

УДК 550.8.05

Изменения структуры порового пространства коллекторов дагинского горизонта при моделировании пластовых условий

В.С. Жуков^{1*}, Ю.М. Чуриков¹, 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: пористость, пластовые условия, скорость распространения продольной волны, межзерновая пористость, трещинная пористость.

Тезисы. В работе исследуется структура порового пространства коллекторов и ее изменения при переходе от атмосферных к пластовым условиям на примере коллекторов дагинского горизонта миоценового возраста шельфа Сахалина.

Программы гидродинамического моделирования процессов разработки месторождений предусматривают наличие данных о трещинной пористости, представляя общую пористость как сумму двух компонент – межзерновой и трещинной емкости. Исследованы образцы коллекторов, представленные средне- и мелкозернистыми алевритистыми песчаниками и алевролитами песчанистыми и глинистыми, имевшими открытую пористость в атмосферных условиях 2,9–28,5 абс. %. Предполагалось, что эти относительно молодые породы пластичны и не содержат трещин. Результаты литолого-минералогических исследований выявили широкое наличие микротрещин по плоскостям спайности и границам зерен. На коллекции из 236 образцов проведены определения открытой пористости, скорости распространения упругих продольных волн в атмосферных условиях и при моделировании пластовых условий.

Коэффициенты трещинной и межзерновой пористости образцов горных пород определялись по данным об общей пористости и скорости распространения упругой продольной волны. Процентное отношение соответствующей скорости, измеренной на образцах горных пород, к ее расчетному значению называется добротностью породы и характеризует интегральное воздействие пор и трещин на породу.

Прогнозирование изменения структуры порового пространства, т.е. изменения межзерновой и трещинной пористости, с увеличением эффективного давления является одним из путей оценки изменений фильтрационно-емкостных свойств коллекторов, происходящих при снижении пластового давления в процессе разработки месторождения. Выявлено, что при переходе от атмосферных условий к пластовым, сопровождающемся ростом эффективного напряжения, средний коэффициент открытой пористости снизился на 1,28 абс. %. Межзерновая пористость снизилась в среднем на 0,779 абс. %; трещинная пористость – на 0,493 абс. %.

В среднем доля трещинной пористости в открытой пористости при атмосферных условиях составила 3,53 %, а при пластовых условиях – 1,33 %. Показано, что при переходе от атмосферных условий к пластовым уменьшаются объемы как микротрещин, так и межзерновых пор. Оценено влияние эффективного напряжения на межзерновую и трещинную пористость, и получены оценки их распределения в атмосферных и пластовых условиях. Указанные оценки могут быть использованы при подсчете запасов и при подготовке проектов разработки месторождений.

Пористость является одним из основных параметров горных пород, который необходимо определить при подсчете запасов или подготовке проекта разработки месторождения углеводородов. Поровое пространство сочетает пористость различных видов – межзерновую, трещинную, кавернозную. Рассмотрение структуры порового пространства и ее изменений при переходе от атмосферных к пластовым условиям на примере коллекторов дагинского горизонта шельфа Сахалина является предметом данной статьи.

Межзерновые поры типичны для терригенных коллекторов. Трещинные полости характерны для пород любого генезиса, но подвергшихся процессам преобразования в течение своей геологической жизни. Каверны и пустоты выщелачивания типичны для большинства карбонатных пород [1]. Одной из наиболее актуальных проблем нефтегазовой отрасли является определение открытой пористости и, в частности, оценка в ней доли трещинной емкости. Программы гидродинамического моделирования

процессов разработки месторождений, такие как Eclipse, VIP Landmark, предусматривают наличие данных о трещинной пористости, представляя общую пористость как сумму двух компонент – межзерновой и трещинной емкости. Данная работа развивает тему предыдущих публикаций [2–5], в которых рассмотрен методологический подход к определению величины трещинной пористости горных пород по данным о скоростях распространения упругих продольных волн.

Объект исследований. Исследованы 236 образцов отложений дагинской свиты Южно-Кириинского месторождения (скв. 1–8) – песчаников средне- и мелкозернистых алевритистых и алевролитов песчаных и глинистых, имевших в атмосферных условиях открытую пористость 2,9–28,5 % при

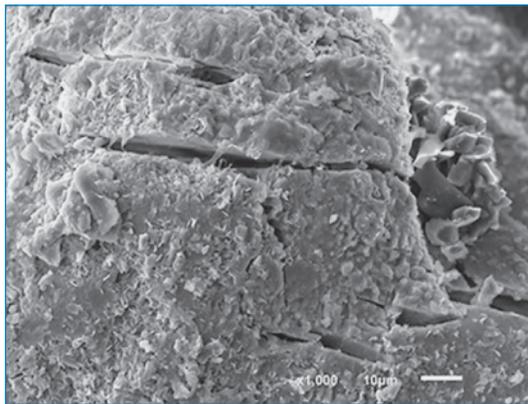


Рис. 1. Зерна кварца с трещинами в мелко-среднезернистом песчанике с глинистыми новообразованиями на поверхности зерен

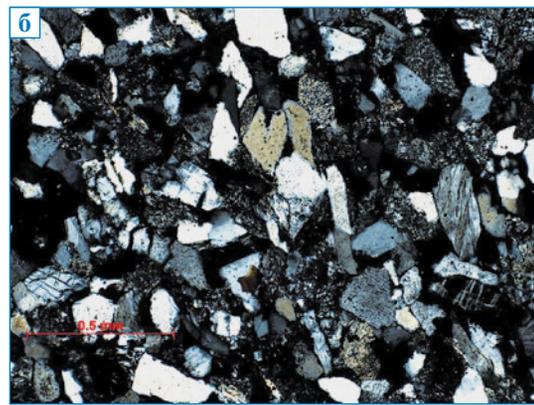
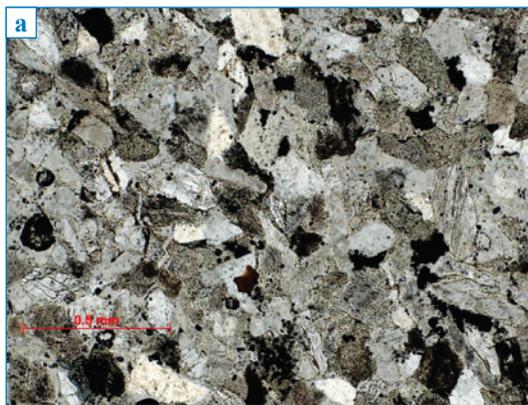


Рис. 2. Снимок порового пространства: а – в обычном свете; б – в поляризованном свете. Пористость: 15–20 %; тип пор: межзерновые; размер пор: 0,05–0,35 мм; поры распределены по породе равномерно, присутствуют единичные микротрещины, образовавшиеся в результате вторичных изменений; микротрещины приурочены к зернам плагиоклаза и слюды по плоскостям спайности

газопроницаемости от 0,001 до 3150 мД. Это относительно молодые породы нижне- и средне-миоценового возраста, и предполагалось, что они пластичны и не содержат трещин. Проведенные литолого-минералогические исследования выявили широкое наличие микротрещин по плоскостям спайности и границам зерен (рис. 1, 2). Анализ результатов детальных литологических исследований показал, что на шлифах 37 из 60 исследованных образцов горных пород по скв. 6 отмечены микротрещины, приуроченные к плоскостям спайности минералов. Также в керне выявлены отдельные вертикальные трещины длиной до 40 см. С целью изучения изменений структуры порового пространства на представительной коллекции из 240 образцов горных пород проведены исследования определения пористости, скорости распространения упругих продольных и поперечных волн в атмосферных условиях и при моделировании пластовых условий на установке ПУМА-650.

Распределение пористости исследованных образцов представлено на рис. 3. Видно, что большинство образцов имеют в атмосферных условиях коэффициент пористости ($K_{п.атм}$) от 20 до 28 %, среднее значение $K_{п.атм} = 22,22$ %. Там же показано распределение пористости в условиях, моделирующих пластовые ($K_{п.пл}$): диапазон распределения пористости смещается в сторону ее уменьшения. Так, среднее значение $K_{п.пл}$ уже составляет 20,95 %, т.е. уменьшилось на 1,28 абс. % или на 5,77 % относительно $K_{п.атм}$.

Условия проведения исследований определяют и параметры трещинной пористости,

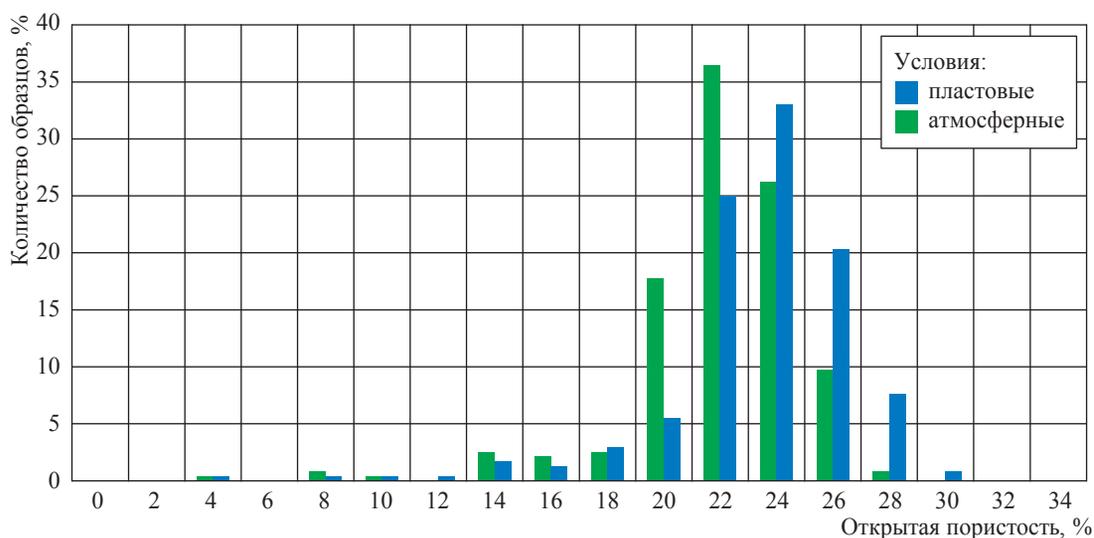


Рис. 3. Распределение 236 исследованных образцов горных пород дагинского горизонта по диапазонам пористости в атмосферных условиях и при моделировании пластовых условий

выявляемой при таком подходе. Поскольку характерный размер исследуемых образцов составляет 30 мм, то длина одиночных трещин не может превышать ориентировочно половины этого размера, т.е. 15 мм. При большей длине трещины образец разрушится. Отношение раскрытия трещины к ее длине обычно составляет не более 0,001. Таким образом, оценка максимального раскрытия выявляемых трещин не превышает 15 мкм, а длина по падению не превышает 15 мм [2–5].

Как известно, на скорость распространения упругих волн в горной породе помимо других факторов большое влияние оказывает и минералогический состав породы. Однородность минералогического состава исследованной коллекции образцов можно оценить при помощи зависимости плотности (объемного веса) от пористости [6]. Приведенные на рис. 4 зависимости плотности образцов в атмосферных ($\rho_{\text{атм}}$) и пластовых ($\rho_{\text{пл}}$) условиях от пористости свидетельствуют об однородности минералогического состава всех исследованных образцов. Так, достоверность аппроксимации R^2 этой зависимости линейным уравнением достаточно высока: для всей коллекции $R^2 = 0,99$; для образцов горных пород по каждой из восьми скважин R^2 составляет 0,99–0,86.

Методика проведения работ. В работе используется рассмотренный ранее методологический подход к решению проблемы

определения трещинной и межзерновой пористости образцов горных пород по данным о скоростях распространения упругой продольной волны [2, 3]. Свойства «идеальной породы», т.е. породы без трещин, пор и других неоднородностей, зависят только от свойств составляющих ее минералов, в частности от скорости распространения продольной волны в минералах, слагающих скелет породы. Скорости распространения упругих продольных волн для основных породообразующих минералов (кварца, кальцита, полевых шпатов, глин различных видов) приведены в ряде работ и справочников [6–11]. Процентное отношение значения скорости ($V_{\text{р.изм}}$), измеренной на образце горной породы, к расчетному значению скорости ($V_{\text{р.ск}}$) называется добротностью породы Q [2]:

$$Q = 100 \frac{V_{\text{р.изм}}}{V_{\text{р.ск}}} \quad (1)$$

Оно и будет характеризовать интегральное воздействие пор и трещин на породу: уменьшение значения Q отражает наличие пористости. Причем межзерновая ($K_{\text{п.мз}}$) и трещинная ($K_{\text{п.тр}}$) пористости различно влияют на Q . Ряд исследователей получили следующие зависимости [2]:

$$Q = 100 - 1,6K_{\text{п.мз}} \quad (\text{только межзерновые поры}); \quad (2)$$

$$Q = 100 - 22,0K_{\text{п.тр}} \quad (\text{только трещины}). \quad (3)$$

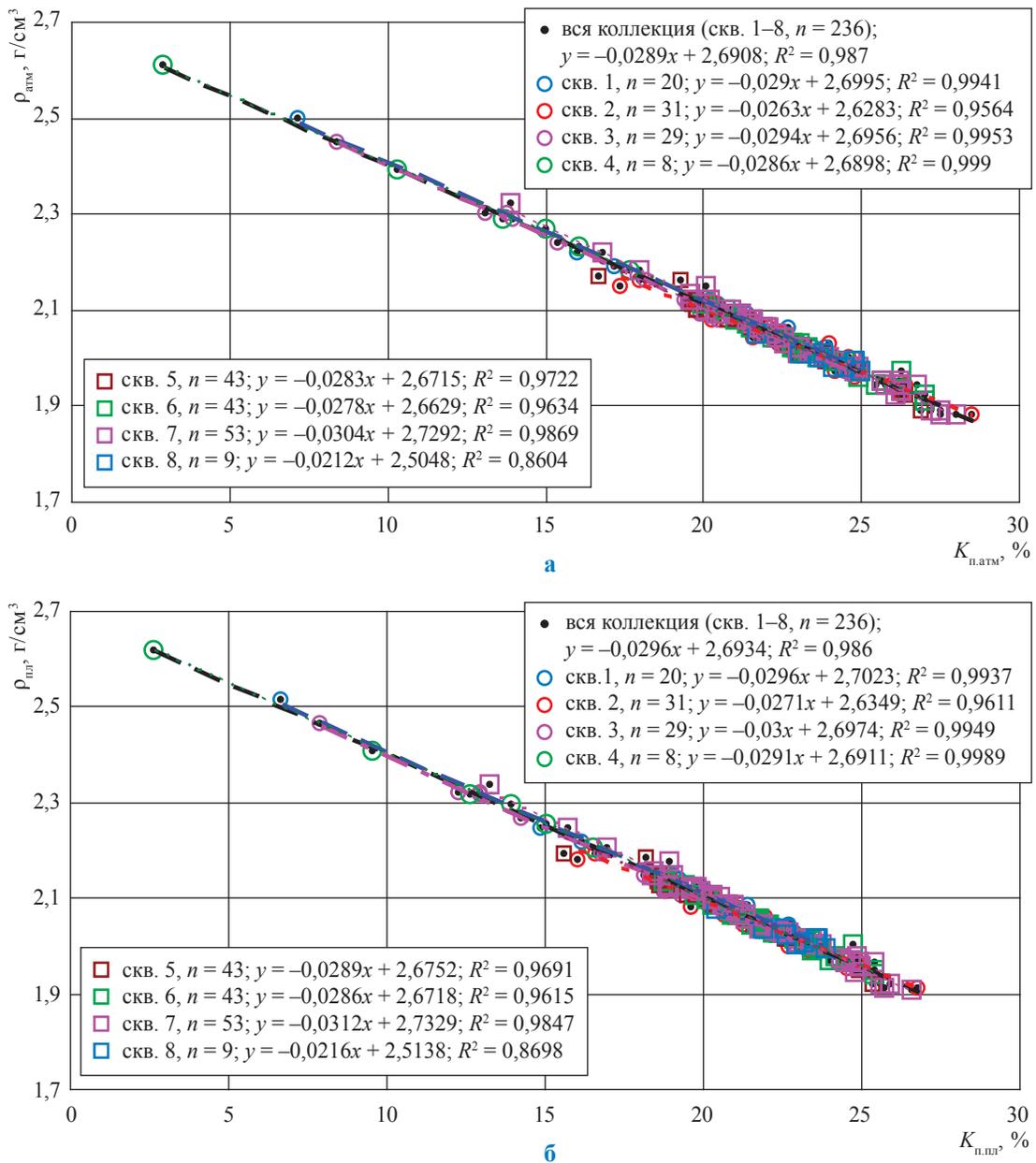


Рис. 4. Зависимости плотности исследованных образцов горных пород от пористости при атмосферных условиях (а) и в условиях, моделирующих пластовые (б): n – число исследованных образцов, шт.

Предполагая одновременное наличие межзерновых пор и трещин и то, что пористость состоит из этих двух компонент, т.е.

$$K_{п} = K_{п.мз} + K_{п.тр}, \tag{4}$$

получим зависимость, аналогичную выведенной К. Туранком, Д. Фурментро и А. Денни [2]:

$$Q = 100 - 1,6K_{п.мз} - 22,0K_{п.тр}. \tag{5}$$

Путем несложных математических преобразований и решением уравнений (1)–(5) относительно $K_{п.тр}$ можно получить выражение для расчета трещинной пористости [12]:

$$K_{п.тр} = \frac{100 - 1,6K_{п.общ} - 100 \frac{V_{р.изм}}{V_{р.ск}}}{20,4}. \tag{6}$$

Результаты исследований. Наиболее интересной представляется разработка подхода к прогнозированию изменения структуры порового пространства – изменения $K_{п.мз}$

и $K_{п.тр}$ – с увеличением эффективного давления. Обусловлено это практическими потребностями учета таких изменений, сопровождающих процессы разработки месторождений углеводородов при снижении пластового давления. Исходным материалом послужили лабораторные исследования образцов горных пород дагинского горизонта при моделировании эффективного давления [11].

Известно, что при росте всестороннего сжатия пород увеличиваются и скорости продольных волн [6–11]. Происходит это, во-первых, вследствие повышения плотности упаковки зерен в терригенных осадочных породах и, во-вторых, из-за закрытия части имеющихся трещин. Эти предпосылки обусловили выбор

скорости продольных волн в породе с «нулевой пористостью», определяемой при моделировании пластовых условий, в качестве $V_{р.ск}$ в уравнениях (1) и (6).

По данным о пористости образцов и скорости распространения продольной волны в этих образцах определены значения $K_{п.мз}$ и $K_{п.тр}$ в атмосферных условиях и в условиях, моделирующих пластовые [2–5, 12]. Представленное на рис. 5 распределение показывает, что в атмосферных условиях $K_{п.мз}$ образцов варьирует от 2,8 до 28 % (в среднем 21,5 %), $K_{п.тр}$ – от 0,145 до 1,067 % (в среднем 0,752 %). В условиях, моделирующих пластовые, диапазоны распределения и той, и другой компоненты пористости смещаются в сторону уменьшения.

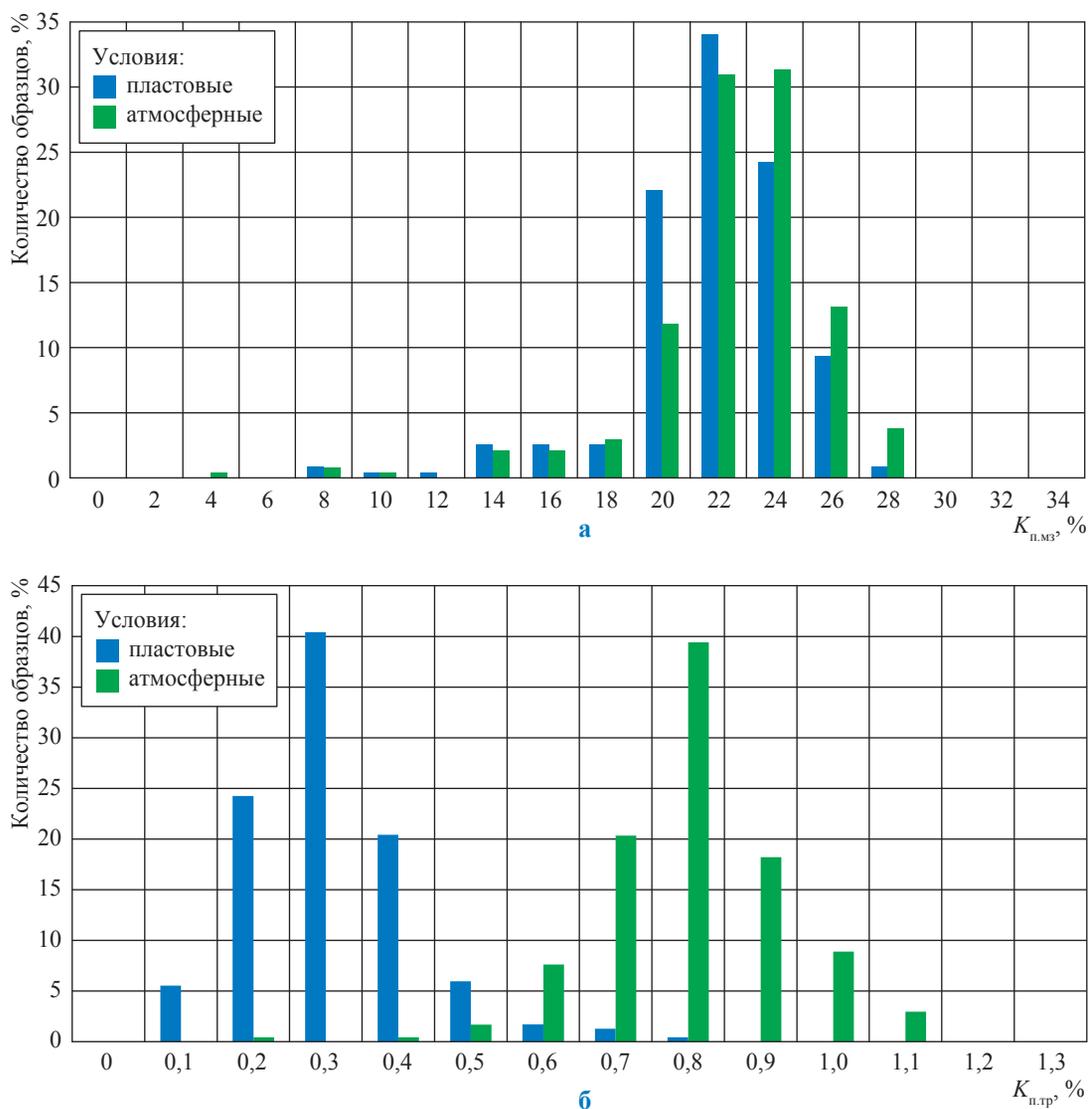


Рис. 5. Распределения межзерновой (а) и трещинной (б) пористости исследованных образцов горных пород (236 шт.) по диапазонам пористости в атмосферных условиях и при моделировании пластовых условий

Так, среднее значение $K_{п.мз}$ в пластовых условиях составляет 20,7%, т.е. уменьшилось на 0,78 абс. % или на 3,63 % относительно его же величины в атмосферных условиях. $K_{п.тр}$ в пластовых условиях в среднем составил 0,26 %, т.е. уменьшился на 0,493 абс. % или на 65,5 % по сравнению с атмосферными условиями.

Как показано на рис. 6 (см. также рис. 3), с ростом эффективного напряжения снижение (уменьшение) пористости для различных образцов варьирует от 0,254 до 2,164 абс. %, в среднем уменьшение пористости составило 1,28 абс. %. Величины обеих компонент пористости – межзерновой и трещинной – тоже уменьшились, но уже в разной степени (рис. 6). Видно, что в структуре пористости преобладает межзерновая пористость, доля трещинной пористости в пористости составляет в среднем 3,53 % в атмосферных условиях и 1,33 % в условиях, моделирующих пластовые.

Более подробный анализ изменений пористости и добротности исследованных образцов на основе наличия двух компонент пористости показал следующее: превалирующим фактором изменения $K_{п}$ в пластовых условиях является межзерновая пористость. На рис. 7 приведены две зависимости добротности от пористости:

$$Q_{пл} = -1,84K_{п.пл} + 100; \tag{7}$$

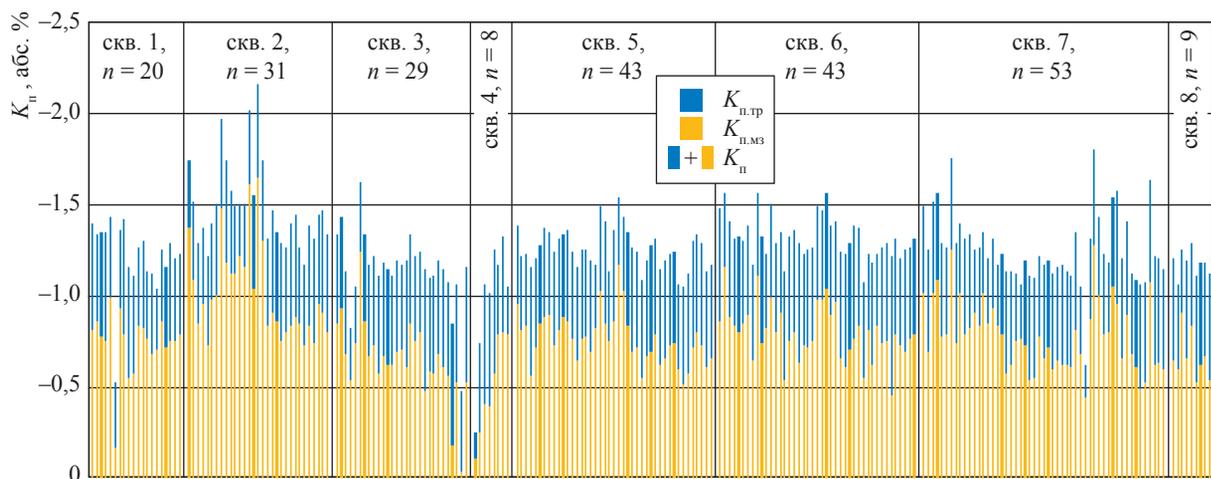
$$Q_{атм} = -2,27K_{п.атм} + 100. \tag{8}$$

При коэффициенте, равном $-1,6$, полностью отсутствует трещинная пористость. Обусловлено это тем, что микротрещины, имеющиеся в образцах исследованных горных пород при атмосферных условиях, в основном закрываются при переходе к условиям, моделирующим пластовые. Доля $K_{п.тр}$ в пористости при атмосферных условиях ($K_{п.атм}$) (см. ранее) несколько выше чем, при пластовых ($K_{п.пл}$) (угловой коэффициент в уравнении (8) выше, чем в уравнении (7)). Как следует из уравнений (2) и (3), увеличение доли трещинной пористости от 0 до 100 % будет сопровождаться ростом этого коэффициента от $-1,6$ до $-22,0$. А изменение углового коэффициента от $-2,27$ до $-1,84$ отражает снижение трещинной пористости.

Показанная на рис. 7 зависимость добротности от пористости (см. красный пунктир)

$$Q = -9,35K_{п} + 257,16 \tag{9}$$

подтверждает высказанное ранее предположение о том, что с ростом эффективного давления уменьшается объем как микротрещин, так и межзерновых пор. В уравнении (9) угловой коэффициент равен $-9,43$. Отметим, что если $K_{п} = -22,0$, $K_{п.мз}$ не меняется, а все изменения происходят только за счет трещинной пористости. Если угловой коэффициент при равен $-1,6$, то $K_{п.тр}$ не меняется, а все изменения происходят только за счет межзерновой пористости.



Коллекция образцов (n = 236)

Рис. 6. Изменение пористости в целом и двух ее составляющих (межзерновой и трещинной) с ростом эффективного давления, сопровождающего переход к пластовым условиям

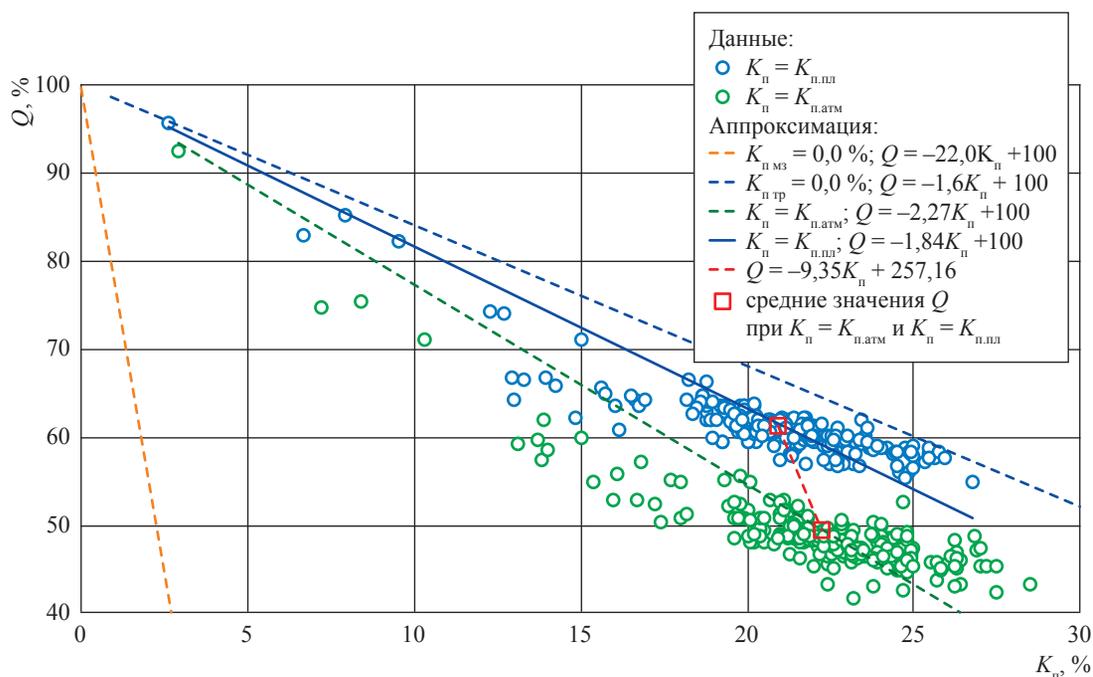


Рис. 7. Зависимости добротности исследованных образцов (236 шт.) горных пород дагинского горизонта Южно-Киринского месторождения от их пористости при атмосферных и пластовых условиях

Таким образом, анализ образцов керна, шлифов и данных электронной микроскопии коллектора дагинского горизонта показал наличие в нем как отдельных визуально наблюдаемых трещин, так микротрещин. Результаты исследований при моделировании пластовых условий позволили выявить соотношение двух компонент пористости (межзерновой и трещинной) и показать изменение структуры пористости при переходе к пластовым условиям. Выявлена доминирующая роль межзерновой компоненты в объеме порового пространства как для атмосферных условий, так и для условий, моделирующих пластовые. Установлено, что трещинная пористость в пластовых условиях частично сохраняется, несмотря

на значительное ее уменьшение (на 65,4 %) при росте эффективного давления при моделировании пластовых условий.

Выявлено, что при переходе к пластовым условиям уменьшение пористости коллекторов дагинского горизонта происходит в диапазоне от 0,25 до 2,16 абс. %, в среднем составляя 1,27 абс. %. Оценено влияние эффективного напряжения на межзерновую и трещинную компоненты, приведены оценки распределения двух этих компонент пористости в атмосферных условиях и в условиях, моделирующих пластовые. Полученные оценки могут быть использованы как при подсчете запасов, так и при 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: НПЦ «Тверьгеофизика», 2003. – 259 с.
2. Туранк К. Распространение волн и границы раздела в породах / К. Туранк, Д. Фурментро, А. Денни // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти / под ред. В. Мори и Д. Фурментро; пер. с англ. и фр. – М.: Мир, 1994. – С. 176–184.

3. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн / В.С. Жуков // Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г.: сб. науч. трудов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 148–152. – (Вести газовой науки).
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 // Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г.: сб. науч. трудов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 153–157. – (Вести газовой науки).
5. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов Оренбургского месторождения по данным о скорости распространения продольной волны / В.С. Жуков, О.В. Иселидзе // Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов: сб. науч. ст. в 2 ч. / под ред. Б.А. Григорьева. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. – Ч. 1. – С. 175–182. – (Вести газовой науки).
6. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник петрофизика / под ред. Н.Б. Дортман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
7. Авчян Г.М. Петрофизика осадочных пород в глубинных условиях / Г.М. Авчян, А.А. Матвеев, З.Б. Стефанкевич. – М.: Недра, 1979. – 224 с.
8. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород / В.Н. Дахнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 310 с.
9. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород / Ю.О. Кузьмин, В.С. Жуков. – М.: Издательство МГТУ, 2004. – 262 с.
10. Рыжов А.Е. Динамика изменений физических свойств образцов продуктивных пород при разработке месторождений нефти и газа / А.Е. Рыжов, В.С. Жуков, О.В. Иселидзе и др. // Разработка месторождений углеводородов: сб. науч. трудов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2008. – С. 154–168.
11. Жуков В.С. Изменение физических свойств коллектора как результат роста эффективного давления в процессе разработки месторождения (моделирование на примере Южно-Киринского месторождения) / В.С. Жуков, П.Ю. Иванов // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2015. – № 4 (24). – С. 144–148.
12. Патент РФ № 2516392. Способ определения трещинной пористости пород / В.С. Жуков; патентообладатель ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – 2012.

Modification of porous space structure in reservoirs of Dagi horizon at transition from atmospheric conditions to in-situ ones

V.S. Zhukov^{1*}, Yu.M. Churikov¹, V.V. Motorygin¹

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Est. 15, Proyektiruemyy proezd # 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

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

Abstract. On example of the Dagi-horizon Miocene reservoirs offshore Sakhalin, the paper reveals structure of reservoir porous space and its changing at transition from atmospheric conditions to in-situ ones.

Programs for hydrodynamic simulation of field development provide for availability of data on cracking porosity, and present general porosity as a sum of such two components like intergranular capacity and cracking capacity. So, few reservoir samples represented by middle- and small-grained silty sandstones and by arenaceous and argillic aleurolites having open porosity of 2,9–28,5 % in absolute terms (for atmospheric conditions) were studied. It was thought that these comparatively young rocks were plastic and had no cracks. The results of lithologic-mineralogical explorations showed wide presence of the micro fissures along the cleavage planes and the grain margins. Using collection of 236 samples, the values of open porosity and velocity of longitudinal elastic wave propagation within the rock were determined for atmospheric conditions and at simulation of in-situ reservoir conditions.

The factors of rocks' cracking porosity and intergranular porosity were determined according to data on general porosity and velocity of longitudinal elastic wave propagation. Percentage of such measured and calculated velocity values is named "quality factor" which characterizes integral influence of pores and cracks on a rock.

Forecasting of structural changes in porous space, i.e. changing of intergranular porosity and cracking porosity values, due to the increase of effective pressure is one of ways to estimate modification of reservoir permeability

properties when reservoir pressure drops in course of field development. It was discovered that at transition from atmospheric conditions to the in-situ ones being accompanied with increase of effective pressure, an average factor of open porosity was reduced at 1,28 % in absolute terms. On average, in absolute terms the intergranular porosity was reduced at 0,779 % and the cracking porosity dropped at 0,493 %.

On average, a share of cracking porosity in the open porosity in atmospheric condition constituted 3,53 %, and 1,33 % in-situ. Diminishing of both micro fissures and intergranular pores at transition from atmospheric conditions to in-situ ones is demonstrated. Impact of efficient pressure to intergranular porosity and cracking porosity, and their distributions under atmospheric and in-situ reservoir conditions are estimated. The mentioned bounds could be used while calculating hydrocarbon reserves and designing field development.

Keywords: porosity, in-situ conditions, velocity of longitudinal elastic waves, intergranular porosity, cracking porosity.

References

- PETERSILYE, V.I., V.I. POROSKUN, G.G. YATSENKO (eds.). *Guidance on volumetric calculation of oil and gas geological reserves* [Metodicheskiye rekomendatsii po podschetu geologicheskikh zapasov nefi i gaza obyemnym metodom]. Moscow: All-Russian Research Geological Oil Institute; Tver: Tvergeofizika, 2003. (Russ.).
- TURANK, K., D. FURMENTRO and A. DENNY. Propagation of waves and demarcation line in rocks [Rasprostraneniye voln i granits razdela v prodakh] In: MORI, V., FURMENTRO D. (eds.). *Rock mechanics in respect of issues in oil exploration and production* [Mekhanika gornykh porod primenitelno k problemem razvedki i dobychi nefi]: collected papers. Translated from English and French. Moscow: Mir, 1994, pp. 176–184. (Russ.).
- ZHUKOV, V.S. *Estimation of reservoir fracture pattern by elastic wave propagation velocity* [Otsenka treshchinovatosti kollektorov po skorosti rasprostraneniya uprugikh voln]. In: *Russian gas-producing regions resource provision problem until 2030* [Problemy resursnogo obespecheniya gazodobyvayushchikh rayonov Rossii do 2030 g.]: collection of sci. articles. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2012, pp. 148–152. (Russ.).
- ZHUKOV, V.S. and O.V. ISELIDZE. *Fracture formation factor assessment by P-wave propagation velocity in case of one field of Eastern Siberia* [Otsenka treshchinovatosti kollektorov po dannym o skorosti rasprostraneniya prodolnoy volny na primere odnogo iz mestorozhdeniy Vostochnoy Sibiri]. In: *Russian gas-producing regions resource provision problem until 2030* [Problemy resursnogo obespecheniya gazodobyvayushchikh rayonov Rossii do 2030 g.]: collection of sci. articles. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2012, pp. 153–157. (Russ.).
- ZHUKOV, V.S. and O.V. ISELIDZE. Estimation of fracturing of the Orenburg field's collectors by compressional velocity [Otsenka treshchinovatosti kollektorov Orenburgskogo mestorozhdeniya po dannym o skorosti rasprostraneniya prodolnoy volny]. In: *Relevant issues of studies of field hydrocarbon formations* [Aktualnyye voprosy issledovaniy plastovykh system mestorozhdeniy uglevodorodov]: collection of sci. articles in 2 pts. B.A. Grigoryev (ed.). Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2011, pt. 1, pp. 175–182. (Russ.).
- DORTMAN, N.B. (ed.). *Physical properties of rocks and mineral products (petrophysics): reference book of a geophysicist* [Fizicheskiye svoystva gornykh porod i poleznykh iskopayemykh (petrofizika): spravochnik geofizika]. 2nd ed. Moscow: Nedra, 1984. (Russ.).
- AVCHAN, G.M., A.A. MATVEYENKO, Z.B. STEFANKEVICH. *Petrophysics of sedimentary rocks* [Petrofizika osadochnykh porod]. Moscow: Nedra, 1979. (Russ.).
- DAKHNOV, V.N. *Geophysical methods for determination of reservoir properties and oil-gas-bearing of rocks* [Geofizicheskiye metody opredeleniya kollektorskikh svoystv i neftegazonasyschcheniya gornykh porod]. 2nd ed., revised. Moscow: Nedra, 1985. (Russ.).
- KUZMIN, Yu.O. and V.S. ZHUKOV. *Modern geodynamics and variations of rocks' physical properties* [Sovremennaya geodinamika i variatsii fizicheskikh svoystv gornykh porod]. Moscow: Moscow State University Publishers, 2004. (Russ.).
- RYZHOV, A.Ye., V.S. ZHUKOV, O.V. ISELIDZE et al. Dynamics of changes in physical properties of productive-rock samples at development of oil and gas fields [Dinamika izmeneniy fizicheskikh svoystv obraztsov produktivnykh gornykh porod pri razrabotke mestorozhdeniy nefi i gaza]. In: *Development of hydrocarbon fields* [Razrabotka mestorozhdeniy uglevodorodov]: collected papers. Moscow: VNIIGAZ, 2008, pp. 154–168. (Russ.).
- ZHUKOV, V.S. and P.Yu. IVANOV. Changing in physical properties of a reservoir caused by increase of effective pressure at a field being developed (modelling on example of the Yuzhno-Kirinskoye field) [Izmeneniye fizicheskikh svoystv kollektora kak rezultat rosta effektivnogo davleniya v protsesse razrabotki mestorozhdeniya (modelirovaniye na primere Yuzhno-Kirinskogo mestorozhdeniya)]. *Vesti gazovoy nauki*. Actual issues in research of stratal hydrocarbons systems [Aktualnyye voprosy issledovaniy plastovykh system mestorozhdeniy uglevodorodov]. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2015, no. 4(24), pp. 144–148. ISSN 2306-8949. (Russ.).
- GAZPROM VNIIGAZ LLC. *Method of rock fractured porosity determination* [Sposob opredeleniya treshchinnoy poristosti]. Inventor ZHUKOV, V.S. 20.05.2014. Appl: 13.09.2012. RU 2516392.