

ЗАДАЧА О РАСПРОСТРАНЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, НАСЫЩЕННОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Л.Ф. Ситдикова, И.К. Гималтдинов

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа,

Российская Федерация

E-mail: sitdikovalf@yandex.ru

В пластовых жидкостях во многих случаях присутствует газ. Например, газожидкостная смесь в пористой среде образуется при кислотных обработках низкопроницаемых зон, при водогазовом воздействии на пласты и т. д. Поэтому представляется актуальным учитывать присутствие пузырьков газа при изучении волновых процессов в пористых средах, насыщенных жидкостью.

В настоящей работе теоретически исследуется распространение акустических волн в пористой среде, насыщенной газожидкостной смесью, с учетом межфазных сил взаимодействия между жидкостью и скелетом и теплообмена между газом и жидкостью. Записана общая система уравнений и физических соотношений, описывающая распространение волн в пористой среде, заполненной пузырьковой жидкостью. Получено дисперсионное соотношение, описывающее зависимость комплексного волнового вектора от частоты, на основе которого исследована зависимость фазовой скорости и коэффициента затухания от частоты для «быстрой» и «медленной» волн.

Результаты расчетов позволяют оценить влияние пузырьков газа на распространение звуковых волн в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью. Кроме этого, результаты работы могут быть использованы при интерпретации данных акустического зондирования пористых сред.

Ключевые слова: пористая среда; акустическая волна; пузырьковая жидкость; «быстрая» волна; «медленная» волна.

Введение

Исследование процессов распространения волн давления в насыщенных пористых средах связано не только с решением практических задач сейсмоки, защиты объектов, неразрушающего контроля и т. д., но и с пониманием фундаментальных основ волновых процессов в таких средах.

Отметим работы посвященные исследованию динамики волн давления в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде.

В ряде работ В.Е. Донцова [1–3] на установке «ударная труба» экспериментально изучена эволюция и структура волн давления в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа. Насыщающей жидкостью была вода, газом – воздух или углекислый газ. В качестве рабочей среды использовалась хаотическая упаковка из спеченных шариков оргстекла диаметром около 2 мм, запекаемых непосредственно в рабочем участке. Выявлено, что затухание «медленной» волны в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками углекислого газа, меньше, чем в той же среде, но с пузырьками воздуха. Показано, что именно колебания пузырьков обуславливают осциллирующую структуру переднего фронта «медленной» волны давления.

Шмельдерс с соавторами [4–5] экспериментально и теоретически исследовали эволюцию волн давления в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью. В качестве пористой среды использовались склеенные частицы песка или природный песчаник. Далее пористый образец насыщался пузырьковой жидкостью, которая готовилась в отдельной емкости. Показано, что, как и в работе [3], волна имеет осцилляционную структуру, связанную с наличием пузырьков. Обнаружены две продольные волны Био. Получено, что незначительное содержание газа в пузырьковой жидкости существенно влияет на динамику волн давления.

Динамика ударных волн в пористой среде, состоящей из частиц песка, склеенных эпоксидной смолой, экспериментально и теоретически исследовано в работе [6]. Рассмотрены три случая: поры, полностью насыщенные водой, поры заполнены воздухом и поры содержат смесь воды и пузырьков воздуха. Показано, что ударную трубу можно использовать для изучения отра-

жения высокочастотных компонент ударной волны от пористой среды. Получено хорошее соответствие между линейной теорией и экспериментальными данными для случая, когда пористая среда насыщена водой. Когда среда насыщена частично, выявлено удовлетворительное соответствие.

В [7] численно исследовалось распространение волн давления в заполненной жидкостью цилиндрической полости в пористой среде, содержащей пузырьковую жидкость, с использованием двухскоростной, с двумя напряжениями модели пористой среды. Полученное авторами решение позволяет оценить, как влияют пузырьки газа в пористой среде на затухание и распространение сигнала в цилиндрическом волноводе.

Однако остается мало изученным вопрос распространения акустических волн в пористой среде, насыщенной газожидкостной смесью, с учетом теплообмена между газом и жидкостью. Что и сделано в данном исследовании в рамках двухфазной системы.

Основные уравнения

Примем общепринятые допущения в волновой динамике для пористых сред, заполненных пузырьковой жидкостью, и запишем систему линеаризованных уравнений [8–15]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \rho_{l0} \frac{\partial v_l}{\partial x} &= 0, \quad \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \rho_{g0} \frac{\partial v_l}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \rho_{s0} \frac{\partial v_s}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial n_b}{\partial t} + n_{b0} \frac{\partial v_l}{\partial x} &= 0, \quad \alpha_{g0} = \frac{4}{3} \pi a^3 n_b, \quad \rho_j = \rho_j^0 \alpha_j, \quad \alpha_{g0} + \alpha_{l0} + \alpha_{s0} = 1, \\ (\alpha_{l0} \rho_{l0}^0 + \alpha_{g0} \rho_{g0}^0) \frac{\partial v_l}{\partial t} &= -(\alpha_{g0} + \alpha_{l0}) \frac{\partial p_l}{\partial x} - F, \quad F = F_m + F_\mu + F_B, \\ F_m &= \frac{1}{2} \eta_m \alpha_{s0} (\alpha_{l0} \rho_{l0}^0 + \alpha_{g0} \rho_{g0}^0) \left(\frac{\partial v_l}{\partial t} - \frac{\partial v_s}{\partial t} \right), \quad F_\mu = \frac{9}{2} \eta_\mu (\alpha_{l0} + \alpha_{g0}) \alpha_{s0} \mu_l (v_l - v_s) a_0^{-2}, \\ F_B &= 6 \eta_B (\alpha_{l0} + \alpha_{g0}) \alpha_{s0} a_0 \sqrt{\pi \rho_l^0 \mu_l} \int_{-\infty}^t \frac{\partial}{\partial \tau} (v_l - v_s) \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}}, \\ (\alpha_{l0} \rho_{l0}^0 + \alpha_{g0} \rho_{g0}^0) \frac{\partial v_l}{\partial t} + \alpha_{s0} \rho_{s0}^0 \frac{\partial v_s}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial x} - \frac{\partial p_l}{\partial x}, \quad \frac{\partial p_g}{\partial t} = -\frac{3\gamma p_g}{b_0} w - \frac{3(\gamma - 1)}{b_0} q, \quad w = \frac{\partial b}{\partial t}, \\ \frac{\rho_{l0}^0}{\rho_{l0}} &= 1 + \beta_l (p_l - p_{l0}), \quad \frac{\rho_{s0}^0}{\rho_{s0}} = 1 + \beta_s (p_s - p_{s0}), \quad p_s = p_l - \frac{\sigma_s^*}{\alpha_{s0}}, \\ \alpha_{s0} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \frac{1}{E_s} \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_s^*}{\mu_s}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v_s}{\partial t}, \\ w &= w_R + w_a, \quad \rho_{l0} \left(b \frac{\partial w_R}{\partial t} + \frac{3}{2} w_R^2 \right) = p_g - p_l - 4 \mu_l \frac{w_R}{b} \left(1 + \frac{1}{4} \eta_\mu \left(\frac{b}{a_0} \right)^2 \right), \quad w_a = \frac{p_g - p_l}{\rho_{l0}^0 C_l \varphi_{g0}^{1/3}}. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь n_b – число пузырьков в единице объема в j фазе; a_0 , b_0 , w – средний радиус пор, размер пузырьков газа и радиальная скорость пузырьков, q – интенсивность теплообмена, β_j – сжимаемость j фазы, η_μ – эмпирический параметр, φ_{g0} – объемная доля газа в пузырьковой жидкости. Нижний индекс $j = l, s$ относится к пузырьковой жидкости и скелету пористой среды. Остальные обозначения соответствуют обозначениям в работе [13].

Запишем уравнение теплопроводности и граничные условия в линейном приближении [16]

$$\rho_{g0}^0 c_g \frac{\partial T_g'}{\partial t} = r^{-2} \left(\lambda_g r^2 \frac{\partial T_g'}{\partial r} \right) + \frac{\partial p_g}{\partial t}, \quad (r < b_0), \tag{2}$$

$$T_g' = T_l', \quad q = -\lambda_g \left(\frac{\partial T_g'}{\partial r} \right)_{b_0}, \quad \frac{\partial T_g'}{\partial r} = 0, \quad (r = 0). \tag{3}$$

Решение системы уравнений ищем в виде [8]:

$$\rho_j^0, \nu_j, p_j, a_j, T_g' \cong A_j \exp[i(Kx - \omega t)], \quad K = k + i\delta. \quad (4)$$

После решения уравнений (1)–(3) получено дисперсионное соотношение. Ввиду его громоздкости оно не приводится. На основе полученного решения вычислены фазовая скорость и декремент затухания линейных волн.

Результаты расчета

В расчетах взяты следующие параметры при $T_0 = 300$ К и $p_0 = 10^5$ Па. Для воздуха: $p_{g0} = 10^5$ Па, $\gamma = 1,4$, $\rho_{g0}^0 = 1,17$ кг/м³, $\mu_g = 1,86 \cdot 10^{-5}$ Па×с, $\lambda_g = 0,027$ Дж/(м×с×К), $c_g = 1006$ Дж/(кг×К). Для песчаника: $\rho_{s0}^0 = 2560$ кг/м³, $\mu_s = 10^8$ Па×с, $E_s = 3,7 \cdot 10^{10}$ Па×с. Для воды: $\rho_{l0}^0 = 1000$ кг/м³, $\mu_l = 10^3$ Па×с, $C_l = 1500$ м/с.

Как известно пузырьковая жидкость является средой с уникальными акустическими свойствами [16]. Добавление в жидкость пузырьков газа, объемное содержание которых порядка 1–2 % кардинально меняет его акустические свойства. Из-за аномальной сжимаемости, связанной с сжимаемостью пузырьков, скорость распространения звуковых волн может уменьшиться до значения 100 м/с. Кроме этого из-за неравновесного теплообмена и акустической разгрузки импульсные сигналы в пузырьковой жидкости затухают [16]. В [16] получен закон дисперсии:

$$\frac{K^2}{\omega^2} = \frac{(1 - \alpha_{g0})^2}{C_l^2} + \frac{1}{C_M^2 \Psi}, \quad \Psi = \frac{1}{Q} - \frac{\omega^2}{\chi \omega_R^2}, \quad Q = \frac{1 + 3(\gamma - 1)(z \cdot \text{cth } z - 1)}{z^2}, \quad z = \sqrt{\frac{-i\omega b_0^2}{\nu_g^{(T)}}}, \quad (5)$$

$$C_M = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_{l0}^0 \alpha_{g0} (1 - \alpha_{g0})}}, \quad \omega_R = \frac{1}{b_0} \sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho_{l0}^0}}, \quad \nu_g^{(T)} = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_{g0}^0}, \quad \chi = 1 - i\omega t_A, \quad t_A = b_0 \alpha_{g0}^{-1/3} C_l^{-1}.$$

На рис. 1 показаны декремент затухания δ и фазовая скорость C_p для случая воды с пузырьками воздуха при $b_0 = 10^{-3}$ м, $\alpha_{l0} = 0,99$, $\alpha_{g0} = 0,01$.

На графиках видно существование трех характерных частотных отрезков, в которых существенно различается количественная и качественная картина дисперсионных кривых. Из анализа выражения (5) следует, что эффект дисперсии звука в низкочастотной области $\omega \leq \omega_R$ (ω_R – частота собственных колебаний пузырьков, частота Миннаерта [8]) определяется межфазной температурной неравновесностью. Промежуток $\omega_R < \omega < \omega_C$ ($\omega_C = \omega_R \sqrt{1 + \alpha_{g0} \rho_{l0}^0 C_l^2 / \gamma p_0}$) соответствует полосе непропускания, в нем декремент затухания и фазовая скорость принимают аномально высокие значения. Величина, обратная декременту затухания, соответствует расстоянию, на котором амплитуда волн уменьшается в e раз, где e – основание натурального логарифма. Из рис. 1 видно, что при частоте, равной частоте собственных колебаний пузырьков, фазовая скорость звука минимальна и составляет приблизительно 60 м/с, а значение логарифмического декремента затухания максимально.

В работе [17] получено дисперсионное соотношение для пористой среды, полностью насыщенной жидкостью, следующего вида:

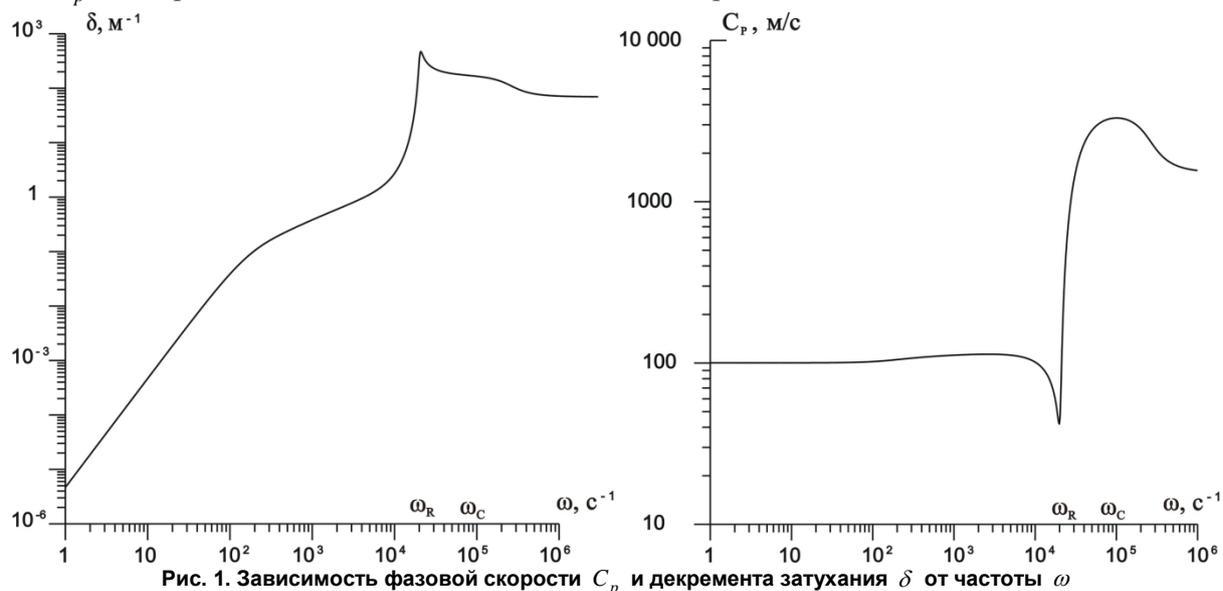
$$\frac{K}{\omega} = \pm \frac{1}{C_l \sqrt{2}} \sqrt{B_1 + B_2 \tilde{C}^2 \pm \sqrt{(B_1 + B_2 \tilde{C}^2)^2 - 4B_3 \tilde{C}^2}},$$

$$B_1 = 1 + i\chi_V \alpha_{s0}, \quad B_2 = \chi_\mu (1 + i\beta \chi_V), \quad \beta = \frac{\rho_{l0}^0}{\rho_{s0}^0}, \quad \tilde{C} = \frac{C_l}{C_s}, \quad C_s = \sqrt{\frac{E_s}{\rho_{s0}^0}}, \quad B_3 = \chi_\mu (1 + i\chi_V (\alpha_{s0} + \beta \alpha_{l0})),$$

$$\chi_V = \frac{1}{\omega \tau^*}, \quad \chi_\mu = 1 + \frac{iE_s}{\mu_s \omega}, \quad \tau^{*-1} = \frac{1}{2} \left(-i\omega \eta_m + 9\eta_\mu \nu_l a_0^{-2} + \frac{9}{2} \eta_B (1 - i) a_0^{-1} \sqrt{2\nu_l \omega} \right), \quad \nu_l = \frac{\mu_l}{\rho_{l0}^0}, \quad (6)$$

где C_l, C_s – фазовые скорости волны в жидкости и в скелете пористой среды соответственно.

На основе выражения (6) построены зависимости декремента затухания δ и фазовой скорости C_p «быстрой» и «медленной» волн от частоты ω на рис. 2.



Из графиков видно, что декремент затухания для обоих типов волн увеличивается с увеличением частоты, кроме этого, коэффициент затухания «быстрой» волны для частот $\omega < 2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ больше, чем декремент затухания «медленной» волны. Также следует, что для частот $\omega < 2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ гармоническая волна затухает на расстоянии порядка 100 м. Из графика зависимости фазовой скорости от частоты следует, что для обоих типов волн с увеличением частоты скорости возрастают. Для частот $\omega > 10^3 \text{ с}^{-1}$ оба типа волн и «медленная», и «быстрая» скорости волн стремятся к постоянным значениям. Скорость «быстрой» волны стремится к скорости звука в песчанике, а скорость «медленной» – к скорости звука в воде.

На рис. 3 показано влияние теплообмена на декремент затухания δ и фазовую скорость C_p для пористой среды, заполненной газожидкостной смесью. Линии 1 построены без учета теплообмена, линии 2 – с учетом теплообмена. Характерные параметры системы $a_0 = 10^{-3}$ м, $b_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $\alpha_{l0} = 0,6$, $\alpha_{s0} = 0,39$, $\alpha_{g0} = 0,01$.

Отметим, что в работе [7] показано, что при частоте собственных колебаний пузырьков и более низких частотах скорость «быстрой» и «медленной» волн в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью, ниже, а затухание выше, чем в пористой среде, насыщенной жидкостью при отсутствии газовых пузырьков. С ростом частоты скорости волн достигают тех же значений, что и в пористой среде полностью насыщенной жидкостью. Из рис. 3 также следует, что в диапазоне частот $0 < \omega < \omega_R$ скорости волн ниже, а коэффициент затухания выше для обоих типов волн, для частот $\omega > \omega_R$ скорости достигают значений, соответствующих значениям заполнения пористой среды «чистой» жидкостью. Характер зависимости для «медленной» волны для пористой среды заполненной пузырьковой смесью такой же, как для «свободной» пузырьковой жидкости, полученной в работе [16], характерные диапазоны частот также разделяют «поведение» кривых коэффициента затухания и фазовой скорости. Отметим, что наиболее отчетливо теплообмен влияет на затухание «медленной» волны в диапазоне $0 < \omega < \omega^{(T)}$, где $\omega^{(T)} = v_g^{(T)} / a_0^2$ ($v_g^{(T)} = \lambda_g / c_g \rho_{g0}^0$). На рис. 3 данные величины соответствуют значениям $\omega^{(T)} = 10 \text{ с}^{-1}$, $\omega_R = 4 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, $\omega_C = 480 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Коэффициент затухания «быстрой» волны до частоты ω_C имеет вид такой же, как для случая пористой среды, насыщенной «чистой» жидкостью, а при частоте $\omega \approx \omega_C$ происходит резкое

уменьшение коэффициента затухания, что соответствует неустойчивому состоянию системы. На коэффициент затухания «быстрой» волны влияние теплообмена практически не влияет.

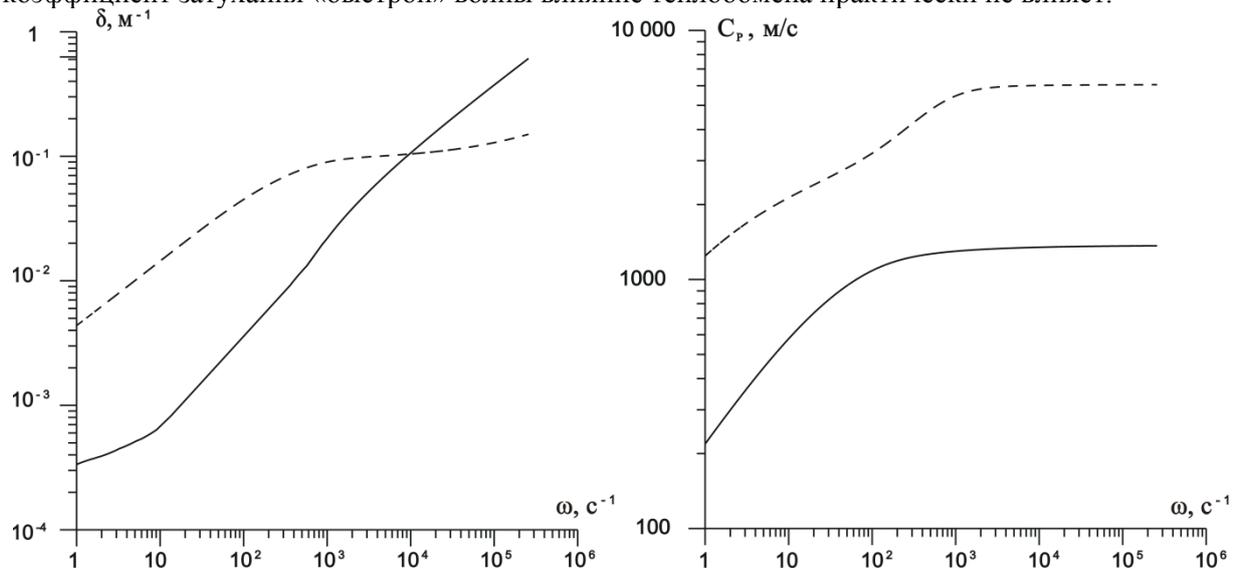


Рис. 2. Зависимости декремента затухания δ и фазовой скорости C_p «быстрой» (пунктирные линии) и «медленной» (сплошные линии) волн от частоты ω для системы песок-вода.

Параметры: $a_0 = 10^{-3}$ м, $\alpha_{10} = 0,6$, $\alpha_{s0} = 0,4$

Скорость «быстрой» волны для пористой среды, заполненной пузырьковой смесью, увеличивается в диапазоне частот $0 < \omega < 10^3$ с⁻¹ до значения скорости звука в песчанике. Скорость «медленной» волны в диапазоне частот $0 < \omega < \omega_R$ не изменяется и составляет около 60 м/с, это значение меньше скорости звука для «свободной» пузырьковой жидкости в этом диапазоне частот. Дополнительное уменьшение скорости звука происходит из-за межфазного трения между жидкостью и скелетом пористой среды. Для диапазона частот $\omega_R < \omega < \omega_C$ (полоса непрозрачности) скорость «медленной» волны повышается до значения скорости в «чистой» жидкости ($C_l = 1500$ м/с), при этом учет теплообмена приводит к более высоким значениям скорости для этого диапазона.

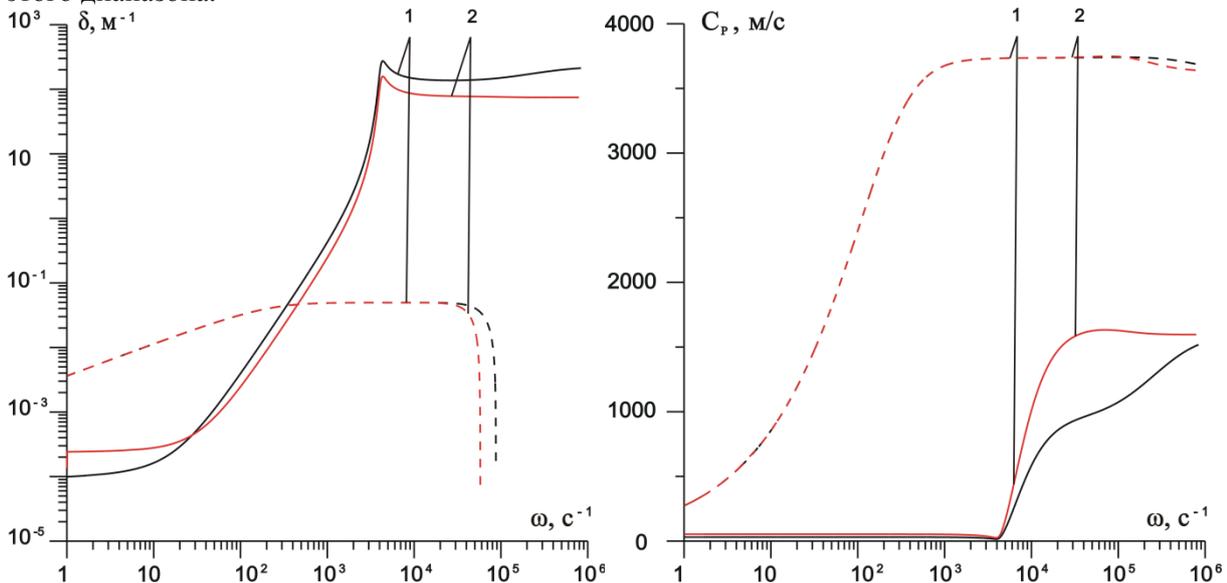


Рис. 3. Зависимости декремента затухания δ и фазовой скорости C_p «быстрой» (пунктирные линии 1,2) и «медленной» (сплошные линии 1,2) волн от частоты ω для системы «песчаник – пузырьковая жидкость». Линия 1 построена без учета теплообмена, линия 2 – с учетом теплообмена. Характерные параметры системы (пористая среда+пузырьковая смесь) $a_0 = 10^{-3}$ м, $b_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $\alpha_{10} = 0,6$, $\alpha_{s0} = 0,39$, $\alpha_{g0} = 0,01$

Заключение

Теоретически исследовано распространение акустических волн в пористой среде, заполненной газожидкостной смесью, с учетом теплообмена между пузырьком и жидкостью. Установлено, что в таких средах для обеих волн характер зависимости декремента затухания и фазовой скорости такой же, как для «свободной» пузырьковой жидкости, полученный в работе [2]. Показано, что учет теплообмена влияет на декремент затухания «медленной» волны в основном для низких частот, а для «быстрой» волны учет теплообмена не влияет на процесс затухания. Стоит отметить, что во всем диапазоне частот на скорость «быстрой» волны межфазный теплообмен между жидкостью и газом влияет незначительно. Для частот $0 < \omega < \omega_R$ скорость «медленной» волны не зависит от учета теплообмена, а в области полосы непропускания учет теплообмена приводит к более высоким значениям скорости звука.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-60015.

Литература

1. Донцов В.Е. Волны давления в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа / В.Е. Донцов, В.В. Кузнецов, В.Е. Накоряков // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1987. – № 4. – С. 85–92.
2. Донцов, В.Е. Структура и динамика возмущений давления конечной амплитуды в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа / В.Е. Донцов // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1992. – № 1. – С. 80–85.
3. Донцов, В.Е. Структура и динамика «медленной» волны давления в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа / В.Е. Донцов, В.А. Маслов // Прикладная механика и техническая физика. – 1994. – № 1. – С. 95–98.
4. Smeulders, D.M.J. Waves in Partially Saturated Porous Media / D.M.J Smeulders, J.P.M. De La Rosette, M.E.H. Vandongen // Transport in Porous Media. – 1992. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 25–37.
5. Smeulders, D.M.J. On Wave Propagation in Saturated and Partially Saturated Porous Media / D.M.J. Smeulders. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1992. – 131 p.
6. Van der Grinten, J.G.M. An Experimental Study of Shock-Induced Wave Propagation in Dry, Water-Saturated, and Partially Saturated Porous Media / J.G.M. Van der Grinten. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1987. – 111 p.
7. Губайдуллин, А.А. Распространение импульсных возмущений в цилиндрическом волноводе в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде / А.А. Губайдуллин, О.Ю. Болдырева, Д.Н. Дудко // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2019. – Т. 5, № 1. – С. 111–122.
8. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
9. Губайдуллин, Д.А. Динамика смесей жидкости с пузырьками нерастворимого газа. Сравнение теории с экспериментом / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров // Известия вузов. Проблемы энергетика. – 2007. – Т. 1-2. – С. 3–7.
10. Губайдуллин, Д.А. Акустические возмущения разной геометрии в смеси жидкости с пузырьками нерастворимого газа / Д.А. Губайдуллин, А.А. Никифоров // Известия вузов. Проблемы энергетика. – 2005. – Т. 1-2. – С. 3–10.
11. Pressure Wave Propagation in Porous Structure Saturated with Water and Methane Bubbles / A.A. Gubaidullin, O.Yu. Boldyreva, D.N. Hai *et al.* // Proceedings of the 1st International Conference on Fluid Machinery and Automation Systems. Hanoi, Vietnam. – 2018. – P. 574–577.
12. Gubaidullin, A.A. Waves in Porous Media Saturated with Bubbly Liquid / A.A. Gubaidullin, O.Yu. Boldyreva, D.N. Dudko // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 899, no. 3. – P. 032011.
13. Гималтдинов, И.К. Динамика звуковых волн при наклонном падении на границу «пористая среда – газ» / И.К. Гималтдинов, Л.Ф. Ситдикова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1, № 2(2). – С. 112–123.

14. Гималтдинов, И.К. Динамика звуковых волн в насыщенных парогазовой смесью пористых средах / И.К. Гималтдинов, В.Л. Дмитриев, Л.Ф. Ситдикова // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 4. – С. 572–580.

15. Ситдикова, Л.Ф. Об эволюции линейных волн в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью / Л.Ф. Ситдикова // Проблема сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Вып. 5. – С. 9–20.

16. Нигматулин, Р.И. Проявление сжимаемости несущей фазы при распространении волн в пузырьковой среде / Р.И. Нигматулин, В.Ш. Шагапов, Н.К. Вахитова // ДАН СССР. – 1989. – Т. 304, № 5. – С. 1077–1081.

17. Дмитриев, В.Л. Распространение линейных волн в насыщенных пористых средах с учетом межфазного теплообмена: дис. ... канд. физ.-мат. наук / В.Л. Дмитриев. – Уфа: Башкир. гос. ун-т, 2005. – 134 с.

Поступила в редакцию 14 мая 2020 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2021, vol. 13, no. 1, pp. 59–66

DOI: 10.14529/mmph210107

THE PROBLEM OF THE PROPAGATION OF ACOUSTIC WAVES IN A POROUS ENVIRONMENT SATURATED WITH BUBBLE LIQUID

L.F. Sitdikova, I.K. Gimaltidinov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

E-mail: sitdikovalf@yandex.ru

In many cases, formation fluids contain gas. For example, a gas-liquid mixture in a porous medium is formed during acid treatment of low-permeability zones, during water-gas stimulation of reservoirs, etc. Therefore, it seems relevant to take into account the presence of gas bubbles when studying wave processes in porous media saturated with liquid.

In this work, the propagation of acoustic waves in a porous medium saturated with a gas-liquid mixture is theoretically investigated taking into account the interfacial forces of interaction between the liquid and the matrix, and heat transfer between the gas and the liquid. A general system of equations and physical relations is written, which describes the propagation of waves in a porous medium filled with bubble liquid. A dispersion relation is obtained that describes the dependence of the complex wave vector on the frequency, on the basis of which the dependence of the phase velocity and attenuation coefficient on the frequency for "fast" and "slow" waves is investigated.

The calculation results make it possible to evaluate the effect of gas bubbles on the propagation of sound waves in a porous medium saturated with bubble liquid. In addition, the results of the work can be used to interpret the data of acoustic sounding of porous media.

Funding: The reported study was funded by RFBR, project number № 19-31-60015.

Keywords: porous medium; acoustic wave; bubble liquid; "fast" wave; "slow" wave.

References

1. Dontsov V.E., Kuznetsov V.V., Nakoryakov V.E. Pressure Waves in a Porous Medium Saturated with a Gassy Fluid. *Fluid Dynamics*, 1987, Vol. 22, pp. 564–570. DOI: 10.1007/BF01051421

2. Dontsov V.E. Structure and Dynamics of Finite-Amplitude Pressure Perturbations in a Porous Medium Saturated with Gassy Fluid. *Fluid Dynamics*, 1992, Vol. 27, pp. 60–63. DOI: 10.1007/BF01054174

3. Dontsov V.E., Maslov V.A. Struktura i dinamika "medlennoy" volny davleniya v poristoy srede, nasyshchennoy zhidkost'yu s puzyr'kami gaza (Structure and Dynamics of a "Slow" Pressure Wave in a Porous Medium Saturated with a Liquid with Gas Bubbles). *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 1994, no. 1, pp. 95–98. (in Russ.).

4. Smeulders D.M.J., De la Rosette J.P.M. Vandongen M.E.H. Waves in Partially Saturated Porous Media. *Transport in Porous Media*, 1992, Vol. 9, Iss. 1, pp. 25–37. DOI: 10.1007/BF01039623
5. Smeulders D.M.J. *On Wave Propagation in Saturated and Partially Saturated Porous Media*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1992, 131 p. DOI: 10.6100/IR375910.
6. Van der Grinten J.G.M. *An Experimental Study of Shock-Induced Wave Propagation in Dry, Water-Saturated, and Partially Saturated Porous Media*. Technische Universiteit Eindhoven, 1987, 111 p. DOI: 10.6100/IR274910
7. Gubaidullin A.A., Boldyreva O.Yu., Dudko D.N. Propagation of Pulse Perturbations in a Cylindrical Waveguide in a Porous Medium Saturated with Bubbly Liquid. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2019, Vol. 5, no. 1, pp. 111–122. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-111-122
8. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred. Chast' 1* (The Dynamics of Multiphase Media. Part 1). Moscow, Nauka Publ., 1987, 464 p. (in Russ.).
9. Gubaidullin D.A., Nikiforov A.A. Dynamics of Mixtures of a Liquid with Bubbles of Insoluble Gas. Comparison between Theory and Experiment. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2007, Vol. 1-2, pp. 3–7. (in Russ.).
10. Gubaidullin D.A., Nikiforov A.A. Acoustic Waves of Different Geometry in the Mixtures of a Liquid with Insoluble Gas Bubbles. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2005, Vol. 1-2, pp. 3–10. (in Russ.).
11. Gubaidullin A.A., Boldyreva O.Yu., Hai D.N., Dudko D.N., Musakaev N.G., Thang N.T., Thai N.Q. Pressure Wave Propagation in Porous Structure Saturated with Water and Methane Bubbles. *Proc. 1st International Conference on Fluid Machinery and Automation Systems, Hanoi, Vietnam*, 2018, pp. 574–577.
12. Gubaidullin A.A., Boldyreva O.Yu., Dudko D.N. Waves in Porous Media Saturated with Bubbly Liquid. *Journal of Physics: Conference Serie*, 2017, Vol. 899, no. 3, pp. 032011. DOI: 10.1088/1742-6596/899/3/032011
13. Gimaltdinov I.K., Sitdikova L.F. The Dynamics of the Sound Waves at Oblique Incidence on the Border “Porous Medium–Gas”. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2015, Vol. 1, no. 2(2), pp. 112–123. (in Russ.).
14. Gimaltdinov I.K., Dmitriev V.L., Sitdikova L.F. Dinamika zvukovykh voln v nasyshchennykh parogazovoy smes'yu poristykh sredakh (Dynamics of Sound Waves in Porous Media Saturated with a Vapor–Gas mixture). *High Temperature*, 2014, Vol. 52, no. 4, pp. 545–553. (in Russ.). DOI: 10.1134/S0018151X14030134
15. Sitdikova L.F. Evolution of Linear Waves in a Porous Medium Saturated with a Bubble Liquid. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of oil and oil products*, 2020, Iss. 5, pp. 9–20. (in Russ.). DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-5-9-20
16. Nigmatulin R.I., Shagapov V. Sh., Vakhitova N.K. Effect of the Compressibility of the Carrier Phase in Wave Propagation in a Bubble Medium. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1989, Vol. 304, no. 5, 1077–1081. (in Russ.).
17. Dmitriev V.L. *Rasprostraneniye lineynykh voln v nasyshchennykh poristykh sredakh s uchetom mezhfaznogo teploobmena: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* (Linear Wave Propagation in Saturated Porous Media, Taking into Account Interfacial Heat Transfer. Cand. phys. and math. sci. diss.). Ufa, Bashkir. gos. un-t Publ., 2005, 134 p. (in Russ.).

Received May 14, 2020