

## АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ, НАСЫЩЕННЫХ ВОДОЙ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА НА СТЕНКАХ ПОР

### ACOUSTIC WAVES IN POROUS MEDIA SATURATED WITH WATER WITH GAS BUBBLES ON THE PORE WALLS

**Л. Ф. Ситдикова**

**Liliya F. Sitdikova**

Уфимский государственный  
нефтяной технический  
университет,  
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum  
Technological University,  
Ufa, Russian Federation

Исследование распространения возмущений в пузырьковой жидкости представляет значительный научный и практический интерес в связи с широким распространением таких систем в природе и в промышленности.

В данном исследовании теоретически исследуются волновые процессы в двухскоростной пористой среде, насыщенной водой с пузырьками газа на стенках пор. 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. Установлено, что для обоих типов волн наблюдается три характерных диапазона частот, где существенно различаются не только количественная, но и качественная картина дисперсионных кривых и зависимость фазовой скорости.

Проведено исследование влияния характеристик пузырьков газа на распространение звуковых волн в пористой среде, насыщенной водой с пузырьками газа на стенках пор.

The study of the propagation of disturbances in a bubble liquid is of considerable scientific and practical interest due to the wide spread of such systems in nature and in industry.

In this study, wave processes are theoretically investigated in a two-speed porous medium saturated with water with gas bubbles on the pore walls. A dispersion relation describing the dependence of the complex wave vector on frequency is obtained, which is used to study the dependence of the phase velocity and the attenuation coefficient on frequency for «fast» and «slow» waves. It is established that for both types of waves there are three characteristic frequency ranges, where not only the quantitative but also the qualitative picture of the dispersion curves and the dependence of the phase velocity differ significantly.

The influence of the characteristics of gas bubbles on the propagation of sound waves in a porous medium saturated with water with gas bubbles on the pore walls is studied.

#### Ключевые слова

пористая среда;  
акустическая волна;  
пузырьки; «быстрая» волна;  
«медленная» волна

#### Key words

porous medium;  
sound wave;  
bubbles; the «fast» wave;  
the «slow» wave

#### Введение

Исследования распространения ударных волн в насыщенных пористых средах являются актуальными на протяжении почти полувека в связи с изучением эффективности временных

защитных сооружений, вопросами акустического каротажа и зондирования, моделирования хаммер эффекта при гидроразрыве пласта.

Этому посвящено достаточное количество работ [1–12]. В этих работах отмечено, что

отличительной особенностью волновой динамики насыщенных пористых сред является то, что в таких средах существуют два типа продольных волн — «быстрая» продольная и «медленная» продольная. Иногда «быструю» продольную волну называют деформационной волной, а «медленную» продольную — фильтрационной волной.

В работах [5, 6] численно исследованы волновые процессы в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью, с учетом нелинейности колебаний пузырьков. Нелинейность учтена в уравнениях состояния газа и Рэлея-Ламба. Численное исследование в рамках нелинейной модели выполнено впервые. Получены дисперсионные зависимости. Проанализировано влияние свойств пористой среды и параметров пузырьковой жидкости на скорость и затухание деформационной и фильтрационной волн. Исследовано прохождение волны ступенчатого профиля из жидкости в пористую среду, насыщенную пузырьковой жидкостью. Изучено влияние параметров среды и интенсивности падающей волны на эволюцию волн в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде. Результаты расчетов показывают хорошее качественное согласование с экспериментальными данными других авторов.

В [7] проведено исследование взаимодействия волнового импульса с пористым слоем. Исследованы особенности прохождения акустической волны в пористый слой и отражения от преграды. Также проведено сравнение расчетных данных с данными эксперимента в части прохождения импульса через погруженную в воду пористую пластину.

Динамика ударных волн в пористой среде, состоящей из частиц песка, склеенных эпоксидной смолой, экспериментально и теоретически исследована в работе [8]. Рассмотрены три случая: поры полностью насыщены водой, поры заполнены воздухом и поры содержат смесь воды и пузырьков воздуха. Показано, что ударную трубу можно использовать для изучения отражения высокочастотных компонент ударной волны от пористой среды. Получено хорошее соответствие между линейной теорией и экспериментом для случая насыщения пористой среды водой. Для частично насыщенной пористой среды соответствие удовлетворительное.

В работе [9] исследовано распространение волн давления конечной амплитуды в упругой

пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа, с учетом нелинейности на контактах зерен твердого скелета. Получено, что контактная нелинейность на твердых частицах может играть существенную роль.

Но остается малоизученным вопрос распространения волн в пористых средах, насыщенных жидкостью и пузырьками газа на стенках пор в двухскоростном приближении. Этому и посвящена данная работа.

*Основные уравнения*

При описании распространения акустических волн в пористой среде, насыщенной пузырьковой смесью, примем следующие допущения: значения длин рассматриваемых волн намного больше размеров пор, радиуса пузырьков и расстояния между пузырьками; скорости в скелете и в газе при прохождении волны равны ( $v_s = v_g$ ). В качестве характерных размеров среды примем средний радиус пор  $a_0$ , характерный размер пузырьков газа  $b_0$  (рисунок 1).

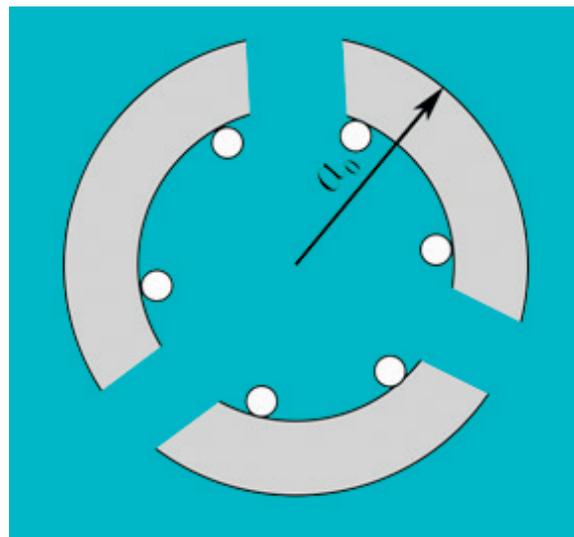


Рисунок 1. Ячейка пористой среды

Запишем макроскопические линейризованные уравнения массы для жидкости, газа в порах и скелета пористой среды в двухскоростном приближении и числа пузырьков [1,3,4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \rho_{l0} \frac{\partial v_l}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \rho_{g0} \frac{\partial v_s}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \rho_{s0} \frac{\partial v_s}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial n_b}{\partial t} + n_{b0} \frac{\partial v_s}{\partial x} = 0, \quad \alpha_{g0} = \frac{4}{3} \pi b^3 n_b, \quad \rho_j = \rho_j^0 \alpha_j. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\rho_j, \rho_j^0, v_j, p_j, n_b$  — средняя по объему и средняя по фазе плотности, скорость, давление, объемные содержания и число пузырьков в единице объема,  $j = g, l, s$ . Дополнительный нижний индекс соответствует первоначальному невозмущенному состоянию.

Уравнения импульсов для жидкости и для всей системы (пористая среда, насыщенная водой и пузырьками газа на стенках пор) имеют следующий вид [5, 6]:

$$\begin{aligned} \alpha_{i0}\rho_{i0}^0 \frac{\partial v_i}{\partial t} &= -\alpha_{i0} \frac{\partial p_i}{\partial x} - F, \quad F = F_m + F_\mu + F_B, \\ F_m &= \frac{1}{2} \eta_m (\alpha_{s0} + \alpha_{g0}) \alpha_{i0} \rho_{i0}^0 \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} - \frac{\partial v_s}{\partial t} \right), \\ F_\mu &= \frac{9}{2} \eta_\mu (\alpha_{s0} + \alpha_{g0}) \alpha_{i0} \mu_i (v_i - v_s) a_0^{-2}, \\ F_B &= 6\eta_B (\alpha_{s0} + \alpha_{g0}) \alpha_{g0} a_0^{-1} \sqrt{\pi \rho_g^0 \mu_i} \int_{-\infty}^t \frac{\partial}{\partial \tau} (v_i - v_s) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}, \\ \alpha_{i0}\rho_{i0}^0 \frac{\partial v_i}{\partial t} + (\alpha_{s0}\rho_{s0}^0 + \alpha_{g0}\rho_{g0}^0) \frac{\partial v_s}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial x} - \frac{\partial p_i}{\partial x}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $p_i$  — давление в жидкости;  $\alpha_{s0}$ ,  $\alpha_{i0}$  и  $\alpha_{g0}$  — объемные содержания твердой, жидкой и газовой фаз соответственно;  $\sigma_s^*$  — приведенное напряжение в скелете;  $F_m$  — сила присоединенных масс, вызванная инерционным взаимодействием фаз;  $F_\mu$  — аналог силы вязкого трения Стокса;  $F_B$  — аналог силы Бассэ, проявляющейся при высоких частотах из-за нестационарности вязкого пограничного слоя около границы с твердой фазой;  $\mu_i$  — вязкость жидкости;  $\eta_m, \eta_\mu, \eta_B$  — коэффициенты, зависящие от параметров пористой среды.

Для твердой и жидкой фаз принято линейное уравнение состояния в акустическом приближении, для скелета пористой среды приемлем модель Максвелла [3–5]:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{s0}^0}{\rho_{s0}} &= 1 + \beta_s (p_s - p_{s0}), \\ \frac{\rho_{i0}^0}{\rho_{i0}} &= 1 + \beta_i (p_i - p_{i0}), \\ p_s &= p_i - \frac{\sigma_s^*}{\alpha_{s0}}, \\ \alpha_{s0} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \frac{1}{E_s} \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_s^*}{\mu_s}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v_s}{\partial t}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\beta_j$  — сжимаемость фаз;  $p_s$  — давление в скелете;  $E_s$  и  $\mu_s$  — модуль упругости и коэффициент динамической вязкости материала скелета соответственно;  $\varepsilon$  — деформация материала скелета.

Будем полагать, что газ в пузырьках сжимается адиабатически:

$$\frac{p_g}{p_{g0}} = \left( \frac{b_0}{b} \right)^{3\gamma}, \quad (4)$$

$$\frac{p_g}{p_{g0}} = \left( \frac{\rho_g}{\rho_{g0}} \right)^\gamma. \quad (5)$$

Здесь  $p_g$  — давление в газовой фазе.

Дополнительным нижним индексом (0) определены параметры, соответствующие невозмущенному состоянию, а параметры без индекса выражают малые возмущения параметров от равновесного значения; верхний индекс (0) соответствует истинному значению параметра.

Для объемных содержаний  $\alpha_j$  справедливо следующее кинематическое соотношение:

$$\alpha_g + \alpha_{i0} + \alpha_{s0}. \quad (6)$$

Изменение радиуса пузырька подчиняется уравнению Рэлея-Ламба для пузырька в пористой среде [1]:

$$\begin{aligned} \rho_{i0} \left( b \frac{\partial w_R}{\partial t} + \frac{3}{2} w_R^2 \right) &= p_g - p_i - \\ &- 4\mu_i \frac{w_R}{b} \left( 1 + \frac{1}{4} \eta_\mu \left( \frac{b}{a_0} \right)^2 \right), \\ w_g &= \frac{\partial b}{\partial t}, \quad w_g = w_R + w_a, \quad w_a = \\ &= \frac{p_g - p_i}{\rho_{i0}^0 C_l \varphi_{g0}^{1/3}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $C_l$  — скорость звука в жидкости;  $\varphi_{g0}$  — объемная доля газа в пузырьковой жидкости.

Решение системы уравнений будем искать в виде затухающих бегущих волн [1]:

$$\begin{aligned} \rho_j^0, v_j, p_j, a_j &\cong A_j \exp[i(Kx - \omega t)], \\ K &= k + i\delta. \end{aligned} \quad (8)$$

После решения уравнений (1)–(7) получено дисперсионное соотношение. Ввиду громоздкости это соотношение не приводится. На основе этого соотношения вычислены фазовая скорость и декремент затухания линейных волн для «быстрой» и «медленной» волн.

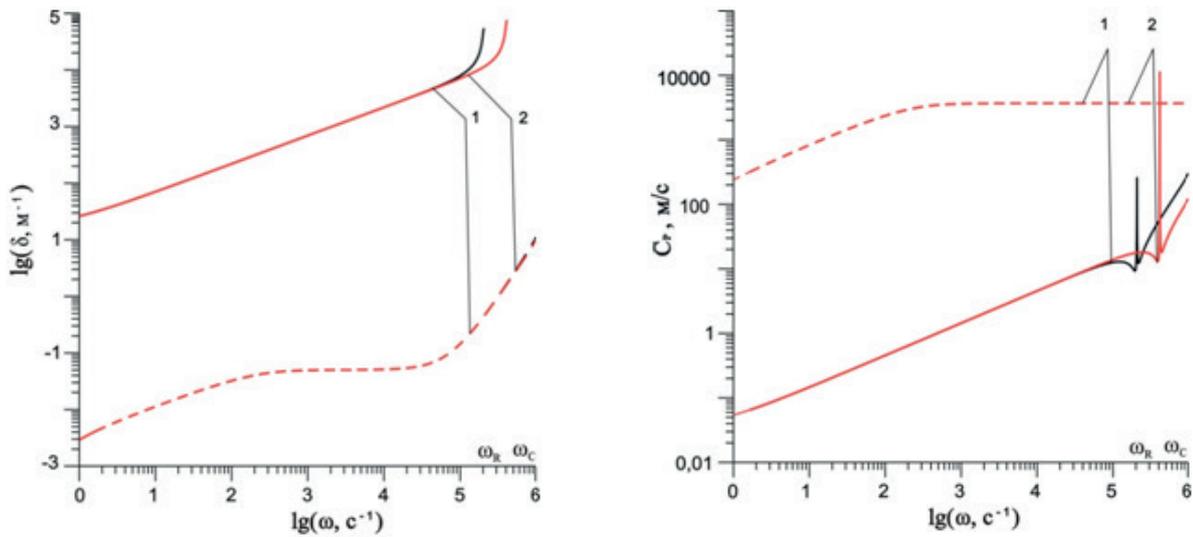
#### Результаты расчета

В расчетах параметры фаз взяты при температуре среды 300 К. Для воздуха:  $p_{g0} = 10^5$  Па,  $\gamma = 1,4$ ,  $\rho_{g0}^0 = 1,17/\text{м}^3$ ,  $\mu_g = 1,86 \cdot 10^{-5}$  Па·с. Для песчаника:  $\rho_{s0}^0 = 2560$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu_s = 108$  Па·с. Для воды:  $\rho_{i0}^0 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu_i = 10^3$  Па·с,  $C_l = 1500$  м/с.

На рисунке 2 показаны зависимости коэффициента затухания  $\delta$  и фазовой скорости  $C_p$  «быстрой» (штриховые линии) и «медленной» (сплошные линии) волн от частоты  $\omega$  для случая, когда пористая среда, насыщена водой и пузырьками газа на стенках пор. Линия 1 построена для размеров  $a_0 = 10^{-3}$  м,  $b_0 = 10^{-4}$  м,  $\alpha_{s0} = 0,39$ ,  $\alpha_i = 0,6$ ,  $\alpha_{g0} = 0,01$ , линия 2 —  $a_0 = 10^{-3}$  м,  $b_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  м,  $\alpha_{s0} = 0,39$ ,  $\alpha_{i0} = 0,6$ ,  $\alpha_{g0} = 0,01$ .

Из рисунка 2 видно, что коэффициент затухания «медленной» волны плавно растет до частоты собственных колебаний пузырьков (частота Миннаерта), эта частота определяется выражением  $\omega_R = b_0^{-1} \sqrt{3\gamma p_0 / \rho_{l0}^0}$ . При достижении этой частоты происходит резкое увеличение коэффициента затухания. Отметим, что коэффициент затухания для «быстрой» волны на всем диапазоне частот почти на два порядка меньше, чем аналогичная величина для «медленной» волны, при этом для частот, превышающих частоту собственных колебаний, коэффициент затухания

возрастает. Из рисунка 2 также видно, что фазовая скорость «быстрой» волны плавно возрастает от 200 до 4360 м/с в диапазоне частот  $1 < \omega < 200 \text{ с}^{-1}$ , далее с увеличением частоты скорость «быстрой» волны не изменяется. «Медленная» волна в диапазоне частот  $1 < \omega < 10^6 \text{ с}^{-1}$  увеличивается от 0,5 до 100 м/с. Необходимо отметить, что при резонансной частоте на графике проявляются характерные всплески. Также видно, что коэффициент затухания и фазовая скорость «быстрой» волны практически не зависят от радиуса пузырьков.



линия 1 —  $b_0 = 10^{-4}$ , линия 2 —  $b_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  м

**Рисунок 2.** Зависимости коэффициента затухания  $\delta$  и фазовой скорости  $C_p$  «быстрой» (штриховые линии) и «медленной» (сплошные линии) волн от частоты  $\omega$  для системы песчаник, насыщенный водой и пузырьками воздуха на стенках пор

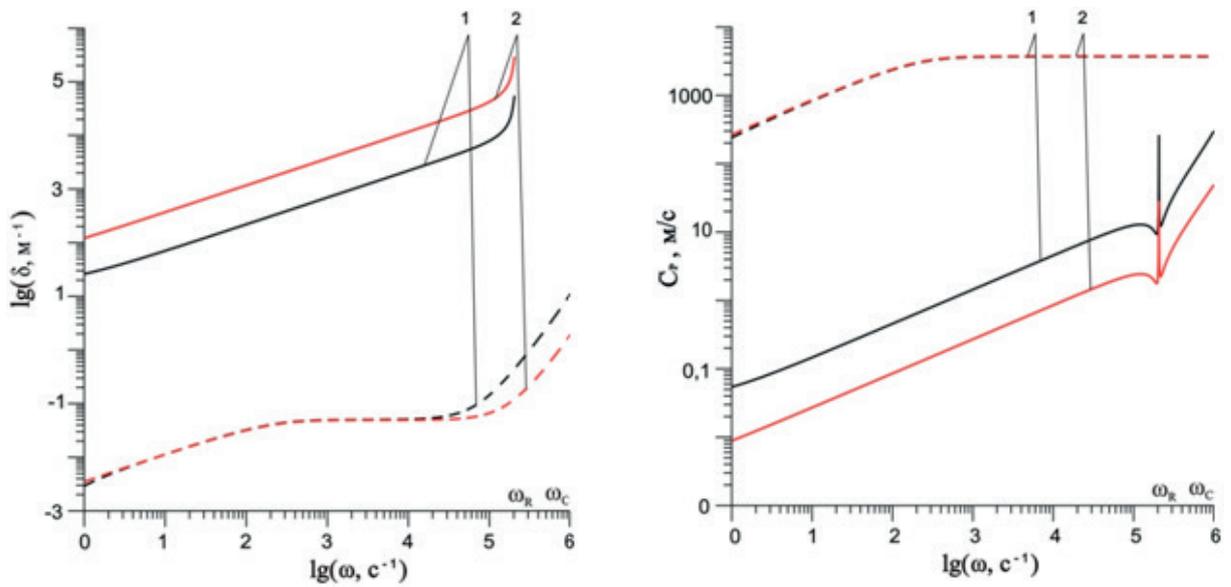
На рисунке 3 показаны зависимости коэффициента затухания  $\delta$  и фазовой скорости  $C_p$  «быстрой» (штриховые линии) и «медленной» (сплошные линии) волн от частоты  $\omega$ . Линия 1 построена для размеров  $a_0 = 10^{-3}$  м,  $b_0 = 10^{-4}$  м,  $\alpha_{s0} = 0,39$ ,  $\alpha_{l0} = 0,6$ ,  $\alpha_{g0} = 0,01$ , линия 2 —  $a_0 = 10^{-3}$  м,  $b_0 = 10^{-4}$  м,  $\alpha_{s0} = 0,35$ ,  $\alpha_{l0} = 0,6$ ,  $\alpha_{g0} = 0,05$ .

Из рисунка 3 видно, что характер зависимости кривых коэффициента затухания и фазовой скорости от частоты обеих волн такой же, как на рисунке 2. Отметим, что увеличение объемного содержания газа и уменьшение объемного содержания жидкости приводит к увеличению коэффициента затухания и уменьшению скорости «медленной» волны. Это связано с тем, что увеличивается количество самих газовых пузырьков, и тем самым они создают большее сопротивление при распространении волны. Резонансная же частота для «медленной» волны при этом не изменяется.

Стоит отметить, что увеличение объемного содержания газа и уменьшение объемного содержания жидкости приводит к уменьшению коэффициента затухания «быстрой» волны. Для частот  $2 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1} < \omega$  скорость «быстрой» волны также постоянна и стремится к скорости в песчанике.

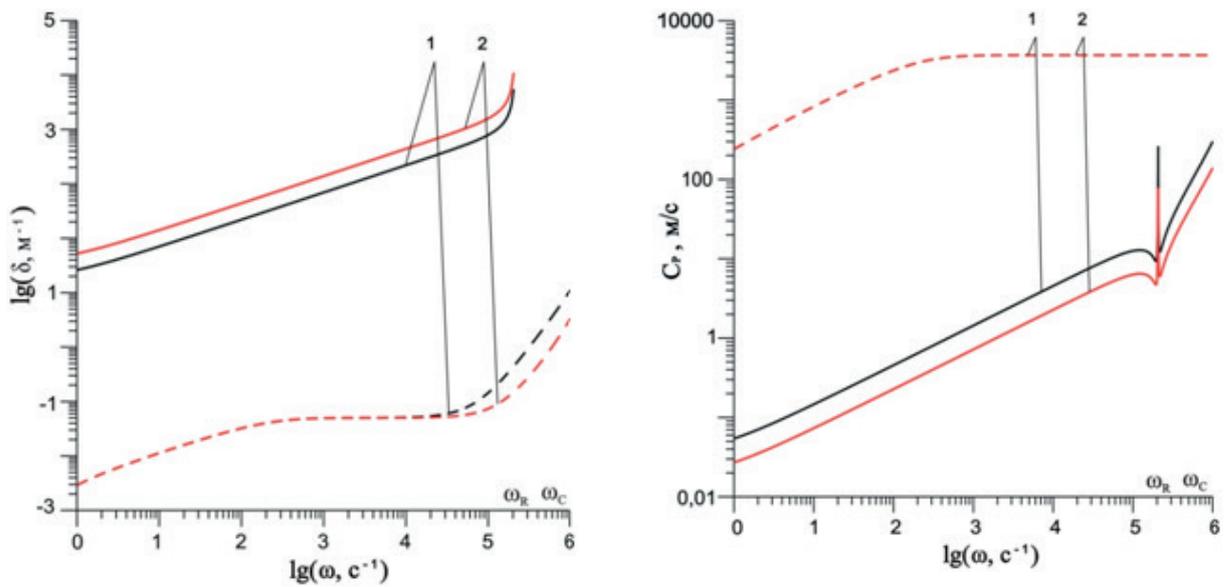
На рисунке 4 показаны зависимости коэффициента затухания  $\delta$  и фазовой скорости  $C_p$  «быстрой» (штриховые линии) и «медленной» (сплошные линии) волн от частоты  $\omega$  для различных размеров пор. Линия 1 построена для размеров  $a_0 = 10^{-3}$  м,  $b_0 = 10^{-4}$  м,  $\alpha_{s0} = 0,39$ ,  $\alpha_{l0} = 0,6$ ,  $\alpha_{g0} = 0,01$ , линия 2 —  $a_0 = 5 \cdot 10^{-4}$  м,  $b_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  м,  $\alpha_{s0} = 0,35$ ,  $\alpha_{l0} = 0,6$ ,  $\alpha_{g0} = 0,01$ .

Из рисунка 4 видно, что уменьшение размера пор приводит к увеличению коэффициента затухания и фазовой скорости «медленной» волны во всем диапазоне частот. Отметим, что резонансная частота  $\omega_R$  не меняется и с изменением размера пор. Из



линия 1 построена для  $a_0 = 10^{-3}$  м,  $b_0 = 10^{-4}$  м,  $\alpha_{s0} = 0,39$ ,  $\alpha_{l0} = 0,6$ ,  $\alpha_{g0} = 0,01$   
 линия 2 —  $a_0 = 10^{-3}$  м,  $b_0 = 10^{-4}$  м,  $\alpha_{s0} = 0,35$ ,  $\alpha_{l0} = 0,6$ ,  $\alpha_{g0} = 0,05$

**Рисунок 3.** Зависимости коэффициента затухания  $\delta$  и фазовой скорости  $C_p$  «быстрой» (пунктирные линии) и «медленной» (сплошные линии) волн от частоты  $\omega$  для системы «песчаник — пузырьковая жидкость»



линия 1 —  $a_0 = 10^{-3}$  м, линия 2 —  $a_0 = 5 \cdot 10^{-4}$  м

**Рисунок 4.** Зависимости коэффициента затухания  $\delta$  и фазовой скорости  $C_p$  «быстрой» (штриховые линии) и «медленной» (сплошные линии) волн от частоты  $\omega$  для системы «песчаник, насыщенный водой и пузырьками воздуха на стенках пор»

рисунка 4 также видно, что уменьшение размера пор приводит к уменьшению коэффициента затухания «быстрой» волны для частот  $\omega > 2 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ . При этом скорость «быстрой» волны не зависит от размера пор. И для частот  $\omega > 200 \text{ c}^{-1}$  она постоянна и равна 4360 м/с.

**Вывод**

Численно исследовано распространение акустических волн в двухскоростной пори-

стой среде, насыщенной водой и пузырьками газа на стенках пор, с учетом межфазных сил взаимодействия между скелетом пористой среды и жидкостью. Установлено, что существует характерная частота ( $\omega_R$  — частота собственных колебаний пузырьков) для «медленной» волны, которая зависит от размера газового пузырька. Получены три характерных диапазона частот для «медленной» волны, где

существенно различаются количественно и качественно коэффициенты затухания и фазовые скорости «медленной» волны.

Результаты расчетов позволяют оценить влияние пузырьков газа на распространение

звуковых волн в пористой среде, насыщенной водой с пузырьками газа на стенках пор.

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

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. 464с.
2. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Вахитов Н.К. Проявление сжимаемости несущей фазы при распространении волн в пузырьковой среде // Доклады академии наук СССР. 1989. Т. 304. № 5. С. 1077–1081.
3. Гималтдинов И.К., Ситдикова Л.Ф., Дмитриев В.Л., Левина Т.М., Хабеев Н.С., Wanqing S. Отражение звуковых волн от пористого материала в случае наклонного падения // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 5. С. 1098–1108.
4. Гималтдинов И.К., Дмитриев В.Л., Ситдикова Л.Ф. Динамика звуковых волн в насыщенных парогазовой смесью пористых средах // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 4. С. 572–580. DOI: 10.7868/S0040364414030132.
5. 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 // Fluid Machinery and Automation Systems: Proceedings of the 1st International Conference. Hanoi, Vietnam. 2018. P. 574–577.
6. Gubaidullin A.A., Boldyreva O. Yu., Dudko D.N. Waves in Porous Media Saturated with Bubbly Liquid // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 899. Issue 3. P. 032011. DOI: 10.1088/1742-6596/899/3/032011.
7. Кумар Р., Кумар С., Миглэни А. Исследование отражения и прохождения плоских волн между двумя различными жидкостями, насыщающими пористые полупространства // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 5 (309). С. 115–126.
8. vd Grinten J.G.M. An Experimental Study of Shock-Induced Wave Propagation in Dry, Water-Saturated, and Partially Saturated Porous Media. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1987. 111 p. DOI: 10.6100/IR274910.
9. Накоряков В.Е., Донцов В.Е. Волны давления конечной амплитуды в нелинейной упругой пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа // Докл. РАН. 1992. Т. 322. № 3. С. 481–483.
10. Biot M.A., Tolstoy I. Acoustics, Elasticity, and Thermodynamics of Porous Media: Twenty-One Papers. New-York: AIPPress, 1992. 272 p.
11. Дунин С.З., Михайлов Д.Н., Николаевский В.Н. Продольные волны в частично насыщенных пористых средах. Влияние газовых пузырьков // Прикладная математика и механика. 2006. Т. 70. № 2. С. 282–294. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2006.06.008.
12. Князьков Н.Н., Шарфарез Б.П. Акустика пористоупругих насыщенных жидкостью сред (обзор теории Био) // Научное приборостроение. 2016. Т. 26. № 1. С. 77–84.

#### REFERENCES

1. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of Multiphase Media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 464 p.[in Russian].
2. Nigmatulin R.I., Shagapov V.Sh., Vakhitov N.K. Proyavlenie szhimaemosti nesushchei fazy pri rasprostranении voln v puzyr'kovoi srede [Manifestation of the Compressibility of the Carrier Phase during Wave Propagation in a Bubble Medium]. *Doklady akademii nauk SSSR – Soviet Physics. Doklady*, 1989, Vol. 304, No. 5, pp. 1077–1081.[in Russian].
3. Gimaltdinov I.K., Sitdikova L.F., Dmitriev V.L., Levina T.M., Khabeev N.S., Wanqing S. Otrazhenie zvukovykh voln ot poristogo materiala v sluchae naklonnogo padeniya [Reflection of Acoustic Waves from a Porous Material at Oblique Incidence]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, Vol. 90, No. 5, pp. 1098–1108. [in Russian].
4. Gimaltdinov I.K., Dmitriev V.L., Sitdikova L.F. Dinamika zvukovykh voln v nasyschennykh parogazovoi smes'yu poristykh sredakh [Dynamics of Acoustic Waves in Porous Media Saturated with Gas-Vapor Mixture]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2014, Vol. 52, No. 4, pp. 572–580. DOI: 10.7868/S0040364414030132.[in Russian].
5. 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. *Proceedings of the 1st International Conference «Fluid Machinery and Automation Systems»*. Hanoi, Vietnam, 2018, pp. 574–577.
6. Gubaidullin A.A., Boldyreva O.Yu., Dudko D.N. Waves in Porous Media Saturated with Bubbly Liquid. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Vol. 899, Issue 3, pp. 032011. DOI: 10.1088/1742-6596/899/3/032011.
7. Kumar R., Kumar C., Migleni A. Issledovanie otrazheniya i prokhozheniya ploskikh voln mezhdvu dvumya razlichnymi zhidkostyami, nasyschayushchimi poristye poluprostranstva [Reflection and Transmission of Plane Waves between Two Different Fluid-Saturated Porous Half-Spaces]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011, Vol. 52, No. 5 (309), pp. 115–126.[in Russian].
8. vd Grinten J.G.M. *An Experimental Study of Shock-Induced Wave Propagation in Dry, Water-Saturated, and Partially Saturated Porous Media*. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 1987. 111 p. DOI: 10.6100/IR274910.
9. Nakoryakov V.E., Dontsov V.E. Volny davleniya konechnoi amplitudy v nelineinoi uprugoi poristoi srede, nasyschennoi zhidkost'yu s puzyr'kami gaza [Finite-

Amplitude Pressure Waves in a Nonlinear Elastic Porous Medium Saturated by a Liquid with Gas Bubbles]. *Dokl. RAN — Dokl. Akad. Nauk*, 1992, Vol. 322, No. 3, pp. 481–483.[in Russian].

10. Biot M.A., Tolstoy I. *Acoustics, Elasticity, and Thermodynamics of Porous Media: Twenty-One Papers*. New-York, AIP Press, 1992. 272 p.

11. Dunin S.Z., Mikhailov D.N., Nikolaevskii V.N. Prodol'nye volny v chastichno насыщенных пористых средах. Vliyanie gazovykh puzyr'kov [Longitudinal Waves in Partially Saturated Porous Media: the Effect of Gas

Bubbles]. *Prikladnaya matematika i mekhanika — Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2006, Vol. 70, No. 2, pp. 282-294. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2006.06.008. [in Russian].

12. Knyazkov N.N., Sharfarets B.P. Akustika poristo-uprugikh насыщенных жидкостью сред (obzor teorii Bio) [Acoustics of Porous-Elastic Fluid Saturated Medium (an Overview of the Biot Theory)]. *Nauchnoe priborostroenie — Nauchnoe Priborostroenie*, 2016, Vol. 26, No. 1, pp. 77–84.[in Russian].

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

#### ABOUT THE AUTHOR

**Ситдикова Лилия Фидарисовна**, научный сотрудник кафедры «Физика», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

**Liliya F.Sitdikova**, Researcher of Physics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: sitdikovalf@yandex.ru