УДК 532.546:534.1

СКОРОСТЬ И ПОГЛОЩЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ВОЛН В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ, НАСЫЩЕННЫХ ГАЗОМ И ЕГО ГИДРАТОМ

А. А. Губайдуллин, О. Ю. Болдырева, Д. Н. Дудко

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 625026 Тюмень, Россия

E-mails: A.A.Gubaidullin@yandex.ru, olga.boldyreva@mail.ru, timms@ikz.ru

Одним из основных методов поиска месторождений газовых гидратов является акустический каротаж. Поскольку для корректной обработки и интерпретации данных сейсморазведки необходимо знать акустические свойства пород, содержащих гидрат, исследуется распространение волн в такой среде. Скелет среды считается состоящим из зерен, сцементированных газовым гидратом, и моделируется однородной твердой фазой с эффективными параметрами. Модули упругости составного скелета пористой среды вычисляются по заданным модулям упругости материала зерен и гидрата с помощью стандартной методики. В рамках двухскоростной модели пористой среды рассчитаны скорости и коэффициенты затухания линейных волн. Проведено сравнение полученных расчетных данных с имеющимися в литературе экспериментальными данными о скоростях звука в гидратосодержащих пористых образцах. Изучено влияние характеристик основной породы, насыщающего флюида и степени заполнения порового пространства газовым гидратом на особенности распространения линейных волн.

Ключевые слова: пористая среда, газовый гидрат, гидратонасыщенность, модули упругости, волны, скорость звука.

DOI: 10.15372/PMTF20220406

Введение. Природный газ, добываемый из залежей газовых гидратов, в будущем может стать основным источником энергии, так как его разведанные запасы многократно превышают запасы газовых месторождений. Газогидрат представляет собой твердое вещество, подобное спрессованному снегу или льду, имеет клатратную структуру и является соединением воды и газа. Механические свойства гидрата (плотность, скорость звука, модули упругости) близки к свойствам льда. Природные газогидраты на 98 % состоят из метангидратов. Одними из основных методов поиска месторождений газовых гидратов являются сейсморазведка и акустический каротаж. Это, в свою очередь, обусловливает актуальность исследований упругих характеристик газогидратных пластов, скоростей распространения и поглощения продольных и поперечных волн в горных породах и осадках, содержащих газогидрат. Исследование акустических свойств гидратосодержащих пород имеет также большое значение с точки зрения безопасности разработки газогидратных

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Тюменской области (научный проект № 20-41-720003).

[©] Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю., Дудко Д. Н., 2022

месторождений для предотвращения выбросов газа вследствие неконтролируемого разложения гидрата.

Лабораторные исследования упругих свойств пористых сред, содержащих газовый гидрат, заключаются в основном в измерениях скоростей продольных и поперечных волн в пористых образцах, в которых предварительно создаются условия для образования гидрата [1–7]. Эксперименты проводятся с высокопроницаемыми синтетическими образцами (шары из кварца) либо насыпными крупнозернистыми средами (песок). В качестве гидратообразующего вещества обычно используется газ метан (CH₄) либо жидкость тетрагидрофуран ($T\Gamma\Phi$) (C_4H_8O). В исходном состоянии, до образования гидрата, газ может быть свободным или растворенным в воде. Для лабораторного моделирования природного пласта, содержащего гидрат и газ и подстилаемого пластом с газом, в эксперименте метан обычно нагнетается по методике "с избытком газа", когда в процессе образования гидрата в него переходит вся поровая вода и в порах остаются газ и его гидрат. В зависимости от начального содержания воды в порах может образоваться различное количество гидрата и соответственно могут реализоваться схемы contact — cementing, когда гидрат образуется на контактах зерен скелета, или envelope — cementing, когда гидрат обволакивает зерна. В случае пласта с гидратом и водой, подстилаемого пластом с водой, в экспериментах используется смесь $T\Gamma\Phi$ с водой, являющаяся однофазной двухкомпонентной жидкостью, или вода с растворенным в ней метаном. В этом случае частицы гидрата образуются в поровой жидкости, по мере роста заполняют поры, касаясь их стенок, и несут нагрузку совместно со скелетом среды (схема load — bearing). Как правило, в экспериментах используются ультразвуковые возмущения и под продольной волной понимается ее быстрая мода. В различных экспериментах разброс значений скоростей может быть существенным (см., например, [4, 6]), что обусловлено различиями условий проведения этих экспериментов. Во всех экспериментах установлена зависимость скоростей упругих волн от содержания гидрата в поровом пространстве: с увеличением гидратонасыщенности наблюдается рост скоростей.

Теоретические работы посвящены созданию методик и получению формул для вычисления эффективных модулей упругости скелета пористой среды с гидратом [8–12]. В соответствии с описанными выше схемами образования гидрата разработанные методики и формулы можно разделить на три группы: contact — cementing, envelope — cementing и load — bearing.

При обработке результатов используются формулы для скоростей продольных и поперечных волн в твердом теле

$$C_P = \sqrt{(K + 4G/3)/\rho}, \qquad C_S = \sqrt{G/\rho}, \tag{1}$$

где *K*, *G* — модули объемной упругости и сдвига соответственно; *ρ* — плотность.

В случае если образец среды можно моделировать с помощью стержня, используется формула для скорости продольной волны в стержне

$$C = \sqrt{E/\rho}, \qquad E = 9GK/(3K+G) \tag{2}$$

(E -модуль Юнга). При этом скорость волны в стержне всегда меньше скорости в безграничной среде C_P . Формулы (1), (2), в которых не учитывается зависимость скоростей от частоты возмущения, соответствуют предельному случаю нулевой частоты для быстрой моды и поперечной волны.

Для описания волновой динамики пористой среды с газовым гидратом необходимо построить математические модели таких сред с учетом несовпадения напряжений и скоростей фаз [13, 14]. Для замыкания системы дифференциальных уравнений моделей следует использовать методики расчета эффективных модулей упругости скелета, учитывающие структуру скелета, насыщенность порового пространства газогидратом, вид порового флюида, и формулы, в которых эффективные модули выражены через модули упругости материала скелета, гидрата и порового флюида. Такие модели необходимы для адекватного описания скоростей и затухания продольных и поперечных волн, их отражения и прохождения через границы между различными слоями пористой среды, отражения от преград и решения прикладных задач.

Математическая модель. Для исследования распространения и затухания волн в пористой среде выбрана двухскоростная модель насыщенной пористой среды [15].

Уравнения сохранения масс и импульсов фаз имеют вид

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla^l (\rho_f v_f^l) = 0, \qquad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla^l (\rho_s v_s^l) = 0,$$
$$\rho_f \frac{d_f v_f^k}{dt} = -\alpha_f \nabla^k p_f - F^k, \qquad \rho_s \frac{d_s v_s^k}{dt} = -\alpha_s \nabla^k p_f + \nabla^l \sigma_{s*}^{lk} + F^k$$

где ρ_j, v_j, α_j — приведенная плотность, скорость, объемная доля *j*-й фазы; индексы j = s, f соответствуют параметрам скелета и флюида; σ_{s*}, p_f — приведенное напряжение в скелете и давление во флюиде.

Выражение для межфазной силы, являющейся суммой сил присоединенных масс F_m , вязкого трения F_{μ} и силы Бассэ $F_{\rm B}$ вследствие нестационарности вязкого пограничного слоя вблизи границы с твердой фазой, записывается в линейном приближении для монохроматического возмущения с круговой частотой ω :

$$F = F_m + F_\mu + F_B,$$

$$F_m = \frac{1}{2} \eta_m \alpha_s \alpha_f \rho_{f0}^{\circ} \left(\frac{d_f v_f}{dt} - \frac{d_s v_s}{dt} \right), \qquad F_\mu = \eta_\mu \alpha_s \alpha_f \mu_f a_{s*}^{-2} \left(v_f - v_s \right)$$

$$F_B = \eta_B \alpha_s \alpha_f a_{s*}^{-1} \sqrt{2\rho_{f0}^{\circ} \mu_f \omega} \left(v_f - v_s \right),$$

где ρ_j° — истинная плотность *j*-й фазы; нижний индекс "0" соответствует невозмущенному значению параметра; a_{s*} — характерный размер зерен скелета; μ_f — динамическая вязкость флюида; η_m , η_μ , η_B — безразмерные коэффициенты взаимодействия фаз, зависящие от структуры среды.

Скелет пористой среды полагается упругим с объемными модулями упругости K_{s*} и сдвига G_{s*} :

$$\sigma_{s*}^{kl} = \left(K_{s*} - \frac{2}{3}G_{s*}\right)\delta^{kl}\varepsilon_s^{mm} + 2G_{s*}\varepsilon_s^{kl} + \frac{K_{s*}}{K_s}\delta^{kl}p_f,$$
$$\frac{d_s\varepsilon_s^{kl}}{dt} = \frac{1}{2}\left(\nabla^k v_s^l + \nabla^l v_s^k\right)$$

 $(K_j, G_j -$ объемные модули упругости и сдвига материала *j*-й фазы; ε_s^{kl} - тензор деформаций скелета; δ^{kl} - тензор Кронекера). Скелет полагается состоящим из зерен основной горной породы, сцементированных газовым гидратом, и моделируется однородной твердой фазой с эффективными параметрами [15]. Модули упругости составного (основная порода и гидрат) скелета пористой среды вычисляются по формулам для модулей упругости гидратосодержащих насыщенных газом осадочных пород [9]. Для насыщенной газом среды, состоящей из одинаковых шаров, сцементированных гидратом, модули упругости рассчитываются следующим образом:

$$K_{s*}(\alpha) = \frac{n(1-m_0)}{6} \left(K_h + \frac{4}{3} G_h \right) S_n(\alpha),$$

$$G_{s*}(\alpha) = \frac{K_{s*}(\alpha)}{5} + \frac{3n(1-m_0)}{20} G_h S_\tau(\alpha),$$

$$\begin{split} S_n(\alpha) &= A_n \alpha^2 + B_n \alpha + C_n, \\ A_n &= -0.024\,153 D_n^{-1.3646}, \qquad B_n = 0.204\,05 D_n^{-0.890\,08}, \\ C_n &= 0.000\,246\,49 D_n^{-1.9864}, \qquad D_n = \frac{2G_h}{\pi G_s}\,\frac{(1-\nu_s)(1-\nu_h)}{1-2\nu_s}, \\ S_\tau(\alpha) &= A_\tau \alpha^2 + B_\tau \alpha + C_\tau, \\ A_\tau &= -10^{-2}(2.26\nu_s^2 + 2.07\nu_s + 2.3) D_\tau^{0.079\nu_s^2 + 0.1754\nu_s - 1.342}, \\ B_\tau &= (0.0573\nu_s^2 + 0.0937\nu_s + 0.202) D_\tau^{0.0274\nu_s^2 + 0.0529\nu_s - 0.8765}, \\ C_\tau &= 10^{-4}(9.654\nu_s^2 + 4.945\nu_s + 3.1) D_\tau^{0.018\,67\nu_s^2 + 0.4011\nu_s - 1.8186}, \qquad D_\tau = G_h/(\pi G_s). \end{split}$$

Здесь ν_j — коэффициент Пуассона *j*-й фазы; n — среднее число контактов одного зерна с соседними; m_0 — пористость среды до образования гидрата. Функции $S_n(\alpha)$, $S_{\tau}(\alpha)$ зависят от G_s , ν_s , G_h , ν_h . Параметр α зависит от гидратонасыщенности s_h и характеризует отношение радиуса цементирующего гидрата к радиусу зерна. При обволакивающем цементировании (схема envelope — cementing)

$$\alpha = \left(\frac{2m_0 s_h}{3(1-m_0)}\right)^{0.5}.$$

Для расчета эффективных модулей упругости по данной модели необходимо знать значения модулей упругости материала скелета и гидрата, среднее число контактов n(для упаковки сферических шаров обычно принимается $n \approx 9$ [7, 11]) и выражения для $S_n(\alpha), S_{\tau}(\alpha)$. Формулы для $S_n(\alpha), S_{\tau}(\alpha)$ [9] являются статистическими приближениями (погрешность не превышает 1 %) строгих решений теории цементации [11]. В случае если горная порода состоит из нескольких минералов, плотность и модули упругости материала скелета можно вычислить как среднеобъемные или среднемассовые значения для этих минералов.

Для каждой фазы запишем линейное уравнение состояния в акустическом приближении (j = s, f):

$$p_j - p_{j0} = K_j (\rho_j^{\circ} - \rho_{j0}^{\circ}) / \rho_{j0}^{\circ}$$

где p_s — истинное давление в твердой фазе. Для замыкания системы уравнений используем соотношения между истинными давлениями в фазах p_f , p_s и эффективным давлением в скелете p_{s*} :

$$p_{s*} = \alpha_s(p_s - p_f), \quad p_{s*} = -\sigma_{s*}^{mm}/3, \quad \alpha_s + \alpha_f = 1, \quad \rho_j = \alpha_j \rho_j^{\circ}, \quad j = s, f.$$

Таким образом, решая задачу о распространении волн в газонасыщенной пористой среде с газогидратом, сначала необходимо задать начальную пористость m_0 , гидратонасыщенность s_h , вычислить модули упругости скелета K_{s*} , G_{s*} , которые в процессе вычислений остаются постоянными, а также начальные значения объемных долей α_s , α_f и приведенной плотности скелета ρ_s :

$$\alpha_{s0} = 1 - m_0 + m_0 s_h, \qquad \alpha_{f0} = m_0 (1 - s_h), \qquad \rho_{s0} = \alpha_{s0} \rho_{s0}^{\circ} + \alpha_{f0} s_h \rho_{h0}^{\circ}.$$

Заметим, что в экспериментах для моделирования глубины залегания пласта задаются осевое, боковое и поровое давления. В математической модели им соответствуют приведенное напряжение в скелете и давление во флюиде.

Результаты расчетов. Был выполнен линейный анализ системы уравнений представленной математической модели. Получены дисперсионные соотношения, на основе



Рис. 1. Зависимости скоростей продольной (1, 2) и поперечной (3, 4) волн в образцах от содержания гидрата метана в порах s_h при частоте колебаний f = 500 кГц: 1, 3 — расчет, 2, 4 — эксперимент [7]; штриховая линия — продольная волна в стержне

которых рассчитаны скорости и декременты затухания продольных и поперечных волн в насыщенной гидратом пористой среде. Проведено сравнение полученных результатов с известными результатами измерений скоростей волн.

Сравним полученные расчетные данные с данными экспериментов [7], в которых использовался образец длиной 40 мм, диаметром 27 мм из кварцевого песка с песчинками размером $0.10 \div 0.63$ мм. Начальная пористость образца составляла 36 %, поровое давление — 10 МПа. Гидрат метана образовывался по методу "избытка газа", т. е. вся вода переходила в гидрат и в порах оставались газ (метан) и его гидрат. Возбуждался ультразвук с частотой 500 кГц и измерялись скорости распространения продольной и поперечной волн. На рис. 1 приведены расчетные и экспериментальные скорости продольных и поперечных воли в пористой среде с гидратонасыщенностью $s_h = 0 \div 0.8$. Видно, что при изменении содержания гидрата от $s_h = 0$ до $s_h = 0,15$ скорости резко увеличиваются. При дальнейшем увеличении содержания гидрата этот процесс становится более плавным. Резкое увеличение скоростей обусловлено тем, что при образовании гидрата неконсолидированная среда цементируется им, при дальнейшем увеличении содержания гидрата сжимаемость среды постепенно уменьшается. Сплошные линии на рис. 1 соответствуют расчетам в рамках предложенной двухскоростной модели по дисперсионному соотношению скоростей деформационной и поперечной волн в безграничной пористой среде с использованием эффективных модулей упругости скелета пористой среды в случае обволакивающего цементирования при частоте колебаний f = 500 к Γ ц.

На рис. 1 видно, что рассчитанные и экспериментальные значения скоростей качественно и количественно хорошо согласуются, с учетом того что в опытах образец имел ограниченный размер и вытянутую форму. Влияние формы образца подтверждается штриховой линией, показывающей скорость продольной волны в стержне и рассчитанной по формуле $C = \sqrt{E/\rho}$ с использованием тех же эффективных модулей упругости, что и в случае безграничной среды. Поэтому представляется возможным и корректным исследование свойств упругих волн в гидратосодержащей пористой среде в рамках предложенной модели. Заметим, что вследствие быстрого затухания фильтрационная (медленная) волна в опытах не фиксируется. Согласно расчетам ее скорость слабо зависит от гидратонасыщенности (рис. 2).



Рис. 2. Зависимости от частоты f фазовой скорости C (a) и линейного декремента затухания δ (δ) деформационной (сплошные линии) и фильтрационной (штриховые линии) продольных волн в гидратосодержащей пористой среде, насыщенной метаном, при различных значениях гидратонасыщенности: 1 — $s_h = 0, 2 - s_h = 0,1, 3 - s_h = 0,3, 4 - s_h = 0,5, 5 - s_h = 0,7$



Рис. 3. Зависимости от частоты f фазовой скорости C (a) и линейного декремента затухания δ (δ) поперечной волны в гидратосодержащей пористой среде, насыщенной метаном, при различных значениях гидратонасыщенности: 1 — $s_h = 0, 2$ — $s_h = 0,1, 3$ — $s_h = 0,3, 4$ — $s_h = 0,5, 5$ — $s_h = 0,7$

На рис. 2, 3 представлены зависимости фазовых скоростей и линейных декрементов затухания деформационной и фильтрационной продольных и поперечной волн в насыщенной метаном и его гидратом пористой среде, рассчитанные по дисперсионному соотношению, полученному в рамках представленной двухскоростной модели. Расчеты проводились при следующих значениях параметров пористой среды: пористость образца в отсутствие гидрата $m_0 = 0.35$, размер зерен $a_{s*} = 0.1$ мм, $\eta_m = 1$, $\eta_\mu = 100$, $\eta_B = 1.5$, $p_0 = 12.5$ МПа, T = 273 K, $\rho_f^{\circ} = 89.6$ кг/м³, $K_f = 16.5$ МПа. При наличии гидрата значения эффективных модулей упругости скелета пористой среды рассчитывались по описанной выше методике для случая обволакивающего цементирования, при отсутствии гидрата $K_{s*} = 1.365$ ГПа, $G_{s*} = 1.56$ ГПа. На рис. 2, 3 видно, что скорости всех волн, за исключением скорости фильтрационной волны в области низких частот, несущественно зависят от частоты. Это позволяет с достаточной точностью оценивать скорости волн по приведенным выше формулам для скоростей звука в твердом теле. Декремент затухания волн быстро увеличивается с ростом частоты в области низких частот, а далее растет постепенно. Декремент затухания поперечной волны больше декремента деформационной волны. Наиболее быстро затухает фильтрационная волна: ее декремент затухания на несколько порядков выше, чем у других волн. Поэтому в экспериментах фильтрационная волна, как правило, не фиксируется, однако ее наличие в пористых средах было предсказано теоретически и подтверждено экспериментально. Зависимости скоростей деформационной и поперечной волн от гидратонасыщенности (см. рис. 2, 3) такие же, как на рис. 1. При любой фиксированной частоте в случае ее роста скорость волн сначала увеличивается быстро (в диапазоне $s_h = 0 \div 0,3$), затем — постепенно. Декремент затухания этих волн с ростом гидратонасыщенности, наоборот, уменьшается. Скорость и декремент затухания фильтрационной волны слабо зависят от гидратонасыщенности.

Исследуем влияние на поведение линейных волн состава основной породы и газа. Влияние состава породы связано со значением результирующей плотности. Так, в экспериментах [4] порода состояла в основном из кварца (38,95 %) и полевого шпата (57,46 %). Результаты расчетов, проведенных в настоящей работе, показали незначительное отличие скоростей волн от скоростей в случае породы из кварца.

Среди газов, образующих гидрат, помимо метана представляет интерес углекислый газ. В настоящее время ведутся исследования возможности захоронения углекислого газа в подземных пластах в виде его гидрата. Характер дисперсионных кривых для углекислого газа не отличается от характера дисперсионных кривых для метана (см. рис. 2, 3).

Заключение. В работе в рамках двухскоростной модели исследованы скорости и декременты затухания продольных и поперечных волн в пористой среде, насыщенной газом и его гидратом. Эффективные модули упругости скелета среды, входящие в уравнение его состояния, впервые определены с помощью формул, в которых учитывается характер образования гидрата и его насыщенность и используются табличные значения модулей упругости материала скелета, гидрата и газа. Рассчитанные зависимости скоростей продольных и поперечных волн от гидратонасыщенности среды качественно и количественно согласуются с имеющимися в литературе экспериментальными данными. Показано, что скорости всех волн, за исключением скорости фильтрационной волны в области низких частот, слабо зависят от частоты. Декремент затухания волн быстро увеличивается с ростом частоты в области низких частот, а затем растет постепенно. Декремент затухания поперечной волны больше, чем деформационной. Наиболее быстро затухает фильтрационная волна, декремент ее затухания на несколько порядков выше, чем у других волн. Зависимости скоростей деформационной и поперечной волн от гидратонасыщенности характеризуются тем, что при любом значении фиксированной частоты с ростом последней скорость сначала (при малых ее значениях) увеличивается быстро, затем — постепенно. Декремент затухания этих волн с ростом гидратонасыщенности, наоборот, уменьшается. Скорость и декремент затухания фильтрационной волны слабо зависят от гидратонасыщенности.

Результаты исследования показывают, что использованная методика вычисления эффективных модулей упругости скелета среды позволяет повысить достоверность расчетных данных, полученных на основе предложенной модели. Зависимости скоростей и декрементов затухания волн от частоты и гидратонасыщенности, полученные в работе, могут быть использованы для совершенствования методов обработки и интерпретации данных сейсморазведки и акустического каротажа с целью оценки наличия и запасов газогидратного пласта или месторождения. Рассмотрен случай, когда поры содержат газ и его гидрат. В природе встречается случай, когда поры заполнены водой и гидрат образован из растворенного в ней газа. Акустические свойства такой породы могут отличаться не только количественно, но и качественно, и это требует отдельного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- Priest J. A., Best A. I., Clayton C. R. I. A laboratory investigation into seismic velocities of methane gas hydrate-bearing sand // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. B04102.
- Li Feng-Guang, Sun Chang-Yu, Zhang Qin, et al. Laboratory measurements of the effects of methane/tetrahydrofuran concentration and grain size on the P-wave velocity of hydrate-bearing sand // Energy Fuels. 2011. V. 25. P. 2076–2082. DOI: 10.1021/ef101665v.
- 3. Waite W. F., Santamarina J. C., Rydzy M., et al. Overview of the inter-laboratory comparison of wave velocity measurements in sand with gas hydrates and other pore-filling materials // Fire Ice. 2012. V. 12, N 1. P. 16–21.
- 4. Bu Q. T., Hu G. W., Ye Y. G., et al. The elastic wave velocity response of methane gas hydrate formation in vertical gas migration systems // J. Geophys. Engng. 2017. V. 14. P. 555–569.
- 5. Дучков А. Д., Дучков А. А., Манаков А. Ю. и др. Лабораторное моделирование и измерение акустических свойств образцов пород, содержащих гидраты метана // Докл. АН. 2017. Т. 472, № 1. С. 80–84. DOI: 10.7868/S0869565217010169.
- Дучков А. Д., Дучков А. А., Дугаров Г. А., Дробчик А. Н. Скорости ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду, лед или гидраты метана и тетрагидрофурана (лабораторные измерения) // Докл. АН. 2018. Т. 478, № 1. С. 94–99.
- Dugarov G. A., Duchkov A. A., Duchkov A. D., Drobchik A. N. Laboratory validation of effective acoustic velocity models for samples bearing hydrates of different type // J. Natural Gas Sci. Engng. 2019. V. 63. P. 38–46. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.01.007.
- Dvorkin J., Nur A., Yin H. Effective properties of cemented granular materials // Mech. Materials. 1994. V. 18. P. 351–366.
- Dvorkin J., Nur A. Elasticity of high-porosity sandstones: theory for two North Sea data sets // Geophys. 1996. V. 61. P. 1363–1370.
- Helgerud M. B., Dvorkin J., Nur A. Elastic-wave velocity in marine sediments with gas hydrates: Effective medium modeling // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26, N 13. P. 2021–2024.
- 11. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: Tools for seismic analysis in porous media. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998.
- Yun T. S., Francisca F. M., Santamarina J. C., Ruppel C. Compressional and shear wave velocity in uncemented sediment containing gas hydrate // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L10609.
- Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю., Дудко Д. Н. Распространение волн в пористой среде, насыщенной газогидратом // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Математика, механика, информатика. 2012. Т. 12, № 4. С. 48–52.
- 14. Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю. Волны в пористой среде со слоем, содержащим газовый гидрат // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 4. С. 31–38. DOI: 10.15372/PMTF20200400.
- 15. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.

Поступила в редакцию 19/VIII 2021 г., после доработки — 10/XI 2021 г. Принята к публикации 29/XI 2021 г.