

550.8.056:552.12

Влияние различных видов пористости на скорости упругих волн и электропроводность коллекторов Чаюдинского месторождения

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

Тезисы. Для достоверного подсчета запасов и подготовки проекта разработки месторождения углеводородов необходимо учитывать характер влияния на физические свойства горных пород межзерновой и трещинной пористости и их соотношения. Так, исследовались образцы песчаника вендского возраста, имевшие в атмосферных условиях открытую пористость от 3,2 до 18,3 %. В условиях, моделирующих пластовые, их трещинная пористость колеблется от 0 до 0,94 %, составляя в среднем 0,5 %. Средняя величина межзерновой пористости равна 10,6 % (диапазон изменений 2,0–17,3 %). Доля трещинной пористости в общей пористости составляет в среднем 5,81 %, достигая 21 %.

Скорости распространения продольных и поперечных волн в породе уменьшаются с ростом ее общей и межзерновой пористости. Отмечена тенденция увеличения скорости распространения волн с ростом доли трещинной пористости. Обусловлено это тем, что при одинаковых значениях трещинной пористости ее доля в общей пористости будет выше для низкопористых горных пород.

С использованием модели Пирсона, которая предусматривает параллельное соединение трещин и поровых каналов, дана оценка влиянию межзерновой и трещинной пористости на удельное электросопротивление. Установлено, что с ростом межзерновой и общей пористости удельное электросопротивление уменьшается. Показано, что при доле трещинной пористости в общей пористости более 20 % общая электропроводность практически полностью определяется электропроводностью трещин. А при стремлении этой доли к нулю, т.е. при отсутствии трещин, общая электропроводность определяется электропроводностью межзернового порового пространства. Выявленная трещинная пористость весьма далека от случая взаимосвязанных трещин.

Оценено влияние межзерновой и трещинной пористости на скорость распространения упругих волн, удельную электропроводимость и параметр пористости, которые зачастую используются как при подсчете запасов, так и при подготовке проектов разработки месторождений.

Как известно, пористость является одним из основных параметров горных пород, которые необходимо определить при подсчете запасов или при подготовке проекта разработки месторождения углеводородов. Далее в статье определен характер влияния различных видов пористости (межзерновой и трещинной) и их соотношения на некоторые физические свойства горных пород на примере коллекторов Чаюдинского месторождения.

Доли объема породы, соответствующие межзерновым порам, трещинам и кавернам, составляют коэффициенты межзерновой, или гранулярной ($K_{п.мз}$), трещинной ($K_{п.тр}$) и каверновой ($K_{п.кав}$) пористости. Межзерновые поры типичны для терригенных коллекторов, трещинные пустоты – для терригенных пород, подвергшихся значительному метаморфизму. Каверны и пустоты выщелачивания характерны для большинства карбонатных пород [1].

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, VIP Landmark, предусматривают наличие данных о трещинной пористости, представляя общую пористость ($K_{п}$) как сумму двух компонент: $K_{п.мз}$ и $K_{п.тр}$.

Настоящая статья написана в развитие темы более ранних публикаций, в которых рассмотрен методологический подход к определению $K_{п.тр}$ горных пород по данным о скоростях продольной упругой волны [2–4]. Авторами исследованы образцы

Ключевые слова: пористость, межзерновая пористость, трещинная пористость, скорости упругих волн, удельное электрическое сопротивление, пластовые условия.

песчаника вендского возраста, имевшие открытую пористость в атмосферных условиях от 3,2 до 18,3 %. На этих образцах горных пород проводились определения пористости, скорости распространения упругих продольных и поперечных волн и удельного электрического сопротивления при моделировании пластовых условий.

Фактические данные о значениях скорости распространения упругих волн в горных породах однородного минерального состава с достаточно широким диапазоном пористости позволяют аналитически определить скорость продольной волны в образцах с нулевой пористостью – так называемую «скорость продольной волны в скелете». Также известно, что при усилении всестороннего сжатия пород увеличиваются и скорости распространения продольных волн [5–8]. Происходит это, во-первых, из-за закрытия части имеющихся трещин и, во-вторых, вследствие более плотной упаковки зерен в терригенных осадочных породах. Эти предпосылки обусловили выбор скорости продольных волн в породе с «нулевой пористостью», определяемой при моделировании пластовых условий.

На рис. 1 приведены результаты расчета добротности пород (Q , %) по формуле (1) для

коллекторов трех горизонтов по результатам определений $K_{п}$ и скорости продольных упругих волн при моделировании пластовых условий [9].

$$Q = 100 \frac{V_{пр}^{изм}}{V_{пр}^{расч}}, \quad (1)$$

где $V_{пр}^{изм}$ – измеренное значение скорости распространения продольной волны, км/с; $V_{пр}^{расч}$ – расчетное значение скорости продольной волны в скелете, км/с. Также на рис. 1 пунктиром показаны параллельные линии равных значений $K_{п.тр}$ (0–1,0 %) и $K_{п.мз}$ (0–15 %).

Коэффициент трещинной пористости $K_{п.тр}$ исследованных горных пород изменяется в пределах 0–0,94 %, составляя в среднем 0,5 %. Коэффициент межзерновой пористости $K_{п.мз}$ оценивается средней величиной 10,6 % при диапазоне изменений 2,0–17,3 %.

Соотношение $K_{п.тр}$ и $K_{п}$ [10], или доля трещинной пористости в общей пористости, составляет в среднем 5,81 %, достигая максимальной величины 21 % (рис. 2), и рассчитывается по формуле

$$v = 100K_{п.тр} / K_{п}. \quad (2)$$

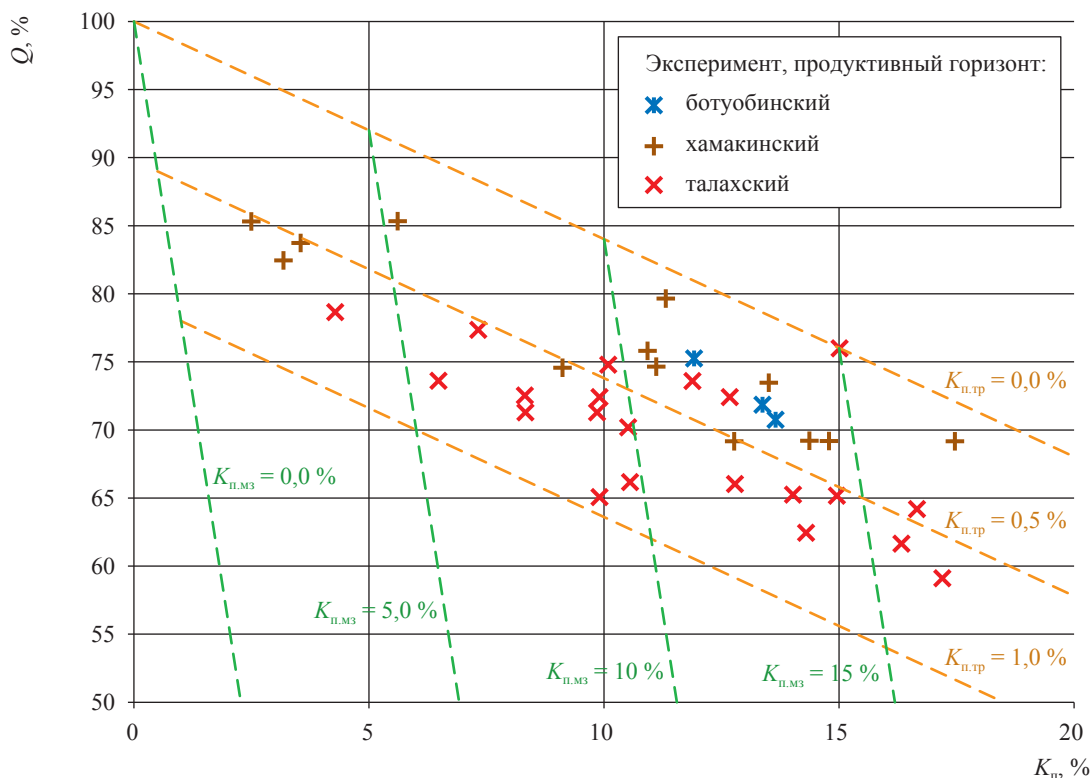


Рис. 1. Значения добротности образцов горных пород в зависимости от их коэффициента общей пористости в пластовых условиях

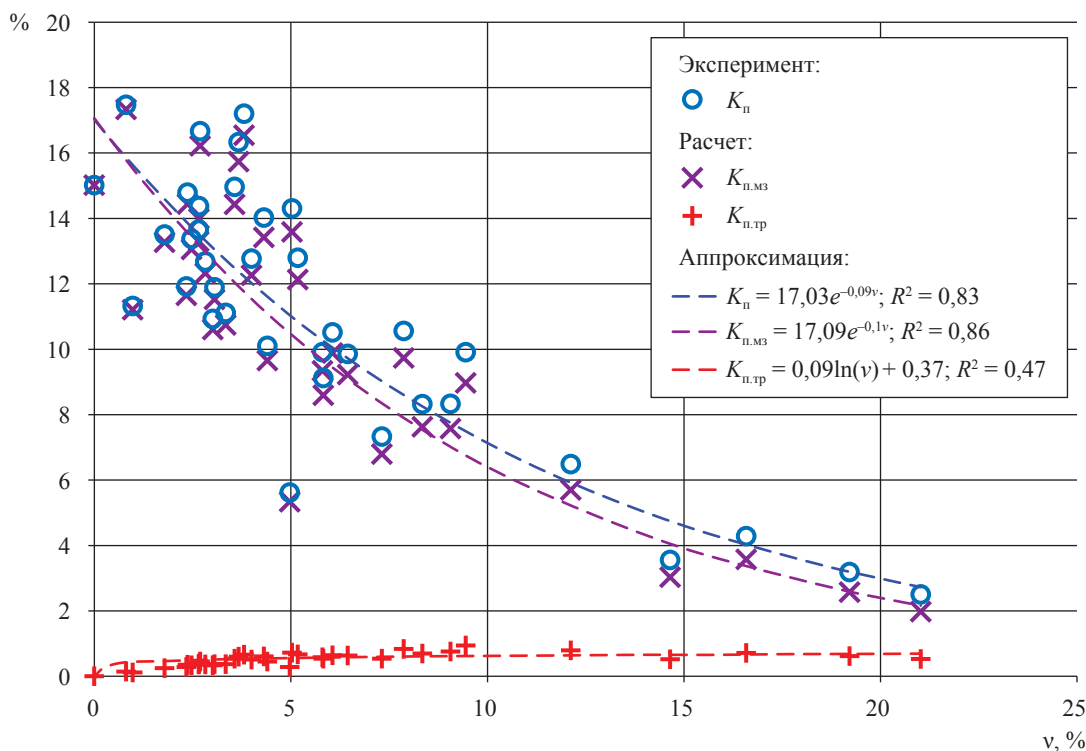


Рис. 2. Связь соотношения трещинной и общей пористости исследованных горных пород с их общей, межзерновой и трещинной пористостью:
 R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации

Таким образом, видно, что исследуемые породы имеют открытую пористость, состоящую из двух компонент: межзерновой и трещинной. Причем при таком подходе параметры выявляемой трещинной пористости диктуются условиями проведения исследований. Поскольку характерные размеры (длина и диаметр) исследуемых образцов составляют 30 мм, то длина трещины не может превышать ее половины. При большей длине трещины образец неминуемо разрушится. Отношение раскрытия трещины к ее длине обычно не превышает 0,001. Таким образом, максимальное раскрытие трещин, выявляемых по предлагаемой методике, оценивается как не превышающее 15 мкм, а длина и/или ширина – как не превышающие 15 мм.

Рассмотрим влияние каждого из видов пористости на скорости распространения упругих волн и удельное электрическое сопротивление, которые зачастую используются как при подсчете запасов, так и при подготовке проектов разработки месторождений. Установлено, что скорости распространения продольных $V_{пр}$ и поперечных $V_{поп}$ волн уменьшаются с ростом $K_{п}$ и $K_{п.мз}$ (рис. 3).

Как $V_{пр}$, так и $V_{поп}$ практически полностью зависят от значений $K_{п}$ и $K_{п.мз}$ (см. рис. 3). Для продольной волны коэффициенты достоверности аппроксимации R^2 этих зависимостей линейными уравнениями

$$V_{пр} = 5,42 - 0,07K_{п} \tag{3}$$

$$\text{и } V_{пр} = 5,50 - 0,08K_{п.мз} \tag{4}$$

составляют 0,67 и 0,63 соответственно. Коэффициенты корреляции между скоростью продольной волны и значениями общей и межзерновой пористости соответственно: $r = 0,804$ и $r = 0,799$.

Влияние трещинной пористости проявляется в виде горизонтального смещения значения скорости для общей пористости к соответствующему значению для межзерновой пористости (см. рис. 3). Смещение равно значению скорости для трещинной пористости, что согласуется с принципом сложения времени при прохождении волны по разным средам (гранулярной и трещинной). Надежной статистической связи скоростей продольных и поперечных волн с трещинной пористостью не выявлено.

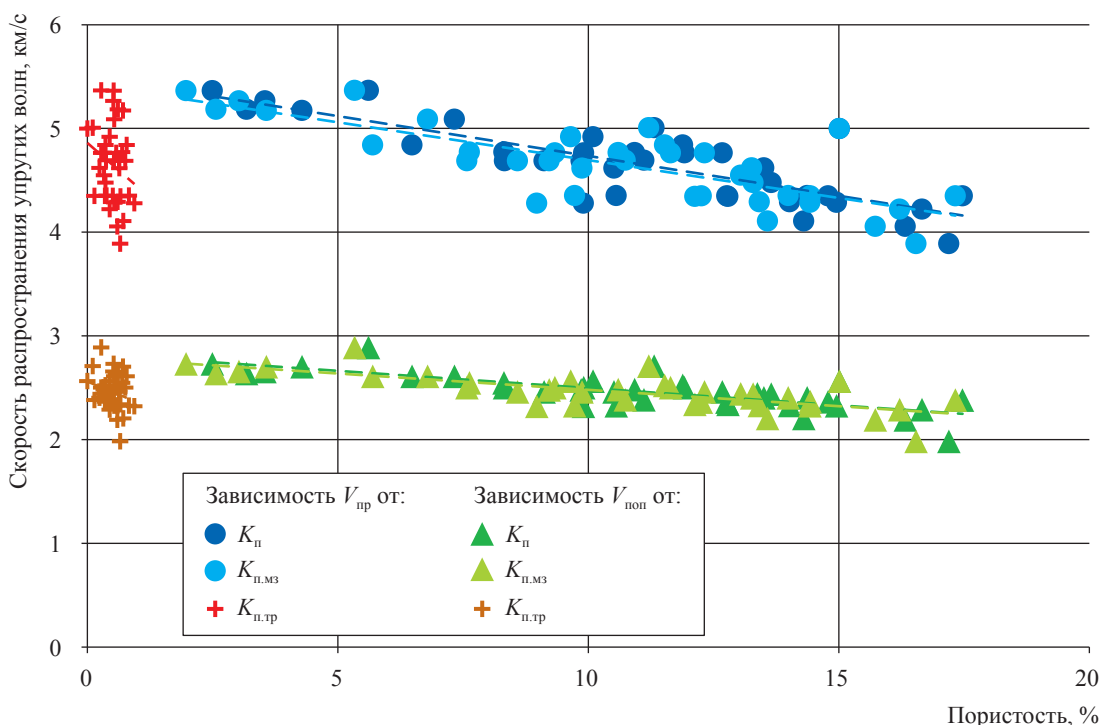


Рис. 3. Зависимость скорости распространения упругих продольных и поперечных волн от пористости образцов (K_n , $K_{н.мз}$ и $K_{н.тр}$)

Также не выявлено статистически значимой зависимости скорости распространения упругих волн от соотношения трещинной и общей пористости (рис. 4). Можно лишь отметить тенденцию увеличения продольной и поперечной скоростей с ростом доли трещинной пористости. Обусловлено это, очевидно, тем, что при одинаковых значениях трещинной пористости доля трещинной пористости будет выше для горных пород с низкими величинами общей пористости (см. рис. 2), где скорости распространения упругих волн выше.

В связи с широким использованием для исследования горных пород различных методов электрического каротажа практический интерес представляет изучение влияния различных видов пористости на удельное электрическое сопротивление горных пород, вскрытых скважинами. Физической основой применения методов электрического каротажа для определения K_n гранулярных коллекторов является зависимость параметра пористости породы (P_n), насыщенного электропроводящим флюидом, от K_n и структуры порового пространства [1].

Существуют несколько подходов к определению удельного сопротивления и параметра пористости пород с двойной пористостью. Так, выведено уравнение, связывающее P_n гор-

ной породы, имеющей двойную пористость, с ее суммарной (общей) пористостью K_n [10, 11]:

$$P_n = \frac{\left(\frac{\rho_w \rho_0}{v K_n \rho_0 + \rho_w (1 - v)} \right)}{\rho_w}, \quad (5)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление породы, Ом·м; ρ_w – удельное электрическое сопротивление электропроводящего раствора, заполняющего поровое пространство, Ом·м. При этом предполагается, что порода содержит две параллельные системы (межзерновые поры и трещины), проводящие электрический ток.

При отсутствии трещин отношение $K_{н.тр}$ к K_n равно нулю, и уравнение (5) преобразуется к обычному виду:

$$P_n = \rho_0 / \rho_w. \quad (6)$$

В случае чисто трещинных коллекторов, когда отсутствует межзерновая (гранулярная) пористость, отношение $K_{н.тр}$ к K_n равно единице, и уравнение (5) приобретает вид

$$P_n = 1 / K_{н.тр}. \quad (7)$$

С учетом полученных значений общей и трещинной пористости для исследованной

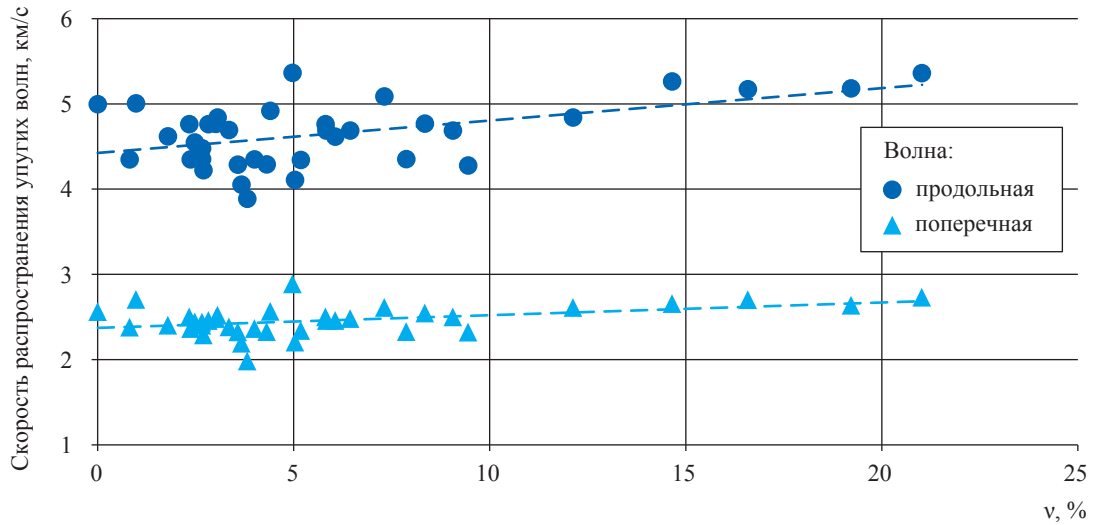


Рис. 4. Изменения скорости распространения упругих продольных и поперечных волн в горных породах в зависимости от соотношения значений их трещинной и общей пористости

коллекции горных пород параметр P_n рассчитан (см. формулу (5)) по методике Агилеры (исп. R. Aguilera) и определен по фактическим данным, полученным при моделировании пластовых условий. Сопоставление расчетных и фактических значений P_n показало, что результаты вычислений согласно Агилере достаточно близки фактическим данным (рис. 5).

Для дифференцированной оценки влияния межзерновой и трещинной пористости на удельное электрическое сопротивление использована модель Пирсона, которая предусматривает параллельное соединение трещин и поровых каналов [11]. Для использования в модели Пирсона определялись значения трещинной и межзерновой пористости: трещинная

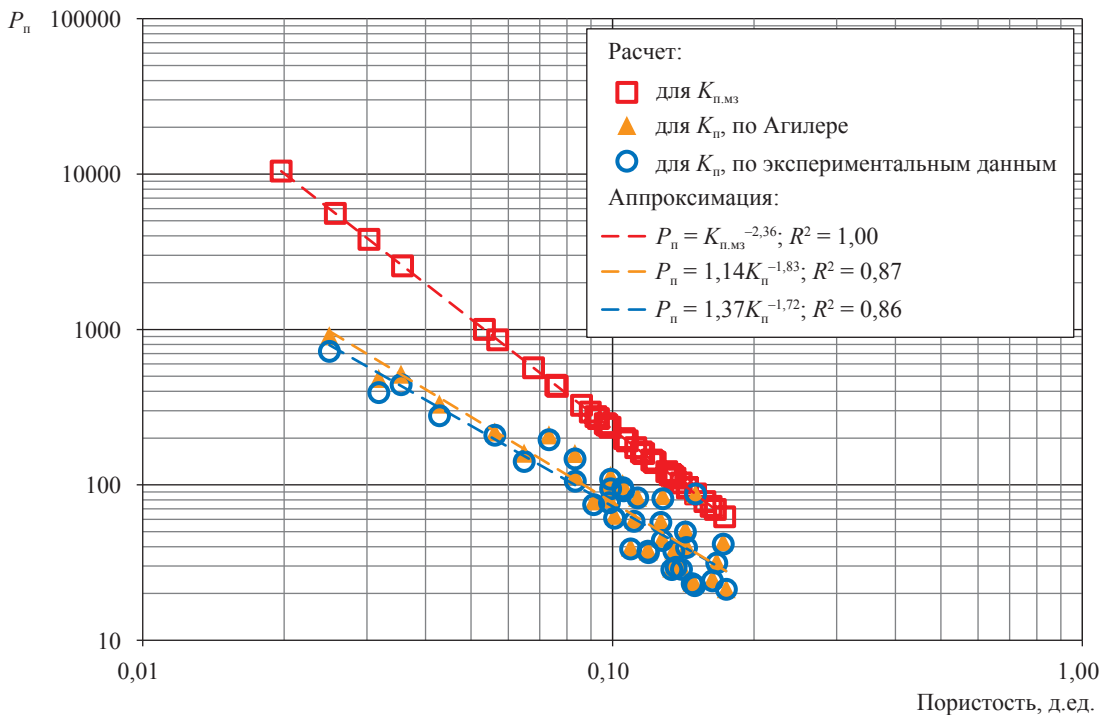


Рис. 5. Зависимость фактического и расчетного (по Агилере) значений параметра пористости от пористости для исследованных образцов горных пород с двойной пористостью

пористость определялась по предложенной ранее методике [2], межзерновая – как разность значений общей и трещинной пористости.

Для расчета удельного электрического сопротивления отдельно межзерновой пористости (поровых каналов) воспользуемся известным уравнением Арчи – Дахнова, выведенным для гранулярных коллекторов [6, 10]:

$$P_n = \frac{a}{K_{п.мз}^m}, \quad (8)$$

где a – коэффициент извилистости; m – показатель цементации, который зависит от формы пор и их распределения по размерам.

Для гранулярных пород без трещин коэффициент a в уравнении (8) обычно принимается равным единице. Для учета степени цементации показатель степени m при коэффициенте пористости подобран таким образом, чтобы значение параметра P_n образца с нулевой трещинной пористостью равнялось фактически полученному значению P_n для этого образца. При выполнении данного условия $m = 2,36$. Исходя из того, что P_n рассчитывается как отношение удельного сопротивления насыщенного раствором солей горной породы к удельному сопротивлению насыщающего раствора (см. форм. (6)), и в предположении, что

удельное электрическое сопротивление раствора в порах и трещинах одинаковое, рассчитаны удельные сопротивления $\rho_{п.мз}$, $\rho_{п.тр}$, ρ_n для межзерновой, трещинной и общей пористости соответственно. На рис. 6 видно, что с ростом межзерновой и общей пористости уменьшается и удельное электрическое сопротивление. Для связи удельного электрического сопротивления и трещинной пористости надежной статической зависимости не выявлено.

Как было сказано, модель двойной пористости (модель Пирсона) предусматривает параллельное прохождение электрического тока по трещинам и поровым каналам. При этом общая удельная электропроводность горных пород будет представлять собой сумму двух электропроводностей: межзерновой и трещинной (рис. 7). Видно, что с ростом межзерновой и общей пористости растет и удельная электропроводность. Между значениями трещинной пористости и удельной электропроводности надежной статической зависимости не выявлено.

Исходя из физических предпосылок можно ожидать, что с ростом v (т.е. доли трещинной пористости) будет расти и вклад электропроводности по трещинам. Для проверки этого предположения построена зависимость

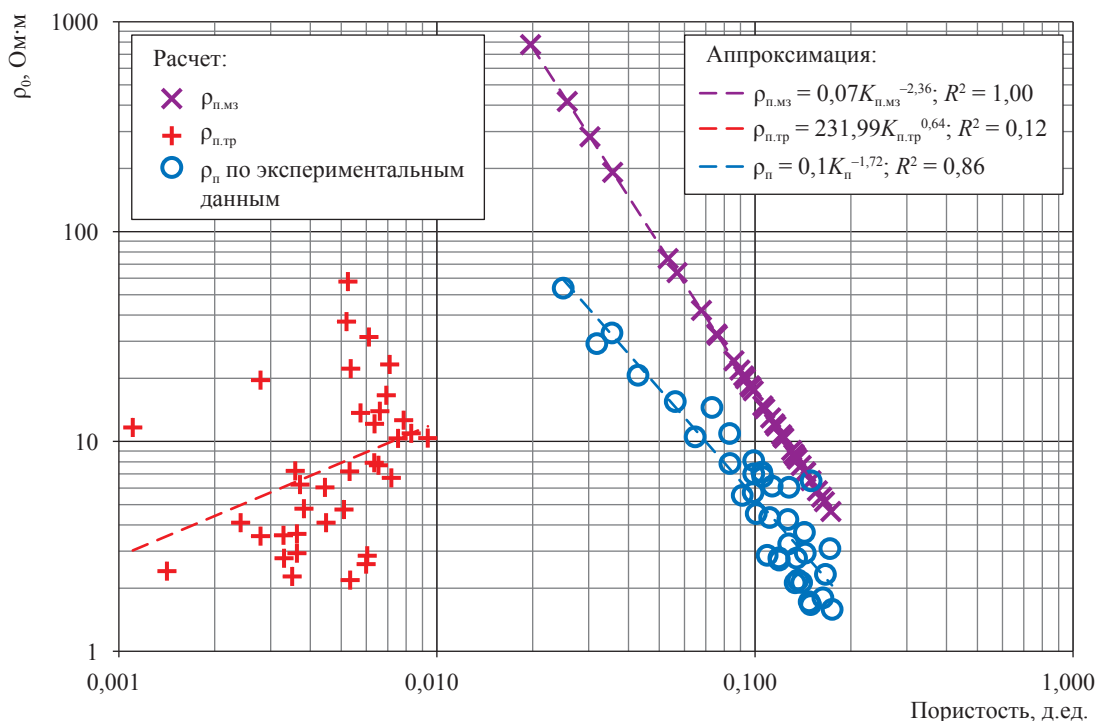


Рис. 6. Зависимость удельного электрического сопротивления исследованных образцов горных пород от их пористости

удельной электропроводности всех исследованных образцов от полученной для каждого из них доли трещинной пористости (рис. 8). Видно, что для данной коллекции образцов

горных пород уже при $v \approx 0,2$ (объем трещинной пористости составляет 20 % от объема общей пористости) общая электропроводность $1/\rho_{\Pi}$ практически полностью определяется

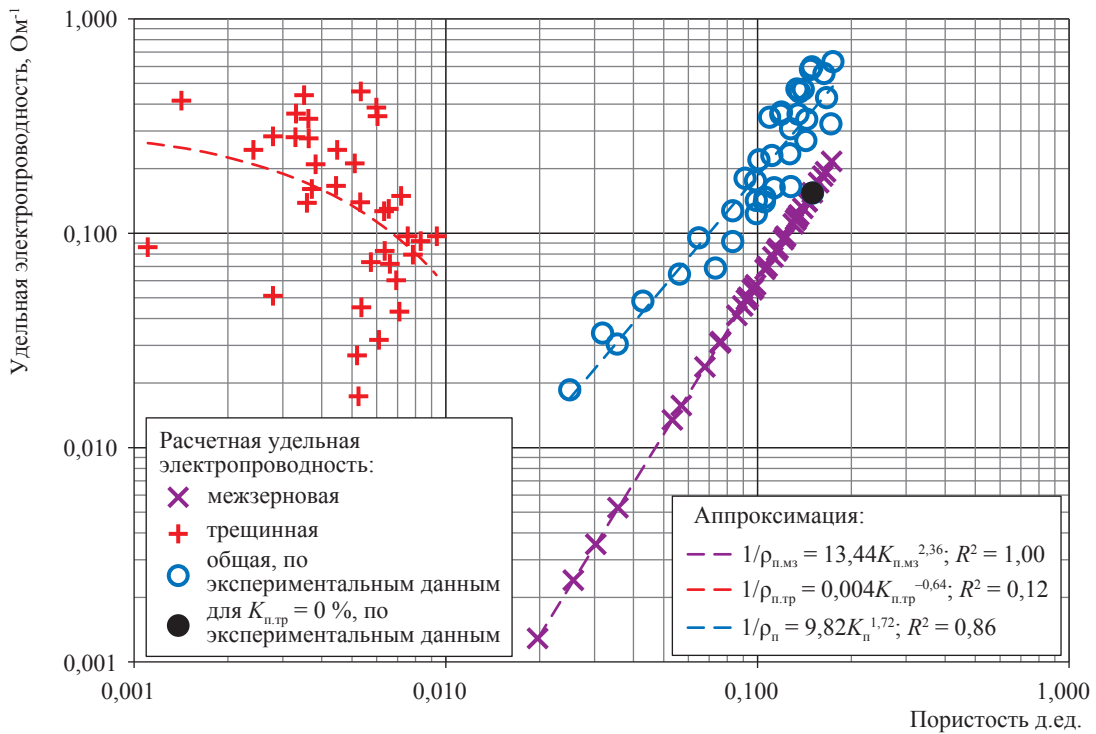


Рис. 7. Зависимость удельной электропроводности исследованных образцов горных пород от их пористости

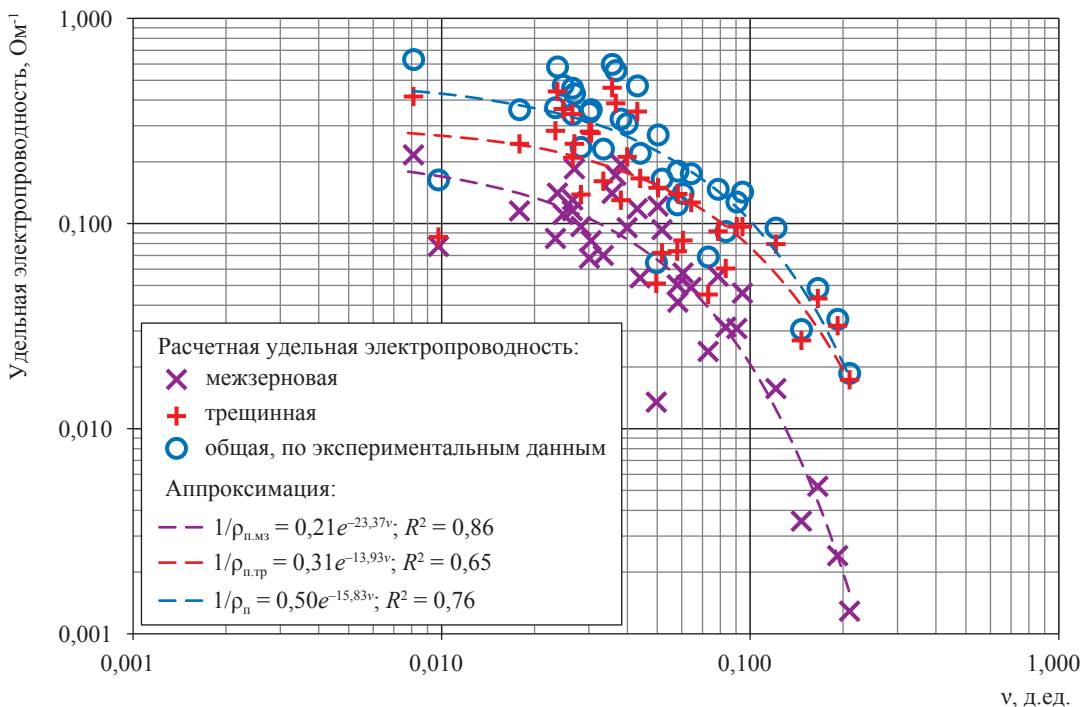


Рис. 8. Зависимости удельной электропроводности исследованных образцов горных пород от соотношения их трещинной и общей пористости

электропроводностью трещин $1/\rho_{п.тр}$. А при стремлении ν к нулю, т.е. при отсутствии трещин, общая электропроводность будет определяться электропроводностью межзернового порового пространства $1/\rho_{п.мз}$.

Также получим зависимости параметра пористости $P_{п}$ от общей, межзерновой и трещинной пористости (рис. 9). Для случая, когда присутствует только трещинная пористость, причем трещины открыты и взаимосвязаны (трещины 1-го типа), $P_{п}$ вычисляется по формуле

$$P_{п} = 1/K_{п.тр}, \quad (9)$$

причем в этом случае параметры a и m (см. форм. (8)) примерно равны единице [10].

На рис. 9 приведены и зависимость (9), и полученные расчетным путем значения параметра трещинной пористости. Сопоставив па-

раметр пористости для трещин 1-го типа (трещины открыты и взаимосвязаны [10]) и рассчитанный параметр трещинной пористости, авторы делают вывод о том, что выявленная ими трещинная пористость весьма далека от предельного случая взаимосвязанных трещин. Параметр трещинной пористости при этом не имеет явно выраженной и надежной статической зависимости от величины трещинной пористости.

Авторы также попытались определить зависимость $P_{п}$ от ν (рис. 10). Видно, что для данной коллекции горных пород уже при $\nu \approx 0,2$ параметр общей пористости близок к параметру трещинной пористости. А при стремлении ν к нулю, т.е. при отсутствии трещин, значение параметра общей пористости приближается к значению параметра межзерновой пористости.

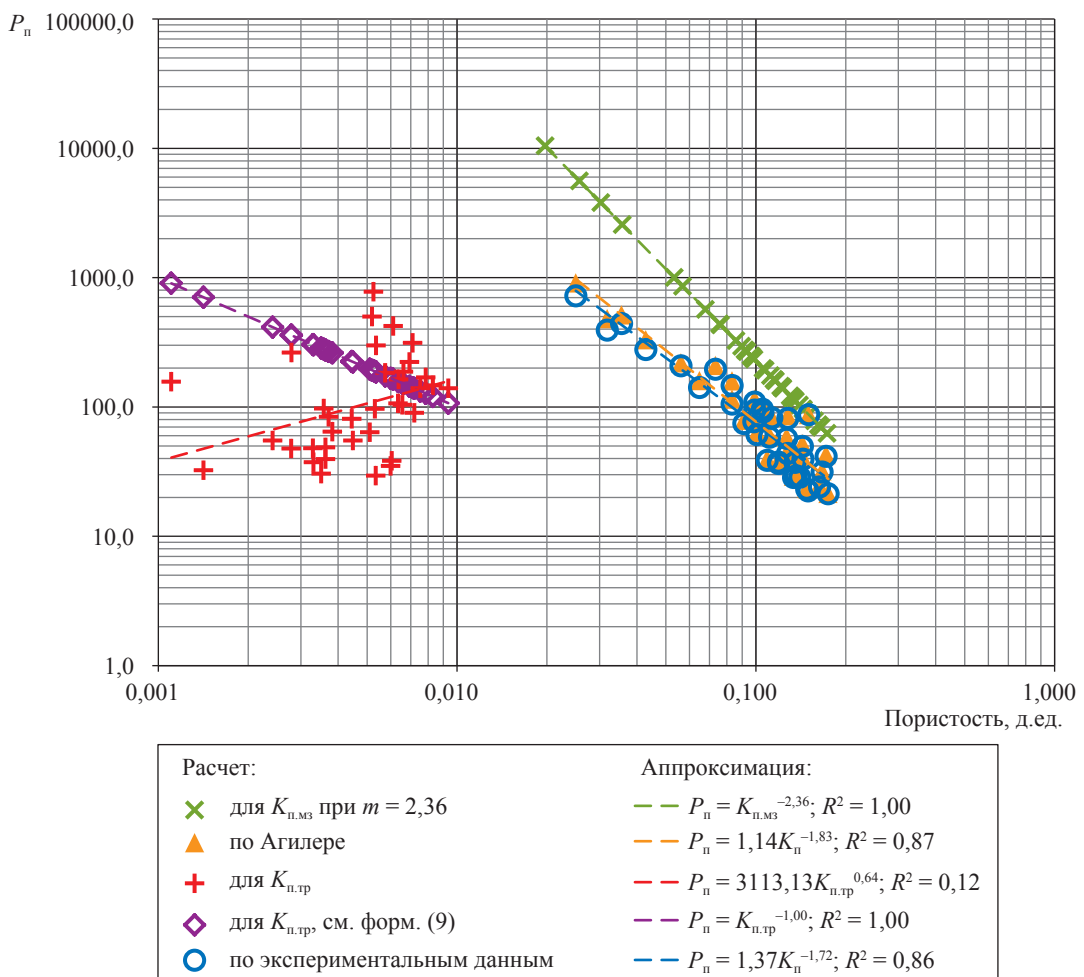


Рис. 9. Зависимость фактического и расчетного значений параметра пористости от пористости для исследованных образцов горных пород с двойной пористостью

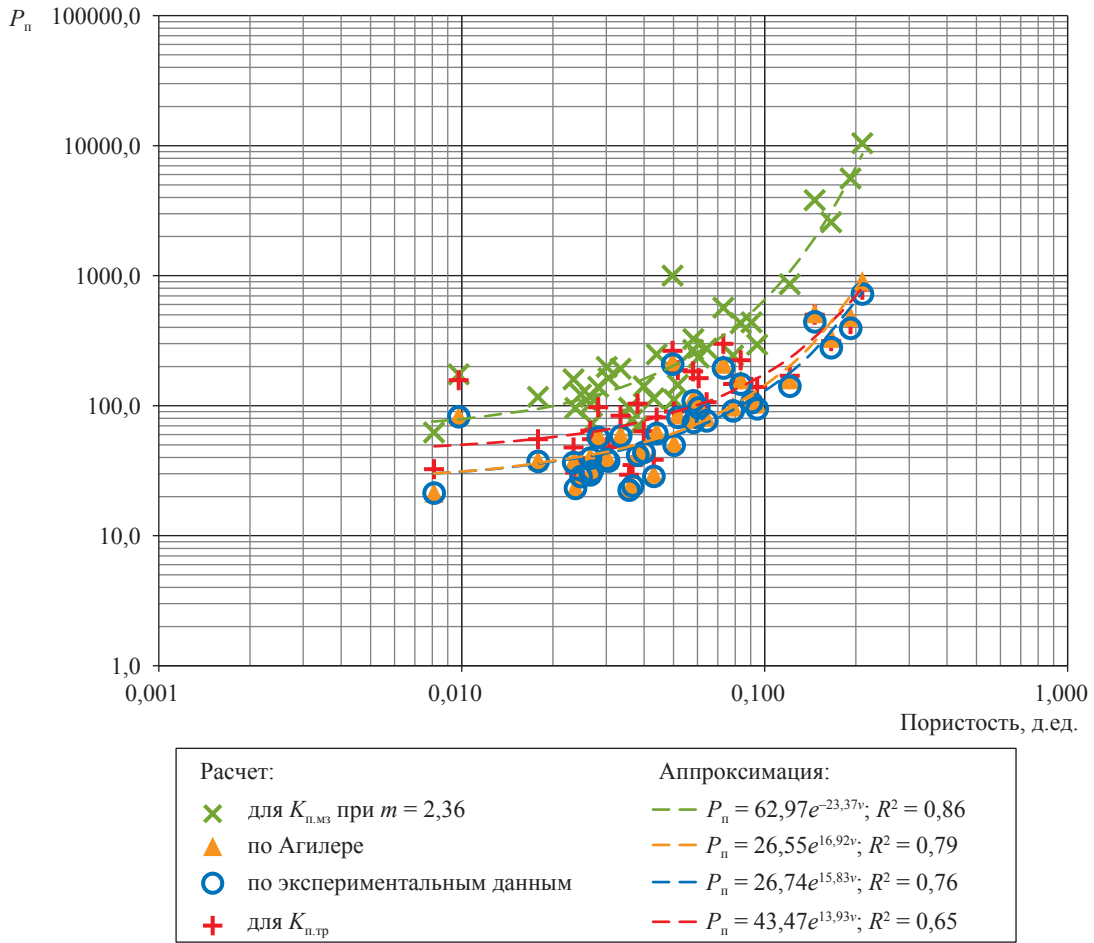


Рис. 10. Зависимости параметра пористости исследованных образцов горных пород от соотношения их трещинной и общей пористости

Оценено влияние межзерновой и трещинной пористости на значения таких петрофизических параметров, как скорость распространения упругих волн, удельная электрическая проводимость и параметр пористости, которые зачастую используются как при подсчете запасов, так и при подготовке проектов разработки месторождений. Показано, что для дан-

ной коллекции горных пород уже при 20%-ной доле трещинной пористости в общей пористости параметр пористости близок к параметру трещинной пористости. А при стремлении трещинной пористости к нулю, т.е. при отсутствии трещин, значение параметра пористости приближается к значению параметра пористости для межзерновой пористости.

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. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн / В.С. Жуков // Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г.: сб. научных ст. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 148–152.
3. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по данным о скорости распространения продольной волны на примере одного их месторождений Восточной Сибири / В.С. Жуков, О.В. Иселидзе // Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г.: сб. научных ст. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 153–157.

4. 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. научных ст. в 2 ч.; под редакцией Б.А. Григорьева. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. – Ч. 1. – С. 175–182.
5. Авчян Г.М. Петрофизика осадочных пород в глубинных условиях / Г.М. Авчян, А.А. Матвеев, З.Б. Стефанкевич. – М.: Недра, 1979. – 224 с.
6. 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.
7. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород / Ю.О. Кузьмин, В.С. Жуков. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 262 с.
8. 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. научных трудов. – М.: ВНИИГАЗ, 2008. – С. 154–168.
9. 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: сб. / пер. с англ. и фр. под ред. В. Мори и Д. Фурментро. – М.: Мир, 1994. – С. 176–184.
10. 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.: Премииум инжиниринг, 2011. – 866 с.
11. Aguilera R. Analysis of naturally fractured reservoirs from conventional well log / R. Aguilera // Journal of Petroleum Technology. – 1976. – V. 28. – P. 764–772.

Influence of various kinds of porosity on velocity of elastic waves and electrical conductivity of Chayanda field reservoir rocks

V.S. Zhukov^{1*}, V.V. Motorygin¹

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

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

Abstract. For authentic calculation of oil and gas reserves and preparation of projects of oil and gas fields' development it is necessary to consider the impact of intergranular and cracking porosities and their parity to physical properties of rocks. Samples of Vendian sandstone with open porosity from 3,2 to 18,3 % in atmospheric conditions were investigated. In modeled in-situ conditions their cracking porosity changes from 0,0 to 0,94 %, averaging 0,5 %. The average value of intergranular porosity is equal to 10,6 % (varies within the range of 2,0–17,3 %). A share of cracking porosity in general porosity averages 5,81 %, reaching 21 %.

Velocity of longitudinal and S-waves decrease with growth of general and intergranular porosity. The tendency of velocity increase if share of cracking porosity grows is noted. The reason is that at identical values of cracking porosity its share in the general porosity will be greater for poor-porous rocks.

The influence of intergranular and cracking porosity on specific electric resistance is estimated by means of Pirson's model, which provides parallel connection of cracks and pore channels. When intergranular and general porosities are growing, specific electric resistances decreases. It is shown that when the share of cracking porosity in general porosity is more than 20 %, general specific electric conductivity is almost completely defined by electric conductivity of cracks. And at aspiration of this share to zero, i.e. in the absence of cracks, the general specific electric conductivity is defined by specific electric conductivity of intergranular pore spaces. Revealed cracking porosity is rather far from a case of interconnected cracks.

Influence of intergranular and cracking porosity on velocity of elastic waves, specific electric conductivity and void parameter is estimated. These characteristics are frequently used both at calculation of stocks, and at preparation of projects for development of oil and gas fields.

Keywords: porosity, intergranular porosity, cracking porosity, velocity of elastic waves, specific electric resistance, in-situ conditions.

References

1. 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 nefiti i gaza obyemnym metodom]. Moscow: All-Russian Research Geological Oil Institute; Tver: Tvergeofizika, 2003. (Russ.).
2. ZHUKOV, V.S. Estimation of reservoir fracture pattern by elastic wave propagation velocity [Otsenka treshchinovostoi 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.).
3. 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 treshchinovostoi 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.).
4. ZHUKOV, V.S. and O.V. ISELIDZE. Estimation of fracturing of the Orenburg field's collectors by compressional velocity [Otsenka treshchinovostoi 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.).
5. AVCHAN, G.M., A.A. MATVEYENKO, Z.B. STEFANKEVICH. *Petrophysics of sedimentary rocks* [Petrofizika osadochnykh porod]. Moscow: Nedra, 1979. (Russ.).
6. DAKHNOV, V.N. *Geophysical methods for determination of reservoir properties and oil-gas-bearing of rocks* [Geofizicheskiye metody opredeleniya kollektorskiykh svoystv i neftegazonasyshcheniya gornyykh porod]. 2nd ed., revised. Moscow: Nedra, 1985. (Russ.).
7. KUZMIN, Yu.O. and V.S. ZHUKOV. *Recent geodynamics and physical properties' variations of rocks* [Sovremennaya geodinamika i variatsii fizicheskikh svoystv gornyykh porod]. Moscow: Moscow State University Publishers, 2004. (Russ.).
8. 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 obratstov produktivnykh gornyykh porod pri razrabotke mestorozhdeniy nefiti i gaza]. In: *Development of hydrocarbon fields* [Razrabotka mestorozhdeniy uglevodorodov]: collected papers. Moscow: VNIIGAZ, 2008, pp. 154–168. (Russ.).
9. TURANK, K., D. FURMENTRO, 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 gornyykh porod primenitelno k problemem razvedki i dobychi nefiti]: collected papers. Translated from English and French. Moscow: Mir, 1994, pp. 176–184. (Russ.).
10. TIAB, Dj. and Erle C. DONALDSON. *Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Translated from English. 2nd ed. Moscow: Premium inzhiniring, 2011. (Russ.).
11. AGUILERA, R. Analysis of naturally fractured reservoirs from conventional well log. *Journal of Petroleum Technology*. 1976, vol. 28, pp. 764–772. ISSN 0149-2136.