АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 6, с. 783–788

УДК 532.546.532.529.5

ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ ЖИДКОСТЬ–ТРЕХФАЗНАЯ СРЕДА

© 1996 г. В. Е. Донцов, В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев

Институт теплофизики СО РАН
630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Поступила в редакцию 09.08.95 г.

Экспериментально исследуется отражение волн давления малой амплитуды на границе раздела жидкость–трехфазная среда (жидкость, твердые частицы, газовые пузырьки). В акустическом приближении получены расчетные зависимости для коэффициента отражения и проведено сравнение с опытными данными.

Существует достаточно большое количество работ по исследованию отражения волн давления на границе раздела жидкость–двухфазная газожидкостная смесь. Изучено влияние нелинейного сжатия газовых пузырьков в волнах давления умеренной интенсивности на границе раздела сред на отражение волн [1–3]. Прохождение импульса давления из жидкости в насыщенную жидкостью пористую среду методом численного расчета исследовано в [4]. В работах [5–7] проведено теоретическое и экспериментальное исследование эволюции и структуры слабонелинейных возмущений давления в суспензии жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками, в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа.

Целью данной работы является экспериментальное изучение отражения волн давления малой амплитуды на границах раздела жидкость–суспензия жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками, жидкость–пористая среда, насыщенная жидкостью с пузырьками газа; сравнение опытных данных с полученными расчетными зависимостями.

Рассмотрим отражение одномерных акустических волн давления на границе раздела жидкость–суспензия жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками, предполагая, что длина волны возмущения значительно превосходит размеры частиц, пузырьков и расстояния между ними. Жидкость с пузырьками газа представим как гомогенную смесь, имеющую среднюю плотность ρ_c, давление p и скорость V_c. Используя непрерывность давления нормальных скоростей на границе раздела жидкость–трехфазная среда, граничные условия для амплитуд гармонических волн можно записать в виде [8]:

$$p_{\text{пад}} + p_{\text{отр}} = p, \tag{1}$$

$$(1-m)V_1 + mV_c = V_{\text{пад}} - V_{\text{отр}} = \frac{p_{\text{пад}} - p_{\text{отр}}}{\rho_2 c_2}, \tag{2}$$

где $p_{\text{пад}}$, $p_{\text{отр}}$ – амплитуды давления, а $V_{\text{пад}}$, $V_{\text{отр}}$ – скорости в падающей и отраженной волне в жидкости, ρ_2, c_2 – плотность и скорость звука в жидкости, V_1 – скорость твердой фазы, m – пористость.

Из (1, 2) следует выражение для коэффициента отражения:

$$\beta^* = \frac{p_{\text{отр}}}{p_{\text{пад}}} = \frac{R - \rho_2 c_2}{R + \rho_2 c_2}, \tag{3}$$

где $R = p/((1-m)V_1 + mV_2)$ – акустическое сопротивление трехфазной среды.

Для нахождения акустического сопротивления трехфазной среды воспользуемся системой уравнений Нигматулина, описывающей распространение одномерных возмущений давления в системе твердые частицы–гомогенная газожидкостная смесь [9]:

$$\frac{\partial m\rho_c}{\partial t} + \frac{\partial m\rho_c V_c}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial (1-m)\rho_1}{\partial t} + \frac{\partial (1-m)\rho_1 V_1}{\partial x} = 0,$$

$$\alpha m\rho_c \frac{dV_c}{dt} - (\alpha-1)m\rho_c \frac{\partial V_1}{\partial t} = -m\frac{\partial p}{\partial x} - F_v, \tag{4}$$

$$-(\alpha-1)m\rho_c \frac{dV_c}{dt} +$$

$$+((1-m)\rho_1 + (\alpha-1)m\rho_c)\frac{\partial V_1}{\partial t} =$$

$$= -(1-m)\frac{\partial p}{\partial x} + F_v,$$

$$\rho_1 = \text{const},$$

где $\rho_c = \rho_2(1-\varphi) + \rho_3\varphi$, φ – объемное газосодержание в жидкости, α-коэффициент присоединенной

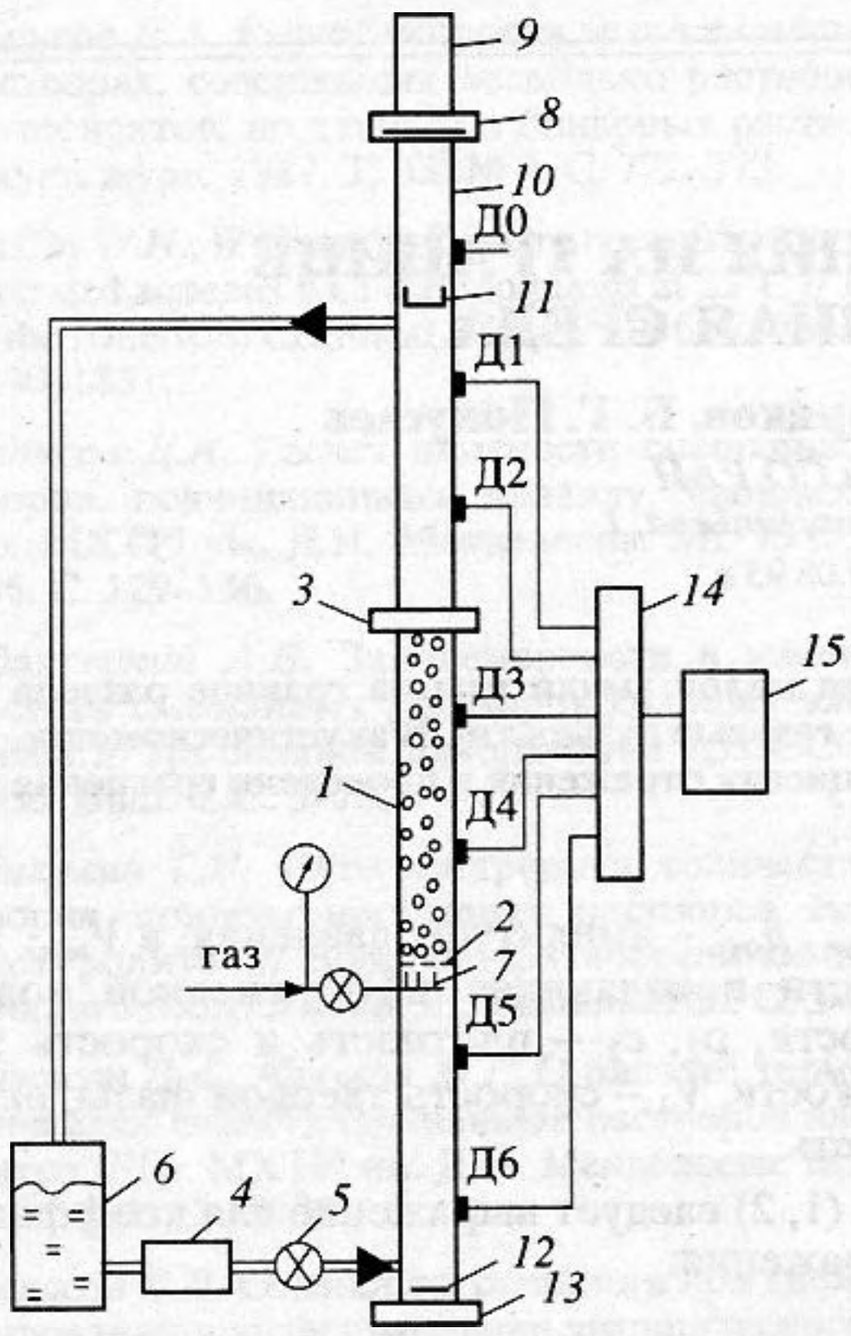

Рис. 1. Схема установки.

массы жидкости, ρ_1, ρ_3 – плотности твердой и газовой фазы соответственно, F_ν – межфазная сила трения. При малой относительной скорости жидкости межфазную силу трения можно представить в виде: $F_\nu = m^2\nu\rho_c(V_c - V_1)/K_0$, K_0 – коэффициент проницаемости, который обычно вводится для пористых сред, ν – кинематическая вязкость жидкости.

Из уравнений неразрывности системы (4) для газожидкостной смеси и твердой фазы в линейном приближении получим

$$mV_c + (1-m)V_1 = -\int \frac{m}{\rho_c}\frac{\partial \rho_c}{\partial t}dx. \qquad (5)$$

В предельном случае, когда плотности жидкости и твердых частиц достаточно сильно отличаются друг от друга, а частота колебаний пузырьков в среде ω_p достаточно высока ($\omega \approx \omega_p \gg \omega_c = m\nu/20K_0$ [7]), в работе [5] было получено уравнение для колебаний пузырька в трехфазной среде и эволюционное уравнение, описывающее распространение слабонелинейных возмущений давления в суспензии жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками. При пренебрежении нелинейными, дисперсионными и диссипативными членами в полученных уравнениях мы имеем простейшие зависимости:

$$\delta\rho_c = \delta p/c_0^2, \qquad (6)$$

$$\partial^2 p/\partial t^2 = c^2\partial^2 p/\partial x^2, \qquad (7)$$

где $c_0 = \left(\frac{(1-\varphi)^2}{c_2^2} + \frac{\rho_c\varphi}{\gamma p_0}\right)^{-0.5}$ – скорость звука в газожидкостной смеси, c – высокочастотная скорость звука в трехфазной среде, γ – показатель адиабаты, p_0 – статическое давление в жидкости.

$$c = c_0\left(\frac{(\alpha - 2m + m^2)\rho_c + m(1-m)\rho_1}{\alpha m(1-m)\rho_1 + (\alpha-1)m^2\rho_c}\right)^{0.5}. \qquad (8)$$

Используя (5)–(8), получим выражение для акустического сопротивления трехфазной среды в высокочастотном приближении ($\omega \gg \omega_c$):

$$R = R_\infty = \rho_{эф}c, \qquad (9)$$

где $\rho_{эф} = \rho_c\frac{\alpha(1-m)\rho_1 + (\alpha-1)m\rho_c}{(\alpha - 2m + m^2)\rho_c + m(1-m)\rho_1}$.

Если не учитывать присоединенную массу жидкости, то выражение для эффективной плотности имеет вид:

$$\rho_{эф}|_{\alpha=1} = ((1-m)/\rho_1 + m/\rho_c)^{-1}.$$

Отметим, что при $\varphi = 0$ выражения (8) и (9) описывают скорость звука и акустическое сопротивление суспензии жидкости с твердыми частицами соответственно.

В другом предельном случае, когда можно не учитывать относительное движение между жидкостью и твердыми частицами ($\omega \ll \omega_c$), имеем гомогенную смесь с плотностью $\rho = ((1-m)\rho_1 + m\rho_2)(1 - m\varphi) + \rho_3 m\varphi$ и низкочастотной скоростью звука в трехфазной среде $c_н$ [5]:

$$c_н = \left(\frac{(1-m\varphi)^2}{c_2^2} + \frac{\rho\varphi m}{\gamma p_0}\right)^{-0.5}. \qquad (10)$$

Следовательно, акустическое сопротивление в низкочастотном приближении будет иметь вид:

$$R = R_0 = \rho c_н. \qquad (11)$$

Так как при получении коэффициента отражения мы пренебрегали нелинейностью, дисперсией и диссипацией в трехфазной среде, то полученные выражения (3), (9) и (11) будут справедливы не только для гармонических волн, но и для линейных волн произвольной формы.

Опыты были проведены на установке, схема которой показана на рис. 1. Рабочий участок *1*,

представляющий собой вертикальную стальную трубу с внутренним диаметром 0.053 м и длиной 1.5 м, состоял из трех секций. Средняя секция рабочего участка частично заполнялась твердыми шариками диаметром 3×10^{-3} м и ограничивалась снизу сеткой *2* с ячейкой 2.5×10^{-3} м. В верхней части секции располагалось прозрачное окно *3*, необходимое для регулирования верхнего уровня трехфазной среды. Пористость среды определялась по объему средней секции и объему засыпанной в нее твердой фазы. В качестве твердой фазы использовались стеклянные и свинцовые шарики. Для взвешивания твердых частиц через весь рабочий участок с постоянной скоростью прокачивалась жидкость. Для этого была использована система постоянного расхода, состоящая из насоса *4*, регулировочного крана *5* и сливного бака *6*. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. В нижней части средней секции рабочего участка, непосредственно под сеткой *2*, через игольчатый генератор пузырьков *7* в жидкость вводились пузырьки воздуха.

Пористая среда, насыщенная жидкостью с пузырьками газа, получалась следующим образом [7]. Вначале хаотическая упаковка из твердых шариков насыщалась жидкостью без пузырьков. Далее жидкость, насыщающая пористую среду, была вытеснена газом до остаточной насыщенности жидкости, равномерно распределенной по объему пористой среды. Повторное заполнение рабочего участка жидкостью проводилось при постоянном расходе, величина которого определяла объемное газосодержание в диапазоне 1–10%. Для получения меньших газосодержаний статическое давление в рабочем участке увеличивалось. Величина среднего по длине газосодержания в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа, определялась по увеличению объема трехфазной среды при уменьшении начального давления в среде [7]. Модуль объемной упругости твердого скелета $K_в$ вычислялся по измеренной скорости продольной волны в сухой засыпке. Модуль сдвига для насыпных пористых сред $\mu = 1.1K_в$ [10].

Волны давления ступенчатой формы создавались разрывом диафрагмы *8*, разделяющей камеру высокого *9* и низкого давлений *10*, и далее через легкий подвижный поршень *11* распространялись в рабочий участок. Волны давления колоколообразной формы создавались электромагнитным излучателем путем отталкивания тонкой медной пластинки *12* от электромагнитной катушки *13* во время прохождения через нее импульса тока. Электромагнитный излучатель мог располагаться как в нижней, так и в верхней части рабочего участка.

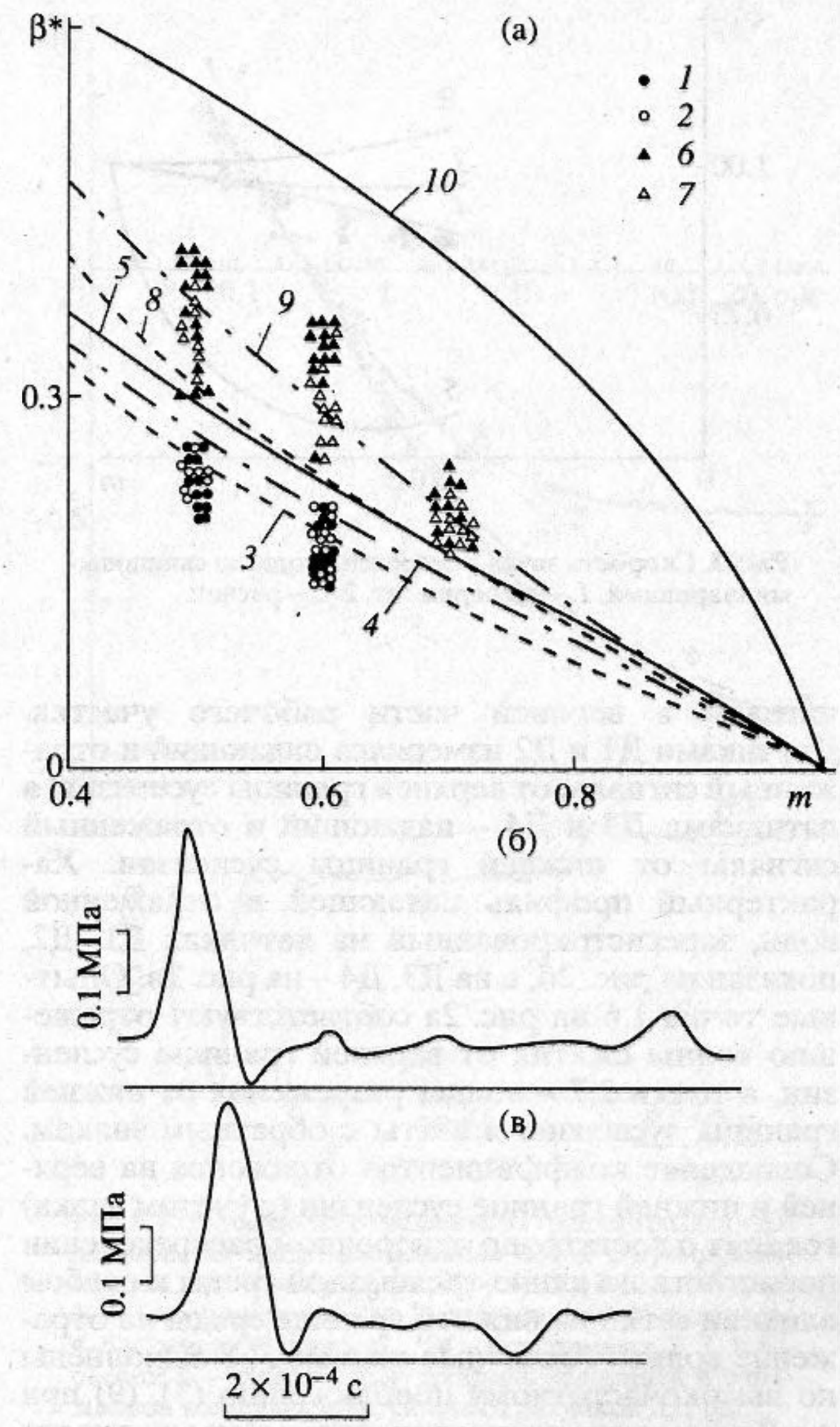

Рис. 2. а – коэффициент отражения на границе раздела вода–суспензия воды со стеклянными (*1–5*) и со свинцовыми шариками (*6–10*); *1, 2, 6, 7* – эксперимент, *3–5, 8–10* – расчет; б и в – характерный профиль падающей и отраженной волн, зарегистрированный на датчиках Д1, Д2 и Д3, Д4, соответственно.

Для измерения профилей волн давления использовались пьезоэлектрические датчики давления Д1–Д6, расположенные по длине рабочего участка и заделанные заподлицо с его внутренней стенкой. Сигналы с датчиков подавались через высокоомные усилители на АЦП 14 и далее обрабатывались на ЭВМ 15.

На рис. 2а показана зависимость от пористости коэффициента отражения волны давления на границе жидкость–суспензия жидкости с твердыми частицами. Для всех экспериментальных данных, представленных на этом графике, волна давления формировалась электромагнитным излу-

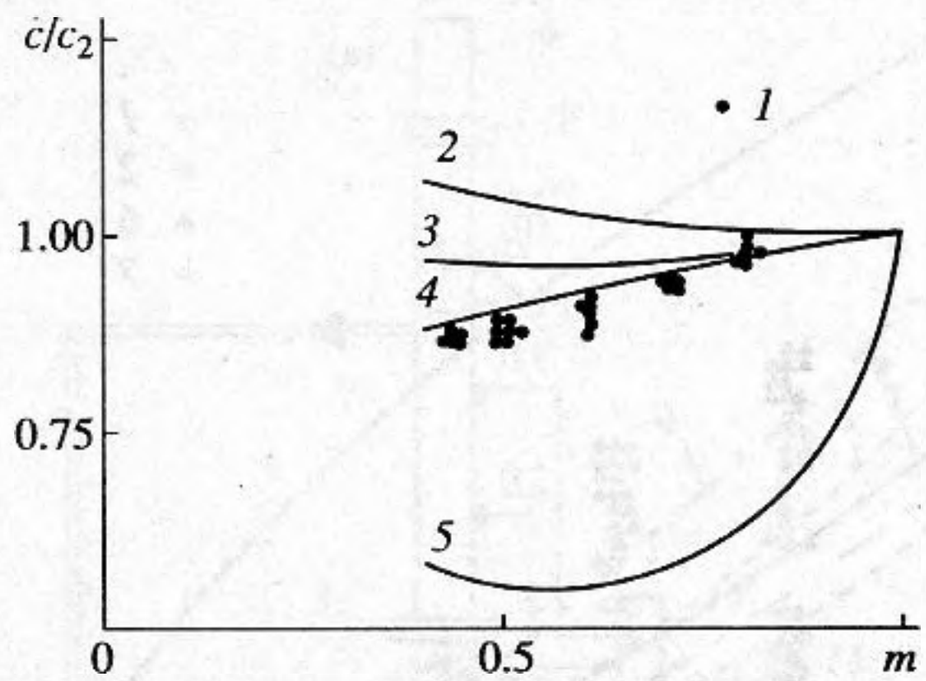

Рис. 3. Скорость звука в суспензии воды со свинцовыми шариками. *1* – эксперимент, *2–5* – расчет.

чателем в верхней части рабочего участка. Датчиками Д1 и Д2 измерялся падающий и отраженный сигналы от верхней границы суспензии, а датчиками Д3 и Д4 – падающий и отраженный сигналы от нижней границы суспензии. Характерный профиль падающей и отраженной волн, зарегистрированный на датчиках Д1, Д2, показан на рис. 2б, а на Д3, Д4 – на рис. 2в. Опытные точки 1.6 на рис. 2а соответствуют отражению волны сжатия от верхней границы суспензии, а точки 2.7 – волны разрежения от нижней границы суспензии и взяты с обратным знаком. Совпадение коэффициентов отражения на верхней и нижней границе суспензии (с учетом знака) говорит о достаточно однородном распределении пористости по длине трехфазной среды и слабом влиянии сетки на нижней границе среды на отражение волны. Расчетные кривые *3*, *8* выполнены по высокочастотному приближению (3), (9) при $\varphi = 0$ и без учета присоединенной массы жидкости $\alpha = 1$, кривые *4*, *9* – по высокочастотному приближению (3), (9) при $\varphi = 0$ и $\alpha = 1 - 0.5(1 - 1/m)$ [11], кривые *5*, *10* – по низкочастотному приближению (3), (11) при $\varphi = 0$. Видно, что опытные точки удовлетворительно описываются высокочастотным приближением. Большой разброс экспериментальных данных, обусловленный наложением отраженной волны на осцилляции давления за фронтом падающей волны, не позволяет определить влияние присоединенной массы жидкости на отражение волн.

Более точные измерения скорости волн давления позволили выделить влияние присоединенной массы жидкости на скорость звука в суспензиях. На рис. 3 показана зависимость скорости слабых возмущений давления в суспензии жидкости с твердыми частицами от пористости. Скорость возмущений давления в суспензии и в чистой жидкости измерялась по вершине профиля волны давления. Кривыми *2–4* показаны расчетные зависимости, выполненные по формуле (8) для высокочастотной скорости звука при $\varphi = 0$ и следующих значениях коэффициента присоединенной массы жидкости: $\alpha = 1$ – кривая *2*, $\alpha = 1 + 0.5(1 - m)$ [9] – кривая *3*, $\alpha = 1 - 0.5(1 - 1/m)$ – кривая *4*, а кривая *5* соответствует низкочастотной скорости звука (10) при $\varphi = 0$. Видно, что расчетная кривая *4* дает наиболее правильный учет влияния присоединенной массы жидкости на скорость звука в суспензии.

На рис. 4а представлена зависимость коэффициента отражения слабых возмущений давления на границе жидкость–суспензия жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками от скорости звука на границе в суспензии в широком диапазоне изменения объемных газосодержаний в трехфазной среде. Экспериментальные точки *1* получены при отражении от нижней границы суспензии возмущений давления, создаваемых электромагнитным излучателем, расположенным в нижней части рабочего участка. Характерный профиль падающей и отраженной волн давления, снятых с датчиков Д5, Д6, показан на рис. 4б. Скорость звука в трехфазной суспензии на границе вычислялась по измеренной средней скорости малых возмущений в суспензии с учетом распределения гидростатического давления p_0 и объемного газосодержания по высоте трехфазной среды. Расчетные кривые *2*, *3* выполнены по высокочастотному приближению (3), (9) при следующих значениях коэффициента присоединенной массы: $\alpha = 1$ – кривая *2*, $\alpha = 1 - 0.5(1 - 1/m)$ – кривая *3*, а кривая *4* – по низкочастотному приближению (3), (11). Видно, что опытные данные лежат в окрестности линий *2* и *3*. Выделить влияние коэффициента присоединенной массы жидкости на отражение волны давления на границе жидкость–трехфазная суспензия не позволяет большой разброс экспериментальных точек.

Отметим, что форма отраженной волны соответствует форме падающей на границу волны давления (рис. 4б), что говорит о слабом влиянии дисперсионных и диссипативных процессов в трехфазной среде на отражение волн.

На рис. 5а представлена зависимость коэффициента отражения волн давления малой интенсивности на границе раздела жидкость–плотная хаотическая упаковка насыпных стеклянных шариков, насыщенных жидкостью с пузырьками газа, от отношения модулей объемной упругости $K_в$ и сдвига пористого скелета μ к модулю объемной упругости газожидкостной смеси $K_c = c_0^2 \rho_c$ для граничных условий "жидкий" и "непроницаемый" поршень. При условии "жидкий" поршень граница является открытой и выполняется условие равенства давлений и нормальных скоростей по обе стороны границы, а первая компонента тензора эффективных напряжений в твердом скелете на

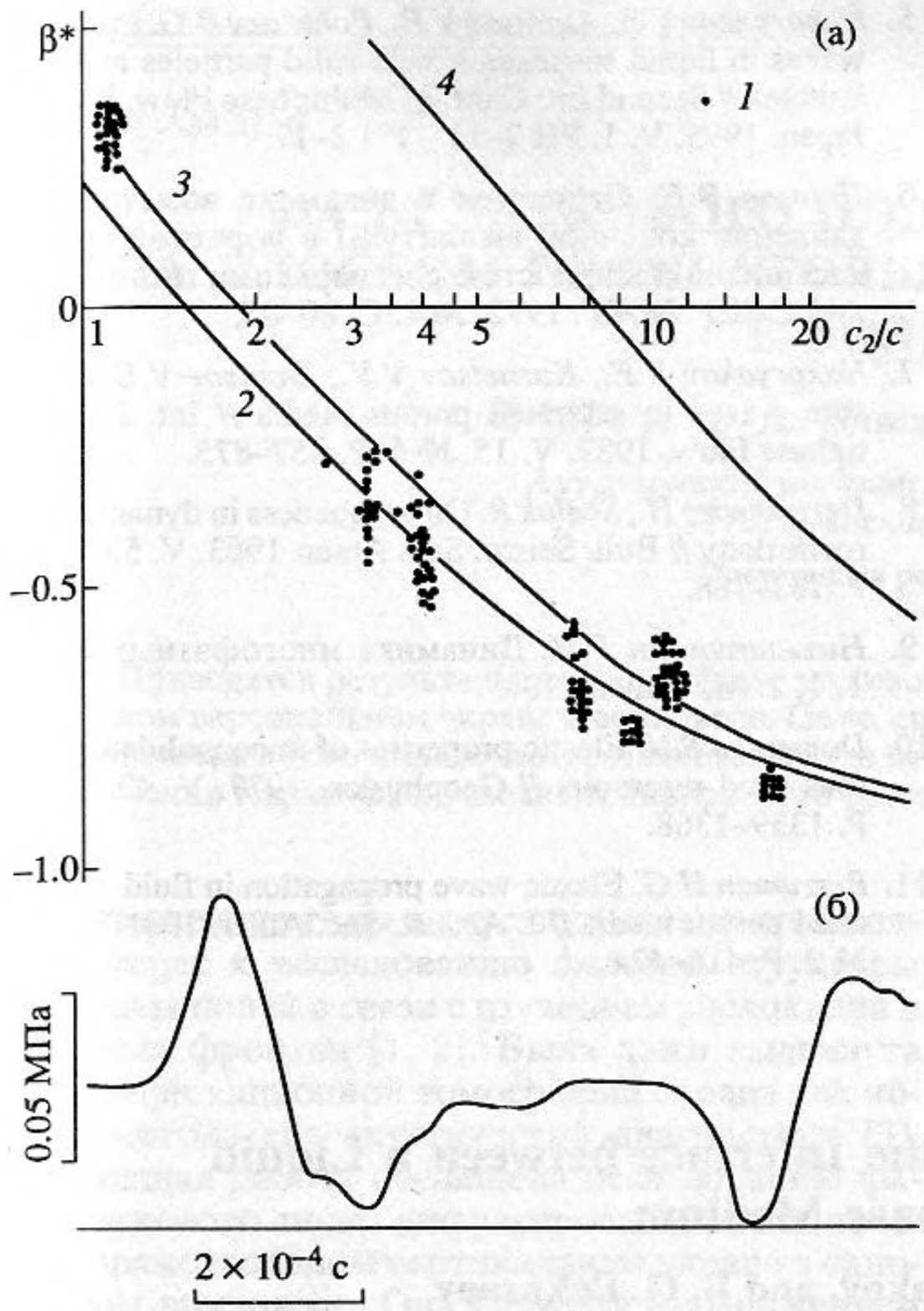

Рис. 4. а – коэффициент отражения на границе раздела вода–суспензия воды со свинцовыми шариками и пузырьками воздуха. $m = 0.60$, $\Delta p/p_0 \leq 1$. *1* – эксперимент, *2–4* расчет; б – характерный профиль падающей и отраженной волн давления, снятый с датчиков Д5, Д6.

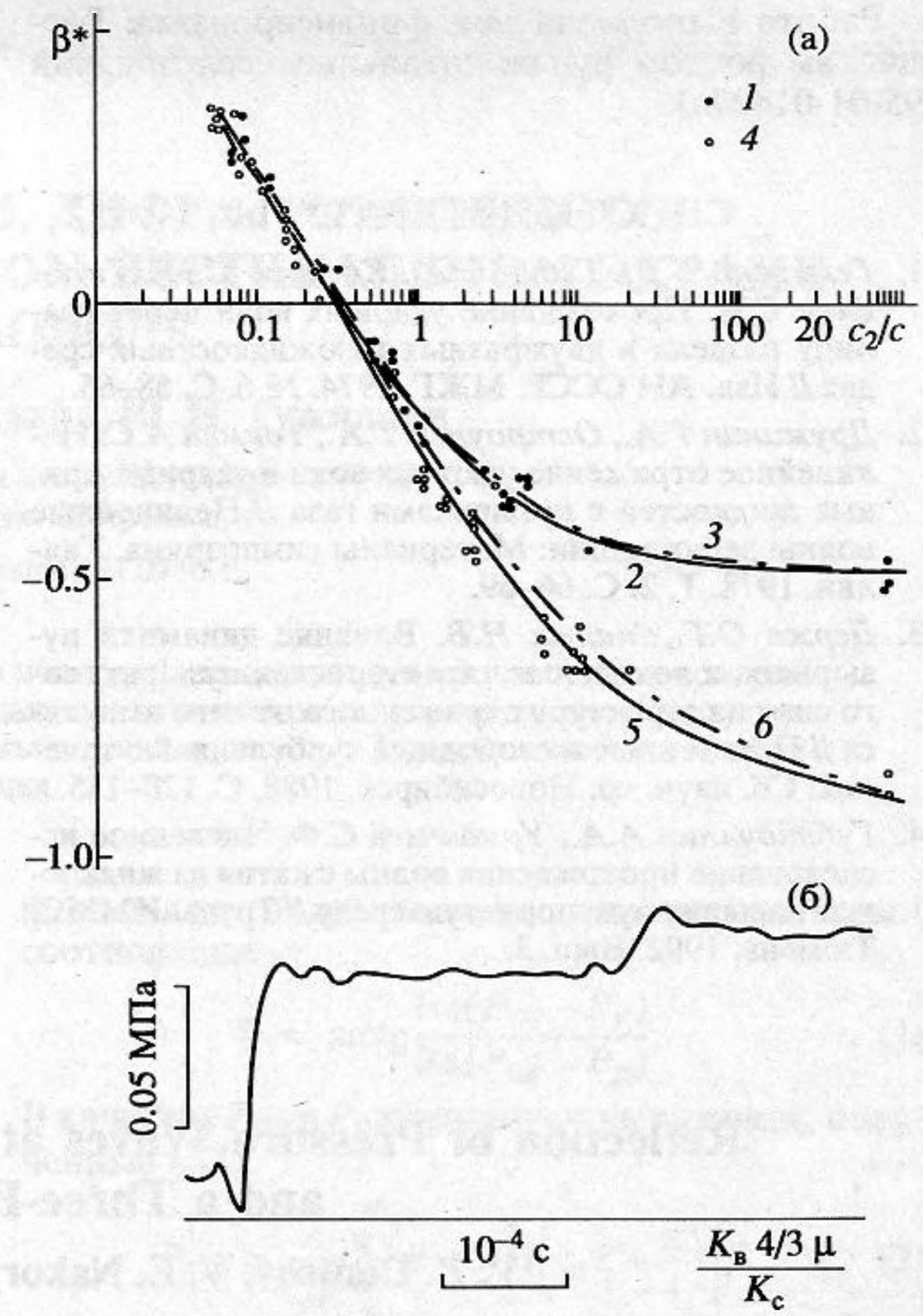

Рис. 5. Коэффициент отражения на границе раздела вода–пористая среда, насыщенная водой с пузырьками воздуха. $m = 0.34$, $\Delta p/p_0 \leq 1$, $K_в + 4\mu/3 = 0.12 \times 10^9$ н/м^2, *1–3* – граничное условие "непроницаемый" поршень, *4–6* – "жидкий" поршень. *1*, *4* – эксперимент, *2*, *3*, *5*, *6* – расчет; б – характерный профиль падающей и отраженной волн давления, снятый с датчиков Д1, Д2.

границе равна нулю. При условии "непроницаемый" поршень на границе расположена тонкая непроницаемая перегородка и выполняется равенство полных тензоров напряжений по обе стороны границы и равенство деформаций твердой и газожидкостной фаз в пористой среде на границе [8]. Характерный ступенчатый профиль падающей и отраженной волн давления с датчиков Д1, Д2, расположенных в жидкости, показан на рис. 5б. Линиями *2*, *3*, *5*, *6* на рис. 5а показаны расчеты, выполненные методом быстрого преобразования Фурье с использованием модели Био [7] и граничных условий "жидкий" и "непроницаемый" поршень при значениях коэффициента присоединенной массы жидкости $\alpha = 1$ – кривые *2*, *5*, $\alpha = 1 - 0.5(1 - 1/m)$ – кривые *3*, *6*. Видно, что расчетные кривые для разных значений α достаточно близки друг к другу при соответствующих граничных условиях и хорошо описывают опытные данные.

При $(K_в + 4\mu/3)/K_c \ll 1$ коэффициенты отражения для обоих типов граничных условий практически совпадают. Это обусловлено тем, что вся нагрузка на границе в насыщенной пористой среде передается через жидкость, а пористый скелет практически не участвует в передаче давления из жидкости в насыщенную пористую среду. Если же модуль объемной упругости пористого скелета значительно превышает модуль объемной упругости газожидкостной смеси, то при граничном условии "непроницаемый" поршень нагрузка на границе передается, в основном, через пористый скелет, и коэффициент отражения определяется отношением $(K_в + 4\mu/3)/K_c$ и не зависит от сжимаемости газожидкостной смеси. А при граничном условии "жидкий" поршень нагрузка передается через жидкость, поэтому при $(K_в + 4\mu/3)/K_c \gg 1$ коэффициент отражения $\beta^* \longrightarrow 0$.

Работа выполнена при финансировании Российским фондом фундаментальных исследований (95-01-01407а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Когарко С.М., Тимофеев Е.И.* Прохождение ударных волн через границу раздела в двухфазных газожидкостных средах // Изв. АН СССР. МЖГ. 1974. № 6. С. 58–65.
2. *Дружинин Г.А., Остроумов Г.А., Токман А.С.* Нелинейное отражение ударных волн и ударные кривые жидкостей с пузырьками газа // Нелинейные волны деформации: Материалы симпозиума. Таллин. 1978. Т. 2. С. 66–69.
3. *Держо О.Г., Малых Н.В.* Влияние динамики пузырьков и локальных характеристик пузырькового слоя на структуру отраженного от него импульса // Пристенные и свободные турбулентные течения: Сб. науч. тр. Новосибирск. 1988. С. 120–135.
4. *Губайдуллин А.А., Урманчеев С.Ф.* Численное исследование прохождения волны сжатия из жидкости в насыщенную пористую среду // Труды ИММС. Тюмень. 1992. Вып. 3.
5. *Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G.* Pressure waves in liquid suspension with solid particles and gas bubbles // Second Int. Conf. of Multiphase Flow. Kyoto. Japan. 1995. V. 1. PH 2–11 – PH 2–17.
6. *Донцов В.Е.* Структура и динамика возмущений давления конечной амплитуды в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1992. № 1. С. 80–85.
7. *Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Dontsov V.E.* Pressure waves in saturated porous media // Int. J. Multiphase Flow. 1989. V. 15. № 6. P. 857–875.
8. *Deresiewiez H., Skalak R.* On uniqueness in dynamic poroelasticity // Bull. Seism. Soc. Amer. 1963. V. 53. № 4. P. 783–788.
9. *Нигматуллин Р.И.* Динамика многофазных сред. Т. 1, 2. М.: Наука, 1987.
10. *Domenico S.N.* Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs // Geophysics. 1977. V. 42. № 7. P. 1339–1368.
11. *Berruman H.G.* Elastic wave propagation in fluid – saturated porous media // J. Acoust. Soc. Amer. 1981. V. 69. № 2. P. 416–424.

Reflection of Pressure Waves at the Interface between a Liquid and a Three-Phase Medium

V. E. Dontsov, V. E. Nakoryakov, and B. G. Pokusaev

We present an experimental study of the reflection of weak pressure waves at the interface between a liquid and a three-phase medium (liquid, solid particles, and gas bubbles). Using the acoustic approximation, we derived formulas for the reflection coefficient and compared respective theoretical and experimental data.