

УДК 550.80.56:552.12

Влияние межзерновой пористости и трещинной пустотности горных пород на скорость продольной волны

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. Зависимость скорости упругой продольной волны от пористости, или так называемое уравнение интервального среднего времени, основана на представлении горной породы в виде совокупности зерен (шариков), в порах между которыми присутствует флюид (вода, нефть, воздух). Многие исследователи объясняют изменения упругих характеристик с глубиной, и в частности скорости продольных волн в горных породах, сокращением в них объема пустотного пространства. Это может быть и частичным закрытием пор и микротрещин под действием приложенного давления. Однако влияние трещин на скорость упругих волн исследовано недостаточно.

Скорость продольной волны в породе без трещин и пор зависит только от свойств составляющих ее минералов. Выраженное в процентах отношение скорости, измеренной на образцах горных пород, к расчетному значению предложено называть добротностью. Оно и будет характеризовать интегральное воздействие пор и трещин на породу. Важно и то, что зависимости скорости продольных волн от объема пор и объема трещин значительно отличаются друг от друга, что позволяет определять как межзерновую пористость, так и трещинную пустотность.

Авторами проведены две серии экспериментов по определению скорости продольной волны: 1-я – на моделях межзерновой среды (смеси свинцовой дроби разных размеров и смеси стеклянных шариков разных размеров); 2-я – на моделях трещинной среды. Образцы трещинной среды были представлены наборами цилиндров из разных материалов: стали; титана; горной породы габбро, подвергнутой одноосному сжатию вплоть до разрушения.

В ходе экспериментов подтверждено различие в характере влияния межзерновой пористости и трещинной пустотности на скорости продольных волн, что обусловлено разной структурой пустотного пространства. Так, при межзерновой пористости поры зачастую изометричны, их размеры в разных направлениях не очень отличаются друг от друга. Трещинная пустотность характеризуется тем, что раскрытие трещины в сотни раз меньше ее простираения в двух других направлениях.

Общеизвестно, что широко используемая зависимость скорости упругой продольной волны от пористости [1], или так называемое уравнение интервального среднего времени (уравнение Вилли) [2], основана на представлении горной породы в виде совокупности зерен (шариков), в порах между которыми присутствует флюид (вода, нефть, воздух). В то же время влияние трещин на скорости упругих волн изучено недостаточно. Многочисленные экспериментальные исследования изменений упругих характеристик с глубиной, и в частности скорости продольных волн горных пород, многими исследователями объясняются сокращением в них объема пустотного пространства. Это может быть и частичным закрытием пор и микротрещин под действием приложенного давления. Значительные изменения скорости продольных волн в начальной области приложения давления М.П. Воларович, Е.И. Баюк, И.С. Томашевская, З.П. Стаховская, I.B. Walsh объясняют закрытием трещин или микротрещин, существовавших в атмосферных условиях.

Справедливости ради отметим, что на скорость распространения продольных волн в горных породах оказывает значительное влияние не только пористость,

Ключевые слова: горная порода, трещины, пористость, скорость продольных волн, разрушение.

но и минералогический состав пород. Так, например, в формуле, определяющей скорость продольной волны,

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\delta(1-2\mu)}}, \quad (1)$$

модуль Юнга E расположен в числителе, а плотность пород δ – в знаменателе. Поэтому с ростом плотности горных пород и слагающих их минералов значение V_p должно снижаться. Но в формулу (1) входит также коэффициент Пуассона μ , а для него закономерных изменений с ростом плотности минералов не наблюдается. Однако μ в формулу (1) входит таким образом, что даже небольшие его вариации сильно сказываются на значениях V_p . И если для одной и той же горной породы минералогический состав не меняется, то можно ожидать, что основное влияние будет оказывать пористость, влияние которой на плотность обычно описывается линейной зависимостью [3]. В то же время объем порового пространства горных пород состоит из таких компонент, как объем межзернового пространства, объем трещин и объем каверн.

В ряде работ рассмотрено влияние трещин на анизотропию скоростей упругих волн, возникающую при сжатии горных пород, и сделан вывод том, что сильное возрастание скоростей вызвано закрытием трещин под давлением [4, 5]. К. Туранк, Д. Фурментро, А. Денни рассмотрели влияние трещин как на скорости упругих продольных и поперечных волн, так и на их отношение, и впервые на основе анализа экспериментальных результатов предположили, что межзерновая пористость и трещинная пустотность различным образом влияют на скорость продольной волны [6].

Далее в статье применен рассмотренный ранее автором принципиальный подход к решению проблемы определения трещинной и межзерновой пористости образцов горных пород по данным о скоростях распространения упругой продольной волны [7]. Свойства «идеальной породы», т.е. породы без трещин, пор и других неоднородностей, зависят только от свойств составляющих ее минералов, в частности скорости продольной волны. Скорости распространения упругих продольных волн для основных породообразующих минералов (кварца, кальцита, полевых шпатов, различных видов глин) приведены в ряде справочников. Предложено отношение значения

скорости, измеренной на образцах горных пород ($V_{p,изм}$), к расчетной скорости ($V_{p,расч}$), выраженное в процентах, называть *добротностью* (Q) [6]. Оно и будет характеризовать интегральное воздействие пор и трещин на породу:

$$Q = 100 \frac{V_{p,изм}}{V_{p,расч}}. \quad (2)$$

Уменьшение значения Q отражает наличие пористости или пустотности. Причем межзерновая пористость и трещинная пустотность влияют на добротность по-разному. Ряд исследователей [6, 8–10] получили зависимости добротности от межзерновой пористости ($K_{п.мз}$) в виде:

$$Q = 100 - 1,6K_{п.мз}, \quad (3)$$

а от трещинной пустотности ($K_{п.тр}$) в виде:

$$Q = 100 - 22,0K_{п.тр}. \quad (4)$$

С учетом предположения одновременного наличия межзерновых пор и трещин и того, что общая пористость состоит из этих двух компонент, получена зависимость добротности от общей пористости ($K_{п}$), аналогичная приведенной ранее [7], в виде:

$$Q = \frac{100 - 1,6K_{п} - 100 \frac{V_{p,изм}}{V_{p,расч}}}{20,4}. \quad (5)$$

Результаты исследований. Для экспериментальной проверки уравнения (3) авторами проведена серия экспериментов на модели межзерновой среды – смеси свинцовой дроби разных размеров. Также были использованы данные исследований зависимости скорости продольной волны от пористости материала, изготовленного из стеклянных шариков диаметром 0,21...0,29 мм [11].

Для моделирования межзерновой пористости использовалась свинцовая дробь диаметром 2,40 и 6,93 мм. Из нее были приготовлены три образца смесей, содержащих разное количество дроби того или иного размера. Пористость каждой смеси определялась на установке Ultra Pore газоволюметрическим способом и составила 45,70; 40,95 и 35,23 %. Скорость упругой волны в свинцовой дроби определялась при толщине в одну дробинку для каждого размера дроби и составила 2,50 км/с. Зависимости значений V_p и Q

от общей пористости для смесей свинцовой дроби приведены на рис. 1.

Зависимость скорости от пористости для смесей свинцовой дроби имеет высокую степень достоверности аппроксимации (см. рис. 1а), и измеренная скорость в материале дроби (2,50 км/с) близка к полученной с использованием линейного уравнения аппроксимации (2,49 км/с). В научных публикациях можно встретить сильно различающиеся данные о скорости продольных волн в стекле (*англ.* glass window), например: 5,69 км/с (стеклянные шарики) [11] против 6,79 км/с [12]. Для расчета скорости в скелете спеченных при температуре 700...740 °С стеклянных шариков

авторы применили значение $V_p = 6,90$ км/с как более точно отражающее этот параметр. Построенные при данных параметрах зависимости V_p и Q от пористости стеклянных шариков приведены на рис. 2.

Уравнение аппроксимации на рис. 2б подтверждает уравнение (3), так как угловой коэффициент $-1,5498$ оказался близким значению 1,6. Таким образом, авторы экспериментально подтвердили, что добротность или скорость распространения продольной волны, нормированная на скорость в скелете в образце, зависит от межзерновой пористости в соответствии с уравнением (3).

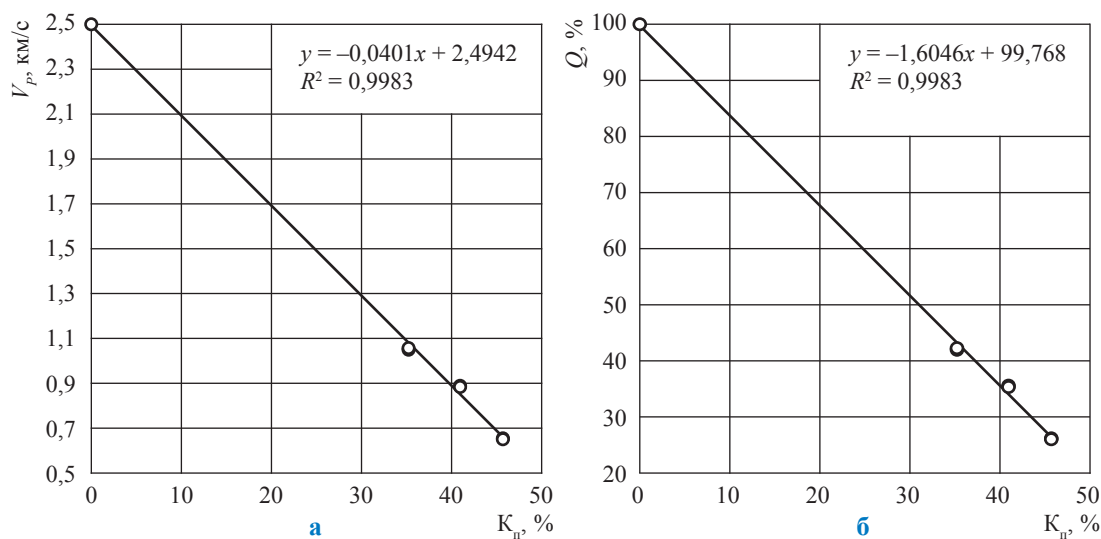


Рис. 1. Зависимости скорости упругой волны (а) и добротности (б) от пористости смесей свинцовой дроби диаметрами 6,93 и 2,4 мм: R^2 – достоверность аппроксимации

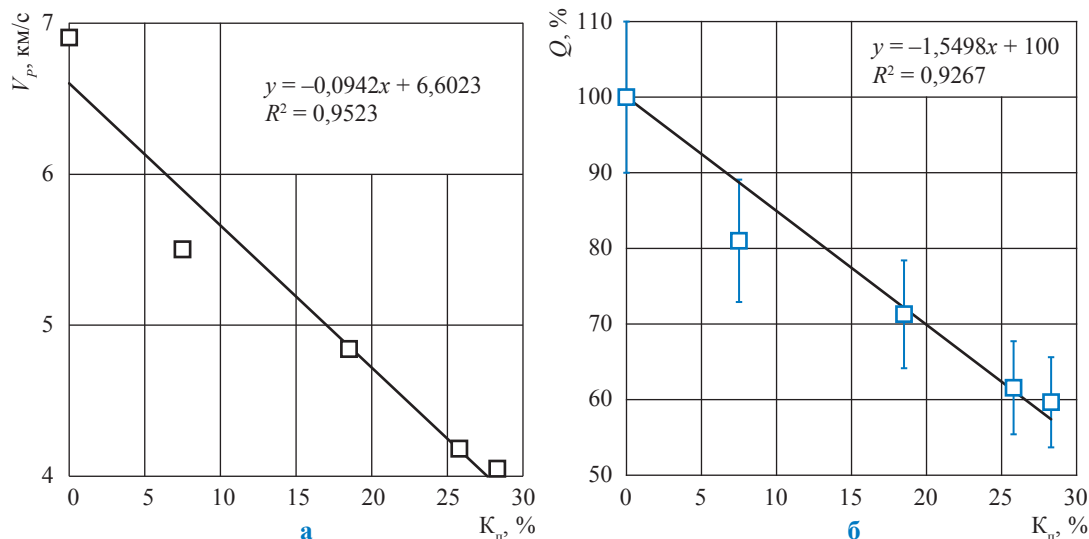


Рис. 2. Зависимость скорости упругих волн (а) и добротности (б) от пористости спеченных стеклянных шариков по [11]

Для экспериментального подтверждения зависимости V_p от трещинной пустотности (см. уравнение (4)) авторы исследовали скорость прохождения ультразвука через модели трещинной среды, выполненные в виде составных наборов цилиндров разной длины (10, 15 и 30 мм), изготовленных из одного куска металла (стали или титана). Скорость упругой волны во всех образцах стали была одинаковой и составляла 5,556 км/с. Моделью одной трещины являлся стык двух образцов длиной по 15 мм, составлявших образец длиной 30 мм. Две трещины моделировались тремя образцами длиной по 10 мм каждый и общей длиной 30 мм. Три трещины моделировались четырьмя образцами длиной по 10 мм каждый и общей длиной 40 мм. Аналогично проводились исследования и на образцах титана. Пористость каждого из составных образцов определялась на установке Ultra Pore газовольюметрическим способом. Пористость модели с единичной трещиной составляла 0,09...0,11 % объема образца. Зависимости скорости продольных волн и добротности от общей пористости приведены на рис. 3.

В уравнении аппроксимации (см. рис. 3б), описывающем зависимость добротности от общей пористости, угловой коэффициент оказался равным 20,636 для стальных образцов, на которых моделировалось влияние от одной до трех трещин. На образцах титана моделировали

одну и две трещины, и тот же коэффициент оказался равным 20,515. Небольшое отличие его от значения 22,0 по уравнению (4), возможно, связано с тем, что у всех цилиндрических образцов слегка округлялся переход между боковой и торцевой поверхностью.

Также в ходе экспериментального подтверждения зависимости V_p от трещинной пустотности авторами были использованы результаты исследования В.Н. Иньковым и др. образцов карельского габбро, подвергнутых одноосному сжатию вплоть до разрушения с целью изучения влияния дефектности, т.е. микротрещин, образующихся при нагружении образцов, на скорость распространения упругих волн [13]. Исследования проводились на изотропных образцах карельского габбро, в которых трещины первоначально отсутствовали. Образцы подвергались циклическому одноосному сжатию, в направлении которого после снятия нагрузки проводились измерения скорости. Максимальные значения напряжения составляли 34, 68, 112, 253 и 280 МПа. Дальнейшее увеличение нагрузки до 295 МПа приводило к разрушению образцов.

Построенная авторами настоящей статьи зависимость скорости продольной волны от напряжения одноосного сжатия (рис. 4) явно говорит о последовательной подготовке разрушения. Можно выделить первый этап нагружения до 68 МПа, при котором произошло

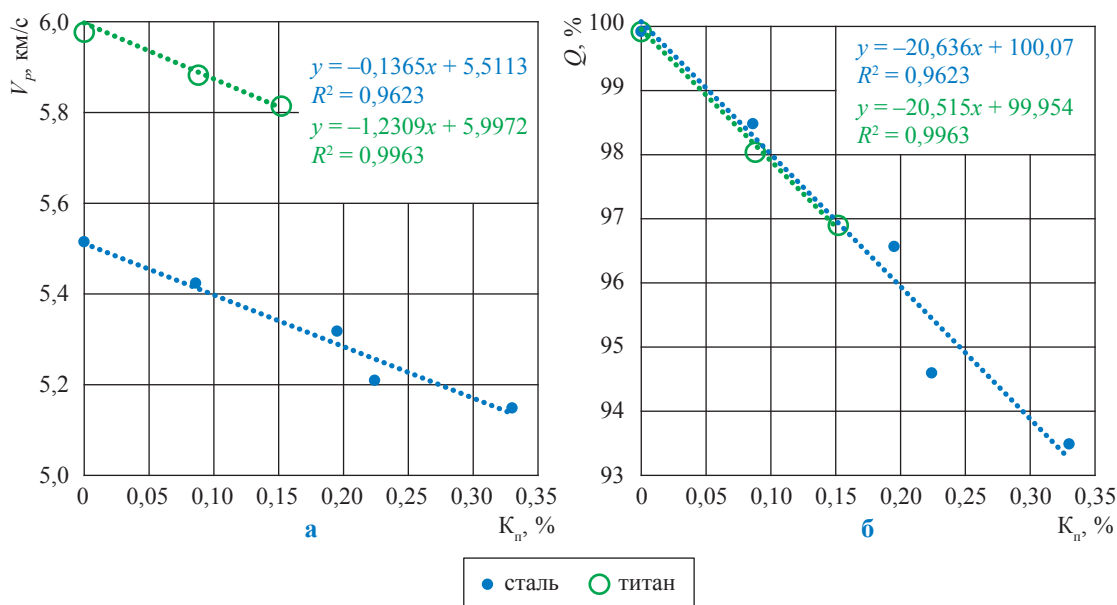


Рис. 3. Зависимость скорости продольных волн (а) и добротности (б) от общей пористости составных образцов стали и титана

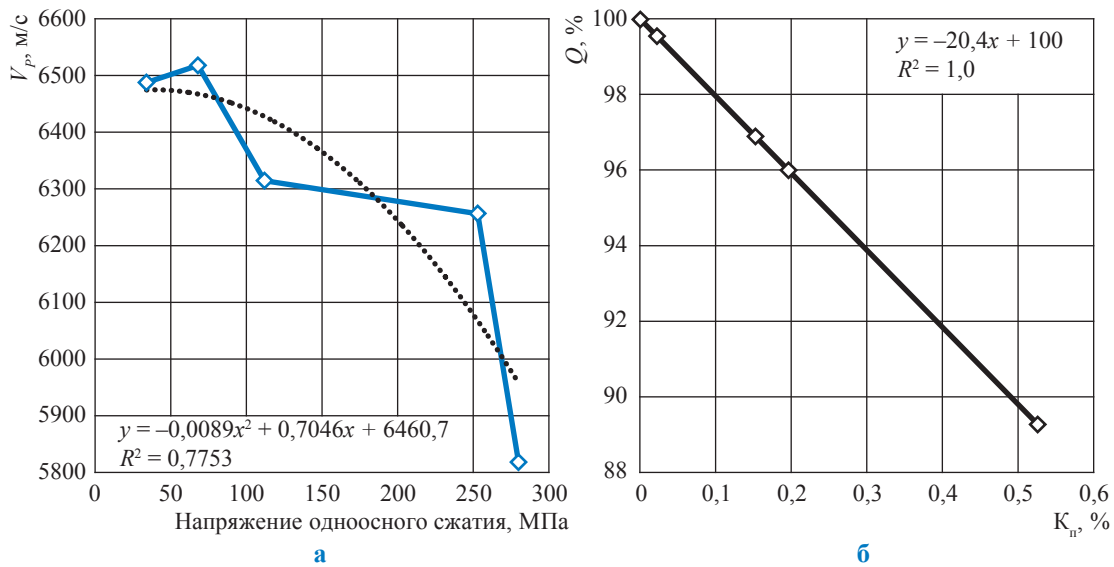


Рис. 4. Зависимость скорости продольной волны (а) и добротности (б) от микротрещиноватости ($K_n = K_{n,тр}$) карельского габбро на различных ступенях одноосного сжатия (по данным В.Н. Инькова и др. [13])

максимальное уплотнение в направлении сжатия. Значение скорости при этом напряжении, равное 6517,6 м/с, было принято за скорость в скелете габбро и использовано для расчета добротности. В предположении отсутствия межзерновой пористости выполнен расчет трещинной пористости (см. формулу (5)), возникшей в процессе одноосного сжатия и подготовки разрушения образца габбро (см. рис. 4).

Рис. 4 подтвердил предположение о минимальной межзерновой пористости, так как в уравнении (5) угловой коэффициент оказался равным 20,4. В случае полного отсутствия межзерновой пористости был бы получен коэффициент, равный 22,0 в соответствии с уравнением (4). Этот результат экспериментально подтверждает, что добротность или скорость распространения продольной волны, нормированная на скорость в скелете в образце, зависит от трещинной пустотности в соответствии с уравнением (4).

Таким образом, можно отметить, что экспериментально подтверждено предположение о различном характере влияния межзерновой пористости и трещинной пустотности на скорость распространения продольных волн в различных модельных материалах и горных породах. Обусловлено это, вероятно, особенностями структуры пустотного пространства. Так, при межзерновом типе пустотного пространства поры зачастую изометричны, т.е. их размеры в разных направлениях не сильно отличаются друг от друга и поры соединяются между собой узкими каналами. Трещинный тип пустотного пространства характеризуется тем, что один из размеров трещины – ее раскрытие – в сотни раз меньше двух других ее размеров, характеризующих плоскость простираения трещины.

Список литературы

1. Ризниченко Ю.В. О распространении сейсмических волн в дискретных и гетерогенных средах / Ю.В. Ризниченко // Известия АН СССР. География и геофизика. – 1949. – № 2. – С. 115–128.
2. Wyllie M.R.J. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media / M.R.J. Wyllie, A.R. Gregory, L.W. Gardner // Geophysics. – 1956. – Т. 21. – № 1. – С. 41–70.
3. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): справочник геофизика / Н.Б. Дортман – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
4. Nur A. Effect of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks / A. Nur // Journal of Geophysical Research. – 1971. – Т. 76. – С. 2022–2032.

5. Nur A. Stress-induced velocity anisotropy in rocks, an experimental study / A. Nur, G. Simmons // *Journal of Geophysical Research*. – 1969. – Т. 74. – С. 6667–6676.
6. 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 / пер. с англ. и фр.; под ред. В. Мори и Д. Фурментро*. – М.: Мир, 1994. – С. 176–184.
7. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн / В.С. Жуков // *Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г.: сб. науч. тр.* – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 148–152. – (Вести газовой науки).
8. Walsh J.B. Cracks and pores in rocks / J.B. Walsh, W.F. Brace // *1st Congrès international de mécanique des roches à Lisbonne*. – Lisboa: Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, 1966. – Т. 1. – С. 643–646.
9. Walsh J.B. The effect of cracks on compressibility of rocks / J.B. Walsh // *Journal of Geophysical Research*. – 1965. – Т. 70. – № 2. – С. 381–411.
10. Wyllie M.R.J. Studies of elastic wave attenuation in porous media / M.R.J. Wyllie, G.H.F. Gardner, A.R. Gregory // *Geophysics*. – 1962. – Т. 27. – С. 569–589.
11. Plona T.J. Observation of second bulk compression wave in porous medium at ultrasonic frequencies / T.J. Plona // *Appl. Phys. Lett.* – 1980. – Т. 36. – № 4. – С. 259–261.
12. Acoustic properties for ceramics, crystals, glass, and minerals // *NDT Resource Center [электронный ресурс]*. – https://www.nde-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/UT/ut_matlprop_ceramics.htm
13. Иньков В.Н. Исследование механо-акустической нелинейности трещиноватых пород методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии / В.Н. Иньков, Е.Б. Черепецкая, В.Л. Шкуратник и др. // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2005. – Т. 46. – № 3. – С. 174–180.

Influence of intergrain and cracking porosity of rocks on P-wave velocity

V.S. Zhukov^{1*}, V.V. Motorygin¹

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninsky district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

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

Abstract. Relationship between P-wave velocity and porosity, or the so-called equation of interval average time, is based on presentation of a rock like an array of grains (small balls), among which there is a fluid (water, oil, air) in pores. Many researches explain changing of elastic properties along the depths, and in particular changing of P-wave velocity values in rocks, by reduction of voids. It could be the local closing of pores and tiny fractures under the influence of applied pressure. But influence of cracks over P-wave velocity is studied insufficiently.

The P-wave velocity in a rock without cracks and pores depends only on the properties of minerals it consists of. It was suggested to name a percentage ratio of measured P-wave velocity to a calculated value as a quality factor. This Q-factor will characterize the integral impact of pores and cracks to a rock. Also it is important that dependences of P-wave velocity from volume of pores and from volume of cracks differ from each other, and this fact enables to determine either the inter-grain porosity, or the cracking cavitation.

The authors have carried out two series of experiments aimed at determination of P-wave velocity: the first – using the inter-grain medium models (the mixtures of various-sized lead pellet, and the mixtures of various-sized glass spheres); the second using models of fractures medium. The samples of fractures medium have been represented by sets of cylinders made of different materials: namely, from steel, titanium, the gabbro rock subject to simple compression down to destruction.

The referred tests have validated diversified effects of the inter-grain porosity and the cracking cavitation to the P-wave velocity. The reason for such distinction is different structure of voids. So, in case of inter-grain porosity the pores are often isometric, and their dimensions in different directions do not differ much. In case of cracking cavitation a crack mouth is hundreds times less than its strikes in both other directions.

Keywords: rock, cracks, porosity, P-wave velocity, destruction.

References

1. RIZNICHENKO, Yu. V. On propagation of seismic waves in discrete and heterogeneous media [O rasprostranenii seismicheskikh voln v discretnykh i geterogennykh sredakh]. *Izvestiya AN SSSR. Geografiya i Geofizika*. 1949, no. 2, pp. 115–128. (Russ.).
2. WYLLIE, M.R.J., A.R. GREGORY, L.W. GARDNER. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*. 1956, vol. 21, no. 1, pp. 41–70. ISSN 0016-8033.

3. DORTMAN, N.B. *Physical properties of rocks and mineral deposits (petrophysics): reference book of a geophysicist* [Fizicheskiye svoystva gornykh porod i polesnykh iskopayemykh (petrofizika): spravochnik geofizika]. 2^d ed., revised. Moscow: Nedra, 1984. (Russ.).
4. NUR, A. Effect of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks. *Journal of Geophysical Research*. 1971, vol. 76, pp. 2022–2032. ISSN 0148-0227.
5. NUR, A., G. SIMMONS. Stress-induced velocity anisotropy in rocks, an experimental study. *Journal of Geophysical Research*. 1969, vol. 74, pp. 6667–6676. ISSN 0148-0227.
6. TURANK, K., D. FOURMAINTRAUX, and A. DENIS. Wave propagation and discontinuities in the rocks. In: *Rock mechanics applied to the problems of oil prospecting and production*. Moscow: Mir, 1994, pp. 176–184. (Russ., Translation of: *Mécanique des roches appliquée aux problèmes d'exploration de production pétrolières*, BousSENS, 1993).
7. ZHUKOV, V.S. Estimation of reservoir fracture pattern by elastic wave propagation velocity [Otsenka treshchinovatosti kollektora po skorosti rasprostraneniya uprugikh voln]. In: *Resource support problems of Russian oil-producing regions up to 2030* [Problemy resursnogo obespecheniya gazodobyvayushchikh rayonov Rossii do 2030 g.]: collected sc. articles. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2012, pp. 148–152. (Russ.).
8. WALSH, J.B., W.F. BRACE. Cracks and pores in rocks. *1^{er} Congrès international de mécanique des roches à Lisbonne*. Lisboa: Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, 1966, vol. 1, pp. 643–646.
9. WALSH, J.B. The effect of cracks on compressibility of rocks. *Journal of Geophysical Research*. 1965, vol. 70, no. 2, pp. 381–411. ISSN 0148-0227.
10. Wyllie, M.R.J., G.H.F. GARDNER, A.R. GREGORY. Studies of elastic wave attenuation in porous media. *Geophysics*. 1962, vol. 27, pp. 569–589. ISSN 0016-8033.
11. PLONA, T.J. Observation of second bulk compression wave in porous medium at ultrasonic frequencies. *Appl. Phys. Lett.* 1980, vol. 36, no. 4, pp. 259–261. ISSN 0003-6951.
12. Acoustic properties for ceramics, crystals, glass, and minerals. In: *NDT Resource Center* [online]. Available from: https://www.nde-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/UT/ut_matlprop_ceramics.htm
13. INKOV, V.N., Ye.B. CHEREPETSKAYA, V.L. SHKURATNIK et al. Studying mechanical-acoustic nonlinear effect of rock cleavage using laser-ultrasonic spectroscopy [Issledovaniye mekhano-akusticheskoy nelineynosti treshchinovatykh porod metodom laserno-ultrazvukovoy spektroskopii]. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika*. 2005, vol. 46, no. 3, pp. 174–180. ISSN 0869-5032. (Russ.).