Научный журнал Российского газового общества. 2022. № 4(36). С. 6-17

Научная статья УДК 550.8.014:552.08 DOI 10.55557/2412-6497-2022-4-6-17

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИННОЙ ПОРИСТОСТИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДОЛОМИТОВ ЮРЯХСКОГО ГОРИЗОНТА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

## Екатерина Александровна Белкова <sup>1</sup>, Виталий Семенович Жуков <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия <sup>1</sup> Ekatbelk@ɑmail.com

<sup>2</sup> Vital.zhukov2018@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1159-5559

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований петрофизических свойств доломитов юряхского горизонта Восточной Сибири, имеющих различную трещинную пористость, в условиях, моделирующих пластовые. Приведены графики зависимости различных параметров образцов доломитов с ростом эффективного давления пласта. Показано, что на различные петрофизические параметры исследованных коллекторов влияет наличие в них трещинной пористости. Выявленные зависимости и оценки изменений физических свойств коллекторов от эффективного давления могут быть полезны при оптимизации процессов разработки месторождений.

Ключевые слова: пористость, трещинная пористость, скорость продольных волн, удельное электрическое сопротивление, параметр пористости, эффективное давление

Для цитирования: Белкова Е. А., Жуков В. С. Оценка влияния трещинной пористости на физические свойства доломитов юряхского горизонта Восточной Сибири // Научный журнал Российского газового общества. 2022. № 4(36). С. 6-17. DOI 10.55557/2412-6497-2022-4-6-17.

© Белкова Е. А., Жуков В. С., 2022

#### Scientific journal of the Russian gas society. 2022;4(36):6-17

Original article UDC 550.8.014:552.08 DOI 10.55557/2412-6497-2022-4-6-17

# EVALUATION OF THE INFLUENCE OF FRACTURED POROSITY ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF DOLOMITES FROM THE YURYAKH HORIZON OF EASTERN SIBERIA

Ekaterina A. Belkova <sup>1</sup>, Vitaliy S. Zhukov <sup>2</sup>

- <sup>1,2</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia
- <sup>1</sup>Ekatbelk@gmail.com
- <sup>2</sup>Vital.zhukov2018@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1159-5559.

**Abstract.** We present the results of experimental laboratory studies of petrophysical properties of dolomites of the Yuryakh horizon in Eastern Siberia with different fractured porosity under conditions simulating reservoir conditions. The graphs of dependence of various parameters of dolomite samples with the growth of effective reservoir pressure are presented. It is shown that different petrophysical parameters of the studied reservoirs are influenced by the presence of fractured porosity in them. The revealed dependences and assessments of changes in physical properties of reservoirs on the effective pressure can be useful in the optimization of field development processes.

**Keywords:** porosity, fractured porosity, longitudinal wave velocity, electrical resistivity, porosity parameter, effective pressure

**For citation:** Belkova E. A., Zhukov V. S. Evaluation of the influence of fractured porosity on the physical properties of dolomites from the Yuryakh horizon of Eastern Siberia. Scientific journal of the Russian gas society. 2022;4(36):6-17. DOI 10.55557/2412-6497-2022-2-6-17.

## Введение

Пористость является одним из основных параметров горной породы и разделяется на межзерновую, трещинную и кавернозную. Межзерновая характерна для обломочных пород, трещинная ярко наблюдается в более твердых образцах и скальных разновидностях, а кавернозная – в породах, частично подвергнутых растворению. Исследование влияния трещин, кроме важного фундаментального аспекта, играет значимую роль при поиске и разработке месторождений нефти и газа. Процессы возникновения, раскрытия и закрытия трещин имеют определенное отражение в изменениях физических свойств коллекторов, в частности пористости, скорости распространения упругих волн, удельных электрических сопротивлений.

В процессе разработки месторождений на истощение отмечается рост эффективного давления, происходит уменьшение величин фильтрационно-емкостных свойств (пористости, сжимаемости порового пространства), увеличение ряда физических свойств (скоростей распространения упругих волн, удельного электрического сопротивления), которые приводят к изменению дебитов скважин и различным геодинамическим последствиям [1–7].

Целью данной работы являлось определение влияния трещинной пористости на коллекторские и физические свойства горных пород – главного фактора при увеличении эффективного давления, сопровождающего процесс разработки месторождений, – на примере продуктивного карбонатного коллектора юряхского горизонта Восточной Сибири.

#### Состояние проблемы

Известны многочисленные работы, посвященные влиянию трещинной пористости на скорость распространения продольной волны, в которых установлено, что наличие трещин или разрывов снижает скорость прохождения продольной волны и амплитуду упругих колебаний [8–12].

Исследования влияния трещин на удельное электрическое сопротивление (УЭС) представлены не столь широко. Фундаментальными исследованиями этого направления можно назвать работы [13–17]. Подход исследования Aguilera заключался в использовании эмпирических уравнений, полученных для гранулированных сред, с расчетом, что они будут полезны при анализе трещиноватых коллекторов; целью являлось распространение метода на другие виды каротажа и презентация новых путей оценки трещиноватости по данным геофизических исследований скважин (ГИС). Анализ различных случаев продемонстрировал, что показатель пористости, выведенный автором в уравнениях, является показателем для обнаружения систем с естественными трещинами.

В ходе экспериментального исследования 2001 года Roberts, Bonner, Kasameyer на образцах андезита и брекчии установили, что величина изменения удельного сопротивления зависит от пористости и поверхностной проводимости, она намного больше для брекчии, обладающей высокой проницаемостью за счет повышенной трещиноватости. Ими было получено, что контраст удельного сопротивления увеличивается с уменьшением порового давления и меньшей пористостью матрицы. Измерения УЭС соответствовали поведению, наблюдаемому при полевых испытаниях [18], проведенных в 2000 году на трещиноватых туфах с помощью различных методов электроразведки. Таким образом, был сделан вывод, что областям повышенной трещиноватости и разломам сопутствуют аномалии удельного электрического сопротивления.

Также следует отметить исследования, представленные в монографии [19], где выведена принципиальная зависимость трещинной пустотности пород и УЭС. В статье [20] определено изменение УЭС гранитов от плотности трещин массива – эти значения имеют обратную линейную зависимость. Одними из последних являются исследования [21], где приведена оценка трещиноватости на основе моделей электротомографии и выявлено, что трещины контрастно проявляются в скальных породах в виде аномалий УЭС. При этом вдоль трещин существует область вторичного изменения вмещающих пород, которая до 10 раз по ширине превышает визуально наблюдаемую зону дезинтеграции пород. В работе [22] опубликованы экспериментальные результаты, которые показали, что кажущееся удельное сопротивление одних и тех же образцов породы зависит от интенсивности трещиноватости и ширины раскрытия трещин. Авторами работы [23] сделан вывод, что для песчаных коллекторов Чаяндинского месторождения уже при 20%-ной доле трещинной пористости в общей пористости параметр пористости близок к параметру трещинной пористости. Но при этом он не имеет явно выраженной и надежной статической зависимости от величины трещинной пористости.

#### Методика и объект исследований

Методики определения петрофизических параметров, рассматриваемых в данной работе, детально описаны в работах [24–25]. Комплекс физических свойств определялся на образцах, полностью насыщенных моделью пластовой воды, в условиях, моделирующих пластовые при разработке месторождений. В данной работе при исследовании влияния трещинной пористости на физические свойства исследуемых образцов доломита рассмотрены такие его петрофизические характеристики, как: коэффициент пористости в пластовых условиях  $Kn_m$ :

$$K \pi_{\pi\pi} = K \pi_{\text{атм}} - \frac{\Delta V_{\text{nop}}}{V_{\text{obp}}},\tag{1}$$

где  $K \Pi_{_{aTM}}$  – коэффициент пористости, определяемый методом жидкостенасыщения, %;  $\Delta V_{_{nop}}$  – изменение объема порового пространства образца при моделировании пластовых условий, равное объему вытесненной из образца жидкости;  $V_{_{ofp}}$  – объем образца, см<sup>3</sup>.

Скорость распространения упругих продольных волн  $V_{\rm n}$  :

$$V_p = \frac{L}{t_{p \text{ HSM}} - m_p},\tag{2}$$

где *L* – длина образца, м; *t<sub>р изм</sub>* – время пробега упругого импульса продольной волны от излучателя до приемника, в секундах; *m<sub>p</sub>* – время задержки импульса продольной волны в аппаратуре и преобразователях («мертвое время»), в секундах.

Параметр пористости или относительное сопротивление  $P_n$ :

$$P_{\Pi} = \frac{\rho_{\text{B.IL}}}{\rho_{\text{B}}},\tag{3}$$

где  $ho_{_{
m B\,IT}}$  и  $ho_{_{
m B\,IT}}$  – удельное сопротивление водонасыщенной породы и насыщающей ее воды соответственно.

Удельное сопротивление водонасыщенной породы зависит от строения поровых каналов, зависимость относительного сопротивления от пористости определяется формулой (4) [13, 26]:

$$P_{\Pi} = \frac{a}{\kappa_{\Pi}^{m}},\tag{4}$$

где *а* – коэффициент, изменяющийся для разных пород и характеризующий извилистость поровых каналов; Кп – коэффициент пористости; *m* – степень цементации, зависящая от трещинной пористости.

Эффективное давление рассчитывалось по следующей формуле:

$$P_{\rm sb} = P_{\rm BC} - \alpha P_{\rm IIOD},\tag{5}$$

где  $P_{_{\rm вс}}$  – всестороннее давление (давление обжима);  $P_{_{\rm пор}}$  – поровое давление;  $\alpha$  – коэффициент разгрузки (Биота), зависящий от свойств породы и принимаемый за единицу в случае, если пористость породы больше 3–5 %.

#### Методика определения трещинной пористости

Для расчета трещинной пористости  $K \pi_m$  используется эмпирическая формула [10, 12]:

$$K \pi_{\rm rp} = \{100 - 1.6 \, \text{K} \pi - 100 \left(\frac{v_p}{v_{pM}}\right)\}/20.4,\tag{6}$$

где Кп – коэффициент пористости,  $V_p$  – измеренная скорость распространения продольных волн в образце;  $V_{pM}$  – скорость продольных волн в минеральном скелете, постоянная при всех величинах эффективного давления.

#### Объект исследования

Объектом исследования являлись 40 образцов горных пород, изготовленных из керна скважин месторождения в Восточной Сибири (спутник Чаяндинского месторождения), представленных доломитами известковистыми и частично глинистыми юряхского продуктивного пласта с глубин 1657–1697 метров [27]. Пластовые условия юряхского продуктивного пласта составляют  $P_{_{\rm BC}}$  = 48,0 МПа,  $P_{_{\rm III}}$  = 18,0 МПа,  $P_{_{\rm III}}$  = 30,0 МПа, T = 23 °C.

#### Результаты экспериментальных исследований

Полученные в результате исследований керна данные о пористости и ее структуре 40 образцов доломита, исследованных при моделировании пластовых условий, представлены на **рисунке 1**.



Рисунок 1 – Структура общей пористости 40 образцов доломита при моделировании пластовых условий

Общая (открытая) пористость исследованных образцов керна в пластовых условиях колеблется от 8,55 % до 26,75 %, трещинная компонента пористости изменяется от 0,002 % до 0,769 %. Доля трещинной пористости в общей пористости составляет от 0,007 до 8,11 относительных процентов, при этом за 100 % принимается общая пористость каждого из образцов. Очевидно, что в структуре общей пористости преобладает межзерновая пористость с наличием небольшой доли трещин. С целью выявления и оценки закономерностей изменений физических свойств при переходе от атмосферных к пластовым условиям по результатам исследования 40 образцов доломита были построены графики зависимости от эффективного давления следующих петрофизических параметров: коэффициент общей пористости (*К*п), коэффициент трещинной пористости (*К*п<sub>тр</sub>), удельное электрическое сопротивление (УЭС), скорость распространения продольной волны (*V*<sub>p</sub>), параметр пористости (*P*<sub>n</sub>).

На **рисунке 2** приведены изменения среднего значения коэффициента пористости при переходе от атмосферных к пластовым условиям при эффективном давлении 30 МПа, там же показаны крайние значения для конкретных образцов с максимальным и минимальным значением коэффициента пористости по всей исследованной коллекции.



# Рисунок 2 – Графики: а) изменения коэффициента пористости; б) изменения коэффициента пористости относительно его начальной величины с увеличением эффективного давления по максимальным, средним и минимальным значениям

Из рисунка 2 видно, что образцы с наибольшей пористостью (26,75 % и 26,25 %) имеют наименьшие величины трещинной пористости (0,01 % и 0,00 %) и, наоборот, образцы с минимальной пористостью (9,48 % и 8,55 %) обладают наибольшей трещинной пористостью (0,77 % и 0,37 %). Изменения коэффициента пористости относительно его начальной величины говорят о том, образцы с наибольшей пористостью (20,98 % и 26,25 %) и небольшими величинами трещинной пористости (0,08 % и 0,002 %) менее интенсивные, чем средняя величина всех образцов. В то же время пористость образца с малой пористостью (9,48 %) и большой величиной трещинной пористости (0,769 %) с ростом эффективного давления до 30 МПа уменьшается до 0,967 от начальной, то есть претерпевает наибольшие относительные изменения.

Отметим, что полученная зависимость изменения величины средней пористости от эффективного давления с высокой степенью достоверности (детерминации) может быть аппроксимирована степенной зависимостью и применена для оценки предполагаемых изменений пористости при разработке месторождения на истощение (со снижением пластового давления). Также очевидно, что эта зависимость зависит от величины трещинной пористости, имеющейся в структуре пористости исследованных образцов.

Принципиально важно рассмотреть и оценить величины изменения трещинной пористости, которые приведены на **рисунке 3**, не только как основного объекта исследований, но и как наиболее податливого или сжимаемого компонента пористости.



Рисунок 3 – Графики изменения: а) величины коэффициента трещинной пористости; б) коэффициента трещинной пористости, нормированного на его начальное значение от величины эффективного давления по максимальным, средним и минимальным значениям

# GEOLOGY

Приведенные на рисунке 3 изменения трещинной пористости с ростом эффективного давления показывают наличие зависимости этих изменений от начальной величины трещинной пористости. Чем меньше эта величина, тем интенсивнее снижается трещинная пористость, но при этом наибольшие изменения происходят на начальном этапе роста эффективного давления до 15 МПа. Более высокий уровень изрезанности графиков с максимальными и минимальными величинами трещинной пористости по сравнению с графиком средних значений определяется сглаживанием средних значений при осреднении по 40 образцам, что в свою очередь повышает надежность их определения.

Наиболее известными методами определения УЭС коллекторов в скважине при определении величины пористости являются методы электрического каротажа, что и определило выбор анализа изменений УЭС, представленных на **рисунке 4**.



## Рисунок 4 – Графики изменения: а) удельного электрического сопротивления по максимальным, средним и минимальным значениям; б) удельного электрического сопротивления, нормированного на его начальную величину, полученные по максимальным, средним и минимальным значениям

Рисунок 4a ожидаемо показывает обратную зависимость пористости и УЭС. Изменения УЭС с ростом эффективного давления закономерно растут, подтверждая уменьшение объема порового пространства, заполненного электропроводящим раствором пластовой жидкости. Изменения УЭС относительно начальной величины (рисунок 4б) с ростом эффективного давления могут как увеличиваться, так и уменьшаться, что отличается от изменений общей и трещинной пористости, которые с ростом эффективного давления снижаются (рисунок 2 и 3). Но связи изменений УЭС с величиной трещинной пористости на этих графиках выявить не удалось. Возможно, это обусловлено сложным характером изменений структуры порового пространства и, в частности, изменением извилистости токопроводящих каналов.

Также для определения величины пористости коллекторов широко применяются методы акустического каротажа, измеряющие скорости распространения и затухания упругих волн в коллекторах, вскрытых скважинами, что и определило выбор анализа изменений скорости упругих продольных волн, представленных на **рисунке 5 (**см. с. 12).

В связи с тесной зависимостью скорости продольных волн от пористости (и плотности) ожидаемо (рисунок 5а) увеличение скорости с ростом эффективного давления, вызывающего уменьшение пористости. Изменения скоростей продольных волн, нормированные на ее начальное значение (при Р<sub>эф</sub> 2 МПа), с ростом эффективного давления закономерно растут (рисунок 5б), подтверждая уменьшение объема порового пространства, заполненного раствором пластовой жидкости, имеющей скорость продольной волны меньше (1,4–1,6 км/с), чем ее скорость в горной породе и твердой матрице (7,39 км/с). Так, максимальные изменения относительной скорости выявлены для образца с трещинной пористостью 0,856 % в атмосферных условиях. Кстати, в этом же образце отмечено и максимальное изменение трещинной пористости – на 0,624 % (с 0,856 % до 0,232 %) при увеличении эффективного давления с 2 до 30 МПа. Но прямой связи изменений скорости продольной волны с величиной трещинной пористости на этих графиках выявить не удалось. Возможно, это обусловлено тем, что, как показано в уравнении (6), при расчете величины трещинной пористости основное влияние оказывает скорость продольной волны в твердой матрице (скелете) образца, а не скорость продольной волны в начале увеличения эффективного давления.

Удельное сопротивление коллекторов нефти и газа зависит от электрического сопротивления минералов породы, пористости, удельного сопротивления воды, заполняющей поровое пространство, структурных и текстурных особенностей пород. Между пористостью и удельным сопротивлением нет строгой зависимости. Однако



Рисунок 5 – Графики изменения с увеличением эффективного давления: а) скорости продольных волн по максимальным, средним и минимальным значениям всех образцов; б) скорости продольных волн, нормированных на ее начальную величину, полученные по максимальным, средним и минимальным значениям

некоторые упрощения позволяют установить такую зависимость с вполне достаточной для практики точностью. Для пород одинакового типа, например доломитов, можно считать, что различие удельных сопротивлений пород, полностью насыщенных водой, в основном будет определяться изменениями их пористости и структуры порового пространства. Для исключения влияния минерализации пластовой воды, содержащейся в породе, при изучении пористости пород по их удельному сопротивлению рассматривается отношение удельного сопротивления водонасыщенной породы  $\rho_{\rm вп}$  к сопротивлению насыщающей ее воды  $\rho_{\rm в}$ . Изменения удельного электрического сопротивления для определения пористости обычно используются для расчета параметра пористости Рп (уравнения (3) и (4), который называют также относительным сопротивлением, или formation resistivity factor (Fr) в англоязычной литературе.

Этот параметр является одним из наиболее часто определяемых в водонасыщенных пластах при геофизических исследованиях скважин электрическими методами. На рисунке ба показано, что для исследованных образцов зависимость среднего значения параметра пористости от эффективного давления при переходе от атмосферных условий к пластовым условиям с высокой степенью достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,97$  описывается степенной зависимостью (7). Эту зависимость можно использовать для оценки изменений параметра пористости при дальнейшем снижении пластового давления и росте эффективного давления:

$$P_{\rm m} = 39,594 \cdot P_{\rm 20}^{0,0411}. \tag{7}$$



Графики изменения параметра пористости с увеличением эффективного давления представлены на рисунке 6.

Рисунок 6 – Графики изменения параметра пористости с увеличением эффективного давления: а) параметра пористости по всем образцам по максимальным, средним и минимальным значениям; б) параметра пористости, нормированного на начальное значение, по максимальным, средним и минимальным значениям

Были проанализированы изменения параметра пористости  $P_{_{\Pi}}$  для всей исследованной коллекции образцов в зависимости от величины трещинной пористости при увеличении эффективного давления (рисунок 6а). Но явная зависимость параметра пористости от величины трещинной пористости на данном графике не выявлена. Изменения среднего значения параметра пористости, нормированного на начальное значение (рисунок 6б), выявили устойчивую зависимость его роста при увеличении эффективного давления с высокой степенью достоверности. Однако эта зависимость является результатом сложения двух противоположных тенденций увеличения и снижения параметра пористости с ростом эффективного давления, так же как изменения нормированного УЭС (рисунок 4). Естественно, остается необходимость поиска более надежного способа оценки влияния трещинной пористости на параметр пористости.

#### Обсуждение результатов исследований

Для оценки влияния трещинной пористости были проанализированы результаты изменения общей (открытой) пористости, нормированной на ее начальные значения от величины доли трещинной пористости в общей пористости образцов, при увеличении эффективного давления (**рисунок 7**).

Рисунок 7 явно показывает, что нормированная пористость образцов с наибольшими величинами доли трещинной пористости (9,183 % и 7,787 %) с ростом эффективного давления уменьшается более интенсивно по сравнению с образцами с наименьшими величинами доли трещинной пористости (1,188 % и 1,267 %). Обусловлено это, возможно, тем, что сжимаемость трещин существенно выше, чем сжимаемость межзерновых пор [28].

Анализ зависимости изменений нормированной трещинной пористости с ростом эффективного давления для образцов с разной величиной трещинной пористости показал сложную картину (**рисунок 8**).

Из рисунка 8 видно, что нормированная трещинная пористость образца с максимальной трещинной пористостью (1,067 %) уменьшилась гораздо меньше, чем образца с трещинной пористостью (0,323 %), близкой к минимальной величине (0,314 %) в исследованной коллекции образцов. В то же время образцы с сильно отличающимися величинами трещинной пористости (0,958 % и 0,314 %) показали близкие со средней изменения нормированной трещинной пористости с ростом эффективного давления. Можно предположить, что обусловлено это сложным или даже хаотичным характером направления трещин в древних вендских отложениях юряхского горизонта, сформированных за длительный геологический период.

Для выявления влияния трещинной пористости на параметр пористости (один из широко используемых при геофизических исследованиях скважин) были рассмотрены его зависимости от коэффициента пористости, построенные при разбиении всей коллекции исследованных образцов на три группы по величине коэффициента трещинной пористости (**рисунок 9,** см. с. 14): менее 0,2 %, от 0,2 % до 0,4 % и более 0,4 %.

Сопоставление зависимостей параметра пористости от пористости показало, что общую зависимость статистически можно разделить на три части для групп образцов с величиной трещинной пористости: менее 0,2 %, от 0,2 % до 0,6% и более 0,6 %. Для образцов с минимальной величиной трещинной пористости (менее 0,2 %) эта зависимость, как и ожидалось, близка к уравнению Арчи – Дахнова:  $P_{\rm n} = a \ / \ {\rm Km}^{\rm m};$   $a = 0,4811; \ m = -2,458.$  Для образцов с максималь-



Рисунок 7 – Сопоставление изменений нормированной пористости с увеличением эффективного давления образцов с наименьшими, средними и наибольшими величинами доли трещинной пористости в общей пористости



Рисунок 8 – Сопоставление изменений нормированной трещинной пористости с увеличением эффективного давления образцов с наименьшими, средними и наибольшими величинами трещинной пористости в общей пористости



Рисунок 9 – Зависимости параметра пористости от пористости (по уравнению Арчи – Дахнова) для всех 40 образцов доломита (1 – синие кружки без заливки) и для образцов с трещинной пористостью: менее 0,2 % (2 – малые серые кружки) 14 образцов, от 0,2 до 0,4 % (3 – зеленые кружки) 16 образцов, более 0,4 % (4 – красные крестики) 10 образцов. 1–4 – аппроксимирующие линии (с коэффициентами детерминации *R*<sup>2</sup>), описываемые уравнениями: *P*<sub>п</sub> = 0,7912 Кп<sup>-2,097</sup>; *R*<sup>2</sup> = 0,820 (1); *P*<sub>п</sub> = 0,4811 Кп<sup>-2,458</sup>; *R*<sup>2</sup> = 0,989 (2); *P*<sub>п</sub> = 0,4284 Кп<sup>-2,432</sup>; *R*<sup>2</sup> = 0,931 (3); *P*<sub>п</sub> = 0,8779 Кп<sup>-1,963</sup>; *R*<sup>2</sup> = 0,6515 (4)

ной трещинной пористостью (более 0,6 %) зависимость приближается к зависимости Тиаба [29] и Агилера [16]  $P_{_{\Pi}} = 1/Kn; a = 0,8779; m = -1,963.$ 

<sup>3</sup>Зависимости нормированной скорости продольной волны от пористости для атмосферных условий и условий, моделирующих пластовые, представлены на **рисунке 10**.





Анализируя рисунок 10, можно видеть, что при переходе от атмосферных условий к условиям, моделирующим пластовые, диапазон распределения пористости смещается в сторону уменьшения. Так, среднее значение пористости в атмосферных условиях составляло 17,615 %, а в пластовых условиях – 17,262 %, то есть уменьшилось на 0,353 абс. %, или на 2,005 % относительно его же величины в атмосферных условиях. Средняя величина трещинной компоненты пористости в атмосферных условиях составляла 0,601 %, а в пластовых условиях – 0,261 %, то есть уменьшилась на 0,339 абс. %, или на 56,488 % по сравнению с атмосферными условиями.

На рисунке 10 приведены три зависимости нормированной скорости продольной волны от пористости (8) – (10), которые позволяют оценить вклад трещинной пористости и ее изменения при переходе от атмосферных к пластовым условиям:

$$V_{p_{aTM}} / V_{p_{M}} = -2,21 \cdot K_{\Pi_{aTM}} + 100$$
 в атмосферных условиях, (8)

$$V_{p_{\Pi\Pi}} / V_{p_{M}} = -1,85 \cdot K_{\Pi_{\Pi\Pi}} + 100$$
 в условиях, моделирующих пластовые, (9)

 $V_p / V_{p_M} = -21,19 \cdot K_{\Pi_{\Pi\Pi}} + 432,9$  при переходе атмосферные – пластовые условия. (10)

Очевидно, что в структуре пористости преобладает межзерновая пористость, так как доля трещинной пористости в пористости составляет в среднем 3,92 % в атмосферных условиях и 1,89 % в условиях, моделирующих пластовые.

В уравнениях (8)–(10) коэффициент при пористости (угловой коэффициент наклона зависимости нормированной скорости продольных волн от пористости) говорит о характере изменения компонент пористости [12]. При коэффициенте минус 1,6 изменяется только межзерновая пористость. При коэффициенте минус 22,0 изменяется только трещинная пористость. Увеличение доли трещинной пористости от 0 до 100 % будет сопровождаться ростом этого коэффициента от минус 1,6 до минус 22,0.

Более подробный анализ изменений пористости и нормированной скорости продольных волн исследованных образцов на основе наличия двух компонент пористости показал следующее. И в атмосферных, и в пластовых условиях превалирующим фактором распределения пористости в образцах является межзерновая пористость, хотя в атмосферных условиях (минус 2,21) по сравнению с пластовыми (минус 1,85) немного больше роль трещин. Обусловлено это тем, что микротрещины, имеющиеся в образцах горных пород при атмосферных условиях, в основном закрываются при переходе к условиям, моделирующим пластовые. А изменение углового коэффициента от минус 2,21 до минус 1,85 отражает снижение трещинной пористости. Показанная на рисунке 10 зависимость (10) может свидетельствовать о том, что при переходе от атмосферных условий к пластовым, то есть с ростом эффективного давления, в основном уменьшается объем микротрещин и частично межзерновани, вых пор, так как в уравнении (10) угловой коэффициент равен минус 21,19.

#### Заключение

Анализ зависимости изменений петрофизических свойств доломитов с наличием межзерновой и трещинной пористости с ростом эффективного давления при переходе от атмосферных условий к условиям, моделирующим пластовые, показал следующее.

Величины коэффициентов обшей и трещинной пористости уменьшаются.

Значения удельного электрического сопротивления и параметра пористости, характеризующие объем токопроводящего пространства пород и его структуру, растут.

Скорости продольных волн увеличиваются.

Полученные зависимости изменения петрофизических параметров имеют высокую степень достоверности аппроксимации и могут быть использованы для оценки их изменений в процессе разработки месторождения, сопровождающегося ростом эффективного давления. Анализ изменений пористости и нормированной скорости продольных волн исследованных образцов показал, что и в атмосферных, и в пластовых условиях превалирует межзерновая пористость. Но в атмосферных условиях, по сравнению с пластовыми, роль трещин немного больше. При переходе от атмосферных условий к пластовым, то есть с ростом эффективного давления, в основном уменьшается объем микротрещин и частично межзерновых пор, можно ожидать аналогичных изменений структуры пористости при дальнейшем росте эффективного давления, сопровождающего разработку месторождений.

Сопоставление результатов лабораторных исследований параметра пористости в условиях, моделирующих пластовые, показало, что с ростом трещинной пористости уменьшается наклон графика степенной зависимости параметра пористости от пористости. Для образцов с минимальной трещинной пористостью (менее 0,2 %) эта зависимость, как и ожидалось, близка к уравнению Арчи – Дахнова, предложенному для межзерновых коллекторов. Для образцов с трещинной пористостью более 0,4 % эта зависимость приближается к зависимости Тиаба и Агилера для трещинных образцов. Экспериментальные исследования показали, что трещинная пористость оказывает существенное влияние на петрофизические характеристики доломитов юряхского горизонта Восточной Сибири. Полученные зависимости могут быть использованы как для оценки запасов углеводородов, так и для проектирования разработки залежей углеводородов, сложенных карбонатными коллекторами со сложной структурой порового пространства.

## Список источников

1. Добрынин В. М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. М.: Недра. 1965. 163 с.

Арутюнов А. Е., Жуков В. С., Кузьмин Ю. О., Никонов А. И. Производственный мониторинг подземных хранилищ газа с целью обеспечения их геодинамической безопасности // Геодинамика в решении экологических проблем развития нефтегазового комплекса: Материалы совещания IV Международного рабочего совещания, Санкт-Петербург, 15–17 сентября 2003 года. Санкт-Петербург: 000 «ИРЦ Газпром», 2004. С. 54–63.

 Рыжов А. Е., Жуков В. С., Иселидзе О. В. и др. Динамика изменений физических свойств образцов продуктивных пород при разработке месторождений нефти и газа // Разработка месторождений углеводородов: Сборник научных трудов. М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2008.
 С. 154–168.

4. Жуков В. С. Оценка изменений физических свойств коллекторов, вызванных разработкой месторождений нефти и газа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 6. С. 341–349.

5. Жуков В. С. Иванов П. Ю. Изменение физических свойств коллектора как результат роста эффективного давления в процессе разработки месторождения (моделирование на примере Южно-Киринского месторождения) // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2015. № 4(24). С. 144–148.

6. Жуков В. С., Чуриков Ю. М., Моторыгин В. В. Изменения структуры порового пространства коллекторов дагинского горизонта при моделировании пластовых условий // Научно-технический сборник. Вести газовой науки. 2017. № 3(31). С. 238–246.

7. Жуков В. С., Семенов Е. О., Кузьмин Ю. О. Динамика физических свойств коллекторов при разработке месторождений нефти и газа // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2018. № 5(37). С. 82–99.

3. Авчян Г. М., Матвиенко А. А., Стефанкевич З. Б. Петрофизика осадочных пород в глубинных условиях. М.: Недра. 1979. 224 с.

9. Туранк К., Фурментро Д., Денни А. Распространение волн и границы раздела в породах. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. Перевод с английского и французского / под редакцией В. Мори, Д. Фурментро. М.: Мир. 1994. С. 176–184.

10. Жуков В. С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2012. № 1(9). С. 148–152.

11. Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кошелев А. Е. Зависимость скорости распространения и амплитуды продольных упругих волн от напряжений при различных режимах нагружения образцов каменного угля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 5. С. 48–53.

12. Жуков В. С., Кузьмин Ю. О. Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны // Физика Земли. 2020. № 4. С. 39–50. https://doi.org/10.31857/S0002333720040109.

13. Archie G. E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, Tram, AIME. 1942. Vol. 146. P. 54-67.

14. Пархоменко Э. И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука. 1965. 164 с.

15. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. М.: Недра, 1972. 365 с.

16. Aguilera R. Analysis of Naturally Fractured Reservoirs from Sonic and Resistivity Logs // Journal of Petroleum Technology. 1974. № 26(11). P. 1233–1238. https://doi.org/10/2118/4398-PA.

17. Roberts J. J., Bonner B. P., Kasameyer P. W. Electrical resistivity measurements of intact and fractured geothermal reservoir rocks // Proceedings, Twenty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California. 2001.

18. Ramirez A., Daily W. Electrical Imaging at the Large Block Test-Yucca Mountain, Nevada, report, October 1, 2000; Oak Ridge, Tennessee. URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc784782/m1/3/. University of North Texas Libraries, UNT Digital Library, https://digital.library.unt.edu; crediting UNT Libraries Government Documents Department.

19. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики. М: Недра, 1990. 502 с.

20. Backstorm A. A. Study of impact fracturing and electric resistivity related to Lockne impact structure, Sweden // Impact structures. Springer, 2005. P. 398-404.

21. Рязанцев П. А. Оценка трещиноватости скального массива на основе моделей электротомографии // Геофизика. 2015. № 1. С. 41–50.

22. Amadu C. C., Gawu S. K., Abanyie K. Experimental Study of Electrical Resistivity to Rock Fracture Intensity and Aperture Size // International Journal of Physics. 2018. Vol. 6, No 3. P. 85–92.

23. Жуков В. С. Моторыгин В. В. Влияние различных видов пористости на скорости упругих волн и электропроводность коллекторов Чаяндинского месторождения // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2017. № 2(30). С. 223–233.

24. Жуков В. С., Люгай Д. В. Определение фильтрационно-емкостных и упругих свойств и электрических параметров образцов горных пород при моделировании пластовых условий: Учебно-методическое пособие. М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2016. 56 с.

25. Иванов М. К., Калмыков Г. А., Белохин В. С., Корост Д. В., Хамидуллин Р. А. Петрофизические методы исследования кернового материала. Учебное пособие в двух книгах. Кн. 2: Лабораторные методы петрофизических исследований кернового материала. М.: Изд-во МГУ, 2008. 113 с.

Дахнов В. Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. М.: Недра. 1985. 344 с.
 Косачук Г. П., Буракова С. В., Буточкина С. И., Мельникова Е. В., Будревич Н. В. К вопросу о формировании нефтяных залежей (оторо-

чек) месторождений Непско-Ботуобинской антеклизы // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2013. № 5(16). С. 114–123.

28. Жуков В. С., Кузьмин Ю. О. Экспериментальная оценка коэффициентов сжимаемости трещин и межзерновых пор коллектора нефти и газа // Записки Горного института. 2021. Т. 251. № 5. С. 658–666. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.5.

29. Tiab D., Donaldson E. C. Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties – 2nd edition. Elsevier, Gulf Professional Publishing. 2004. 889 p.

GEOLOGY

# References

1. Dobrynin V. M. Deformations and changes in physical properties of oil and gas reservoirs. M.: Nedra. 1965. 163 p. (In Russ.).

2. Arutyunov A. E., Zhukov V. S., Kuzmin Y. O., Nikonov A. I. Production monitoring of underground gas storages to ensure their geodynamic safety // Geodynamics in solving environmental problems of oil and gas complex development: Proceedings of IV International Workshop, St. Petersburg, 15–17 September 2003. Saint-Petersburg: IRC Gazprom, 2004. P. 54–63 (In Russ.).

3. Ryzhov A. E., Zhukov V. S., Iselidze O. V., et al. Dynamics of changes in physical properties of productive rock samples during development of oil and gas fields // Hydrocarbon field development: a collection of scientific papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2008. P. 154–168 (In Russ.).

4. Zhukov V. S. Assessment of changes in the physical properties of reservoirs caused by the development of oil and gas fields // Mountain Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2010. № 6. P. 341–349 (In Russ.).

5. Zhukov V. S. Ivanov P. Y. Changes in physical properties of the reservoir as a result of effective pressure growth during field development (modeling by the example of Yuzhno-Kirinskoye field) // Scientific and Technical Collection "Vesti gazovoy nauki". 2015. № 4(24). P. 144–148 (In Russ.).

6. Zhukov V. S., Churikov Yu. M., Motorygin V. V. Changes in the structure of pore space of Daginskiy horizon reservoirs when simulating reservoir conditions // Scientific and Technical Collection "Vesti gazovoy nauki". 2017. № 3(31). P. 238–246 (In Russ.).

7. Zhukov V. S., Semenov E. O., Kuzmin Y. O. Dynamics of physical properties of reservoirs at development of oil and gas fields // Scientific and Technical Collection "Vesti gazovoy nauki". 2018. № 5(37). P. 82–99 (In Russ.).

Avchyan G. M., Matvienko A. A., Stefankevich Z. B. Petrophysics of sedimentary rocks in deep conditions. Moscow: Nedra. 1979. 224 p. (In Russ.).
 Turank K., Furmentro D., Denny A. Wave propagation and interface in rocks. Rock mechanics as applied to problems of oil exploration and

production. Translation from English and French / Edited by V. Mori, D. Furmentro. Moscow: Mir, 1994. P. 176–184 (In Russ.).

10. Zhukov V. S. Assessment of fracturing of reservoirs by the velocity of elastic wave propagation // Scientific and Technical Collection "Vesti gazovoy nauki". 2012. № 1(9). P. 148–152 (In Russ.).

11. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Koshelev A. E. Stress dependence of elastic P-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52, No 5. P. 873–877. https://doi.org/10.1134/S1062739116041322.

12. Zhukov V. S., Kuzmin Y. O. The Influence of Fracturing of the Rocks and Model Materials on P-Wave Propagation Velocity: Experimental Studies // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020. Vol. 56, No 4. P. 470–480. https://doi.org/10.1134/S1069351320040102.

13. Archie G. E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, Tram, AIME. 1942. Vol. 146. P. 54–67.

14. Parkhomenko E. I. Electrical Properties of Rocks. Moscow: Nauka. 1965. 164 p. (In Russ.).

15. Dakhnov V.N. Interprenation of results of geophysical well surveys. Moscow: Nedra. 1972. 365 p. (In Russ.).

16. Aguilera R. Analysis of Naturally Fractured Reservoirs from Sonic and Resistivity Logs // Journal of Petroleum Technology. 1974. № 26(11). P. 1233–1238. https://doi.org/10/2118/4398-PA.

17. Roberts J. J., Bonner B. P., Kasameyer P. W. Electrical resistivity measurements of intact and fractured geothermal reservoir rocks // Proceedings, Twenty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California. 2001.

18. Ramirez A., Daily, W. Electrical Imaging at the Large Block Test-Yucca Mountain, Nevada, report, October 1, 2000; Oak Ridge, Tennessee. URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc784782/m1/3/. University of North Texas Libraries, UNT Digital Library, https://digital.library.unt.edu; crediting UNT Libraries Government Documents Department.

19. Ogilvi A. A. Fundamentals of engineering geophysics. Moscow: Nedra, 1990. 502 p. (In Russ.).

20. Backstorm A. A. Study of impact fracturing and electric resistivity related to Lockne impact structure, Sweden // Impact structures. Springer, 2005. P. 398-404.

21. Ryazantsev P. A. Assessment of rock massif fracturing based on electrotomography models // Geophysics. 2015. № 1. P. 41–50 (In Russ.).

22. Amadu C. C., Gawu S. K., Abanyie K. Experimental Study of Electrical Resistivity to Rock Fracture Intensity and Aperture Size // International Journal of Physics. 2018. Vol. 6, No 3. P. 85–92.

23. Zhukov V. S. Motorygin V. V. Influence of various kinds of porosity on velocity of elastic waves and electrical conductivity of Chayanda field reservoirs rocks // Scientific and Technical Collection "Vesti gazovoy nauki". 2017. № 2(30). P. 223–233 (In Russ.).

24. Zhukov V. S., Lyugai D. V. Determination of filtration-capacitative and elastic properties and electrical parameters of rock samples when simulating reservoir conditions: Training manual. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2016. 56 p. (In Russ.).

25. Ivanov M. K., Kalmykov G. A., Belokhin V. S., Korost D. V., Khamidullin R. A. Petrophysical methods of core material study. Textbook in 2 Books. Vol. 2: Laboratory Techniques of Petrophysical Investigations of Core Material. Moscow: Publishing house of Moscow State University, 2008. 113 p. (In Russ.).

26. Dakhnov V. N. Geophysical methods of determination of reservoir properties and oil and gas saturation of rocks. Moscow: Nedra. 1985. 344 p. (In Russ.).

27. Kosachuk G. P., Burakova S. V., Butochkina S. I., Melnikova E. V., Budrevich N. V. On the forming of Oil Deposits (Rims) of the Nepsko-Botuobinskaya Anteclise Fields // Scientific and Technical Collection "Vesti gazovoy nauki". 2013. № 5(16). P. 114–123 (In Russ.).

28. Zhukov V. S., Kuzmin Y. O. Experimental evaluation of compressibility coefficients for fractures and intergranular pores of an oil and gas reservoir // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 251. P. 658–666. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.5.

29. Tiab D., Donaldson E. C. Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties – 2nd edition. Elsevier, Gulf Professional Publishing. 2004. 889 p.

Информация об авторах: Виталий Семенович Жуков, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Екатерина Александровна Белкова, инженер, магистрант физического факультета МГУ

Information about the authors: Vitaliy S. Zhukov, doctor of technical sciences, chief researche, Ekaterina A. Belkova, engineer, MA student in the physics department MSU

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022; принята к публикации 17.11.2022. The article was submitted 14.11.2022; approved after reviewing 16.11.2022; accepted for publication 17.11.2022.