

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ

© 2020 г. В. С. Жуков¹, Ю. О. Кузьмин², *

¹ООО “Газпром-ВНИИГАЗ”, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: kuzmin@ifz.ru

Поступила в редакцию 07.10.2019 г.

После доработки 10.01.2020 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

В работе показано, что жесткость среды является более тензочувствительным параметром, чем плотность горных пород для величины скорости упругой волны при росте глубины. Для оценки влияния межзерновой и трещинной пористости использовано выраженное в процентах отношение измеренного значения скорости продольных волн в горной породе к скорости в ее твердой матрице — “нормированная скорость”. Результаты экспериментальных исследований показали, что влияние трещин (разрывных нарушений, стыков горных пород) и межзерновой пористости на скорость распространения упругих продольных волн имеет разный характер. Увеличение трещинной пористости сильнее снижает скорость распространения продольных волн, чем увеличение межзерновой пористости идентичной величины. Показано влияние наличия и числа разрывных нарушений на скорости распространения упругих продольных волн в горных породах и модельных материалах. Демонстрируется возможность селективной оценки величин межзерновой и трещинной пористости для горных пород-коллекторов месторождений нефти и газа при их разработке.

Ключевые слова: скорость упругих волн, горная порода, пористость, трещины, пластовые условия, эффективное давление.

DOI: 10.31857/S0002333720040109

ВВЕДЕНИЕ

Широкая распространенность различных видов разрывных нарушений горных пород (от микротрещин до региональных тектонических разломов) оказывает существенное влияние на их физические свойства и во многом определяет тектонофизические условия формирования геодинамических режимов различных регионов. Зачастую залежи углеводородов приурочены или осложняются разломной тектоникой, что формирует трещиноватую структуру резервуаров. Кроме того, разломные зоны нефтегазоносных осадочных бассейнов характеризуются интенсивными вариациями локального напряженно-деформированного состояния во времени [Кузьмин, 1999; 2015; 2016; 2018; 2019а; б; Кузьмин, Жуков, 2004]. Но, несмотря на широкое использование данных сейсмологии и сейсморазведки для изучения геологического строения, до сих пор, даже на лабораторном уровне, недостаточно исследованы различные аспекты влияния разрывных нарушений на скорости распространения упругих продольных волн.

Важно отметить, что зачастую, многие исследователи используют термин “разуплотненность” характеризуя увеличение степени трещиноватости среды. Это во многом понятно, поскольку в геолого-геофизической литературе очень часто термин “разуплотнение” означает “размягчение” и наоборот. Действительно, во многих случаях более плотные породы имеют большую жесткость (прочность). Однако не следует забывать, что плотность гранита почти в четыре раза меньше плотности руты. Поэтому термины “плотность” и “жесткость” не являются идентичными понятиями, а иногда выступают в качестве антиподов. Это происходит, когда исследуется явление увеличения скорости сейсмических волн с глубиной. Так, например, в одномерном случае в формуле скорости продольных волн, жесткость среды (E) расположена в числителе, а плотность (ρ) в знаменателе ($V = \sqrt{E/\rho}$). Увеличение жесткости среды (“ужесточение”) приводит к увеличению скорости сейсмических волн, а уплотнение, соответственно, к ее уменьшению. Это находится в полном соответствии с принятой в физике феноменологической моде-

лю, согласно которой среда представлена набором материальных шаров плотностью ρ и упругими пружинами жесткостью E . Естественно, что более жесткие пружины быстрее передают колебания, а более тяжелые шары, затрудняют эту передачу. Может показаться, что подобная ситуация противоречит экспериментальным данным, т.к. установлено, что с глубиной увеличивается и скорость сейсмических волн, и плотность среды. Но это справедливо, если считать, что жесткость среды не меняется с глубиной. В действительности же, и жесткость среды, и ее плотность увеличиваются с глубиной, но увеличение жесткости (упругих модулей) с глубиной оказывается существенно большим, чем плотности. Таким образом, жесткость среды является более тензочувствительным параметром, чем плотность для величины скорости сейсмической волны. Именно поэтому для описания процессов трещинообразования более уместно использование термина “разупрочнение” (“размягчение”) [Кузьмин, 1999; 2013; 2015]. К сожалению, в сейсморазведке, при построении сейсмических разрезов часто учитывается корреляционная зависимость скорости от плотности, что несколько снижает возможности интерпретации сейсморазведочных данных.

В геофизике широко используется зависимость скорости упругой продольной волны от пористости [Ризниченко, 1949] или так называемое “уравнение интервального среднего времени” (уравнение Вилли) [Wyllie, 1956], которое основано на представлении горной породы в виде совокупности зерен, между которыми присутствует флюид. Хорошо известно, что объем порового пространства горных пород состоит из таких компонент как объем межзернового пространства и объем трещин. Поэтому, изучая экспериментально влияние пористости на скорость распространения упругих волн, исследователи имеют дело с “интегральным” проявлением этого параметра. В то же время оценка влияния именно трещин на скорости упругих волн исследована недостаточно.

Известны работы, посвященные влиянию трещин на скорость распространения продольной волны, в которых установлено, что наличие трещин или разрывов снижает скорость прохождения продольной волны и амплитуду колебаний, регистрируемую пьезоэлектрическими или другими датчиками [Anderson, 1974; Young et al., 1985; Sassa, Watanabe, 1995; Kahraman, 2001; Kurtulus et al., 2011; Azhari et al., 2013; Altindag, Guney, 2005; и др.].

Кроме того, в ряде теоретических и экспериментальных исследований [Nur, 1971; Nur, Simmons, 1969; Sassa, Watanabe, 1995; Walsh, 1965; Walsh, Brace, 1966; Wyllie et al., 1962; Wyllie, Gregory, 1956; Young et al., 1985; Баюк, Рыжков, 2010; Zobak, 2007; Tiab, Donaldson, 2004; Иньков и др., 2005; Жуков и др., 2018] показано, что на скорость продольных волн сильно влияют неоднородности

состава и нарушения структуры горных пород, в частности, трещины.

В работе [Туранк и др., 1994] рассмотрено влияние трещин как на скорости упругих продольных и поперечных волн. Наибольшая достоверность результатов была достигнута в опытах с продольными волнами, так как они могут быть измерены достаточно просто и с высокой точностью. В работе [Туранк и др., 1994] для оценки неоднородностей горных пород предложено использовать выраженный в процентах коэффициент добротности. Авторами данной статьи предлагается термин “нормированная скорость” \tilde{V}_p как отношение измеренного значения скорости продольных волн V_p к скорости в твердой матрице горной породы V_{p_m} , (1), где предполагается отсутствие межзерновой пористости и трещин. Полученная таким образом величина характеризует общее воздействие всех границ раздела на измеренную скорость продольной волны:

$$\tilde{V}_p = 100 \frac{V_p}{V_{p_m}}. \quad (1)$$

Хорошо известно, что межзерновые поры и трещины совместно образуют полную или общую пористость m (2):

$$m = m_{ig} + m_{fr}, \quad (2)$$

где: m – общая пористость, m_{ig} – межзерновая или межгранулярная пористость; m_{fr} – трещинная пористость.

В работе [Туранк и др., 1994] показано, что для горных пород с межзерновой пористостью зависимость нормированной скорости от пористости имеет вид (3):

$$\tilde{V}_p = 100 - 1.6m_{ig}, \quad (3)$$

а для трещиноватых пород имеет вид (4):

$$\tilde{V}_p = 100 - 22.0m_{fr}. \quad (4)$$

При одновременном наличии межзерновых пор и трещин выражение для нормированной скорости будет иметь вид (5):

$$\tilde{V}_p = 100 - 1.6m_{ig} - 22.0m_{fr}. \quad (5)$$

Зависимости (3) и (4) приведены на рис. 1 в виде наклонных линий (точки – межзерновая пористость и длинные штрихи – трещинная пористость).

Для формирования хаотически ориентированных трещин авторы работы [Туранк и др., 1994] нагревали до температур 450–600°C [Ge et al., 2018; Li et al., 2020] образцы гранита Лувиње-дю-Дезер (обозначены крестиками) и Каррарского мрамора (обозначены наклонными крестиками), в которых отсутствовала межзерновая пористость. Также добывались хаотического растрескивания при нагревании образцов песчаника Фонтенбло с межзерновой пористостью 6.6% (обозначены незалитыми кружками) и известняка с межзерновой пористо-

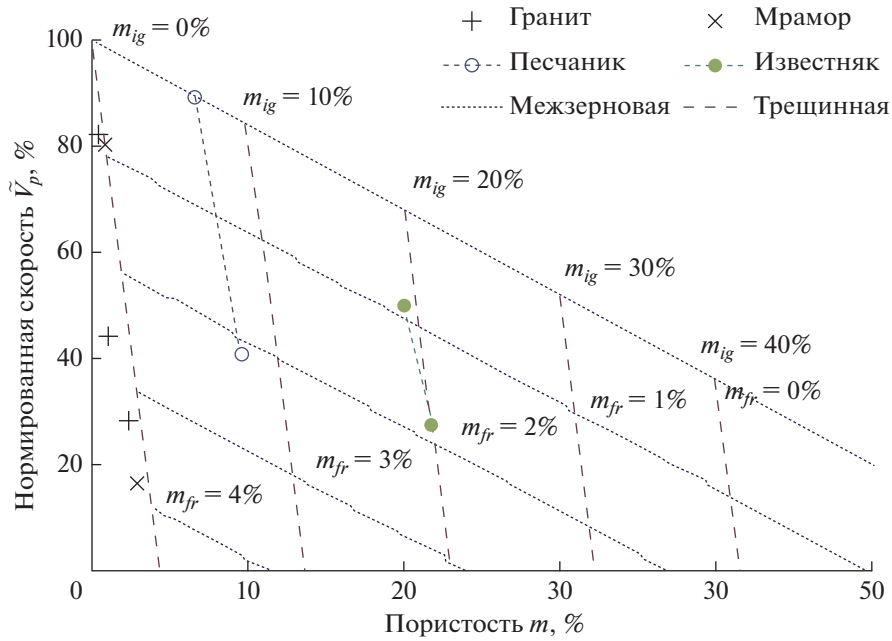


Рис. 1. Нормированная скорость продольной волны в зависимости от пористости для различных горных пород.

стью 20% (обозначены залитыми кружками). Полученные величины пористости и скорости упругой продольной волны послужили для расчетов нормированной скорости в этих образцах (рис. 1) в зависимости от пористости.

Таким образом, в работе [Туранк и др., 1994] на основе анализа экспериментальных результатов показано, что межзерновая и трещинная пористость различным образом влияют на скорость продольной волны.

Авторами данной статьи обосновывается предположение, что имеется возможность раздельного определения величины двух компонент пористости (межзерновой m_{ig} и трещинной m_{fr}), измеряя общую пористость m и скорость распространения продольной волны в горной породе V_p , а также используя ее известное значение в твердой матрице V_{p_m} .

Учитывая, что общая пористость состоит из этих двух компонент (2), из формулы (5) было получено выражение (6) [Жуков, 2012] для расчета, например, величины трещинной пористости с использованием зависимости нормированной скорости от общей пористости:

$$m_{fr} = \left(100 - 1.6m - 100 \times \frac{V_p}{V_{p_m}} \right) / 20.4. \quad (6)$$

Для обоснования этого подхода в данной работе приведено эмпирическое обобщение результатов большого массива лабораторных экспериментов на образцах горных пород и модельных материалов по исследованию закономерностей скоростей распространения упругих волн в тре-

щиновато-пористых средах. Основной целью является экспериментальная проверка эмпирических соотношений, полученных в работе [Туранк и др., 1994], выявление зависимости скорости распространения продольной волны от наличия трещин путем исследования ряда модельных материалов и составных образцов горных пород, а также разработка метода селективной оценки величин межзерновой и трещинной пористости для горных пород-коллекторов месторождений нефти и газа. Для этого были исследованы модели трещин, выполненные из стальных и титановых дисков, модели межзерновой пористости, созданные из смеси свинцовых шариков разного диаметра, а также использованы материалы исследований образцов горных пород и кернов, извлеченных из скважин ряда месторождений углеводородов.

Рассматриваемый авторами данной работы подход к определению трещинной пористости, позволил сделать оценку вклада изменений структуры пористости как одного из факторов, формирующих отклик среды на изменения современного напряженного состояния, в частности, при разработке месторождений нефти и газа [Жуков и др., 2002; 2017; 2018].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение скоростей распространения упругих волн проводилось методом прозвучивания с помощью автоматизированной установки моделирования пластовых условий “ПУМА-650”



Рис. 2. Принципиальная гидравлическая схема и внешний вид установки ПУМА-650 (ЭКОПЛАСТ).

по методике, приведенной в [Жуков, Люгай, 2016]. Она позволяет непосредственно определять изменение объема порового пространства, скорости распространения упругих продольных и поперечных волн и ряд других петрофизических параметров образцов горных пород и модельных материалов в условиях, моделирующих пластовые, в широком диапазоне задаваемых значений давлений и температур.

Образцы горных пород помещались в камеру высокого давления. После этого, постепенно небольшими ступенями, увеличивали давление всестороннего сжатия до 15.0 МПа и поровое давление до 13.0 МПа, вследствие чего достигалось начальное эффективное давление $P_{эф} = 2.0$ МПа. Затем ступенчато увеличивали значение всестороннего сжатия до величины, соответствующей пластовой (50.0 МПа), поддерживая постоянным поровое давление на уровне 13.0 МПа, поднимая тем самым эффективное давление до величины 37.0 МПа. Относительная погрешность измерений всестороннего и порового давлений составляла $\pm 0.25\%$. (рис. 2).

Полученные экспериментальные данные об изменениях пористости позволили рассчитать изменения плотности образцов и сжимаемости его порового пространства. Результаты измерения скоростей упругих продольных и поперечных волн позволили рассчитать такие динамические упругие параметры как модуль сдвига и модуль объемного сжатия исследуемых объектов.

В дальнейшем значения всех исследованных параметров (пористости, плотности, скорости продольной волны, упругих параметров) при текущих значениях эффективного давления были, для примера, нормированы на величины соответ-

ствующих параметров при эффективном давлении 2.0 МПа и получены их относительные изменения с ростом эффективного давления, что имитировало увеличение глубины залегания пласта (рис. 3).

Наибольшее относительное увеличение – на 40.5% – получено для модуля объемного сжатия K . Скорость продольной волны V_p выросла на 11.7%. Плотность выросла только на 0.8%, а пористость уменьшилась на 11.4% относительно первоначального значения. Возвращаясь к проблеме зависимости скорости упругих волн от упругих модулей и плотности, которая отмечалась во Введении, и анализируя рис. 3, можно отметить, что основным фактором, влияющим на рост скорости с увеличением эффективного давления (или глубины залегания пласта), является рост упругих модулей, т.е. жесткости породы. А увеличение при этом плотности лишь частично снижает влияние роста упругих модулей. Таким образом, подтверждается большая тензочувствительность жесткостных параметров, по сравнению с плотностью пород, которые используются в формуле для расчета скоростей упругих волн.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Простейшие модели горной породы, применяемые в рамках теории упругости, состоят из шаров (одинакового или разного размера), уложенных в различные упаковки (кубическая, гексагональная и др.). Однако реальное влияние давления на упругие параметры объясняется более сложной структурой осадочных пород, которые не являются однородными, как это предполагает-

ся в простых моделях упругой среды. Поэтому, влияние межзерновой пористости и трещин на скорость продольной волны экспериментально исследовалось на модельных материалах и горных породах. При этом, использовались как результаты собственных экспериментов, так и данные, полученные другими исследователями.

Модели межзерновой пористости

Для экспериментальной проверки приведенного выше уравнения (3) была проведена серия экспериментов на модели межзерновой пористости – смеси свинцовых шариков разных размеров. Кроме того, были использованы опубликованные данные исследований [Plona, 1980] зависимости скорости продольной волны от пористости материала, изготовленного из стеклянных шариков диаметром 0.21 и 0.29 мм.

Для моделирования межзерновой пористости нами были использованы свинцовые шарики двух размеров: диаметром 2.40 и 6.93 мм. Были приготовлены образцы смесей, содержащие разное количество шариков того или иного размера. Определение пористости каждой смеси, составленной из свинцовых шариков разных размеров, определялась на порозиметре Ultra Pore газоволюметрическим способом, пористость смесей составляла 45.70; 40.95 и 35.23%. Скорость упругой волны материала свинцовых шариков составила 2.50 км/с. Сравнение зависимости скорости упругой волны от пористости для смесей свинцовых шариков и смесей стеклянных шариков приведены на рис. 4.

Зависимость скорости от общей пористости для смесей свинцовых шариков (рис. 4а) с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0.998$) аппроксимируется линейной формулой (7):

$$V_p = -0.040m + 2.494. \tag{7}$$

В этой формуле второе слагаемое (2.494), означающее скорость в материале шариков при пористости, равной нулю, практически совпадает с измеренным значением (2.50 км/с).

Зависимость нормированной скорости от общей пористости для моделей из смеси свинцовых шариков разных диаметров (рис. 4б) с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0.998$) аппроксимируется линейной формулой (8):

$$\tilde{V}_p = -1.605m + 99.8. \tag{8}$$

Для стеклянных шариков значение скорости продольной волны в стекле равно 5.69 км/с, приведенное в работе [Plona, 1980], значительно отличается от скорости в стекле, указываемой в других источниках. Так, в работе [NDT..., 2001–2014] приводится значение скорости в стекле (glass window) 6.79 км/с, которое было принято

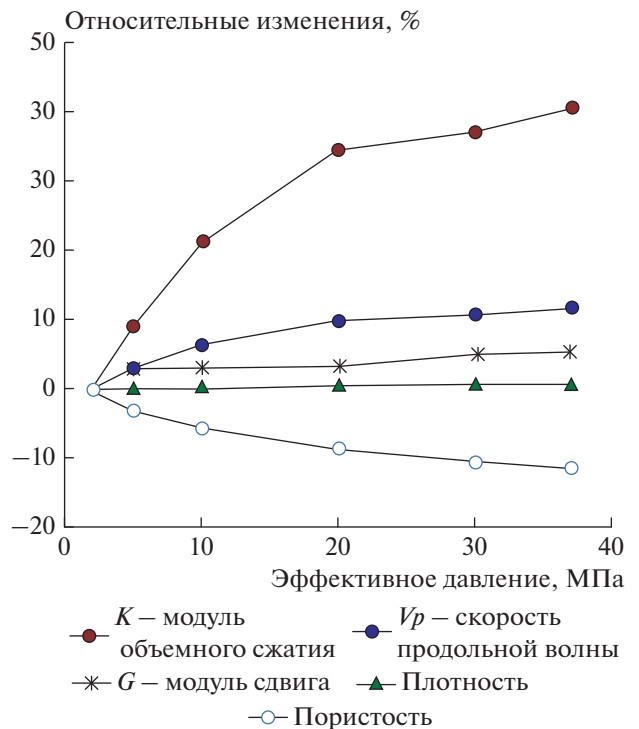


Рис. 3. Относительные изменения упругих параметров, плотности и пористости образца горной породы с ростом эффективного давления.

нами для дальнейшего расчета нормированной скорости.

Зависимость скорости продольной волны от общей пористости (рис. 4а) для моделей из стеклянных шариков хорошо аппроксимируется ($R^2 = 0.961$) линейной формулой (9):

$$V_p = -0.0911m + 6.532. \tag{9}$$

В этой формуле второе слагаемое (6.532), означающее скорость в материале шариков при общей пористости равной нулю, довольно близко к значению принятому нами значению 6.79 км/с из работы [NDT..., 2001–2014].

Полученная зависимость нормированной скорости от общей пористости для стеклянных шариков (рис. 4б) с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0.940$) аппроксимируется линейной формулой (10):

$$\tilde{V}_p = -1.505m + 100.0. \tag{10}$$

Видно, что полученные нами зависимости нормированной скорости от общей пористости (8) и (10) аналогичны по структуре уравнению (3), предложенному в работе [Туранк и др., 1994] для межзерновой пористости. Коэффициент при общей пористости, во всех трех уравнениях (3), (8) и (10), оказался близким к величине 1.6 (1.605 для смеси свинцовой дроби и 1.505 для смеси стек-

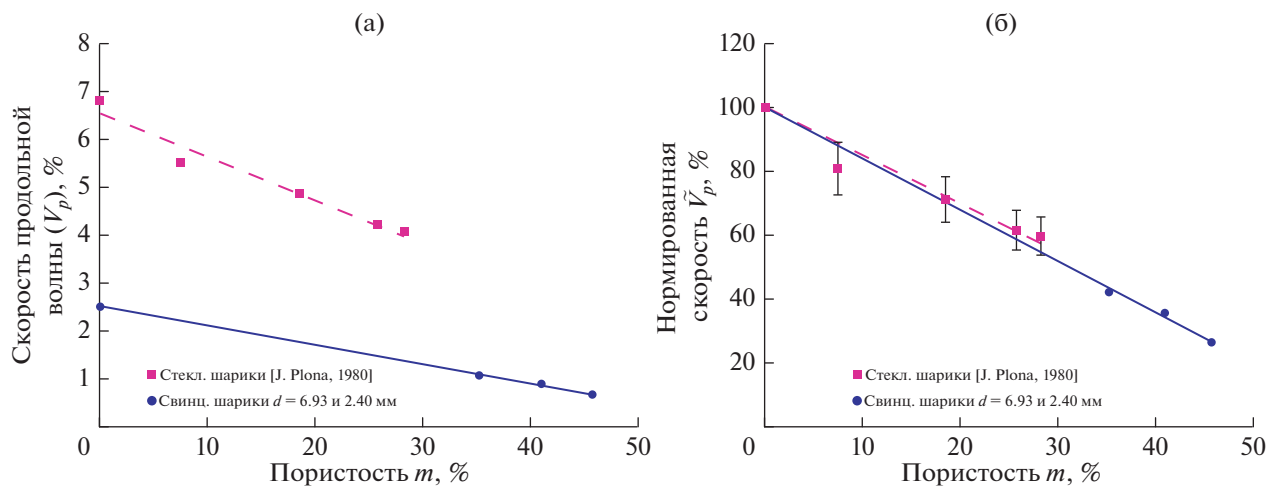


Рис. 4. Зависимости (а) скорости упругой волны и (б) нормированной скорости от общей пористости смесей стеклянных шариков (по [J. Plopa, 1980]) и смесей свинцовых шариков диаметром 6.93 и 2.40 мм.

лянных шариков), что свидетельствует о межзерновом характере общей пористости.

Таким образом, экспериментально на моделях межзерновой пористости, изготовленных из свинцовых и стеклянных шариков, подтверждено, что нормированная скорость, зависит от межзерновой пористости в соответствии с уравнением (3).

Модели трещин

Для получения экспериментального подтверждения зависимости (4) для трещинной пористости исследовалась скорость прохождения ультразвука как через образцы металла (сталь и титан) в виде набора цилиндров разной длины, так и через составные образцы горных пород (мрамор из Марокко и Турции).

Влияние трещин на скорость упругих волн проводилось на составных стальных цилиндрах длиной 10, 15 и 30 мм, изготовленных из одного куска металла. Скорость упругой волны в материале стали была одинакова и составляла 5.556 км/с. Моделью одной трещины являлся стык между двумя стальными цилиндрами длиной по 15 мм. Две трещины моделировались стыками между тремя частями длиной по 10 мм каждая и общей длиной 30 мм. Три трещины моделировались стыками между четырьмя частями длиной по 10 мм каждая и общей длиной 40 мм. Аналогично были проведены исследования и на образцах титана. Общая пористость каждого из составных образцов также определялась на порозиметре Ultra Pore газоволюметрическим способом как разница между объемами составного и сплошного образца аналогичной длины. Объем каждой из трещин составлял от 0.09 до 0.11% объема образца. Зависимости изменения скорости продольных волн и

нормированной скорости от общей пористости приведены на рис. 5.

Зависимость скорости от общей пористости для составных образцов из титана (рис. 5а) имеет высокую степень достоверности ($R^2 = 0.99$):

$$V_p = -1.507m + 6.004, \quad (11)$$

а измеренная скорость в материале титана (6.00 км/с) практически совпадает с полученной по линейному уравнению (11) аппроксимации (6.004).

Зависимость скорости от общей пористости для составных стальных образцов (рис. 5а) тоже хорошо аппроксимируется ($R^2 = 0.96$) линейным уравнением (12):

$$V_p = -1.137m + 5.511, \quad (12)$$

а измеренная скорость в материале стали (5.55 км/с) близка к значению (5.51 км/с), полученному по уравнению (12).

Зависимости нормированной скорости от общей пористости для моделей трещин из титана (13) и стали (14) хорошо аппроксимируются линейными зависимостями ($R^2 = 0.99$ и $R^2 = 0.96$, соответственно) и приведены на рис. 5б:

$$\tilde{V}_p = -20.548m + 99.92, \quad (13)$$

$$\tilde{V}_p = -20.636m + 100.07. \quad (14)$$

В формулах (13) и (14) коэффициент при общей пористости оказался равным 20.636 для стальных образцов, на которых моделировалось влияние от одной до трех трещин и 20.548 для образцов титана, где моделировали одну и две трещины. Небольшое отличие его от величины 22.0 полученное по уравнению (4), для трещинной пористости, возможно, связано с тем, что у всех цилиндрических образцов слегка сглаживался переход между боковой и торцевой поверхностью. Та-

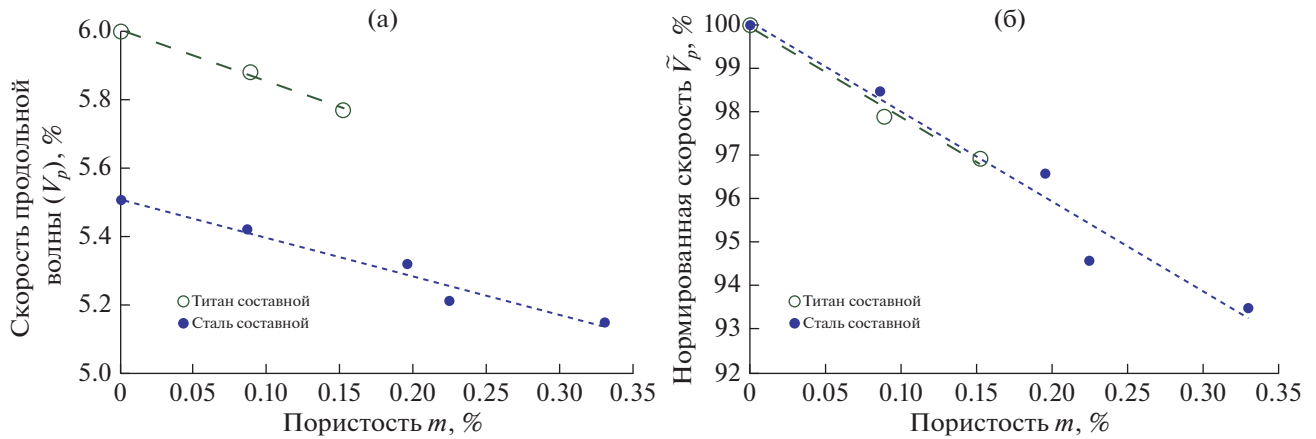


Рис. 5. Зависимость (а) скорости продольных волн и (б) нормированной скорости от общей пористости составных образцов стали и титана.

ким образом, экспериментально на моделях трещинной пористости, изготовленных из титановых и образцов, подтверждено, что нормированная скорость, зависит от трещинной пористости в соответствии с уравнением (4).

В работе [El Azhari, El Hassani I., 2013] рассматриваются образцы сухого и водонасыщенного мрамора Марокко пористостью от 0.28 до 0.45% (нами принято среднее значение 0.365%), составленные из блоков $5 \times 5 \times 20$ см. Используя предлагаемый в данной статье подход к определению трещинной пористости, нами были получены зависимости скорости распространения продольной волны и нормированной скорости от числа искусственно созданных трещин (стыков блоков).

Принимая, что раскрытие искусственных трещин (стыков) равно 1 мм, можно оценить трещинную пористость величиной 0.5% для каждой из трещин (стыков блоков). Блоки мрамора стыковались без шлифования поверхностей. Значение скорости в материале исследованного мрамора было принято равным 6.628 км/с. По формуле (1) рассчитаны значения нормированной скорости и получены ее линейные зависимости от величины общей пористости для водонасыщенного (15) и сухого мрамора (16) ($R^2 = 0.98$ и $R^2 = 0.97$ соответственно). При этом межзерновая пористость, имеющаяся в блоках мрамора, остается постоянной 0.365%, а трещинная пористость, искусственно созданная в виде стыков блоков, изменяется от 0.5% до 4.0% с увеличением числа стыков от 1 до 8 (рис. 6б).

$$\tilde{V}_p = -20.23m + 100.0, \quad (15)$$

$$\tilde{V}_p = -20.61m + 88.5. \quad (16)$$

В уравнениях аппроксимации линейной зависимости нормированной скорости от общей пористости (15) и (16) коэффициенты при пористости равны 20.23 (водонасыщенный образец) и

20.61 (сухой образец) близки к величине 22.0, что подтверждает наше предположение о возможности использования формулы (4) для расчета трещинной пористости. В случае полного отсутствия межзерновой пористости мы получили бы значение этого коэффициента 22.0 в соответствии с уравнением (4). Полученный результат экспериментально подтверждает, что скорость распространения продольной волны, нормированная на скорость в матрице образца, отражает наличие трещинной пустотности.

Данные еще одной публикации [Kurtulus et al., 2011] по исследованию зависимости скорости распространения продольной волны от числа искусственно созданных трещин (стыков блоков), но уже других образцов сухого мрамора из Турции (рис. 7а), так же были использованы для подтверждения справедливости использования формулы (4) для расчета трещинной пористости. Размеры блоков составляли $6 \times 6 \times 30$ см и, приняв, что раскрытие искусственных трещин (стыков) составляет 1 мм можно оценить трещинную пористость величиной 0.333% для каждой из трещин (стыков блоков).

Значения нормированной скорости были рассчитаны по формуле (1). Далее, используя значение скорости в твердой матрице исследованного мрамора 6.54 км/с, была получена линейная зависимость ($R^2 = 0.92$) нормированной скорости (рис. 7б) от величины общей пористости (17):

$$\tilde{V}_p = -24.32m + 94.70. \quad (17)$$

В этом случае нами было принято, что межзерновая пористость отсутствует, а трещинная изменяется от 0.333 до 2.00% с ростом искусственных трещин (стыков) от 1 до 6 (на рис. 7б – залитые кружки)). Полученная при этом величина коэффициента при пористости (-24.32) в уравнении (17) существенно выше значения 22.0 характерного для наличия только трещинной пористости (4).

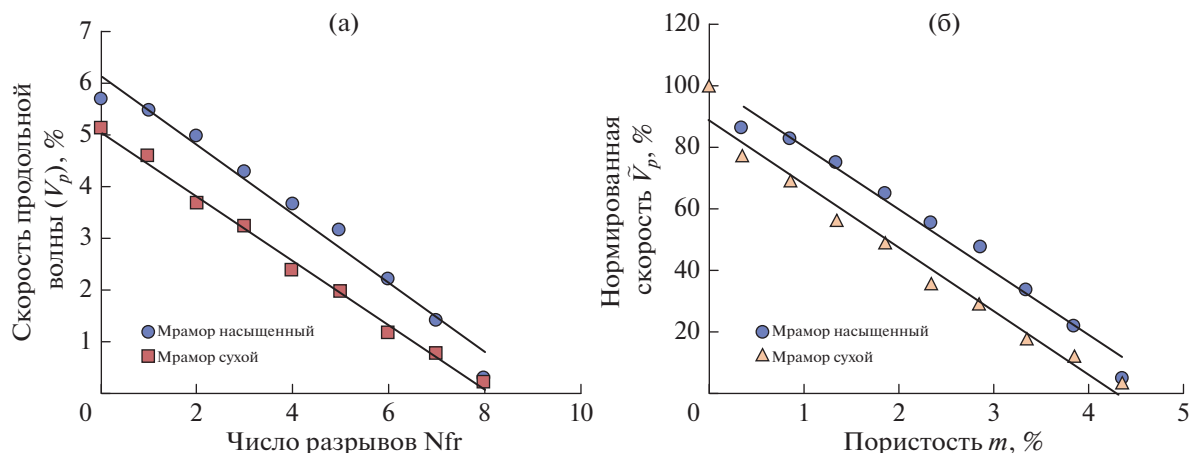


Рис. 6. Зависимость скорости продольной волны (а) и нормированной скорости от общей пористости (б) составных блоков сухого и водонасыщенного образца мрамора по данным [El Azhari et al., 2013].

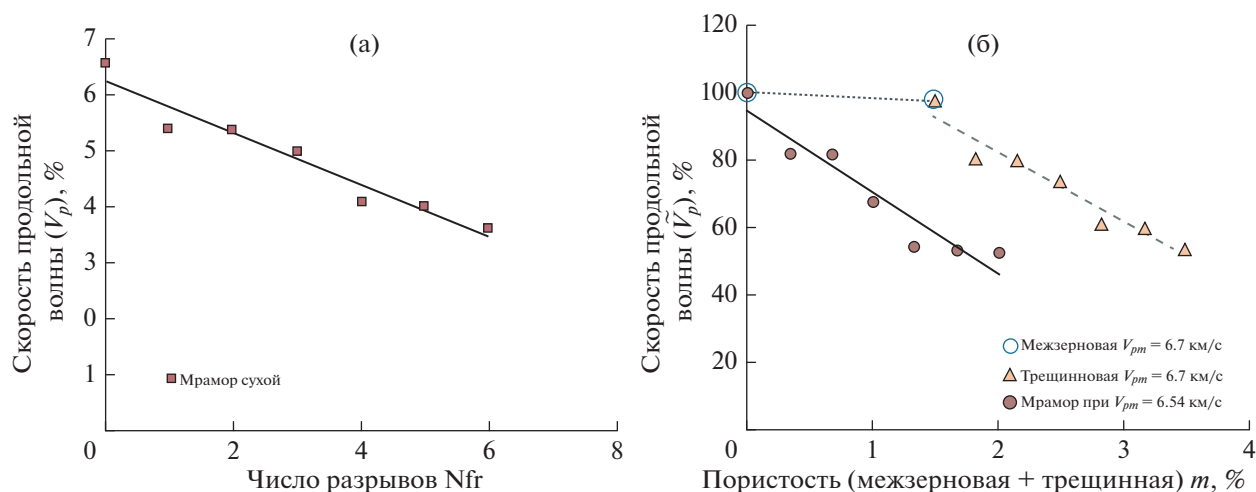


Рис. 7. Зависимость скорости продольной волны от числа разрывов (а) и нормированной скорости от пористости (б) сухого составного образца мрамора по данным [Kurtulus et al., 2011].

Для более корректного построения зависимости нормированной скорости от пористости была выполнена оценка структуры образцов мрамора по данным, приведенным в работе [Kurtulus et al., 2011]. Она позволила оценить возможную межзерновую пористость блоков мрамора, величиной 1.5%. Скорость распространения продольной волны в матрице, исходя из известных сведений по образцам мрамора, была принята равной 6.70 км/с.

В данном случае, зависимость нормированной скорости от пористости (18) на интервале пористости от 0.0% (твердая матрица породы) до 1.49%, отвечающему блоку мрамора без стыков, но с межзерновой пористостью 1.49%, (на рис. 7б открытые кружки) получена абсолютная линейная зависимость ($R^2 = 1.00$) идентичная формуле (3):

$$\tilde{V}_p = -1.60m + 100.0. \quad (18)$$

Участок общей пористости от 1.49 до 3.49% (1.49 + 2.0) будет соответствовать изменению только трещинной пористости составного блока мрамора (на рис.7б заливные треугольники), и линейная зависимость ($R^2 = 0.94$) нормированной скорости от пористости описывается формулой (19):

$$\tilde{V}_p = -20.66m + 123.65. \quad (19)$$

В формуле (18) полученное нами значение коэффициента при пористости равно -1.60 , что означает наличие только межзерновой пористости. А в формуле (19) этот коэффициент равен -20.66 , что отражает изменение только трещинной (искусственной) пористости.

Приведенные выше данные как собственных экспериментальных исследований, так и данные, полученные другими авторами, подтверждают наше предположение о возможности экспери-

ментального определения: как межзерновой (формула (3)), так и трещинной пористости (формулы (4) и (6)).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОРМИРОВАННОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ МЕЖЗЕРНОВОЙ И ТРЕЩИННОЙ ПОРИСТОСТИ РЕЗЕРВУАРОВ

Авторы данной работы применили описанный выше подход для исследования изменений структуры порового пространства коллекторов дагинского горизонта шельфа Сахалина [Жуков и др., 2017; Жуков и др., 2018]. Коллектора сложены песчаниками средне и мелкозернистыми, алевритистыми и алевролитами песчанистыми и глинистыми, с общей пористостью в атмосферных условиях 2.9–28.5%. Было исследовано 240 образцов, среднее значение пористости которых в атмосферных условиях составляет 22.2%. Детальные литологические исследования показали, что на 37 шлифах из 60 исследованных отмечены хаотически ориентированные микротрещины, приуроченные к плоскостям спайности минералов.

Наиболее интересным представляется прогноз изменения структуры порового пространства – изменение межзерновой и трещинной пористости – с увеличением эффективного давления. Обусловлено это практической необходимостью учета этих изменений, сопровождающих процессы разработки месторождений нефти и газа на режимах истощения или при снижении пластового давления.

Известно, и авторами данной работы неоднократно отмечалось, что при росте всестороннего сжатия пород увеличиваются и скорости продольных волн [Nur, 1965; Nur, Simmons, 1966; Жуков и др., 1991; 2018; Кузьмин, Жуков, 2004; Рыжов и др., 2008; Sheriff, Geldart, 1983; Zobak, 2007; Tiab, Donaldson, 2004; Mavko et al., 2009; Жуков, Иванов, 2015]. Происходит это, во-первых, вследствие повышения уплотнения упаковки зерен в терригенных осадочных породах и, во-вторых, из-за закрытия части имеющихся трещин.

Экспериментальные данные о величине пористости и скорости продольных волн по каждому из образцов были получены в условиях увеличения эффективного давления от 2.0 до 37.0 МПа. Затем, мы определили величину скорости продольной волны в твердой матрице горных пород V_{pm} , которая оказалась равной 5.656 км/с и рассчитали нормированную скорость для каждого из образцов, исследованных при эффективном давлении 2.0 и 37.0 МПа (рис. 8).

На рис. 8 приведены зависимости нормированной скорости исследованных образцов горных пород от общей пористости, а также их средние величины для эффективного давления 2.0 и 37.0 МПа. Там же приведены линии и уравнения

изменения нормированной скорости от общей пористости для двух крайних случаев: в предположении наличия только межзерновой пористости ($m_{fr} = 0.0\%$) и наличия только трещинной пористости ($m_{ig} = 0.0\%$).

Уравнения зависимости нормированной скорости от общей пористости ($R^2 = 0.50$ и $R^2 = 0.63$ соответственно) несколько отличаются при эффективном давлении 2.0 МПа (20) и при 37.0 МПа (21):

$$\tilde{V}_p = -2.26m + 100.0, \quad (20)$$

$$\tilde{V}_p = -1.84m + 100.0. \quad (21)$$

Анализ этих уравнений показывает, что в них коэффициент при пористости равен -2.26 при эффективном давлении 2.0 МПа и -1.84 при эффективном давлении 37.0 МПа. Это свидетельствует, во-первых, об уменьшении величины трещинной пористости с ростом эффективного давления на 35.0 МПа, так как при величине этого коэффициента -1.6 полностью отсутствует трещинная пористость. Во-вторых, что основным фактором, влияющим на величину общей пористости, в обоих случаях, является межзерновая пористость, так как значение этих коэффициентов (-2.26 и -1.84), далеки от величины -22.0 , которая характерна для пород, в которых имеется только трещинная пористость. Величина трещинной пористости при эффективном давлении 2.0 МПа несколько больше, чем, при эффективном давлении 37.0 МПа, и обусловлено это тем, что микротрещины, имеющиеся в образцах, в основном закрываются при увеличении эффективного давления.

Средние значения общей пористости и нормированной скорости всех образцов (на рис. 8 обозначены красными квадратами) при эффективном давлении 2.0 и 37.0 МПа позволили получить линейную зависимость изменения нормированной скорости от изменения общей пористости (уравнение (22)) при росте эффективного давления до 37.0 МПа:

$$\tilde{V}_p = -9.43m + 258.9. \quad (22)$$

Это свидетельствует о том, что при увеличении эффективного давления уменьшается как межзерновая, так и трещинная пористость: коэффициент при пористости равен -9.43 . Отметим, что при величине этого коэффициента равной -22.0 величина межзерновой пористости не изменится, а все изменения будут только за счет трещинной пористости. А при величине этого коэффициента -1.6 все изменения происходят только за счет межзерновой пористости.

Таким образом, использование описанного подхода для определения трещинной пористости (уравнения (3)–(6)) позволило получить изменения величины межзерновой и трещинной компонент пористости для каждого из исследованных

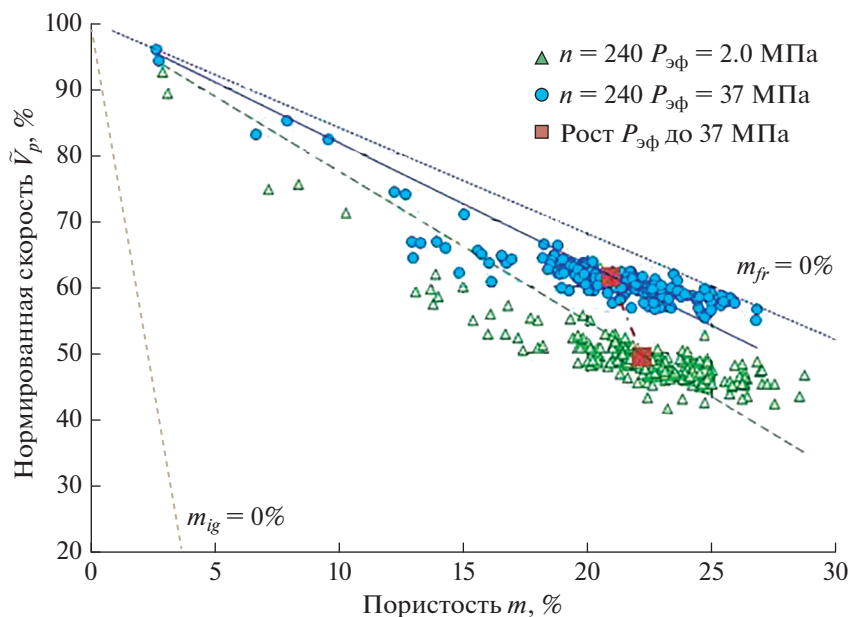


Рис. 8. Сопоставление зависимостей нормированной скорости исследованных образцов горных пород от общей пористости при увеличении эффективного давления от 2.0 до 37.0 МПа.

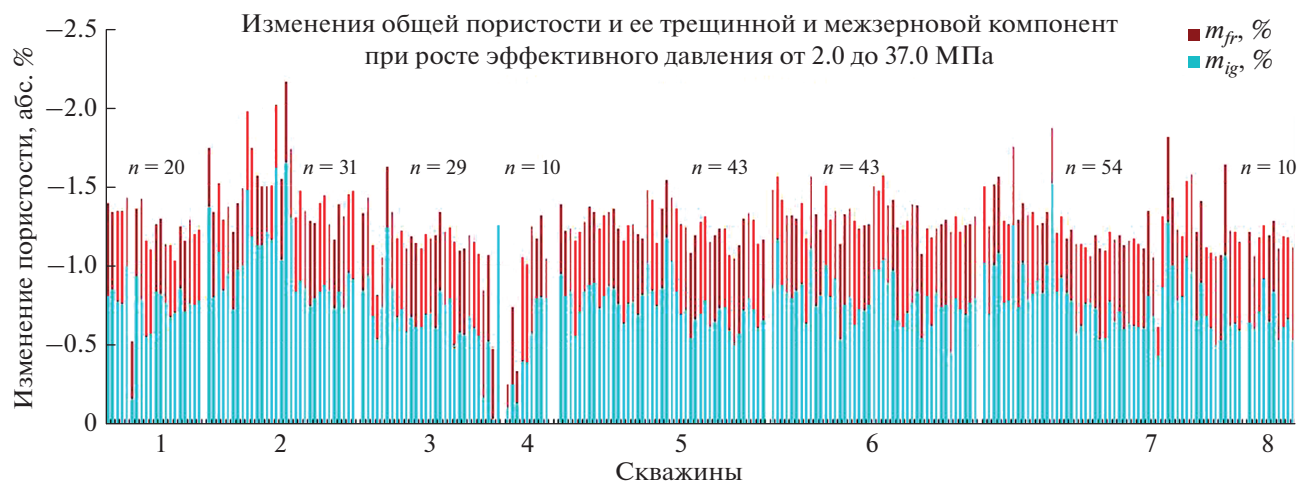


Рис. 9. Изменение общей пористости и двух ее составляющих (межзерновой и трещинной) с ростом эффективного давления от 2.0 до 37.0 МПа (n — число исследованных образцов по каждой из скважин).

240 образцов коллектора (из восьми скважинам) при увеличении эффективного давления от 2 до 37.0 МПа (рис. 9).

Результаты экспериментальных исследований показали (рис. 8 и рис. 9), что с ростом эффективного напряжения происходит уменьшение величины общей пористости на 0.25–2.16% для различных образцов. Среднее значение общей пористости всех исследованных образцов уменьшилось с 22.22 до 20.95%, т.е. на 1.28%. Величины обеих компонент общей пористости — межзерновой и трещинной — тоже уменьшились, но уже в разной степени. Так, снижение величины межзерновой пористости со-

ставляло для разных образцов от 0.04 до 1.65%, в среднем на 0.78%. А относительно первоначальной величины (при эффективном давлении 2.0 МПа) межзерновая пористость снизилась на 3.67%. Уменьшение величины трещинной пористости различных образцов составляло от 0.14 до 0.76%, в среднем на 0.49% (рис. 9). А относительно первоначальной величины трещинная пористость снизилась на 65.5%. Таким образом, трещинная пористость образцов горной породы в большей степени изменяется при увеличении эффективного давления по сравнению с межзерновой пористостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований показали, что влияние трещин (разрывных нарушений, стыков горных пород) и межзерновой пористости на скорость распространения упругих продольных волн имеет принципиально разный характер. Показано, что увеличение трещинной пористости сильнее снижает скорость распространения продольных волн, чем увеличение межзерновой пористости идентичной величины.

Основываясь на этом факте и учитывая, что общая пористость состоит из двух компонент (межзерновой и трещинной (2)), показано, что предложенное уравнение (6), позволяет оценить величину трещинной пористости горных пород. Это продемонстрировано на различных материалах и горных породах, моделирующих межзерновую и трещинную пористость. Показано влияние наличия и числа разрывных нарушений на скорости распространения упругих продольных волн в горных породах не только на качественном, но и на количественном уровне.

Следует отметить, что данный подход расчета трещинной пористости достаточно приемлем и для хаотически ориентированных трещин (горные породы) и для трещин, расположенных перпендикулярно распространению упругой продольной волны (составные образцы из металла (сталь и титан) и блоки мрамора).

Предложенный авторами методический подход позволил получить оценки трещинной пористости коллектора конкретного месторождения углеводородов при различных величинах эффективного давления и на большом количестве исследованных образцов. Полученные оценки влияния увеличения эффективного напряжения на величины межзерновой и трещинной пористости могут быть использованы как при подсчете запасов, так и при подготовке проектов разработки месторождений нефти и газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баюк И.О., Рыжков В.И. Определение параметров трещин и пор карбонатных коллекторов по данным волнового акустического каротажа // Технологии сейсморазведки № 3. 2010. С. 32–42.

Жуков В.С., Салов Б.Г., Кузьмин Ю.О. Деформации и трещинообразование в образцах горных пород при длительном воздействии постоянных сжимающих напряжений. Модельные и натурные исследования очагов землетрясений. М.: Наука. 1991. С. 156–162.

Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Полоудин Г.А. Оценка процессов проседания земной поверхности при разработке газовых месторождений (на примере Северо-Ставропольского месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. № 7. 2002. С. 54–57.

Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн. Проблемы

ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г. М.: ООО “Газпром ВНИИГАЗ”. 2012. С. 148–152.

Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Физическое моделирование современных геодинамических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень № 5. 2003. С. 71–77.

Жуков В.С., Иселидзе О.В., Григорьев Е.Б. Методика экспериментального исследования значений некоторых характеристик образцов горных пород, получаемых при поиске углеводородов в диапазоне температур 0...100°C и давлениях до 85 МПа. М.: Государственная служба стандартных справочных данных (ГСССД) Зарегистрировано под № ГСССД МЭ 257-2016 во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологической службы (ФГУП “ВНИИМС”). 2016. 31с.

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 Н и Г имени И.М. Губкина. 2016. 56 с.

Жуков В.С., Моторыгин В.В., Чуриков Ю.М. Изменения структуры порового пространства коллекторов дагинского горизонта при моделировании пластовых условий // Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России. М.: Газпром ВНИИГАЗ. 2017. № 3(31) С. 238–246.

Жуков В.С., Семенов Е.О., Кузьмин Ю.О. Динамика физических свойств коллекторов при разработке месторождений нефти и газа // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. М.: Газпром ВНИИГАЗ. № 5(37). 2018. С. 92–87.

Иньков В.Н., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л., Карабутов А.А., Макаров В.А. Исследование механо-акустической нелинейности трещиноватых пород методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46. № 3. С. 174–180.

Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство Экономических Новостей. 1999. 220 с.

Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломов и парадоксы скоростей деформаций // Физика Земли. 2013. № 5. С. 28–46.

Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика системы разломов // Физика Земли. 2015. № 4. С. 25–30.

Кузьмин Ю.О. Индуцированные деформации разломных зон // Физика Земли. 2019. № 5. С. 61–75.

Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: изд-во МГГУ. 2004. 262 с.

Ризниченко Ю.В. О распространении сейсмических волн в дискретных и гетерогенных средах // Изв. АН СССР. Серия географ. и геофиз. 1949. № 2. С. 115–128.

Рыжов А.Е., Жуков В.С., Иселидзе О.В., Дахнов А.В., Семенов Е.О. Динамика изменений физических свойств образцов продуктивных пород при разработке месторождений нефти и газа. Разработка месторождений углеводородов. М.: ООО “ВНИИГАЗ”. 2008. С. 154–168.

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 англ. и фр. / Под ред. В. Мори, Д. Фурментро. М.: Мир. 1994. С. 176–184.
- Altindag R., Guney A.* Evolution of the relationship P-wave velocity and joint density. The 19-th International Mining Congress and Fair of Turkey, IMCET 2005, Izmit, Turkey, June 09–12.
- Anderson D.L., Minster B., Cole D.* The effect of oriented cracks on seismic velocities // *J. Geophysical Research.* V. 79. 1974. P. 4011–4015.
- El Azhari H., El Hassani I.* Effect of the number and orientation of fractures on the P-wave velocity diminution: application on the building stones of the Rabat area (Morocco) // *Geomaterials.* 2013. № 3. P. 71–81.
- Gassman F.* Elastic waves through a picking spheres // *Geophysics.* 1951. V. 16. P. 85–673.
- Ge Z., Sun Q., Li W.* Temperature and pressure effect on permeability of Chinese sandstone: a review // *Acta Geodyn. Geomater.* 2018. V. 15. № 3(191). P. 289–296. <https://doi.org/10.13168/AGG.2018.0021>
- Kahraman S.A.* Correlation between P-way Velocity, Number of Joints and Schmidt Hammer Rebound Number // *International J. Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts.* 2001. V. 38. № 5. P. 729–733.
- Kurtulus G., Uchkardesh M., Sari U., Guner O.* Experimental studies in wave propagation across a jointed rock mass. *Bulletin Engineering Geology Environment.* 2011. (Springer published on line 31.08.2011).
- Li Z., Wong L.N.Y., Teh C.I.* Influence of Thermal and Mechanical Loading on Development of Microcracks in Granite // *Rock Mechanics and Rock Engineering.* 2020. V. 53. № 5. P. 2035–2051. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-02030-0>
- Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J.* *The Rock Physics Handbook. Tools for Seismic Analysis in Porous Media.* Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press. 2009. 525 p.
- NDT Education Research Center Iowa State University 2001–2014. Acoustic properties for ceramics, crystals and minerals. Электронный ресурс: www.ndt-ed.org
- Nur A.* Effect of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks // *J. Geophysical Research.* 1971. V. 76. P. 2022–2032.
- Nur A., Simmons G.* Stress-induced velocity anisotropy in rocks, an experimental study // *J. Geophysical Research.* 1969. V. 74. P. 6067–2076.
- Plona T.J.* Observation of second bulk compression wave in porous medium at ultrasonic frequencies // *Appl. Phys. Lett.* V. 36. № 4. P. 259–261.
- Sassa K., Watanabe T.* Velocity and Amplitude of P-waves Transmitted through Fractured Zones Composed of Multiple Thin Low-Velocity Layers // *International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts.* 1995. V. 32. № 4. P. 313–324.
- Sheriff R.E., Gelard L.P.* *Exploration Seismology.* V 1, 2. London: Cambridge University Press. 1983.
- Tiab D., Donaldson E.C.* *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties – 2nd edition.* Elsevier, Gulf Professional Publishing. 2004.
- Walsh J.B., Brace W.F. Cracks and pores in rocks / 1-er Congrèss International's de Mécanique des Roches. Lisbonne 1966. № 3. V. 67.
- Walsh J.B.* The effect of cracks on compressibility of rocks // *J. Geophysics Research.* 1965. V. 70. № 2. P. 381–411.
- Wyllie M.R.J., Gregory A.R., Gardner L.W.* Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media // *Geophysics.* 1956. V. 21. № 1. P. 41–70.
- Young R.P., Hill T.T., Bryan I.R., Middleton R.* *Seismic Spectroscopy in Fracture Characterization* // *Quarterly J. Engineering Geology.* № 4. 1985. V. 18. P. 459–479.
- Zoback M.D.* *Reservoir Geomechanics* / Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press. 2007.

The Influence of Fracturing of the Rocks and Model Materials on P-wave Propagation Velocity: Experimental Studies

V. S. Zhukov^a and Yu. O. Kuzmin^{b, *}

^aOOO Gazprom-VNIIGAZ, Moscow, 142717 Russia

^bSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

*e-mail: kuzmin@ifz.ru

It is shown that rigidity of the medium is a more strain-sensitive parameter than rock density for the elastic wave velocity with the increase in the depth. For assessing the effect of intergrain and fracture porosity, the ratio (in percent) of the measured P-wave velocity in the rock to the velocity in the solid matrix—the “normalized velocity”—is used. The results of the experimental studies have shown that the effect of fractures (faults, rock joints) and intergrain porosity on the propagation velocity of the elastic P-waves is different. The increase in fracture porosity more strongly reduces the P-wave velocity than the increase in intergrain porosity of identical magnitude. It is shown that the propagation velocity of the elastic P-waves in the rocks and model materials depends on the presence and number of cracks (fractures). The possibility of selective assessment of intergrain and fracture porosity in reservoir rocks of the oil and gas fields during their development is demonstrated.

Keywords: elastic wave velocity, rock, porosity, fractures, reservoir conditions, effective pressure