



ДИСПЕРСИЯ СКОРОСТИ И ЗАТУХАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ИЗОТРОПНО-ТРЕЩИНОВАТОЙ СРЕДЕ

Г.М. Голошубин^{1,2}, А.Г. Крылова¹

¹Университет Хьюстона, TX 77204, Хьюстон, 312 Science & Research, Bldg 1, США,
e-mail: ggoloshubin@uh.edu, akrylova@uh.edu

²Тюменский индустриальный университет, 625000, ул. Володарского, 56, Тюмень, Россия

В статье рассматриваются упругие свойства флюидонасыщенных изотропно-трещиноватых горных пород с учетом распространения медленной дисперсионной волны Крауклиса в каждой из трещин, что приводит к увеличению дисперсии скорости и затухания *P*-волны. Результаты расчетов демонстрируют существенное различие отражающих свойств трещиноватого слоя по сравнению со слоем без трещин.

Трещины, волна Крауклиса, трещиноватая среда, дисперсия скорости, затухание

VELOCITY DISPERSION AND ATTENUATION OF SEISMIC WAVES IN ISOTROPIC-FRACTURED MEDIUM

G.M. Goloshubin^{1,2}, A.G. Krylova¹

¹University of Houston, 312 Science & Research, Bldg 1, Houston, TX 77204, USA,
e-mail: ggoloshubin@uh.edu, akrylova@uh.edu

²Industrial University of Tyumen, Volodarskogo st., 56, Tyumen, 625000, Russia

The elastic properties of the fluid-saturated isotropic-fractured rock are discussed with consideration of propagation of the slow and dispersive Krauklis wave within individual fractures. The presence of the Krauklis wave in fractures tends to increase *P*-wave velocity dispersion and attenuation. The results of calculations exhibit a significant difference of the reflectivity of the fractured layer in comparison with a layer without fractures.

Fractures, Krauklis wave, fractured medium, velocity dispersion, attenuation

ВВЕДЕНИЕ

Трещины являются естественными элементами горных пород. Они могут быть разных масштабов: от микрон в межпоровом материале до многих километров в формациях горных пород. Вне зависимости от масштаба трещины оказывают значительное влияние на физические свойства горных пород и на течение жидкостей [Bonnet et al., 2001]. Все основные параметры сейсмических волн, такие как скорость, затухание, дисперсия, анизотропия, в той или иной степени зависят от трещиноватости. Каждая открытая флюидонасыщенная трещина в любом масштабе обуславливает распространение флюидной, волноводного типа, сильно дисперсионной волны Крауклиса [Korneev, Goloshubin, 2015]. Такое название дано волне в честь ее первооткрывателя – П.В. Крауклиса [Korneev et al., 2012]. Волна Крауклиса (*K*-волна) исследована аналитически [Крауклис, 1962; Ferrazzini, Aki, 1987; Korneev, 2008], численно [Paillet, White, 1982; Groenenboom, Falk, 2000; Frehner, Schmalholz, 2010], подтверждена и изучена экспериментально [Ferrazzini et al., 1990; Goloshubin et al., 1993, 1994; Tary et al., Eaton, 2014; Nakagawa, Korneev, 2014; Nakagawa et al., 2016]. Результаты исследований показывают, что *K*-волна несет в себе значительную часть волновой энергии по сравнению с другими волнами, в частности волнами диффузного типа, на которые опираются исследователи при попыт-

ке объяснить затухание и дисперсию скорости распространения продольных сейсмических волн. Существует большое количество работ и исследований, посвященных упругим свойствам трещиноватых пород [Budiansky, O'Connell, 1976; Kachanov, 1980; Schoenberg, Sayers, 1995; Berryman, Wang, 2000; Grechka et al., 2006; Carcione et al., 2013], но ни одна из них не учитывает *K*-волну. В работе [Korneev, Goloshubin, 2015] предложен механизм усреднения модулей упругости вмещающих горных пород (матрицы) и трещинной компоненты среды для расчета скоростей распространения продольных и поперечных волн в трещиноватых флюидонасыщенных средах с учетом распространения волны Крауклиса в каждой отдельной трещине. Развивая это направление, авторы проанализировали различные законы распределения трещин в горных породах, исследовали влияние плотности распределения трещин и вязкости флюида на скорости и затухание сейсмических волн, рассмотрели отражающие свойства трещиноватой среды. Ниже кратко излагаются теоретические основы усреднения упругих свойств изотропно-трещиноватых сред с учетом *K*-волны в индивидуальных трещинах, приводятся результаты исследований дисперсии скорости и затухания при распространении *P*-волны в таких средах, иллюстрируются отражающие свойства этих сред.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Распределение трещин в среде. Наличие закономерностей в распределении трещин определенной длины зависит от многих факторов и может быть представлено разными законами [Bonnet et al., 2001]. Наиболее часто используемые – это экспоненциальный, степенной, гамма- и фрактальный законы. В данной работе при анализе влияния трещин на скорость и затухание сейсмических волн применялся фрактальный закон, качественно иллюстрируемый на рис. 1 и увязывающий количество трещин N с их длиной l формулой

$$N(l) = N_0 \left(\frac{l}{l_0} \right)^{-C}. \quad (1)$$

В формуле (1) N_0 – это константа, эквивалентная плотности трещин, l_0 – характерная длина трещины, C – размерность фрактального закона. В нашем случае использовались значения $l_0 = 1$, $C = 2.5$ в предположении хаотичной ориентации трещин в трехмерном пространстве, что приводит к модели изотропно-трещиноватой среды, где исчезает понятие анизотропии, связанное с трещинами.

Волна в трещине. Обобщенное решение волнового уравнения для трещины, насыщенной вязким флюидом, представлено в работе [Nakagawa, Korneev, 2014]. Это решение имеет в качестве асимптот волны Крауклиса (в случае открытая трещина с параллельными стенками) и Био (при бесконечно высоком модуле сдвига). Если исходить из конечности модуля сдвига и связности трещин, то в качестве основного волнового явления в трещине можно рассматривать K -волну, распространяющуюся со скоростью V_K [Крауклис, 1962]:

$$V_K(\omega) = \left(\frac{\omega h G}{\rho_f} \left(1 - \left(\frac{V_S}{V_P} \right)^2 \right) \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Здесь ω – угловая частота ($\omega = 2\pi f$, где f – частота в Гц); h – толщина трещины ($h = \alpha l$, где α – аспектное соотношение, l – длина трещины); ρ_f – плотность флюида в трещине; G , V_P , V_S – соответственно мо-

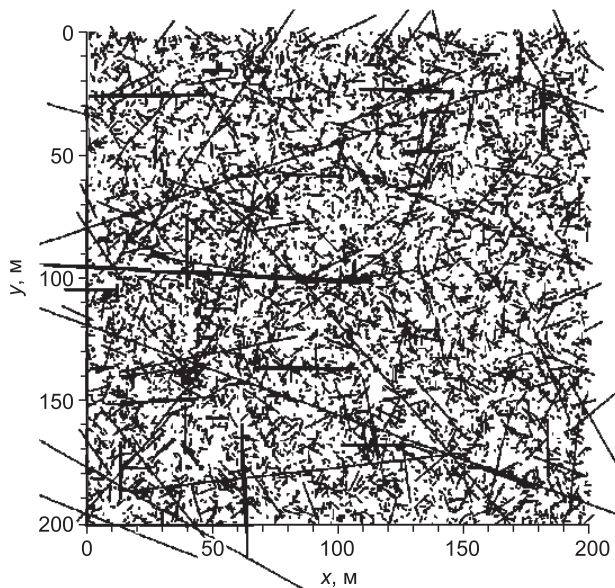


Рис. 1. Схема распределения трещин разной длины по фрактальному закону [Bour, Davu, 1997].

дуль сдвига, скорости продольной и поперечной волн во вмещающей среде.

Профиль скорости K -волны в сейсмическом частотном диапазоне показан на рис. 2. Расчеты сделаны при $h = 10^{-3}$ м, $\rho_f = 800$ кг/м³, $G = 15 \cdot 10^9$ Па, $V_P = 4000$ м/с, $V_S = 2360$ м/с. Видно, что это очень медленная сейсмическая волна с аномальной дисперсией скорости.

С учетом вязкости флюида значение скорости распространения K -волны становится комплекснозначным, обуславливая вязкостное затухание [Korneev, 2008]:

$$\hat{V}_K(\omega) = V_K(\omega) \left(\frac{\beta}{1 + \beta} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$\beta = -\frac{i}{12} \frac{h^2 \omega \rho_f}{\eta_f}$, где η_f – вязкость флюида.

В соответствии с законом (1) в среде может быть значительное количество трещин, длины которых соизмеримы с длиной K -волны в сейсмическом диапазоне частот. Это создает предпосылки для резонансных явлений, связанных с переотражением K -волны от концов трещин. Результаты расчетов энергии резонансов в зависимости от вязкости флюида при фиксированной длине трещины, равной 2 м, приведены на рис. 3. Как и следовало ожидать, энергия резонансов понижается с повышением вязкости, при этом резонансный пик смещается в сторону низких частот.

Эффективные модули упругости. Допустим, что вне трещин среда (матрица) характеризуется плотностью ρ_m , добротностью Q_{Pm} и скоростью V_P продольной волны, добротностью Q_{Sm} и скоростью V_S поперечной волны. Полный объем V_{0P} среды, в рамках которого проводится усреднение параметров матрицы и трещин для определения эффективного модуля упругости, может быть представлен как объем пространства, заключенного между двумя сферическими поверхностями: внешней сферической поверхностью, определяемой длиной продольной волны на самой низкой частоте f_{\min} и внутренней сферической поверхностью, определяемой длиной продольной волны на самой высокой частоте f_{\max} в исследуемом (регистрируемом) диапазоне частот. С учетом того, что продольная волна распространяется со скоростью V_P , объем среды,

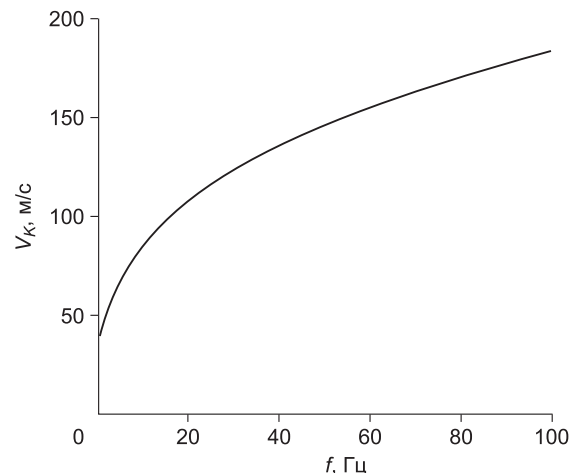


Рис. 2. Скорость волны Крауклиса в зависимости от частоты.

охватываемый волновым процессом, может быть вычислен по формуле

$$V_{0P} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{V_P}{f_{\min}} \right)^3 - \left(\frac{V_P}{f_{\max}} \right)^3 \right). \quad (2)$$

Объем v_P , охватываемый волной в пределах каждой отдельной трещины длиной l , может быть определен как объем эллипсоида вращения с полуосями $a = b > c$, где $a = b = l/2$, а малая полуось c определяется через длину K -волны λ : $c = \lambda/2\pi$, $\lambda = 2\pi V_K(\omega)/\omega$. Тогда волновой объем каждой отдельной трещины вычисляется по формуле

$$v_P(l, \omega) = 2\pi l^2 \left(\frac{V_K(\omega)}{8\omega} \right).$$

Минимальная (L_{\min}) и максимальная (L_{\max}) длина трещин в объеме, определяемом формулой (2), вычисляются как

$$L_{\min} = \frac{V_K(\omega)}{f_{\max}}, \quad L_{\max} = \frac{V_P \sqrt{f_{\max}^2 - f_{\min}^2}}{f_{\max} f_{\min}}.$$

Отсюда, эффективный объем флюидонасыщенного трещинного пространства в рамках фрактального закона (1) может быть рассчитан с помощью интегрирования по всему объему трещин:

$$V_f = \frac{1}{L_{\max} - L_{\min}} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} v_P(l, \omega) N_i(l) dl.$$

Объем матрицы среды в этом случае можно записать как разницу между полным объемом среды и суммарным объемом системы трещин $V_{MP} = V_{0P} - V_f$, получив таким образом весовые функции для осреднения динамических модулей упругости трещин и матрицы:

$$c_{11} = \begin{cases} \rho V_K^2 \text{ frac} \\ \rho V_K^2 \text{ matrix} \end{cases}.$$

Формула расчета эффективного модуля упругости для продольной волны с использованием соответствующих весовых функций, представляющих собой суммарный объем трещин V_f и объем матрицы V_{MP} , может быть представлена в виде:

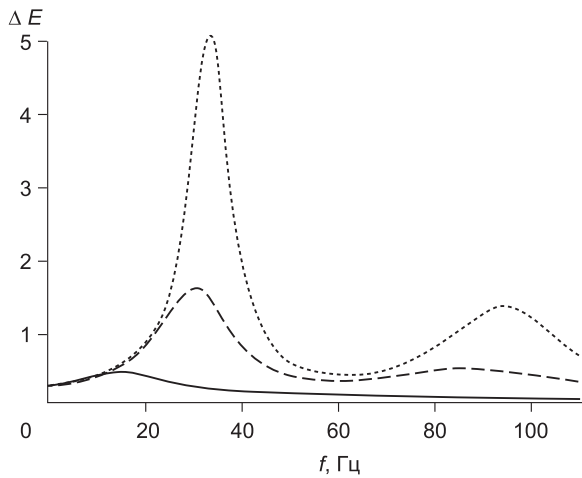


Рис. 3. Относительные изменения энергии ΔE резонансов K -волны в зависимости от частоты f в трещине длиной 2 м, шириной 1 мм при разной вязкости флюида: 0.5 сП (точки), 1.0 сП (пунктир), 5.0 сП (сплошная линия)

$$\bar{c}_{11}(\omega) = \left(\frac{1}{V_{0P}(L_{\max} - L_{\min})} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} v_P(l, \omega) N_i(l) (\rho \hat{V}_K^2)^{-1} dl + \frac{V_{MP}}{V_{0P}} (\rho \hat{V}_P^2)^{-1} \right)^{-1}.$$

Эффективная скорость распространения продольной волны определяется через модуль

$$\bar{V}_P^2(\omega) = \frac{\bar{c}_{11}(\omega)}{\bar{\rho}}.$$

Добротность среды вычисляется из отношения реальной и мнимой составляющих эффективного модуля упругости:

$$Q = \left| \frac{\Re(\bar{c}_{11}(\omega))}{\Im(\bar{c}_{11}(\omega))} \right|,$$

где \Re и \Im – действительная и мнимая части модуля.

По такой же схеме возможно провести усреднение и для поперечных S -волн. В работе [Korneev, Goloshubin, 2015] показано, что эффективная скорость распространения поперечных волн имеет слабую зависимость от частоты, поэтому в рамках наших исследований, предполагается, что

$$\bar{V}_S^2(\omega) = \frac{\bar{c}_{44}(\omega)}{\bar{\rho}} \approx V_S^2.$$

ЧИСЛЕННЫЕ ПРИМЕРЫ

Скорость и затухание в трещиноватой среде. С применением описанной выше схемы осреднения была рассчитана эффективная скорость продольной волны и затухание для трещиноватой среды в сейсмическом диапазоне частот 10–100 Гц при различной плотности распределения трещин. В каждой трещине была учтена медленная дисперсионная K -волна. За исходные значения параметров матрицы среды были взяты следующие значения: $V_P = 2540$ м/с, $V_S = 1260$ м/с, модуль сдвига $G = 3.6 \cdot 10^9$ Па, добротность среды $Q_m = 80$, плотность $\rho = 2300$ кг/м³, пористость $\phi = 0.07$. Распределение трещин по их длинам было представлено

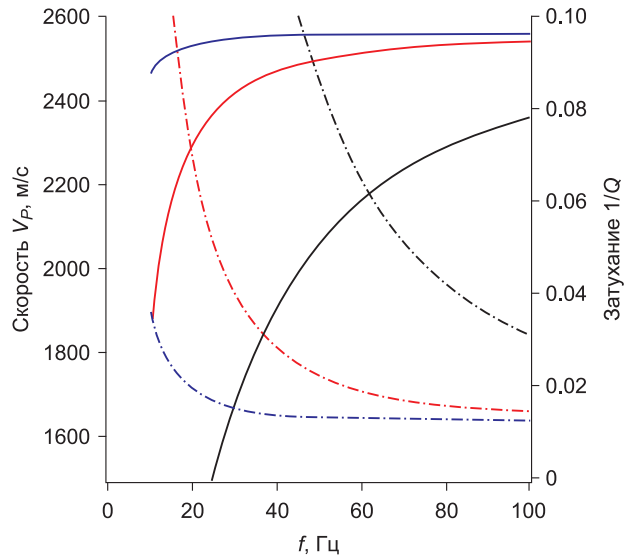


Рис. 4. Скорость (сплошные линии) и затухание (пунктирные линии) P -волны в трещиноватой среде в зависимости от частоты при различной плотности распределения трещин: $N_0 = 10^3$ (синий цвет), $N_0 = 10^4$ (красный цвет), $N_0 = 10^5$ (черный цвет).

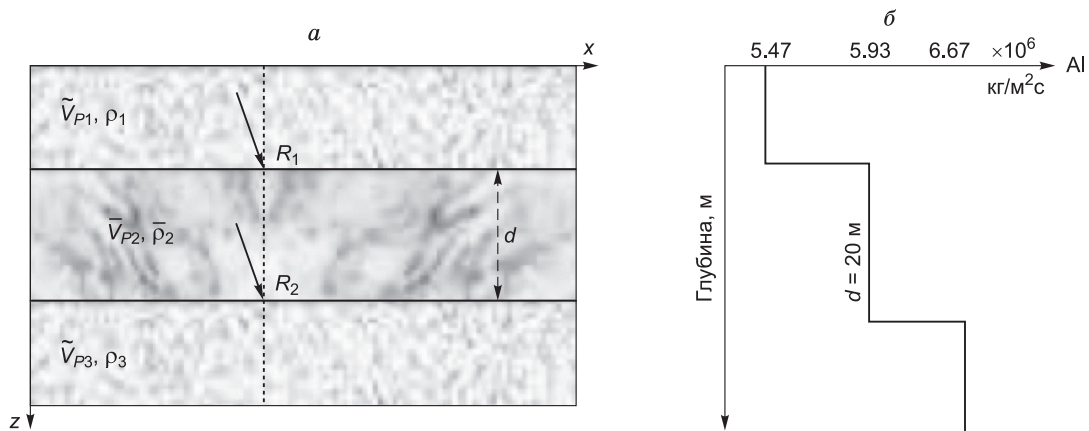


Рис. 5. Изотропно-трещиноватый слой между двумя изотропными полупространствами (а) и профиль акустического импеданса (AI) до наложения трещин (б).

фрактальным законом (1) с открытостью трещин $h = 10^{-3}$ м. Предполагалось, что трещины насыщены водой с плотностью $\rho_{fl} = 1000$ кг/м³, вязкостью $\eta_{fl} = 1$ сП. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

Наблюдается аномальная дисперсия скорости и повышенное затухание P -волны, особенно выраженное на низких частотах. Дисперсия скорости и затухание увеличиваются с ростом плотности распределения трещин.

Отражающие свойства трещиноватого слоя. Отражение продольной волны от изотропно-трещиноватого слоя толщиной d , расположенного между двумя изотропными полупространствами (рис. 5), анализировалось на основе расчетов.

Коэффициент отражения плоской волны от такого слоя для угла падения α на частоте ω рассчитывался по модифицированной формуле [Бреховских, 1957]:

$$R(\omega, \alpha) = \frac{R_1(\omega, \alpha) + R_2(\omega, \alpha)e^{i\omega\Delta t \cos \alpha_2}}{1 + R_1(\omega, \alpha)R_2(\omega, \alpha)e^{i\omega\Delta t \cos \alpha_2}},$$

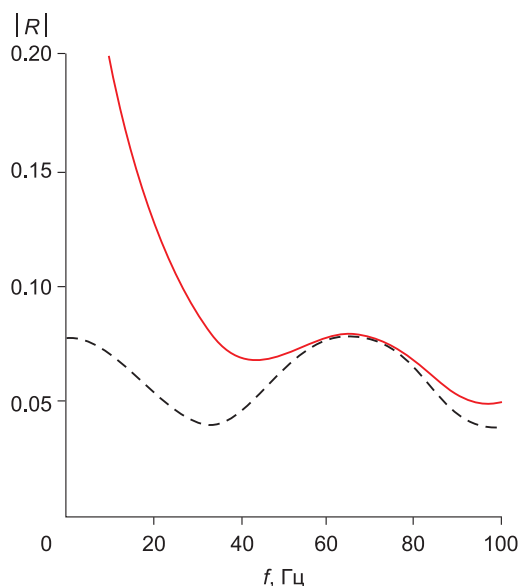


Рис. 6. Модули коэффициентов отражений от трещиноватого (сплошная линия) и однородного (пунктирная линия) слоев в зависимости от частоты при нормальном падении P -волны.

где $\Delta t = d / \bar{V}_p(\omega)$ – толщина слоя во времени, $R_i(\omega, \alpha)$ – коэффициенты отражения волны при ее углах падения α_i ($i = 1, 2$) на верхнюю и нижнюю границы соответственно. При этом коэффициенты отражения от границ слоя при комплексных значениях импедансов вычислялись через уравнение Цепприца [Zoeppritz, 1919]. Расчеты были сделаны для слоя толщиной 20 м с промежуточным импедансом (см. рис. 5, б). Слой насыщался трещинами по фрактальному закону (1) с плотностью распределения трещин $N_0 = 10^4$ при открытости трещин $h = 10^{-3}$ м, насыщенного флюидом с плотностью $\rho_{fl} = 1000$ кг/м³ и вязкостью $\eta_{fl} = 1$ сП. Сравнивались отражающие свойства изотропно-трещиноватого слоя с отражающими свойствами исходного однородного (матричного) слоя без трещин. Результаты расчетов модулей коэффициентов отражения P -волны от трещиноватого и однородного слоев для нормального падения волны на слой в зависимости от частоты представлены на

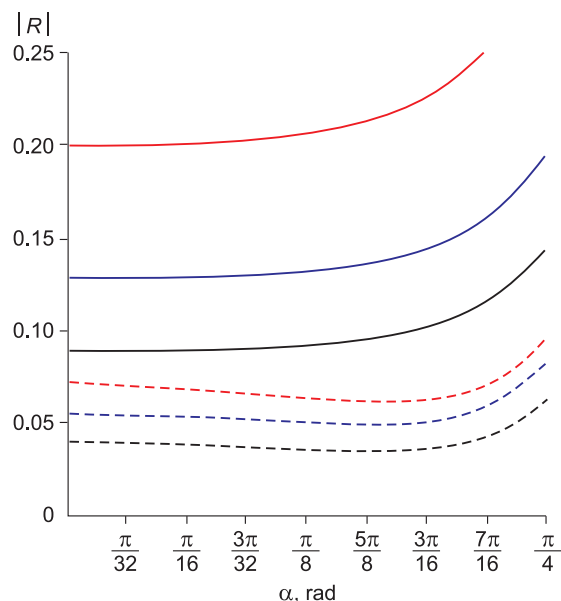


Рис. 7. Модули коэффициентов отражений $|R|$ от трещиноватого (сплошные линии) и однородного (пунктирные линии) слоев в зависимости от угла отражения α на частотах $f = 10$ Гц (красные линии), $f = 20$ Гц (синие линии), $f = 30$ Гц (черные линии).

рис. 6. Наблюдается разница в коэффициентах отражения, особенно на низких частотах, где значимо превалирует отражение от трещиноватого слоя.

Расчеты изменения амплитуд отраженных P -волн в зависимости от их угла отражения α для трещиноватого (сплошная линия) и однородного (пунктирная линия) слоев при заданных частотах $f = 10$ Гц (красные линии), $f = 20$ Гц (синие линии), $f = 30$ Гц (черные линии) приведены на рис. 7. Результаты расчетов показывают, что амплитуды отраженных волн и их поведение в зависимости от угла отражения для трещиноватого слоя отличаются от соответствующих амплитуд для однородного слоя. Отличие особенно заметно на низких частотах, в частности на 10 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены теоретические основы осреднения упругих свойств трещиноватой флюидонасыщенной среды с учетом K -волны в каждой отдельной трещине для получения таких параметров среды, как затухание и скорость распространения P -волны. Предлагаемое осреднение упругих свойств было реализовано в рамках изотропно-трещиноватой среды с фрактальным законом распределения трещин по их размерам. Расчеты показали, что учет волновых явлений в трещинах приводит к аномальной дисперсии скорости и повышенному затуханию P -волны, что влияет на отражающие свойства среды. Наблюдается значимое различие отражающих свойств трещиноватого слоя по сравнению с однородным, особенно проявляющееся на низких сейсмических частотах.

Полученные результаты рассматриваются авторами как предварительные. Мы планируем проверку предложенного подхода на экспериментальных данных с известными свойствами среды, с информацией о размерах трещин и их распределении, в частности, с этой целью планируется использование физического моделирования в лабораторных условиях.

Работа посвящается памяти Валерия Александровича Корнеева — ученого и замечательного человека.

Авторы благодарят Западно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии и геофизики за поддержку исследований.

Литература

- Бреховских Л.М.** Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 50 с.
- Крауклис П.В.** О некоторых низкочастотных колебаниях жидкого слоя в упругой среде // ПММ. 1962. Т. 26. С. 1111–1116.
- Berryman J.G., Wang H.F.** Elastic wave propagation and attenuation in a double-porosity dual-permeability medium // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2000. V. 37, N 1. P. 63–78.
- Bonnet E., Bour O., Odling N.E., Davy P., Main I., Cowie P., Berkowitz B.** Scaling of fracture systems in geological media // Rev. Geophys. 2001. V. 39, N 3. P. 347–383.

Bour O., Davy P. Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution // Water Resources Research. 1997. V. 33, N 7. P. 1567–1583.

Budiansky B., O'Connell R. Elastic moduli of a cracked solid // Int. J. of Solids and Structures. 1976. V. 12, N. 2. P. 81–97.

Carcione J.M., Gurevich B., Santos J.E., Picotti S. Angular and frequency-dependent wave velocity and attenuation in fractured porous media // Pure and Applied Geophys. 2013. V. 170, N 11. P. 1673–1683.

Ferrazzini V., Aki K. Slow waves trapped in a fluid-filled infinite crack: Implication for volcanic tremor // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1987. V. 92, B9. P. 9215–9223.

Ferrazzini V., Chouet B., Fehler M., Aki K. Quantitative analysis of long-period events recorded during hydrofracture experiments at Fenton Hill, New Mexico: Implications for volcanic tremor // J. Geophys. Res. 1990. V. B 95, N B13. P. 21871–21884.

Frehner M., Schmalholz S. Finite-element simulations of Stoneley guided wave reflection and scattering at the tips of fluid-filled fractures // Geophysics. 2010. V. 75, N 2. P. T23–T36.

Goloshubin G.M., Krauklis P.V., Molotkov L.A., Helle H.B. Slow wave in oil-saturated layer // 55th Ann. Int. Conf. and Exhibition, EAGE. 1993.

Goloshubin G.M., Krauklis P.V., Molotkov L.A., Helle H.B. Slow wave phenomenon at seismic frequencies // 63rd Ann. Int. Mtg, SEG, Exp. Abstracts. 1994. P. 809–811.

Grechka V., Vasconcelos I., Kachanov M. The influence of crack shape on the effective elasticity of fractured rocks // Geophysics. 2006. V. 71, N 5. P. D153–D160.

Groenenboom J., Falk J. Scattering by hydraulic fractures: Finite-difference modeling and laboratory data // Geophysics. 2000. V. 65. P. 612–622.

Kachanov M. Continuum model of medium with cracks // J. Eng. Mechanics Division. 1980. V. 106. P. 1039–1051.

Korneev V. Slow waves in fractures filled with viscous fluid // Geophysics. 2008. V. 73, N 1. P. N1–N7.

Korneev V., Goloshubin G. Elastic properties of fluid-saturated fractured rock // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2015. P. 3202–3208.

Korneev V., Goloshubin G., Kashtan B., Bakulin A., Troyan V., Maximov G., Molotkov L., Frehner M., Shapiro S., Shigapov R. Krauklis wave – half a century after // EAGE Expanded Abstracts. Saint Petersburg, 2012.

Nakagawa S., Korneev V. Effect of fracture compliance on wave propagation within a fluid-filled fracture // J. Acoust. Soc. Amer. 2014. V. 135, N 6. P. 3186–3197.

Nakagawa S., Nakashima S., Korneev V.A. Laboratory measurements of guided-wave propagation within a fluid saturated fracture // Geophys. Prosp. 2016. V. 6. P. 143–156.

Paillet F.L., White J.F. Acoustic models of propagation in the borehole and their relationship to rock properties // Geophysics. 1982. V. 47. P. 1215–1228.

Schoenberg M., Sayers C. Seismic anisotropy of fractured rock // Geophysics. 1995. V. 60, N 1. P. 204–211.

Tary J.B., Baan M., Eaton D.W. Interpretation of resonance frequencies recorded during hydraulic fracturing treatments // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2014. V. 119, N 2. P. 1295–1315.

Zoeppritz K. Erdbebenwellen vii. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen // Mathematisch-Physikalische Klasse. 1919. P. 7–65.

Статья поступила в редакцию 26 октября 2016 г., в окончательном варианте — 18 ноября 2016 г.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ГОЛОШУБИН Геннадий Михайлович — доктор физико-математических наук, профессор университета Хьюстона, США, профессор Тюменского индустриального университета. E-mail: ggoloshubin@uh.edu

КРЫЛОВА Анна Григорьевна — аспирантка, ассистент-исследователь, университет Хьюстона. E-mail: akrylova@uh.edu