

УДК 534-18

ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ ПУЗЫРЬКОВАЯ ЖИДКОСТЬ — ПОРИСТАЯ СРЕДА, НАСЫЩЕННАЯ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Л. Ф. Ситдикова, И. К. Гималтдинов

Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450064 Уфа, Россия

E-mails: sitdikovalf@yandex.ru, iljas_g@mail.ru

Теоретически исследовано отражение и прохождение гармонических волн на границе между пузырьковой жидкостью и пористой средой, насыщенной этой жидкостью. Изучено влияние параметров системы на коэффициенты отражения и прохождения через границы раздела двух сред. Установлено, что для границы пузырьковая жидкость — пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, существует диапазон частот, в котором отражение происходит так же, как от свободной поверхности, а обратное отражение — как от жесткой стенки.

Ключевые слова: звуковая волна, пористая среда, коэффициент отражения, коэффициент прохождения.

DOI: 10.15372/PMTF20220514

Введение. Акустические свойства пористых сред, насыщенных жидкостью, очень чувствительны к наличию даже небольшого объема газа в порах. В сейсмической инженерной практике это может влиять на характеристики волн, отраженных от подземных резервуаров углеводородов. В петрофизике акустические скважинные инструменты в основном используются для измерения коллекторских характеристик пласта. На результаты этих измерений также могут влиять пузырьки газа, находящиеся в жидкости, которая, в свою очередь, насыщает пористую среду.

Использование акустических методов позволяет дистанционно, на расстоянии нескольких сотен метров, с помощью штатных или специализированных судовых эхолотов и гидролокаторов обнаружить всплывающие пузырьки миллиметрового размера, уточнить их размеры и скорости всплытия. Это свидетельствует об актуальности изучения процессов отражения и прохождения акустических волн через границы между пузырьковой жидкостью и пористой средой, насыщенной также пузырьковой жидкостью.

Теоретическому и экспериментальному изучению акустических свойств пористых сред и процессов распространения волн в таких средах посвящены работы [1–16]. Численный анализ прохождения и рассеяния волн в пузырьковом слое представлен в работе [1], в которой показано, что нелинейные эффекты проявляются даже при незначительной амплитуде акустической волны. Отмечено существенное рассеяние на частотах, близких к собственным частотам пузырьков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-31-60015) и в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ в сфере научной деятельности № FEUR-2020-0004 “Решение актуальных задач и исследование процессов в нефтехимических производствах, сопровождающихся течениями многофазных сред”.

© Ситдикова Л. Ф., Гималтдинов И. К., 2022

В [2] рассмотрена трехслойная среда вода — вода с пузырьками воздуха — воздух и экспериментально определен коэффициент отражения в случае нормального падения акустической волны со стороны воды. Отражение и преломление гармонических волн на границе раздела “чистой” жидкости и жидкости с пузырьками парогазовой смеси при их падении по нормали изучено в [3]. Установлено, что при падении со стороны “чистой” жидкости на границу раздела волна проходит в пузырьковую жидкость. А при падении волны на границу со стороны пузырьковой жидкости может реализоваться условие полного внутреннего отражения.

В работе [4] проведено исследование взаимодействия импульсного возмущения давления малой амплитуды с многослойным образцом, содержащим слой полидисперсной пузырьковой жидкости. Установлено, что особые дисперсионные и диссипативные свойства слоя пузырьковой жидкости могут оказывать существенное влияние на динамику акустического сигнала в многослойной среде при некоторых значениях основной частоты сигнала.

Динамика акустических волн жидкости при наличии в ней пузырьковой зоны и отражение волн от твердой стенки, покрытой пузырьковой смесью, изучались в работах [5–7]. В частности, в [7] проанализированы коэффициенты отражения и прохождения на границах, разделяющих области воды и воздушно-водяной смеси, и установлено, что на них существенное влияние оказывают дисперсионные и диссипативные свойства слоя пузырьковой жидкости.

Теоретическому исследованию отражения и преломления акустических волн на границах пористой перегородки, расположенной в жидкости и насыщенной жидкостью, посвящены работы [8, 9].

В экспериментальной работе [10] исследуется прохождение волн через погруженную в воду пористую пластину при их падении по нормали. Проведено сравнение коэффициентов прохождения волны через пористый слой при падении по нормали, рассчитанных в рамках модели Био, и экспериментальных данных. Прохождение ступенчатой волны давления через пористое полупространство и отражение от него рассматривались в работе [11], в которой показано, что в случае отражения давление увеличивается в два раза с запозданием, величина которого зависит от пористости, проницаемости и вязкости флюида.

В [12] изучена эволюция волнового импульса при прохождении через пористую преграду, расположенную в газе и насыщенную тем же газом. В случае “закрытой” границы пористая перегородка практически полностью отражает падающий импульс давления. В случае “открытой” границы определяющее влияние на затухание импульса давления оказывает начальный радиус пор.

В работе [13] показано, что при учете полидисперсности (в пренебрежении вязкостью и другими диссипативными процессами) теоретические значения фазовой скорости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными работы [14].

В [15] получено уравнение, описывающее излучение звука кавитирующими потоками жидкости. Установлено, что интенсивность кавитационного шума пропорциональна четвертой степени скорости потока в случае, когда шум может рассматриваться как совокупность импульсов со случайными амплитудами и значениями времени прихода в точку наблюдения, а также в случае слабых пульсаций кавитирующих пузырьков.

В работе [16] приведены результаты численного моделирования движения ударной волны с тороидальным пузырьковым кластером в жидкости и возникновения направленного излучения в жидкость.

В настоящей работе с использованием полученного в [17] дисперсионного соотношения, описывающего комплексный волновой вектор, исследуются процессы отражения и прохождения акустических волн на границе пузырьковая жидкость — пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью.

Граница пузырьковая жидкость — пористая среда, насыщенная газированной водой. Пусть на плоскую границу между водой и пористой средой, насыщенной газированной водой, падает акустическая волна. Как и в случае обычных однофазных сред, будем полагать, что отраженная от границы и преломленная волны представляют собой плоские гармонические волны [18]. Допустим, что размеры пузырька значительно превышают размер пор. Кроме того, будем полагать, что газированная вода, содержащаяся в порах, расположенных непосредственно на границе, соприкасается со свободной жидкостью — водой, окружающей пористую среду, т. е. граница является “открытой”. Тогда в области, занятой водой, малые возмущения представляют собой сумму двух гармонических волн (падающей и отраженной), а в пористой среде распространяется прошедшая волна, которая разделяется на быструю и медленную волны.

Положим, что ось x декартовой системы координат расположена в направлении нормали к границе раздела. Тогда движение слева от границы ($x < 0$) является суперпозицией двух волн — падающей и отраженной, давление и скорость которых определяются по формулам

$$\begin{aligned} p_f^{(0)} &= A_{p,f}^{(0)} e^{i(K_f^{(0)} x - \omega t)}, & v_f^{(0)} &= A_{v,f}^{(0)} e^{i(K_f^{(0)} x - \omega t)}, \\ p_f^{(r)} &= A_{p,f}^{(r)} e^{i(K_f^{(r)} x - \omega t)}, & v_f^{(r)} &= A_{v,f}^{(r)} e^{i(K_f^{(r)} x - \omega t)}, \end{aligned}$$

где K_f — волновое число для пузырьковой жидкости; нижний индекс f соответствует жидкости, окружающей пористую среду, а верхние индексы “(0)” и “(r)” — падающей и отраженной волнам.

Амплитуды давления $A_{p,f}^{(m)}$ и скорости $A_{v,f}^{(m)}$ в однородной среде связаны соотношениями

$$A_{p,f}^{(0)} = \rho_{f0}^0 C_f A_{v,f}^{(0)}, \quad A_{p,f}^{(r)} = -\rho_{f0}^0 C_f A_{v,f}^{(r)},$$

где ρ_{f0}^0 — плотность окружающей пористую среду пузырьковой жидкости; C_f — скорость распространения волны в окружающей пузырьковой жидкости.

Для определения коэффициентов отражения и прохождения падающей волны запишем граничные условия. На границе $x = 0$ должны выполняться следующие условия [8, 18]:

1) непрерывности давления:

$$p_f^{(0)} + p_f^{(r)} = p_l^{(t)};$$

2) непрерывности нормальной компоненты осредненной по объему скорости:

$$v_f^{(0)} - v_f^{(r)} = \alpha_{s0} v_s^{(t)} + (1 - \alpha_{s0}) v_l^{(t)};$$

3) равенства сил, действующих на единицу площади поверхности (т. е. суммарных напряжений) по обе стороны от этой поверхности:

$$p_f^{(0)} + p_f^{(r)} = p_l^{(t)} - \sigma_s^{*(t)}$$

(σ_s^* — приведенное напряжение в скелете).

Результирующие возмущения эффективного напряжения в скелете и давления в газожидкостной фазе прошедшей волны определяются из выражений

$$\sigma_s^* = [A_{\sigma,a} e^{iK_a^{(0)} x} + A_{\sigma,b} e^{iK_b^{(0)} x}] e^{-it}, \quad p_l = [A_{p,a} e^{iK_a^{(0)} x} + A_{p,b} e^{iK_b^{(0)} x}] e^{-it}.$$

Здесь $A_{\sigma,a}$, $A_{p,a}$, $A_{\sigma,b}$, $A_{p,b}$ — амплитуды эффективного напряжения и давления быстрой и медленной волн, распространяющихся по скелету и пузырьковой жидкости; нижние индексы a , b соответствуют быстрой и медленной волнам.

Результирующие скорости движения скелета и жидкости в порах определяются из выражений

$$v_m = [A_{v_m,a} e^{iK_a^{(0)}x} + A_{v_m,b} e^{iK_b^{(0)}x}] e^{-it}, \quad m = l, s.$$

Найдем коэффициенты отражения N_1 и прохождения $M_{1,b}$, $M_{1,a}$ волн, определяемые соответственно как отношения амплитуды давлений отраженной и прошедшей волн к падающей волне. Учитывая граничные условия и проводя соответствующие преобразования, для первой границы получаем следующие коэффициенты отражения и прохождения:

$$N_1 = M_{1,b} + M_{1,a} - 1, \quad M_{1,b} = \frac{2}{1 + \rho_{f0}^0 C_f(z_b - z_a \zeta)}, \quad M_{1,a} = -\frac{2\zeta_1}{1 + \rho_{f0}^0 C_f(z_a - z_b \zeta)},$$

где

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{\alpha_{3b}\alpha_{1a}}{\alpha_{3a}\alpha_{1b}}, \quad z_\theta = (1 - \alpha_{s0})\alpha_{2\theta} + \alpha_{s0}\alpha_{3\theta}, \quad \theta = a, b, \\ \alpha_{1\theta} &= \frac{E_s - i\omega\mu_s}{iK_\theta\alpha_{s0}\mu_s E_s}, \quad \alpha_{2\theta} = \frac{K_\theta S_{10} - (S_{11} + S_{12}K_\theta^2)\alpha_{3\theta}}{S_4}, \quad \alpha_{3\theta} = \frac{S_7 + S_8 - S_{13}K_\theta^2}{S_9K_\theta - S_5K_\theta - S_6K_\theta^3}, \\ S_{13} &= (1 - \alpha_{s0})\rho_{s0}^0 S_4 S_3, \quad S_4 = N\gamma p_{g0}/\rho_{g0}^0, \quad S_3 = \omega(\alpha_{g0}\rho_{g0}^0 + \alpha_{l0}\rho_{l0}^0), \\ N &= 1 + \frac{b_0}{3\gamma p_{g0} S_2} - \chi T, \quad \chi T = \frac{(\gamma - 1)\lambda_g(1 - \gamma^{-1})(1 - \tilde{A})T_0\rho_{l0}^0 C_l \alpha_{g0}^{1/3}}{\gamma p_{g0}^2 (S_1 \rho_{l0}^0 C_l \alpha_{g0}^{1/3} + 1)}, \\ S_1 &= \frac{b_0}{4\mu_l + 4\mu_l\eta_\mu(b_0/a_0)^2 - i\omega\rho_{l0}^0 b_0^2}, \quad S_2 = \frac{i}{\omega} \left(S_1 + \frac{1}{\rho_{l0}^0 C_l \alpha_{g0}^{1/3}} \right), \\ S_5 &= \frac{(1 - \alpha_{s0})\alpha_{s0}(\rho_{s0}^0)^2 \omega}{S_3}, \quad S_6 = \frac{(1 - \alpha_{s0})\rho_{s0}^0}{S_3} S_{14}, \quad S_{14} = \frac{i\alpha_{s0}\mu_s E_s}{E_s - i\omega\mu_s}, \\ S_7 &= \omega\rho_{s0}^0 \left(\alpha_{s0}\beta_s S_{14} + \frac{\alpha_{g0}}{\rho_{g0}^0} \right), \quad S_8 = \frac{\omega\alpha_{l0}\rho_{s0}^0}{\rho_{l0}^0 S_4 C_l^{-2}}, \quad S_9 = \omega\rho_{s0}^0 \beta_s S_{14} + \alpha_{s0}\rho_{s0}^0, \\ S_{10} &= \frac{S_4}{\alpha_{g0}\rho_{g0}^0 + \alpha_{l0}\rho_{l0}^0}, \quad S_{11} = \frac{\omega\alpha_{s0}\rho_{s0}^0}{\alpha_{g0}\rho_{g0}^0 + \alpha_{l0}\rho_{l0}^0}, \end{aligned}$$

K_θ — комплексное волновое число, полученное в [17]; α_{s0} , α_{l0} , α_{g0} — объемные доли твердой, жидкой и газовой фаз соответственно; b_0 , a_0 — радиус пузырьков газа и характерный размер пор; μ_s , μ_l — вязкости твердой и жидкой фаз; β_s — сжимаемость твердой фазы; C_l — скорость звука в “чистой” жидкости; ρ_j^0 — средняя по фазе плотность; p_{g0} — давление; γ — показатель адиабаты; индексы g , l , s соответствуют газу (в данном случае воздух), воде и скелету пористой среды.

Приведем зависимость фазовой скорости от частоты для системы песчаник с пузырьковой жидкостью — вода с пузырьками газа. Как известно [18], фазовую скорость можно определить, зная комплексное волновое число

$$C_p = \frac{\omega}{\text{Re}(K_\Theta)}.$$

Расчеты проводились при следующих значениях параметров: температура среды 300 К, $p_{g0} = 10^5$ Па, $\gamma = 1,4$, $\rho_{g0}^0 = 1,17$ кг/м³, $c_g = 1006$ Дж/(кг·К), $\lambda_g = 0,027$ Дж/(м·с·К), $\mu_g = 1,86 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\rho_{s0}^0 = 2560$ кг/м³, $\mu_s = 10^8$ Па·с, $E_s = 3,7 \cdot 10^{10}$ Па·с, $\rho_{l0}^0 = 1000$ кг/м³, $\mu_l = 10^{-3}$ Па·с, $C_l = 1500$ м/с.

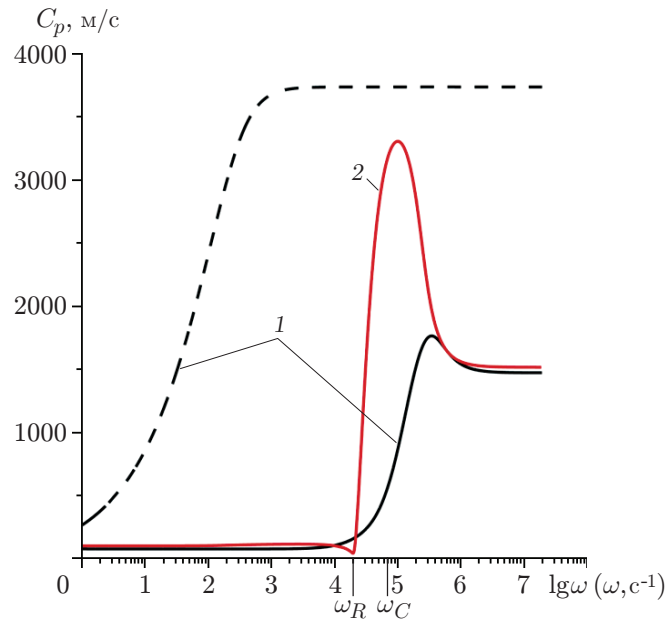


Рис. 1. Зависимость фазовой скорости C_p от частоты в системе песчаник — пузырьковая жидкость ($a_0 = 10^{-4}$ м, $b_0 = 10^{-3}$ м, $\alpha_{l0} = 0,6$, $\alpha_{s0} = 0,39$, $\alpha_{g0} = 0,01$) (1) и в воде с пузырьками воздуха ($b_0 = 10^{-3}$ м, $\alpha_{l0} = 0,99$) (2): сплошные линии — медленная волна, штриховая — быстрая волна

На рис. 1 представлена зависимость фазовой скорости C_p от частоты для случаев быстрой и медленной волн в системе песчаник — пузырьковая жидкость и в воде с пузырьками воздуха. Видно, что скорость быстрой волны в пористой среде, заполненной пузырьковой смесью, увеличивается в диапазоне частот $0 < \omega < 10^3 \text{ с}^{-1}$ до значения скорости звука в песчанике. Наблюдаются три характерных диапазона частот, в которых дисперсионные кривые различаются не только количественно, но и качественно. Из анализа дисперсионного уравнения, полученного в работе [19], следует, что дисперсия звука в области низких частот $\omega \leq \omega_R$ определяется межфазной температурной неравновесностью. В диапазоне частот $\omega_R < \omega < \omega_C$ ($\omega_C = \omega_R \sqrt{1 + \alpha_{g0} \rho_{l0}^0 C_l^2 / (\gamma p_0)}$; ω_R — частота Миннаэрта) фазовая скорость принимает аномально большие значения, поэтому эта зона частот соответствует полосе непропускания. Скорость медленной волны в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью, в диапазоне частот $0 < \omega < \omega_R$ не изменяется и приблизительно равна 60 м/с, что меньше скорости звука для “свободной” пузырьковой жидкости в этом диапазоне. Дополнительное уменьшение скорости звука происходит вследствие межфазного трения между жидкостью и скелетом пористой среды. Для диапазона частот $\omega_R < \omega < \omega_C$ (полоса непрозрачности) скорость медленной волны в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью, увеличивается до значения скорости в “чистой” жидкости ($C_l = 1500$ м/с). В случае “свободной” пузырьковой жидкости в том же диапазоне частот фазовая скорость увеличивается до значений, превышающих 3000 м/с, далее с увеличением частоты скорость стремится к скорости звука в “чистой” жидкости.

В случае пузырьковой жидкости ($\omega > \omega_C$) скорость звука стремится к определенному значению. Величина, обратная декременту затухания, соответствует расстоянию, на котором амплитуда волн уменьшается в e раз (e — основание натурального логарифма). На рис. 1 видно, что в полосе непропускания скорость в воде с пузырьками воздуха значительно превышает скорость медленной волны в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью.

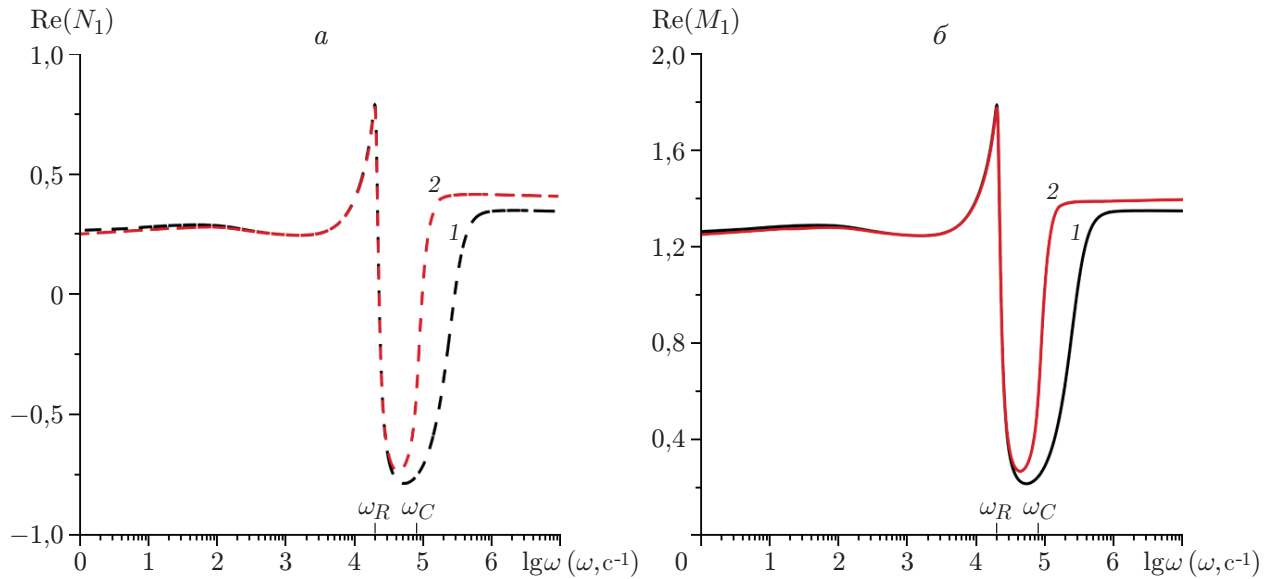


Рис. 2. Зависимости реальных частей коэффициентов отражения (а) и прохождения (б) от частоты для медленной волны в случае падения на границу пузырьковая жидкость — пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, при различных значениях параметров:

1 — $\alpha_{l0} = 0,39$, $\alpha_{g0} = 0,01$, 2 — $\alpha_{l0} = 0,3$, $\alpha_{g0} = 0,1$

На рис. 2 представлены зависимости реальных частей коэффициентов отражения и прохождения от частоты при прохождении через границу пузырьковая жидкость — пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, для медленной волны при $a_0 = 10^{-4}$ м, $b_0 = 10^{-3}$ м, $\alpha_{s0} = 0,6$. На оси абсцисс отмечена собственная частота колебаний $\omega_R = a_0^{-1} \sqrt{3\gamma p_0 / \rho_{l0}^0}$.

На рис. 2 видно, что в полосе непрозрачности наблюдается значительная дисперсия коэффициентов отражения и прохождения. Для частоты $\omega = \omega_R$ отражение на границе стремится к отражению, имеющему место в случае “жесткой” стенки, т. е. $|N_1| \rightarrow 1$, $|M_{1,a}| \rightarrow 2$. Следует отметить, что увеличение объемной доли газа приводит к увеличению реальной части коэффициента прохождения на высоких частотах.

На рис. 3 показано влияние размера газового пузырька на зависимости реальной части коэффициентов отражения и прохождения от частоты при прохождении медленной волны через границу пузырьковая жидкость — пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью. Видно, что зависимости реальных частей коэффициентов отражения и прохождения от частоты имеют такой же характер, как на рис. 2, но поскольку при изменении радиуса пузырьков изменяются характерные частоты ω_R и ω_C , это приводит к соответствующим изменениям вида зависимости коэффициентов от частоты.

Граница пористая среда, насыщенная газированной водой, — пузырьковая жидкость. На границе $x = l$ должны выполняться следующие условия [8, 18]:

1) неразрывности давления

$$p_b^{(0)} + p_{ba}^{(r)} + p_{bb}^{(r)} = p_f^{(t)} \quad (1)$$

($p_f^{(t)}$ — возмущение давления в области пузырьковой жидкости);

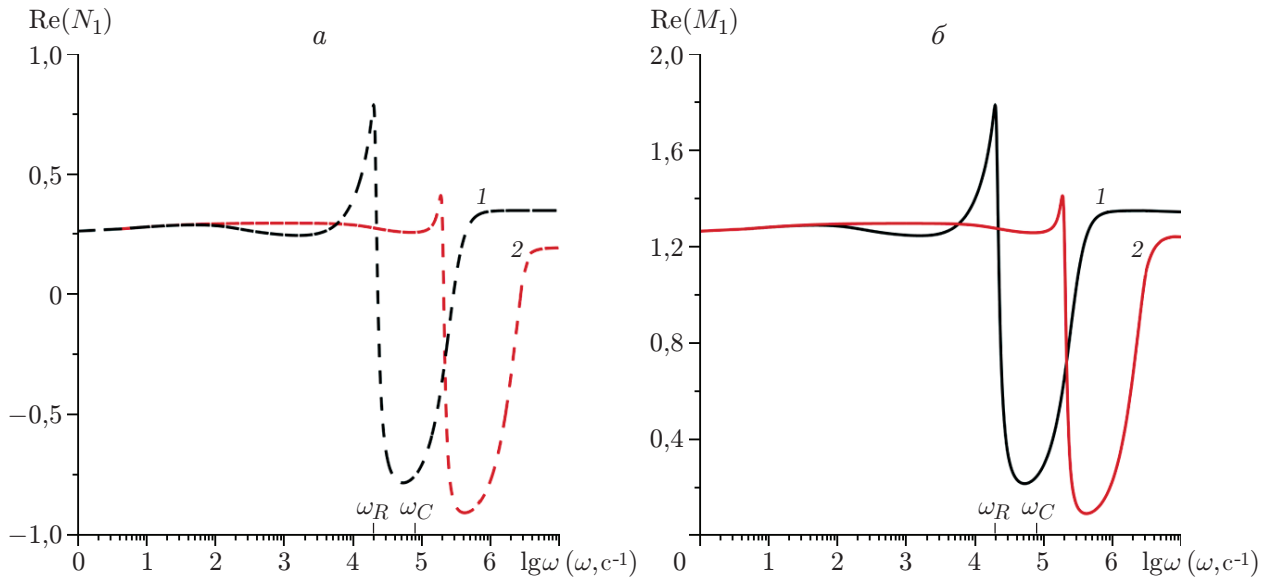


Рис. 3. Зависимости реальных частей коэффициентов отражения (а) и прохождения (б) от частоты для медленной волны в случае падения на границу вода — пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, при различных размерах пузырька газа:

1 — $b_0 = 10^{-3}$ м, 2 — $b_0 = 10^{-4}$ м

2) неразрывности нормальных составляющих скоростей:

— для медленной волны

$$(\alpha_{g0} + \alpha_{l0})v_b^{(0)} + \alpha_{s0}u_b^{(0)} - (\alpha_{g0} + \alpha_{l0})(v_{bb}^{(r)} + v_{ba}^{(r)}) - \alpha_{s0}(u_{bb}^{(r)} + u_{ba}^{(r)}) = v_{fb}^{(t)}, \quad (2)$$

— для быстрой волны

$$(\alpha_{g0} + \alpha_{l0})v_a^{(0)} + \alpha_{s0}u_a^{(0)} - (\alpha_{g0} + \alpha_{l0})(v_{ab}^{(r)} + v_{aa}^{(r)}) - \alpha_{s0}(u_{ab}^{(r)} + u_{aa}^{(r)}) = v_{fa}^{(t)}; \quad (3)$$

3) равенства сил, действующих на единицу площади поверхности:

$$\sigma_{sa}^{*(0)} + \sigma_{saa}^{*(r)} + \sigma_{sab}^{*(r)} = 0. \quad (4)$$

Используя условия (1)–(4), для коэффициентов отражения и прохождения получаем

$$1 + N_{2s,a} + N_{2s,b} = M_a, \quad N_{2s,b} = \frac{2z_{2a}}{(\rho_{f0}^0 C_f)^{-1} + z_{2b} - \xi((\rho_{f0}^0 C_f)^{-1} + z_{2a})},$$

$$N_{2s,a} = -1 - \xi \frac{2z_{2a}}{(\rho_{f0}^0 C_f)^{-1} + z_{2b} - \xi((\rho_{f0}^0 C_f)^{-1} + z_{2a})},$$

$$1 + N_{2l,a} + N_{2l,b} = M_b, \quad N_{2l,a} = \frac{2z_{2b}}{(\rho_{f0}^0 C_f)^{-1} + z_{2a} - \xi((\rho_{f0}^0 C_f)^{-1} + z_{2b})},$$

$$N_{2l,b} = -1 - \frac{2z_{2b}}{\xi((\rho_{f0}^0 C_f)^{-1} + z_{2b} - \xi((\rho_{f0}^0 C_f)^{-1} + z_{2b}))},$$

где

$$z_{2\theta} = \alpha_{2\theta}(\alpha_{g0} + \alpha_{l0}) + \alpha_{s0}\alpha_{3\theta}, \quad \theta = a, b, \quad \xi = \alpha_{3b}\alpha_{1a}/(\alpha_{1b}\alpha_{3a}),$$

$$\alpha_{2\theta} = (K_{\theta}S_4 - \alpha_{3\theta}(S_{11} - S_{14}K_{\theta}^2))/S_3, \quad S_{11} = \omega\alpha_{s0}\rho_{s0}^0.$$

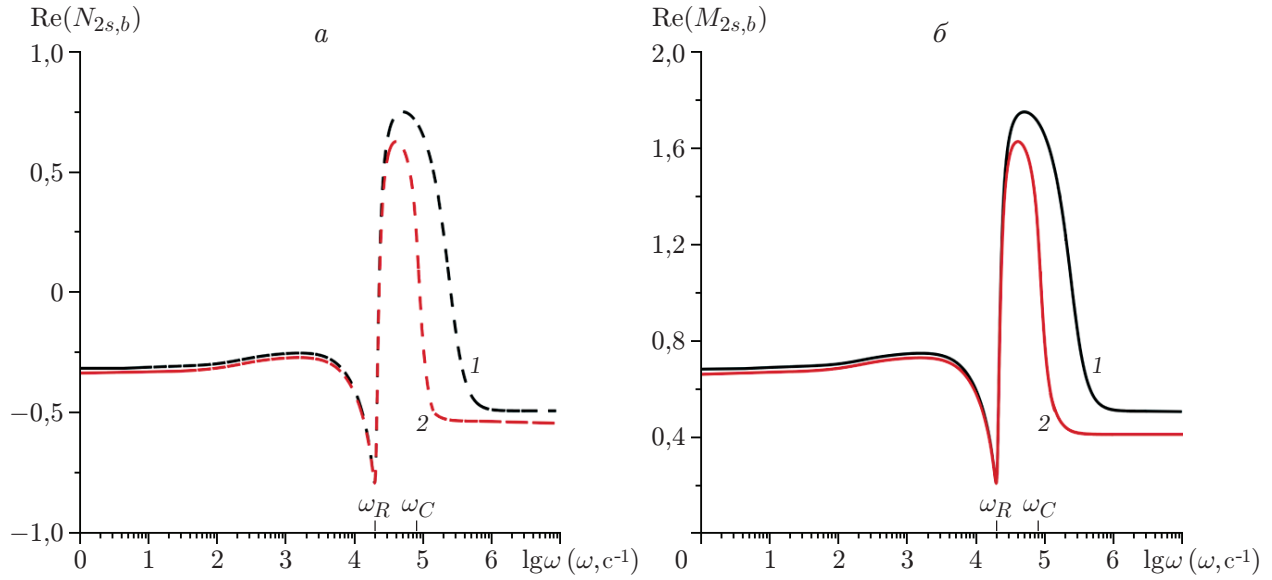


Рис. 4. Зависимости реальных частей коэффициентов отражения (а) и прохождения (б) от частоты для быстрой волны при $a_0 = 10^{-4}$ м, $b_0 = 10^{-3}$ м, $\alpha_{l0} = 0,6$ и различных значениях объемной доли газа на границе пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, — пузырьковая жидкость:

1 — $\alpha_{l0} = 0,39$, $\alpha_{g0} = 0,01$, 2 — $\alpha_{l0} = 0,3$, $\alpha_{g0} = 0,1$

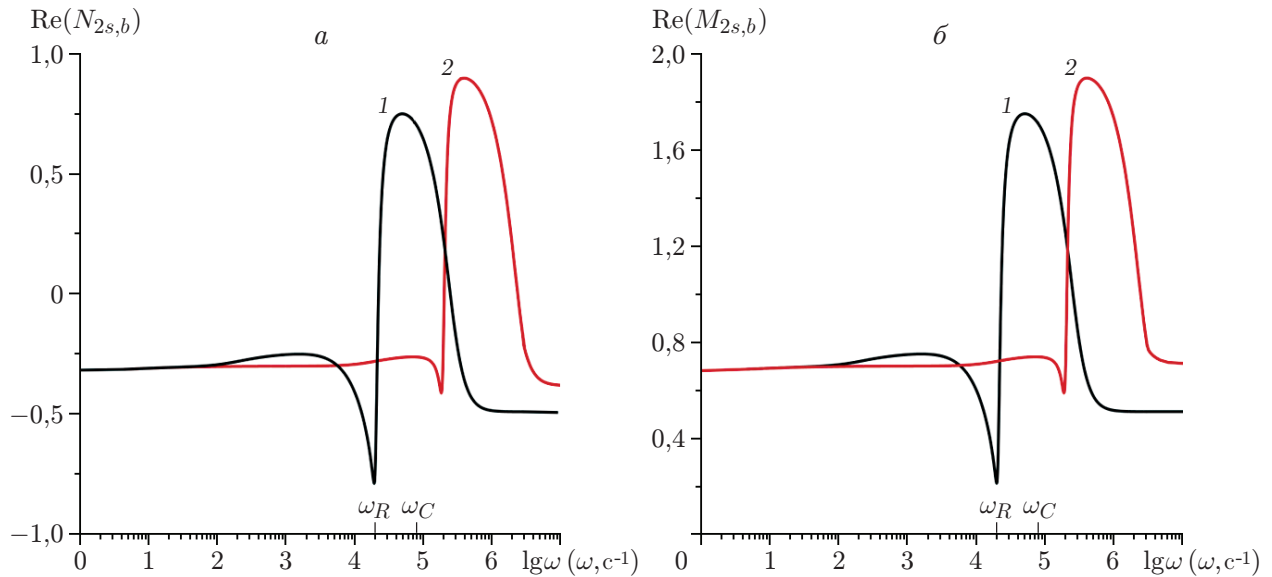


Рис. 5. Зависимости реальных частей коэффициентов отражения (а) и прохождения (б) от частоты для медленной волны при различных значениях радиуса пузырьков газа на границе пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, — пузырьковая жидкость:

1 — $b_0 = 10^{-3}$ м, 2 — $b_0 = 10^{-4}$ м

Результаты анализа поведения волны на границе пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, — пузырьковая жидкость показывают, что медленная волна отражается так же, как от свободной границы ($|N_{2l,a}| \rightarrow 0$, $|M_a^l| \rightarrow 1$). Следовательно, медленная волна проходит через границу пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, — пузырьковая жидкость.

На рис. 4 показаны зависимости реальных частей коэффициентов отражения и прохождения от частоты при прохождении быстрой волны через границу пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, — пузырьковая жидкость. Видно, что для границы пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, — пузырьковая жидкость в случае быстрой волны в диапазоне частот $0 < \omega < \omega_R$ реальная часть коэффициента прохождения $\text{Re}(M_{2s,b}) < 1$, а в диапазоне частот $\omega > \omega_R$ увеличивается реальная часть коэффициентов отражения и прохождения. Заметим, что увеличение объемной доли газа приводит к уменьшению реальной части коэффициентов отражения и прохождения во всем диапазоне частот.

На рис. 5 показано влияние размера газового пузырька на зависимости реальной части коэффициентов отражения и прохождения от частоты при прохождении медленной волны через границу пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, — пузырьковая жидкость. Видно, что при уменьшении радиуса газового пузырька происходит уменьшение полосы непрозрачности и наблюдается большая дисперсность модулей коэффициентов отражения и прохождения. Также видно, что на коэффициенты преломления и прохождения изменение размера газового пузырька не оказывает влияния в диапазоне частот $\omega < 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Заключение. В работе показано, что на границе раздела пузырьковая жидкость — пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, для значений частоты, меньших частоты собственных колебаний пузырьков, отражение аналогично отражению от свободной поверхности. Однако при значении частоты $\omega = \omega_R$ отражение на границе стремится к отражению, имеющему место в случае “жесткой” стенки.

Отражение от границы пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, — пузырьковая жидкость для быстрой волны аналогично отражению от твердой стенки для значений частоты, меньших частоты собственных колебаний пузырьков. При значениях частоты, больших частоты собственных колебаний, происходит уменьшение модулей коэффициентов отражения и прохождения. Через границу раздела пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью, — пузырьковая жидкость медленная волна проходит практически полностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Miksi M. J., Ting L. Effects of bubbly layers on wave propagation // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V. 86, N 6. P. 2349–2385.
2. Lee K., Choi B. K., Yoon S. W. Acoustic pressure reflection coefficients of a subsurface bubble layer in water // J. Korean Phys. Soc. 2002. V. 40, N 2. P. 256–263.
3. Шагапов В. Ш., Галимзянов М. Н., Вдовенко И. И. Особенности отражения и прохождения акустических волн на границе “чистой” и пузырьковой жидкости при прямом их падении // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 1. С. 1–8. DOI: 10.1134/S0040364419010228.
4. Губайдуллин Д. А., Никифоров А. А. Взаимодействие акустического сигнала с неподвижной дискретно-слоистой средой, содержащей слой пузырьковой жидкости // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55, № 1. С. 102–107.

5. Шагапов В. Ш., Гималтдинов И. К., Галимзянов М. Н. Двумерные волны давления в жидкости, содержащей пузырьки // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2002. № 2. С. 139–147.
6. Shagapov V. Sh., Gimaltdinov I. K., Khabeev N. S., Bailey S. S. Acoustic waves in a liquid with a bubble screen // Shock Waves. 2003. V. 13, N 1. P. 49–56. DOI: 10.1007/s00193-003-0194-1.
7. Губайдуллин Д. А., Гафиятов Р. Н. Отражение и прохождение акустической волны через многофракционный пузырьковый слой // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 1. С. 97–100.
8. Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю., Дудко Д. Н. Взаимодействие акустических волн с пористым слоем // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 3. С. 455–470.
9. Кумар Р., Кумар С., Миглэни А. Исследование отражения и прохождения плоских волн между двумя различными жидкостями, насыщающими пористые полупространства // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 5. С. 115–126.
10. Derible S. Debye-series analysis of the transmission coefficient of a water-saturated porous plate obeying Biot's theory // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 118, N 6. P. 3430–3435.
11. Шагапов В. Ш., Султанов А. Ш., Урманчиев С. Ф. К решению задачи об отражении линейных волн во флюиде от насыщенного этим флюидом пористого полупространства // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 5. С. 16–26.
12. Хусаинов И. Г., Дмитриев В. Л. Исследование эволюции волнового импульса при прохождении через пористую преграду // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 5. С. 136–145.
13. Кедринский В. К. Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // ПМТФ. 1968. № 4. С. 29–34.
14. Фокс Ф., Керли С., Ларсен Г. Измерения фазовой скорости и поглощения звука в воде, содержащей воздушные пузырьки // Пробл. соврем. физики. 1956. № 8. С. 22–30.
15. Богуславский Ю. Я., Иоффе А. И., Наугольных К. А. Излучение звука кавитирующей областью // Акуст. журн. 1970. Т. 16, вып. 1. С. 20–24.
16. Кедринский В. К., Шокин Ю. И., Вшивков В. А. и др. Генерация ударных волн в жидкости сферическими пузырьковыми кластерами // Докл. АН. 2001. Т. 381, № 6. С. 773–776.
17. Ситдикова Л. Ф., Гималтдинов И. К. Задача о распространении акустических волн в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. Математика. Механика. Физика. 2021. Т. 13, № 1. С. 59–66.
18. Лепендин Л. Ф. Акустика. М.: Высш. шк., 1978.
19. Нигматулин Р. И., Шагапов В. Ш., Вахитов Н. К. Проявление сжимаемости несущей фазы при распространении волн в пузырьковой среде // Докл. АН СССР. 1989. Т. 304, № 35. С. 1077–1081.

*Поступила в редакцию 31/VIII 2021 г.,
после доработки — 17/I 2022 г.
Принята к публикации 31/I 2022 г.*