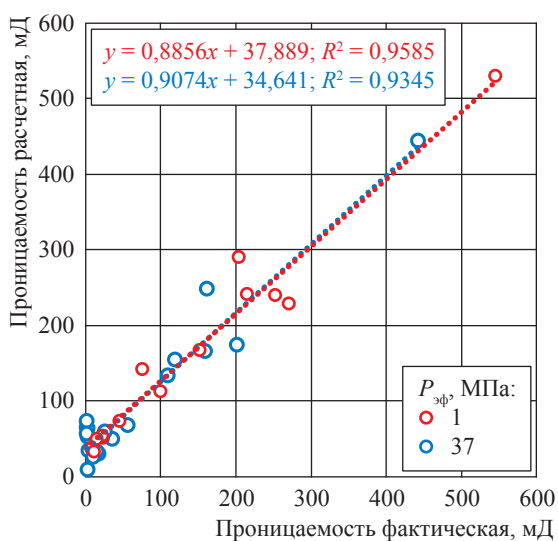


Рис. 6. Сопоставление расчетной и фактической газопроницаемости образцов песчаника вендского возраста Чайядинского месторождения

по уравнению (14) с использованием данных о $K_{п.тр}$ и h для условий, моделирующих пластовые. Сопоставление значений проницаемости, полученных суммированием $K_{пр.мз}$ и $K_{пр.тр}$, рассчитанных по формулам (10) и (14), и фактических данных для Чайядинского месторождения

приведено на рис. 6 и показывает хорошее соответствие между ними.

Как было установлено ранее [4], исследованные авторами образцы горных пород вендского возраста имели существенную долю трещинной пустотности, что дает возможность оценить ее влияние на проницаемость, рассматривая обе компоненты (межзерновую и трещинную) как пористости, так и проницаемости (см. рис. 5). Следует отметить значительное завышение значения $K_{пр.мз}$ для образцов со значительной трещинной пористостью ($K_{п.тр} > 0,5\%$). Доля трещинной пустотности в них составляет от 9,5 до 21 % при среднем значении $K_{п.тр} = 5,9\%$. Завышение значения $K_{пр.мз}$ обусловлено, очевидно, тем, что при расчете эффективного радиуса межзерновых каналов фильтрации $R_{эф}$ по формуле (7), а затем и при расчете $K_{пр.мз}$ по формуле (10) использовалось значение общей (суммарной) проницаемости.

Рис. 7 и 8 показывают, что и для песчаников вендского возраста главную роль играет межзерновая проницаемость, а $K_{пр.тр}$ в этом случае не превышает 25 мД, или 33 % от $K_{пр}$. И только для пяти образцов, имеющих $K_{п.тр} > 0,5\%$, $K_{пр.тр} = 27...44$ мД, или 42...80 % $K_{пр}$ этих образцов. Следует отметить, что это образцы с наименьшими значениями общей пористости

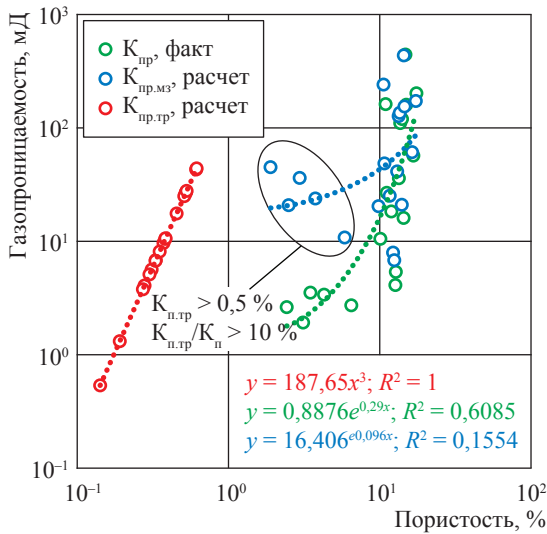


Рис. 7. Сопоставление межзерновой и трещинной расчетных компонент проницаемости и фактической газопроницаемости образцов вендского возраста Чаяндинского месторождения при моделировании пластовых условий $P_{\text{эф}} = 37$ МПа

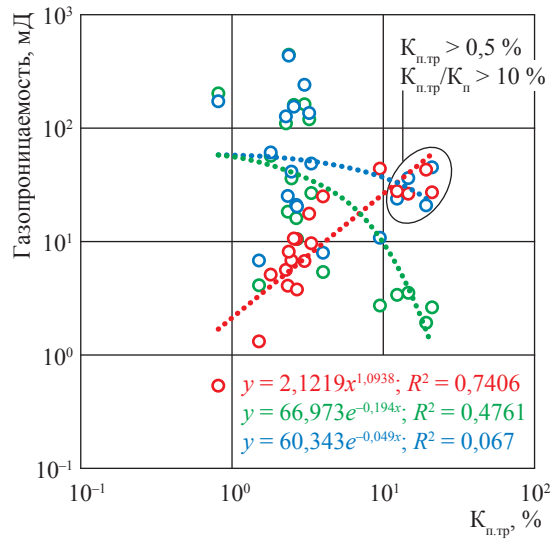


Рис. 8. Влияние доли трещинной пустотности на межзерновую и трещинную расчетные компоненты проницаемости и фактическую газопроницаемость образцов вендского возраста Чаяндинского месторождения при моделировании пластовых условий $P_{\text{эф}} = 37$ МПа: см. экспликацию к рис. 7

$K_{\text{п}} = 2,4 \dots 6,5$ % и $K_{\text{п,тр}}/K_{\text{п}} = 10 \dots 21$ % имели низкую проницаемость $K_{\text{пр}} = 1,9 \dots 3,5$ мД, но наибольшие значения извилистости порового пространства. Видно (см. рис. 7), что с ростом $K_{\text{п,тр}}$ растет $K_{\text{пр,тр}}$, но значительно быстрее снижаются $K_{\text{пр,мз}}$ и $K_{\text{пр}}$, что позволяет сделать вывод о том, что выявленные авторами трещины в данном случае не взаимосвязаны, не образуют единой сети фильтрации и, возможно, частично заполнены глинистыми минералами.

Хорошая сходимость фактической проницаемости и расчетной как суммы трещинной и межзерновой проницаемостей позволяет считать изложенный подход к оценке межзерновой и трещинной проницаемости, подразумевающий использование уравнений (10) и (14), приемлемым для практических

целей. Предложены уравнения (10) и (14), учитывающие результаты определения и электрических, и акустических параметров горных пород, и показана их применимость для оценки межзерновой и трещинной проницаемости. На примере коллекторов двух различных типов – песчаники вендского и сеноманского возрастов – установлено, что главную роль играет межзерновая проницаемость, а трещинная проницаемость имеет второстепенное значение; показаны отличия в характере влияния межзерновой пористости и трещинной пустотности на газопроницаемость. Выявлено, что с ростом доли трещинной пустотности растет трещинная проницаемость, но значительно быстрее снижаются межзерновая и общая проницаемость, что позволило сделать вывод о том, что выявленные авторами трещины в данном случае не взаимосвязаны и не образуют единой сети фильтрации.

Список литературы

1. Кобранова В.Н. Петрофизика: учеб. для вузов / В.Н. Кобранова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 392 с.
2. Котяхов Ф.И. Физика нефтяных и газовых коллекторов / Ф.И. Котяхов. – М.: Недра, 1977. – 287 с.
3. Тиаб Дж. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов / Дж. Тиаб, Эрл Ч. Доналдсон; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Премиум Инжиниринг, 2011. – 868 с.
4. Жуков В.С. Влияние различных видов пористости на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов (на примере Чаиндинского месторождения) / В.С. Жуков, В.В. Моторыгин // Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих регионов России. – М.: Газпром ВНИИГАЗ. – 2016. – №1 (25). – С. 63–67.

Impact of intergranular porosity and cracking cavitation to permeability

V.S. Zhukov^{1*}, V.V. Motorygin¹

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

* E-mail: V_Zhukov@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. Permeability, which determines possibility to recover oil and gas, depends on dimensions and configuration of a rock's pore space. Often, the higher porosity of a rock, the higher its permeability. But due to complexity of the pore space one can't rely on the surely expressed connection between permeability and porosity, and must evaluate how a type of the pore-space structure (either intergranular, or cracking) influences the permeability of rocks.

The article discusses Kozeny–Carman and Poiseuille equations, which deal with the intergranular porosity and describe filtration of a liquid within the tubes of various forms and cuts. Herewith, in theory the permeability should depend on the cubed value of effective porosity, i.e. in absence of the residual water the permeability must depend on the cubed porosity.

Authors have estimated the permeability of cracks grounding on relations of Buckingham and Darcy equations at in-situ fluid filtration through a narrow crack. Herewith, the permeability of crack is in proportion to a squared width of the crack. Authors have determined width of the cracks substituting all the cracks in a core sample by one crack of equivalent volume.

To estimate intergranular and cracking permeability values, the equations considering electric parameters have been suggested in order to take into account acoustics and tortuosity of filtration channels and to calculate cracking cavitation of rocks. In the case of Vendurian and Cenomanian sandstones, authors have shown applicability of these equations for calculation of intergranular and cracking permeability values, as well as correspondence of calculations and measurements.

Testing the samples of two distinct sandstones has demonstrated that intergranular porosity and cracking cavitation would differently affect the gas permeability of core samples. Authors have discovered that the intergranular porosity have dominated for both sandstones, and the cracking cavitation has been secondary. When percentage of cracking cavitation grows, the cracking permeability will grow, but herewith intergranular permeability and general permeability will decrease quicker. It have enabled authors to conclude that the cracks they have discovered have not intersected and have not formed a united filtration net.

Keywords: intergranular porosity, cracking cavitation, permeability, filtration of fluids, crack, sandstone.

References

1. KOBRAKOVA, V.N. *Petrophysics* [Петрофизика]: textbook for universities. 2nd ed., revised and updated. Moscow: Nedra, 1986. (Russ.).
2. KOTYAKHOV, F.I. *Physics of oil and gas reservoirs* [Физика нефтяных и газовых коллекторов]. Moscow: Nedra, 1977. (Russ.).
3. TIAB, D., E.C. DONALDSON. *Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties* [Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов]. Translated from English. 2nd ed. Moscow: Premium Inzhiniring, 2011. (Russ.).
4. ZHUKOV, V.S., V.V. MOTORYGIN. Influence of different types of porosity on filtration-capacitive properties of reservoirs (by the example of the Chayanda field) [Влияние различных видов пористости на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов (на примере Чаиндинского месторождения)]. *Vesti Gazovoy Nauki*: collected scientific technical papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2016, no. 1 (25): Issues for resource provision of gas-extractive regions of Russia, pp. 63–67. ISSN 2306-8949. (Russ.).