

УДК 550.8.056:552.12

В.С. Жуков, В.В. Моторыгин

Влияние различных видов пористости на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов (на примере Чаюдинского месторождения)

Как известно, одним из основных параметров, которые необходимо определять при подсчете запасов или подготовке проекта разработки месторождения углеводородов, является пористость горных пород. Межзерновые поры типичны для терригенных коллекторов, трещинные пустоты – для терригенных пород, подвергшихся значительному метаморфизму, каверны и пустоты выщелачивания характерны для большинства карбонатных пород [1]. Доли объема породы, соответствующие межзерновым порам, трещинам и кавернам, называются коэффициентами межзерновой, трещинной и каверновой пористости. Далее в статье на примере коллекторов одного из месторождений Восточной Сибири исследуется характер влияния различных видов пористости и их соотношений на физические свойства горных пород.

При подсчете запасов и подготовке проектов разработки месторождений нефти и газа одной из наиболее актуальных проблем является определение открытой пористости и, в частности, оценка доли трещинной пористости. Программы гидродинамического моделирования процессов разработки месторождений, такие как Eclipse и VIP Landmark, предусматривают наличие данных о трещинной пористости в рамках двойной пористости. В работах [2, 3] рассмотрен методологический подход к определению величины трещинной пористости горных пород по данным о скоростях продольной упругой волны. Этот же подход применен и в настоящей статье для оценки величины трещинной пористости и соотношения трещинной и общей пористости коллекторов.

Авторами исследованы образцы песчаника вендского возраста одного из месторождений Восточной Сибири, имевшие в атмосферных условиях открытую пористость 3,2–18,3 %. На образцах проводились определения пористости, проницаемости по газу, скорости распространения упругих продольных и поперечных волн и удельного электрического сопротивления при моделировании пластовых условий. В работе [4] показано, что исследуемые породы имеют двойную пористость – межзерновую и трещинную. Трещинная пористость находится в пределах 0–0,94 %, составляя в среднем 0,5 % в условиях, моделирующих пластовые. Межзерновая (гранулярная) пористость в пластовых условиях оценивается в среднем величиной 10,6 % с диапазоном изменений 2,0–17,3 %. Отношение трещинной пористости к общей пористости, или доля трещинной пористости в общей пористости, составляет в среднем 5,81 %, достигая максимальной величины 21 %. Естественно, что при равных значениях трещинной пористости ее доля в общей пористости будет больше для малых величин общей пористости (рис. 1). Причем параметры трещинной пористости, выявляемой при таком подходе, диктуются условиями проведения исследований. Длина трещины не может превышать половины длины образца, иначе образец неминуемо разрушится. Отношение раскрытия трещины к ее длине обычно составляет величину не более 0,001. Характерный размер исследуемых образцов составлял 30 мм. Таким образом, оценка максимального раскрытия выявляемых по этой методике трещин не превышает 15 мкм, а максимальная длина трещин составляет не более 15 мм.

Наиболее важным параметром для планирования разработки месторождений является коэффициент проницаемости. По результатам измерений проницаемости по газу при моделировании пластовых условий на 19 образцах наибольшая

Ключевые слова:
пористость,
проницаемость
по газу,
межзерновая
пористость,
трещинная
пористость,
удельное
электрическое
сопротивление,
пластовые условия.

Keywords:
porosity,
gas permeability,
intergranular
porosity,
fracture porosity,
specific electric
resistance,
stratal conditions.

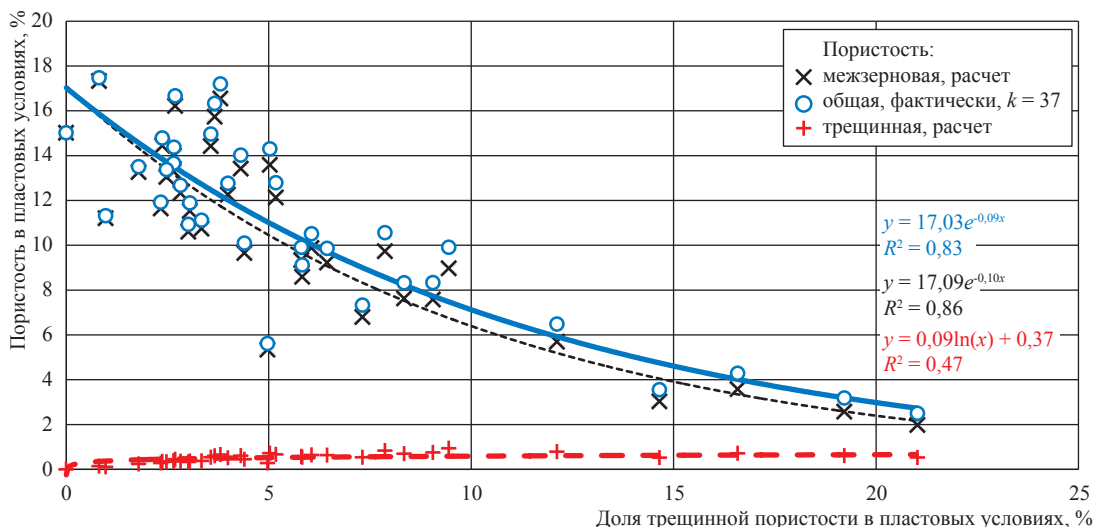


Рис. 1. Связь соотношения трещинной и общей пористости (доли трещинной пористости) с величинами общей и межзерновой пористости исследованных образцов:
 k – количество исследованных образцов

достоверность аппроксимации ($R^2 = 0,61$) получена для экспоненциальной зависимости (1) от общей пористости:

$$K_{np} = 0,87e^{29,12K_{n,общ}}, \quad (1)$$

где K_{np} – коэффициент проницаемости по газу, мД; $K_{n,общ}$ – коэффициент общей открытой пористости, д.ед.

В работе [5] приводится уравнение (2) для расчета проницаемости трещинного коллектора:

$$K_{np,тр} = 8,44 \cdot 10^{-4} w_f K_{n,тр}, \quad (2)$$

где $K_{np,тр}$ – коэффициент проницаемости по газу трещинного коллектора; w_f – ширина или просвет (раскрытие трещины), мкм; $K_{n,тр}$ – коэффициент трещинной пористости, %.

Там же [5] приводится и уравнение (3) для расчета просвета или раскрытия трещин:

$$w_f = 10^6 \rho_e L / n \rho_{вн,мп} D, \quad (3)$$

где ρ_e – удельное электрическое сопротивление жидкости, насыщающей горную породу; $\rho_{вн,мп}$ – удельное электрическое сопротивление водонасыщенной горной породы с трещинами; n – число трещин; L и D – длина и диаметр образца горной породы соответственно, мм.

Заменяя в уравнении (3) n трещин одной, получим просвет этой эквивалентной трещины. Для исследованных цилиндрических об-

разцов ($L = D = 30$ мм) уравнение (3) упрости-
 тся до выражения (4):

$$w_f = 10^6 \rho_e / \rho_{вн,мп}. \quad (4)$$

Тогда с учетом (4) выражение (2) примет вид:

$$K_{np,тр} = 8,44 \cdot 10^2 \rho_e / \rho_{вн,мп} K_{n,тр}. \quad (5)$$

Если исходить из предположения о наличии двух параллельных каналов фильтрации – между зернами и по трещинам, то общая проницаемость будет равна сумме проницаемостей по этим каналам. Зависимости проницаемости по газу от пористости (межзерновой, общей и трещинной) приведены на рис. 2.

Согласно графикам на рис. 2 с ростом межзерновой и общей пористости растет и проницаемость по газу. Надежной статистической зависимости проницаемости от величины трещинной пористости не выявлено. Проницаемость по газу через трещины достигает максимальной величины 5 мД.

Зависимость проницаемости от соотношения трещинной и общей пористости выявлялась графическим способом (рис. 3). На рис. 3 показано, что для данной коллекции образцов горных пород общая проницаемость по газу близка к проницаемости межзерновой пористости вне зависимости от соотношения трещинной и общей пористости. Видно только,

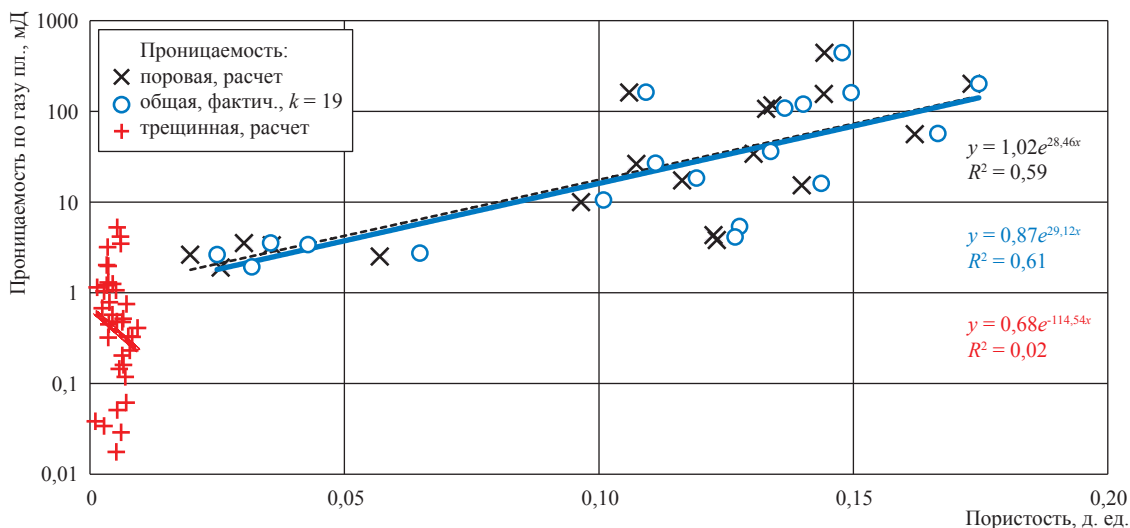


Рис. 2. Зависимости проницаемости по газу от пористости для образцов горных пород, исследованных при моделировании пластовых условий

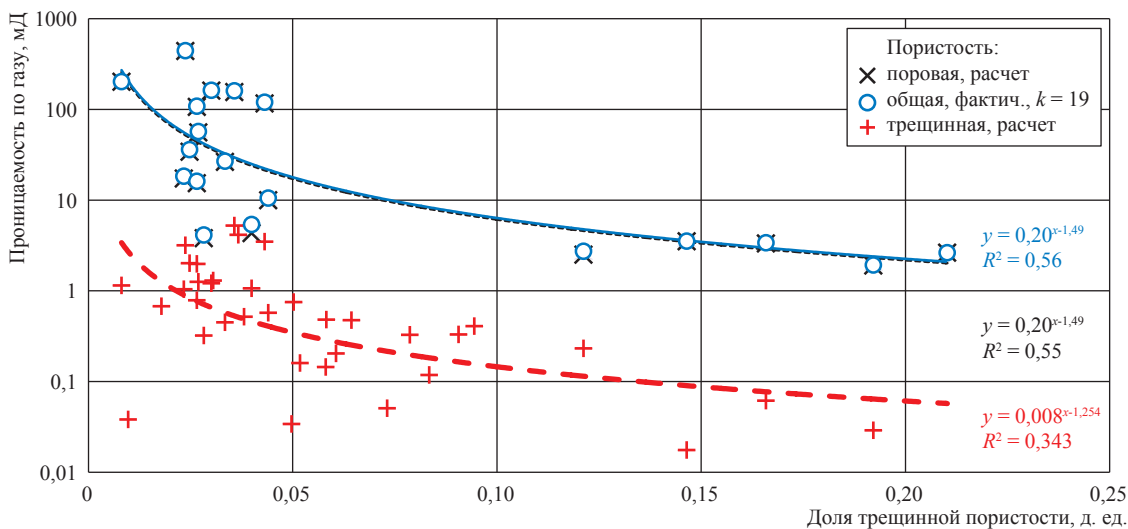


Рис. 3. Зависимости проницаемости исследованных образцов горных пород по газу от соотношения их трещинной и общей пористости

что с ростом этого соотношения проницаемость по газу снижается. Обусловлен этот процесс тем, что соотношение трещинной и общей пористости растет с уменьшением общей пористости (см. рис. 1). А снижение общей пористости сопровождается снижением проницаемости. Величина трещинной пористости исследованных образцов изменяется от 0 до 0,91 % (абсолютных), составляя в среднем 0,5 %, в то время как общая пористость составляет в среднем 11,1 % (абсолютных), изменяясь в диапазоне 2,5–17,5 %. Естественно, доля трещинной пористости будет расти при малых величинах общей пористости.

Согласно рис. 2 и 3 теснота связи между проницаемостью и разными видами пористости (общей, межзерновой и трещинной) и соотношением трещинной и общей пористости невысока (достоверность аппроксимации R^2 не превышает 0,61, а коэффициент корреляции r не превышает 0,5). Это послужило мотивом для поиска статистически более достоверных возможностей оценки проницаемости с использованием физических свойств горных пород, определенных при моделировании пластовых условий.

Так, с физической точки зрения, электропроводность и проницаемость являются

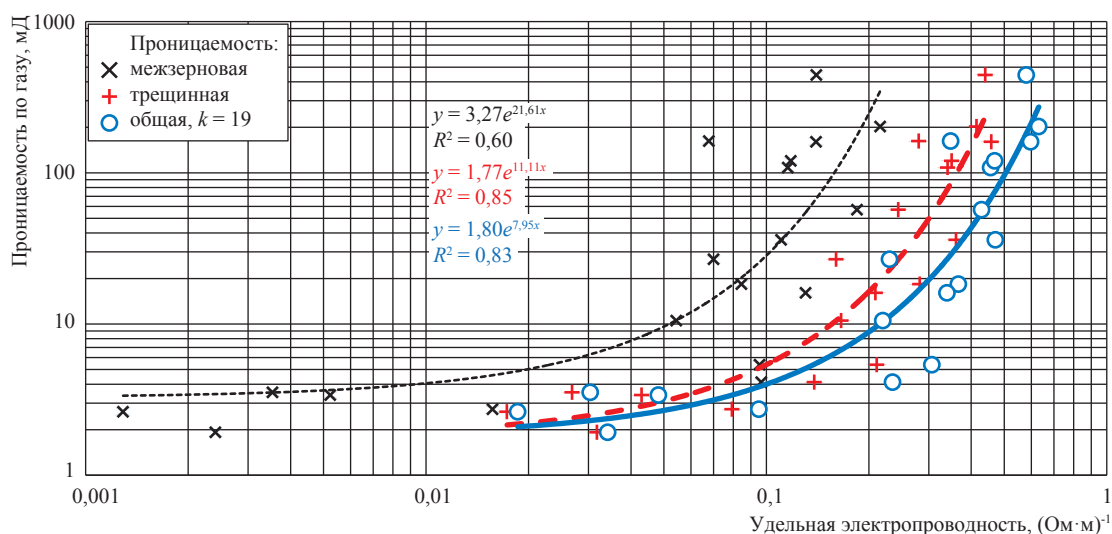


Рис. 4. Зависимости проницаемости по газу от общей удельной электропроводности и ее межзерновой и трещинной компонент для исследованных образцов горных пород

наиболее близкими параметрами для горной породы. Проницаемость выражает способность породы пропускать сквозь себя газ или жидкость, а электропроводность отражает ее способность пропускать электрический ток. Достоверность аппроксимации R^2 зависимости между проницаемостью по газу и общей удельной электропроводностью (рис. 4) составляет 0,83, а коэффициент корреляции $r = 0,69$.

Это позволяет вполне удовлетворительно оценить проницаемость по газу, используя эмпирические зависимости (6)–(8):

$$K_{пр} = 1,80e^{7,95 \cdot 1/\rho_{эл}} \quad (R^2 = 0,83; r = 0,69), \quad (6)$$

$$K_{пр,тр} = 1,77e^{11,11 \cdot 1/\rho_{эл,тр}} \quad (R^2 = 0,85; r = 0,73), \quad (7)$$

$$K_{пр,мз} = 3,27e^{21,61 \cdot 1/\rho_{эл,мз}} \quad (R^2 = 0,60; r = 0,54), \quad (8)$$

где $K_{пр,мз}$ – коэффициент проницаемости по газу межзерновых пор коллектора; $\rho_{эл,мз}$ – удельное электрическое сопротивление межзерновых пор водонасыщенной горной породы. Причем

статистический анализ свидетельствует о более высокой достоверности ($R^2 = 0,85$) и тесной ($r = 0,73$) связи проницаемости и удельной электропроводности по трещинам.

Таким образом, показано, что для исследованной коллекции образцов горных пород общая проницаемость по газу близка к проницаемости, обусловленной межзерновой пористостью. Но с ростом доли трещинной пористости в общей пористости проницаемость по газу снижается.

Получена эмпирическая зависимость между проницаемостью по газу и удельной электропроводностью, которая позволяет вполне удовлетворительно оценить проницаемость по газу (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,83$, а коэффициент корреляции $r = 0,69$).

Оценено влияние трещинной и межзерновой пористости на такие фильтрационно-емкостные свойства горных пород, как общая пористость и проницаемость по газу, которые зачастую используются при подсчете запасов и подготовке проектов разработки месторождений.

Список литературы

1. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / под ред. В.И. Петерсилье, В.И. Пороскуна, Г.Г. Яценко. – М.: ВНИГНИ; Тверь: Тверьгеофизика, 2003. – 259 с.
2. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн / В.С. Жуков // Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – № 1 (9). – С. 148–152.
3. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов Оренбургского месторождения по данным о скорости распространения продольной волны / В.С. Жуков, О.В. Иселидзе // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. Ч. 1. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. – № 1 (6). – С. 175–182.
4. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по данным о скорости распространения продольной волны на примере одного из месторождений Восточной Сибири / В.С. Жуков, О.В. Иселидзе // Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – № 1 (9). – С. 153–157.
5. Тиаб Дж. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов: пер. с англ. / Дж. Тиаб, Эрл Ч. Доналдсон. – 2-е изд. – М.: Премиум инжиниринг, 2011. – 866 с.



**VI Международная
научно-техническая конференция**

**ОСВОЕНИЕ РЕСУРСОВ НЕФТИ
И ГАЗА РОССИЙСКОГО ШЕЛЬФА:
АРКТИКА И ДАЛЬНИЙ ВОСТОК**

**25–26 октября 2016 г.
Москва, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»**



**The VI International Conference
Russian Offshore Oil and Gas Development:
Arctic and Far East**

**October 25–26, 2016,
Moscow, Gazprom VNIIGAZ**

vniigaz.gazprom.ru