

## ЭВОЛЮЦИЯ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПОРИСТУЮ ПЕРЕГОРОДКУ, НАСЫЩЕННУЮ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТЬЮ

© 2024 г. И. К. Гималтдинов<sup>a,\*</sup>, А. С. Родионов<sup>a,\*\*\*</sup>, О. Ю. Валиахметова<sup>a,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

\*e-mail: [iljas\\_g@mail.ru](mailto:iljas_g@mail.ru)

\*\*e-mail: [artrodionov@mail.ru](mailto:artrodionov@mail.ru)

\*\*\*e-mail: [v9174121007@gmail.com](mailto:v9174121007@gmail.com)

Поступила в редакцию 17.07.2024 г.

После доработки 08.10.2024 г.

Принята к публикации 08.10.2024 г.

Рассмотрены особенности динамики волн давления при наличии пористой перегородки (слоя), насыщенной пузырьковой жидкостью. Показано, что отражение волнового импульса от пористой перегородки, насыщенной пузырьковой смесью, в зависимости от параметров газированной смеси и пористой среды (объемного содержания газа, дисперсности пузырьков, пористости,) аналогично отражению от свободной границы или от жесткой стенки.

**Ключевые слова:** пористая среда, пузырьковая жидкость, волны, свободная граница

**DOI:** 10.31857/S1024708424060148, **EDN:** FDGWVM

Защита сооружений или подводной фауны от воздействия волновых импульсов, распространяющихся в воде с помощью различного рода преград (например, пузырьковые завесы, пористые среды) является актуальной проблемой [1–5]. Надежное функционирование систем защиты от воздействия волн давления требует углубленного изучения закономерностей распространения возмущений в экранирующих слоях среды. Проблеме экранирования волн, распространяющихся в жидкостях, посвящено множество исследований, обзор по которым приведен в [6–8]. Исследования по этим вопросам продолжаются до сих пор [9–11].

В данной работе численно исследуется эволюция импульса конечной длительности в жидкости при прохождении его через пористый слой, насыщенный жидкостью с пузырьками газа или “чистой” (без пузырьков) жидкостью.

### 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим задачу об эволюции плоско-одномерных волн в жидкости при прохождении через пористый слой, заполненный газированной жидкостью. Будем полагать, что пористая среда, скелет которой считается вязкоупругим, насыщена однородной газожидкостной смесью. Для описания движения насыщенной пористой среды принимаются следующие допущения: размеры частиц скелета пористой среды и пузырьков значительно больше молекулярно-кинетических масштабов и много меньше расстояний, на которых макроскопические параметры фаз меняются заметно; эффекты вязкости и теплопроводности существенны лишь в процессах межфазного взаимодействия; отсутствуют процессы межфазного массообмена и дробления пузырьков; деформации скелета малы; жидкость – акустически сжимаема; газ – калорически совершенный; внешние массовые силы отсутствуют; движение полагается одномерным, плоским и нестационарным. При сделанных предположениях запишем основные уравнения для пористой среды, поровое пространство которой занято газожидкостной

смесью. Уравнения баланса масс, числа пузырьков и импульсов имеют вид [12]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{l+g}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{l+g} v_l}{\partial x} &= 0, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial n_b}{\partial t} + \frac{\partial n_b v_l}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \rho_{l+g} v_l}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{l+g} v_l^2}{\partial x} + \alpha_g \frac{\partial p_l}{\partial x} &= -F_\mu - F_m, \\ \frac{\partial \rho_s v_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s^2}{\partial x} + \alpha_s \frac{\partial p_l}{\partial x} &= \frac{\partial \sigma_{s^*}}{\partial x} + F_\mu + F_m, \\ \rho_i = \alpha_i \rho_i^0, \quad \rho_{l+g} &= \rho_l + \rho_g, \quad i = (s, l, g), \quad \alpha_s + \alpha_l + \alpha_g = 1, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $\rho_j$ ,  $\rho_j^0 v_j$ ,  $\alpha_j$  — приведенная и истинная плотность, скорость, объемное содержание  $j$ -й фазы соответственно, нижние индексы  $s$ ,  $l$ ,  $l + g$  относятся к скелету пористой среды, к жидкости и к смеси жидкости и пузырьков соответственно;  $\sigma_{s^*}$ ,  $p_l$  — приведенное напряжение в скелете и давление в жидкости соответственно,  $n_b$  — число пузырьков в единице объема,  $F_\mu$  и  $F_m$  — силы вязкого трения и присоединенной массы. Скелет пористой среды предполагается вязкоупругим [13]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{s^*}}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_{s^*} v_s}{\partial x} &= \sigma_{s^*} e_{s^*} + E_{f^*} e_{s^*} - \frac{\sigma_{s^*} - E_{e^*} \xi_{s^*}}{t_{s0}}, \\ e_{s^*} = \frac{d_s \xi_{s^*}}{dt} &= \frac{\partial v_s}{\partial x} \quad \left( \frac{d_s}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_s \frac{\partial}{\partial x} \right), \\ E_{f^*} = \rho_{s0} D_{f^*}^2, \quad E_{e^*} &= \rho_{s0} D_{e^*}^2, \end{aligned} \quad (1.2)$$

здесь  $\xi_{s^*}$ ,  $e_{s^*}$  — деформация твердой фазы и ее приведенная скорость,  $E_{f^*}$ ,  $E_{e^*}$  — динамический и статический модули упругости;  $D_{f^*}$ ,  $D_{e^*}$  — продольные динамическая и статическая скорости звука в скелете пористой среды,  $t_{s0}$  — время релаксации в скелете при его вязкоупругом деформировании.

Межфазное взаимодействие включает силы вязкого трения  $F_\mu$  и присоединенной массы  $F_m$  [12]

$$F_\mu = \eta_\mu \alpha_s \alpha_{l+g} \mu_l a_{s^*}^{-2} (v_l - v_s), \quad F_m = \frac{1}{2} \eta_m \alpha_s \rho_{l+g} \left( \frac{d_l v_l}{dt} - \frac{d_s v_s}{dt} \right), \quad (1.3)$$

где  $a_{s^*}$  — характерный размер зерен скелета,  $\mu_l$  — динамическая вязкость жидкости,  $\eta_\mu$ ,  $\eta_m$  — безразмерные коэффициенты взаимодействия фаз, зависящие от структуры среды. При описании радиального движения будем полагать, что скорость радиального движения  $w$  складывается из двух составляющих:  $w = w_A + w_R$ , где  $w_R$  определяется из уравнения Релея—Ламба для пористой среды,  $w_A$  — слагаемое, учитывающее сжимаемость жидкости [14]

$$\begin{aligned} \rho_{l0}^0 \left( a \dot{w}_R + \frac{3}{2} w_R^2 \right) &= p_g - p_l - \frac{2\Sigma}{a} - 4\mu_l \frac{w_R}{a} \left( 1 + \frac{1}{4} \alpha_s \eta_\mu \left( \frac{a}{a_{s^*}} \right)^2 \right), \\ w_A &= \frac{p_g - p_l}{\rho_{l0}^0 C_l x_{g0}^{1/3}}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где  $v_l$  — кинематическая вязкость жидкости,  $x_{g0}$  — объемная доля газа в пузырьковой жидкости,  $C_l$  — скорость звука в “чистой” жидкости.

Для давления в газовой фазе запишем уравнение в виде [6]

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma - 1)}{a} q. \quad (1.5)$$

Здесь  $\gamma$  — коэффициент Пуассона для газа;  $q$  — межфазный тепловой поток (от газа к жидкости) через единицу площади контактной поверхности.

Будем полагать, что жидкость является акустически сжимаемой, газ — калорически совершенным, а скелет пористой среды — несжимаемым

$$p_l = p_0 + C_l^2 (\rho_l^0 - \rho_{l0}^0), \quad p_g = \rho_g^0 B T_g, \quad \rho_s^0 = \text{const}, \quad (1.6)$$

где  $B$  — газовая постоянная.

Интенсивность межфазного теплообмена между жидкостью и газом зададим в виде

$$q = \frac{\lambda_g \text{Nu} (T_g - T_0)}{2a}, \quad (1.7)$$

где температура жидкости  $T_0 = \text{const}$ .

Числа Нуссельта и Пекле имеют вид

$$\text{Nu} = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}}, \text{Pe} \geq 100 \\ 10, \text{Pe} < 100 \end{cases}, \quad \text{Pe} = 12(\gamma - 1) \frac{T_0}{|T_g - T_0|} \frac{a|w|}{\kappa_g}, \quad (1.8)$$

где коэффициент температуропроводности  $\kappa_g = \lambda_g / c_g \rho_g^0$ . Для замыкания системы используем следующие соотношения

$$\alpha_{g0} = \frac{4}{3} \pi a^3 n_b, \quad \rho_j = \rho_j^0 \alpha_j, \quad \rho_{l+g} = \rho_l + \rho_g. \quad (1.9)$$

## 2. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для численного решения системы уравнений (1.1)–(1.5) с определяющими соотношениями (1.6)–(1.9) введем в рассмотрение равномерную пространственную сетку размерности  $N$  с границами в точках  $x_i, i = \overline{0, N}$ . Будем считать, что скорости жидкости и скелета заданы на границах ячеек в точках  $x_i$ , а все остальные параметры — в центре ячеек в точках  $x_i = x_i - \Delta x/2$ , где  $\Delta x$  — шаг по пространству. Далее используется неявная схема, основанная на методе контрольного объема [15].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Рассматривается следующая задача: внутри области  $(0 \leq x \leq L)$ , заполненной водой, есть пористая перегородка ( $x^* \leq x \leq x^{**}$ ), насыщенная газированной водой или “чистой” (без пузырьков) водой. В начальный момент  $t = 0$  на границе  $x = 0$  задается импульсное давление. Требуется изучить эволюцию волнового импульса при прохождении пористой перегородки в зависимости от определяющих параметров пористой среды и газожидкостной смеси. Начальные условия для сформулированной задачи, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} p_l &= p_0, \quad \rho_l^0 = \rho_l^0, \quad v_l = 0, \quad \alpha_l = 1, \quad \alpha_g = 0, \quad \alpha_s = 0, \\ &\quad (0 < x < x^*, \quad x^{**} < x \leq L); \\ p_g &= p_0, \quad \rho_g^0 = \rho_{g0}^0, \quad T_g = T_0, \quad \alpha_g = \alpha_{g0}, \\ p_l &= p_0, \quad \rho_l^0 = \rho_{l0}^0, \quad v_l = 0, \quad w_R = 0, \quad w_A = 0, \quad \alpha_l = \alpha_{l0}, \\ v_s &= 0, \quad \sigma_{s^*} = 0, \quad \xi_{s^*} = 0, \quad e_{s^*} = 0, \quad \alpha_s = \alpha_{s0} = 1 - \alpha_{g0} - \alpha_{l0}, \\ &\quad (x^* \leq x \leq x^{**}). \end{aligned}$$

Нижними индексами 0 отмечены невозмущенные параметры системы.

На границе  $x = 0$  давление задается следующим выражением:

$$p_l = \begin{cases} p_0 + \Delta p_{l0} \cdot e^{\left(-\left(\frac{t-t^*}{t^{**}}\right)^2\right)}, & t \leq t^* \\ p_0, & t > t^*, \end{cases}$$

где  $\Delta p_{l0}$  — амплитуда начального возмущения,  $t^*$  — протяженность импульса,  $t^{**}$  — характерный параметр импульса.

На правой границе задаются условия, как на жесткой стенке

$$v_l = 0, \quad v_s = 0 (x = L).$$

Расчеты выполнялись на разных расчетных сетках до получения результатов, не зависящих от сетки: дальнейшее измельчение сетки и уменьшение шага интегрирования по времени никак не влияло на результаты расчетов. Расчеты проводились для песчаника, воды и воздуха. При этом использовались следующие значения термодинамических параметров фаз:  $p_0 = 1.01325$  бар,  $T_0 = 290$  К,  $\rho_{s0}^0 = 2650$  кг/м<sup>3</sup>,  $D_{f*} = 1750$  м/с,  $D_{e*} = 900$  м/с,  $a_{s*} = 0.5$  мм,  $\eta_\mu = 1400.0$ ,  $\eta_m = 0.15$ ,  $t_{s0} = 0.5$  мс,  $\rho_{l0}^0 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_l = 1500$  м/с,  $\mu_l = 0.001$  Па · с,  $\Sigma = 73$  мН/м,  $\rho_{g0}^0 = 1.29$  кг/м<sup>3</sup>,  $B = 287$  Дж/(кг·град),  $\lambda_g = 0.0259$  Вт/(м·град),  $c_g = 1.005$  кДж/(кг · °C),  $a_0 = 1.0$  мм. Параметры импульса полагались равными  $\Delta p_{l0} = 3$  бар,  $t^* = 0.5$  мс; протяженность пористой среды составляла 0.5 м ( $x^* = 1.75$ ,  $x^{**} = 2.25$  м).

Под действием граничного давления в области жидкости формируется колоколообразный импульс амплитудой 3.0 бар и протяженностью 0.75 м, (см. рис. 1, эпюра для момента  $t = 1.0$  мс). Объемное содержание газированной жидкости в пористой среде составляет  $\alpha_{l0+g0} = 0.351$ , а объемное содержание газа  $\alpha_{g0} = 0.001$ . Несмотря на такое маленькое значение содержания газа, импульс от слоя пористой среды, насыщенной газированной жидкостью, отражается как от свободной границы [16], т.е. падающий импульс сжатия отражается как импульс разрежения (при  $t = 1.7$  мс). Форма отраженного и прошедшего сигналов является неоднородной. Амплитуды отраженного и прошедшего сигналов приблизительно равны 0.5 и 0.25 бар соответственно, т.е. амплитуда прошедшего сигнала через пористую перегородку, насыщенную газированной жидкостью, уменьшается в 12 раз. Пик давления

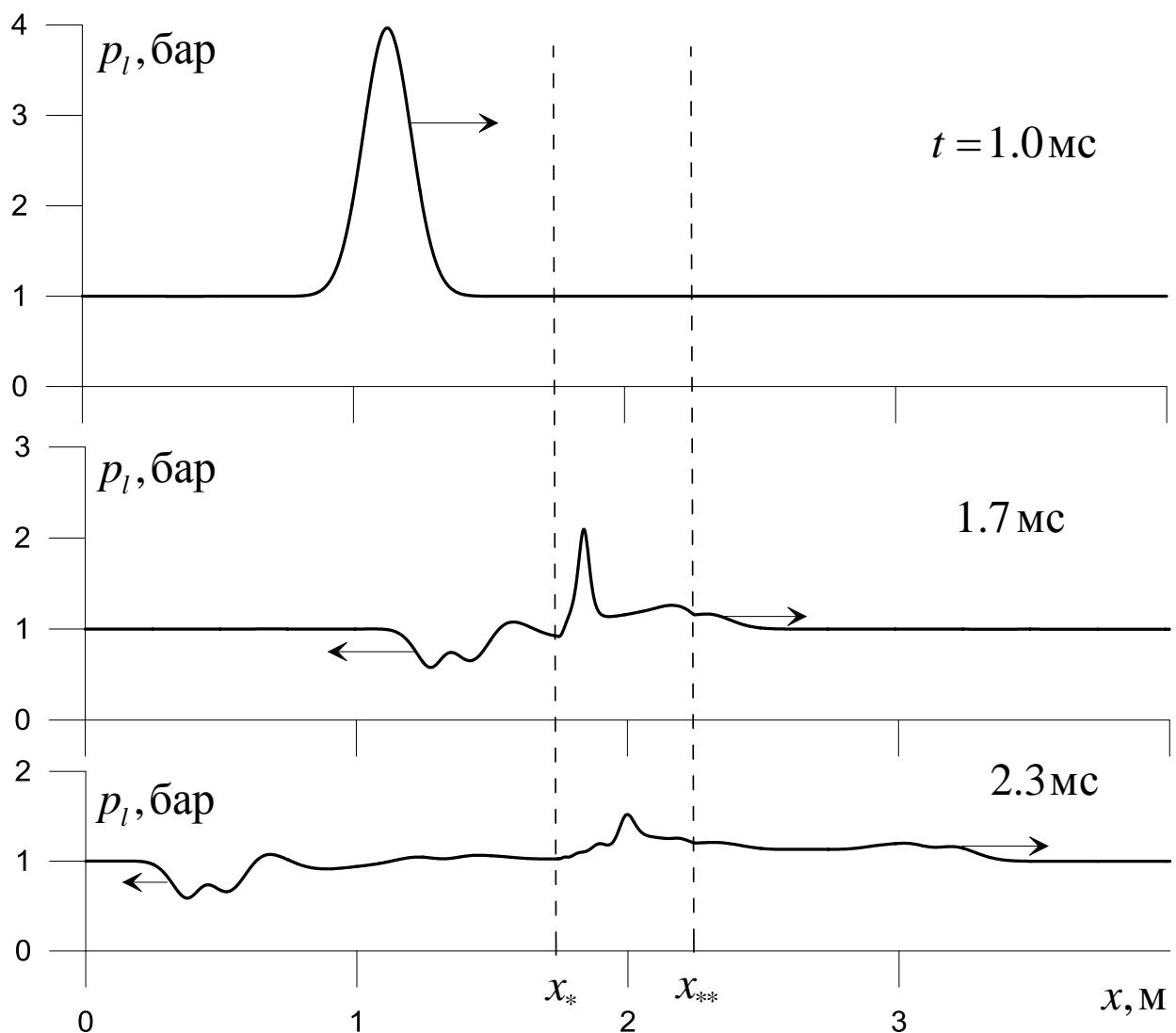


Рис. 1. Эпюры давления при прохождении слоя пористой среды, насыщенной газированной жидкостью. Параметры расчета:  $\alpha_{g0} = 0.001$ ,  $\alpha_{l0} = 0.35$ ,  $a_0 = 1$  мм.

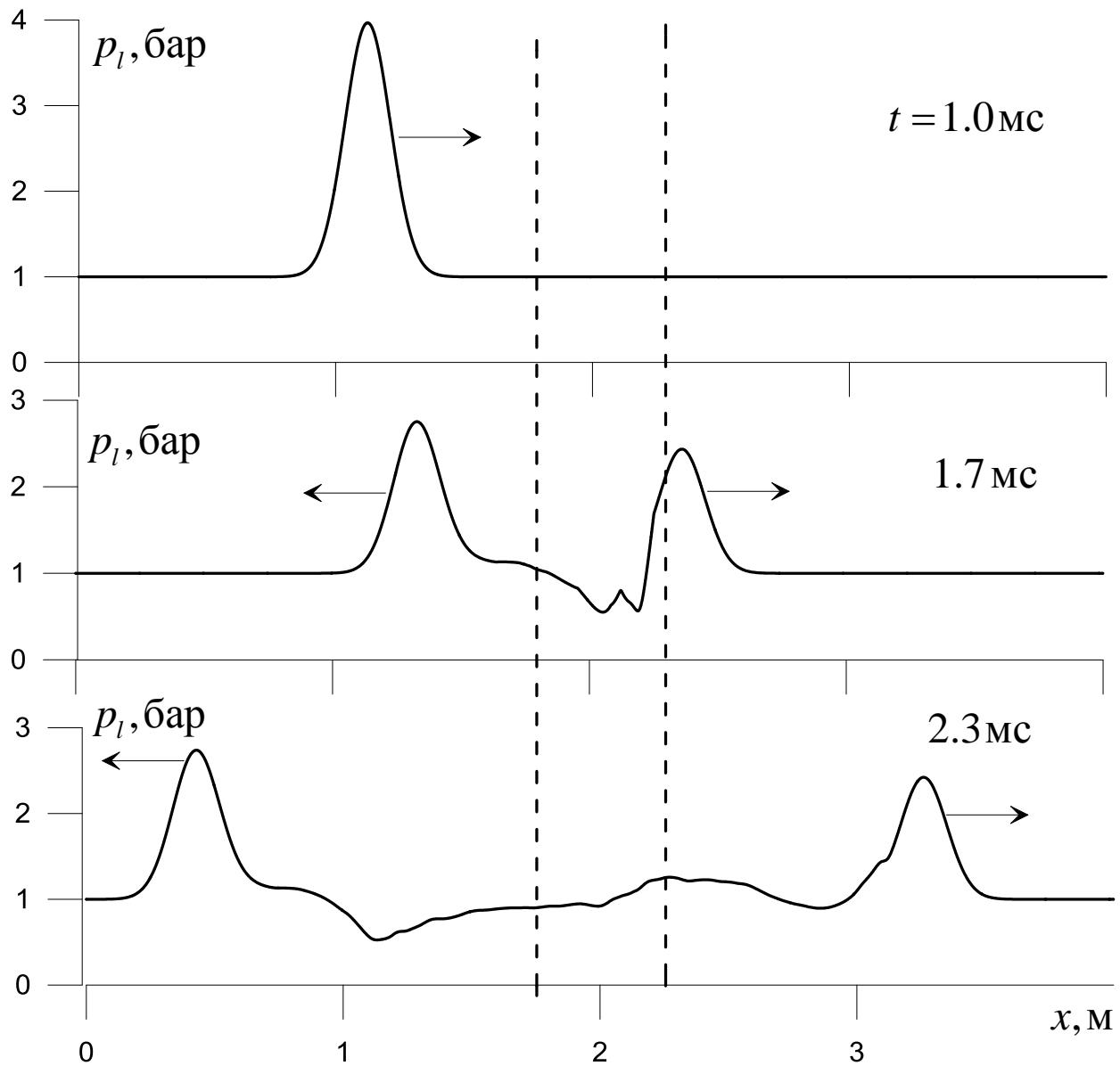


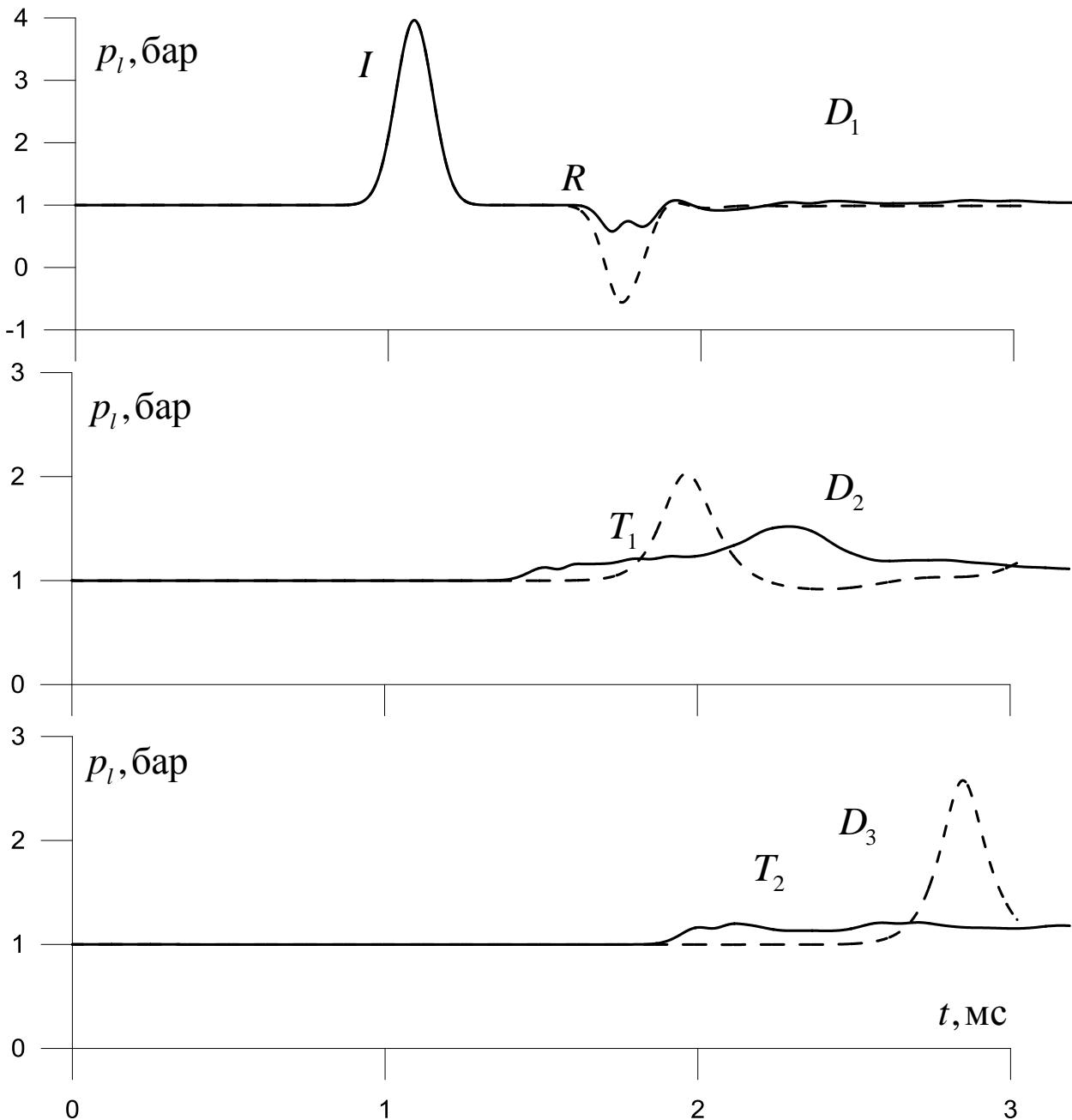
Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но пористая среда насыщена водой без пузырьков.

внутри пористого слоя, на эпюре, соответствующем моменту 1.7 мс связан с переотражением “быстрой” (деформационной) волны сжатия в скелете пористой среды [13]. В дальнейшем амплитуда этого пика уменьшается ( $t = 2.3$  мс).

Динамика импульсного сигнала при прохождении через пористую перегородку, насыщенной водой без пузырьков, представлена на рис. 2. Параметры первоначального импульса такие же, как для рис. 1. Под действием граничного давления формируется импульсный сигнал колоколообразной формы, рис. 2. ( $t = 1.0$  мс). Акустический импеданс [16] пористой перегородки, насыщенной водой, больше аналогичного параметра для воды, поэтому падающий импульс давления отражается как импульс сжатия, не изменяя своей фазы ( $t = 1.7$  мс). Амплитуда импульса, отраженного от перегородки, равна 1.7 бар, а прошедшего — 1.5 бар, т.е. амплитуда импульса, прошедшего слой пористой среды, насыщенный жидкостью, уменьшается в 2 раза. Отражение волны давления на границе “пористая среда — жидкость” из-за того, что акустическая жесткость пористой среды насыщенной водой меньше, чем аналогичный параметр для воды, происходит аналогично отражению от свободной границы, т.е. им-

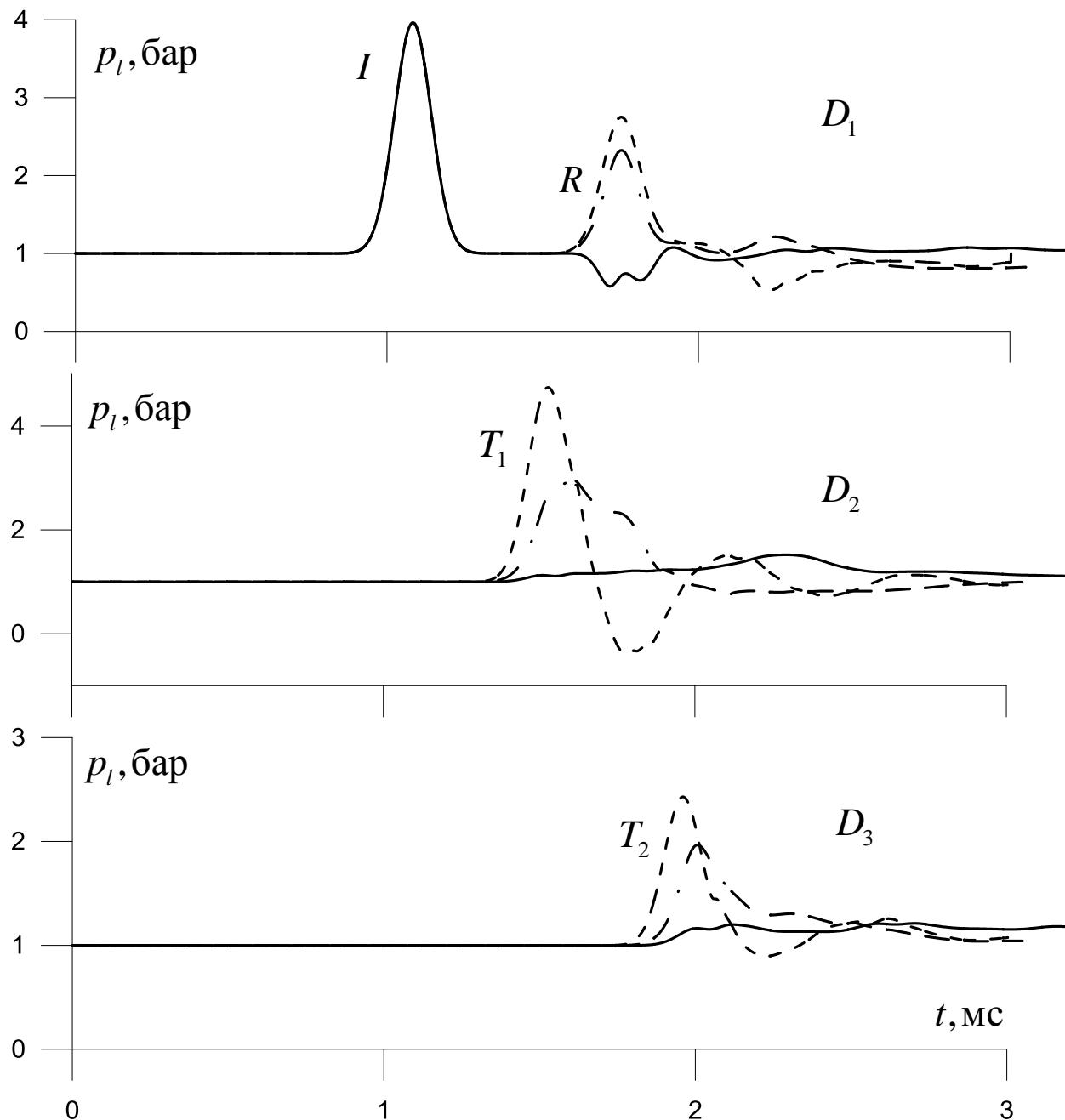
пульс изменяет свою фазу, поэтому в эпюрах давления, соответствующих моменту  $t = 2.3$  мс, за импульсами сжатия следуют импульсы разрежения.

Сравнение “осциллограмм” давления, показывающих динамику прохождения импульсного давления пористой перегородки, насыщенной газированной водой, или пузырьковой завесы с такой же толщиной и с таким же объемным содержанием газа, как в области пористого слоя, представлено на рис. 3.



**Рис. 3.** Расчетные “осциллограммы” давления в жидкости. Датчики  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  расположены соответственно перед пористой перегородкой на расстоянии  $0.5$  м от границы  $x^*$ , в середине перегородки, и за перегородкой на расстоянии  $0.5$  м от границы  $x^{**}$ . Сплошная и штриховая линии соответствуют случаям взаимодействия волнового импульса с пористой перегородкой, насыщенной газированной жидкостью ( $\alpha_{g0} = 10^{-3}$ ,  $\alpha_{l0} = 0.35$ ), и с пузырьковой завесой ( $\alpha_{g0} = 10^{-3}$ ), все остальные исходные параметры такие же, как на рис. 1.

Первый всплеск  $I$  на осциллограмме для датчика  $D_1$  соответствует падающему импульсу на границу “вода — пористая среда, насыщенная газированной водой” или “вода — газированная вода (пузырьковая завеса)”, символом  $R$  (reflection) обозначены отраженные сигналы от перегородки или завесы. Следует отметить, что отраженные сигналы от пористой перегородки или пузырьковой завесы являются импульсами разрежения (см. рис. 3, датчик  $D_1$ ). Амплитуда отраженного сигнала от пузырьковой завесы более четырех раз превышает амплитуду отраженного сигнала от пористой перегородки, насыщенной газированной водой.



**Рис. 4.** Динамика импульсного сигнала при прохождении через пористую прегородку. Сплошная, штриховая и штрихпунктирная линии соответствуют объемному содержанию газа  $\alpha_{g0} = 0, 10^{-3}, 10^{-4}$  соответственно; все исходные параметры такие же, как на рис. 1. Расположение датчиков и обозначения начального, отраженного и прошедших сигналов такое же, как на рис. 3.

Волновой импульс, прошедший в пузырьковую завесу  $T_1$  (transit), сохраняет форму уединенного сигнала и в середине завесы имеет амплитуду, приблизительно, 2.0 бар, а в пористой перегородке волновой импульс растягивается, максимальное значение амплитуды внутри перегородки около 0.5 бар, рис. 3, датчик  $D_2$ . Амплитуда импульса, прошедшего через пузырьковую завесу ( $T_2$ ), уменьшается почти в два раза по сравнению с амплитудой начального импульса и составляет 1.7 бар; сигнал, прошедший через пористую перегородку, растягивается и имеет амплитуду около 0.25 бар, рис. 3, датчик  $D_2$ . Отметим, что для расчетов, приведенных на рис. 3, протяженность импульса превышает период собственных колебаний пузырьков ( $t^* > t_M$ ,  $t_M = 2\pi/\omega_M$ ,  $\omega_M = a^{-1}\sqrt{3\gamma p_0/\rho_{l0}^0}$ ), если протяженность импульса близка к периоду собственных колебаний пузырьков ( $t^* = t_M$ ), то происходит большее отражение сигнала на границе с пористой перегородкой или завесой и более интенсивное затухание внутри перегородки или завесы, и, как следствие, амплитуда прошедшего импульса является ничтожно малой величиной, чем амплитуда падающего сигнала.

Расчетные осциллограммы для датчиков  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , показывающих влияние объемного содержания газа в пористой перегородке на динамику прохождения импульсного сигнала, представлены на рис. 3. Следует отметить, что когда объемное содержание газа  $\alpha_{g0} = 10^{-3}$ , отражение импульса от пористой среды, насыщенной газированной жидкостью, происходит как от акустически мягкой системы, а при  $\alpha_{g0} = 10^{-4}$ , при прочих одинаковых параметрах, отражение от пористой среды аналогично отражению импульса от жесткой стенки. Амплитуда волнового сигнала, прошедшего через первую границу ("вода – насыщенная пористая среда") и распространяющегося в пористом слое  $T_1$ , существенно зависит от объемного содержания газа в пористом слое (см. датчик  $D_2$ ). Когда пористая среда насыщена "чистой" жидкостью, амплитуда сигнала  $T_1$  равна 4.0 бар, т.е. превышает первоначальную амплитуду падающего сигнала на 1.0 бар, при  $\alpha_{g0} = 10^{-4}$  и  $10^{-3}$  эта же величина равна 2.0 бар и 0.25 бар соответственно.

Амплитуда сигнала, прошедшего через пористой слой  $T_2$ , насыщенный "чистой" жидкостью, равна 1.5 бар, это значение в два раза меньше амплитуды падающего импульса  $I$  (датчик  $D_1$ ). Прохождение импульсного сигнала с амплитудой 3.0 бар слоя пористой среды, насыщенной газированной жидкостью с объемным содержанием газа  $\alpha_{g0} = 10^{-4}$  и  $10^{-3}$ , приводит к уменьшению амплитуды до 1.0 и 0.1 бар соответственно. Таким образом, можно утверждать, что существует критическое значение объемного содержания газа в пористой среде, насыщенной газированной жидкостью, меньше которого импульсное давление отражается от границы "жидкость – пористая среда, насыщенная газированной жидкостью" как от жесткой стенки (без изменения фазы), а когда объемное содержание газа выше этого значения – отражение происходит, как от свободной границы (с изменением фазы).

Влияние объемного содержания жидкости в пористой перегородке, при одинаковом значении объемного содержания газа на динамику прохождения импульсного сигнала, представлено на рис. 5. С уменьшением объемного содержания жидкости, соответственно с увеличением объемного содержания скелета, акустическая жесткость пористой перегородки увеличивается, и волновой импульс отражается как от жесткой стенки, за ним следует волна разрежения, связанная с отражением волны давления от границы "пористая среда – вода". Уменьшение доли воды в скелете приводит к более интенсивным осцилляциям давления в середине (датчик  $D_2$ ) и за пористой перегородкой (датчик  $D_3$ ), что связано с циркуляцией "быстрой" деформационной волны в скелете.

Расчетные "осциллограммы" полного напряжения и давления в жидкости, "регистрируемые" в середине пористой перегородки датчиком  $D_2$ , представлены на рис. 6. В случае насыщения пористого слоя газожидкостной средой влияние давления в воде на полное напряжение несущественно, рис. 6а. Пульсации в профиле полного напряжения связаны с циркуляцией деформационной волны сжатия в скелете вязкоупругой пористой среды. Период этих пульсаций равен 0.3 мс, что соответствует времени распространения волн в скелете со скоростью, близкой к продольной динамической скорости звука в вязкоупругой пористой среде ( $D_{f*} = 1750$  м/с). Протяженность сигнала, который характеризует полное напряжение, составляет приблизительно 2.15 мс, амплитуда – 8.0 бар. В случае насыщения пористой среды "чистой" жидкостью (см. рис. 6б), в отличие от случая насыщения пористой среды газированной жидкостью, в значение полного напряжения существенный вклад вносит давление в жидкости. Для случая, представленного на рис. 6б, максимальное значение амплитуды полного напряжения на 2.2 бар превышает амплитуду давления в жидкости и составляет приблизительно 6.5 бар. Профиль полного напряжения и давления в жидкости имеет пульсационный характер, что также связано с переотражением деформационной волны на границах насыщенной пористой среды и жидкости.

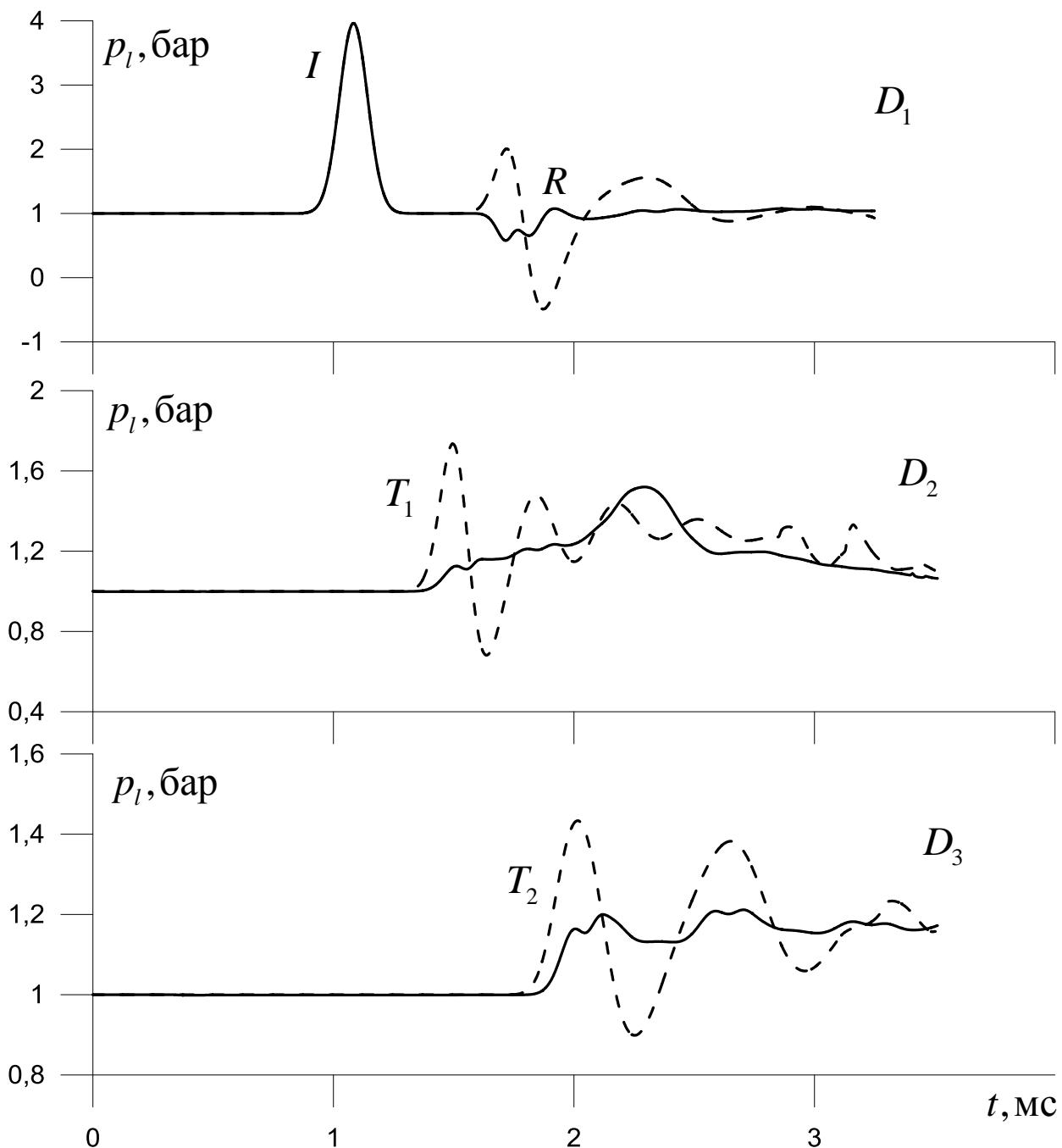
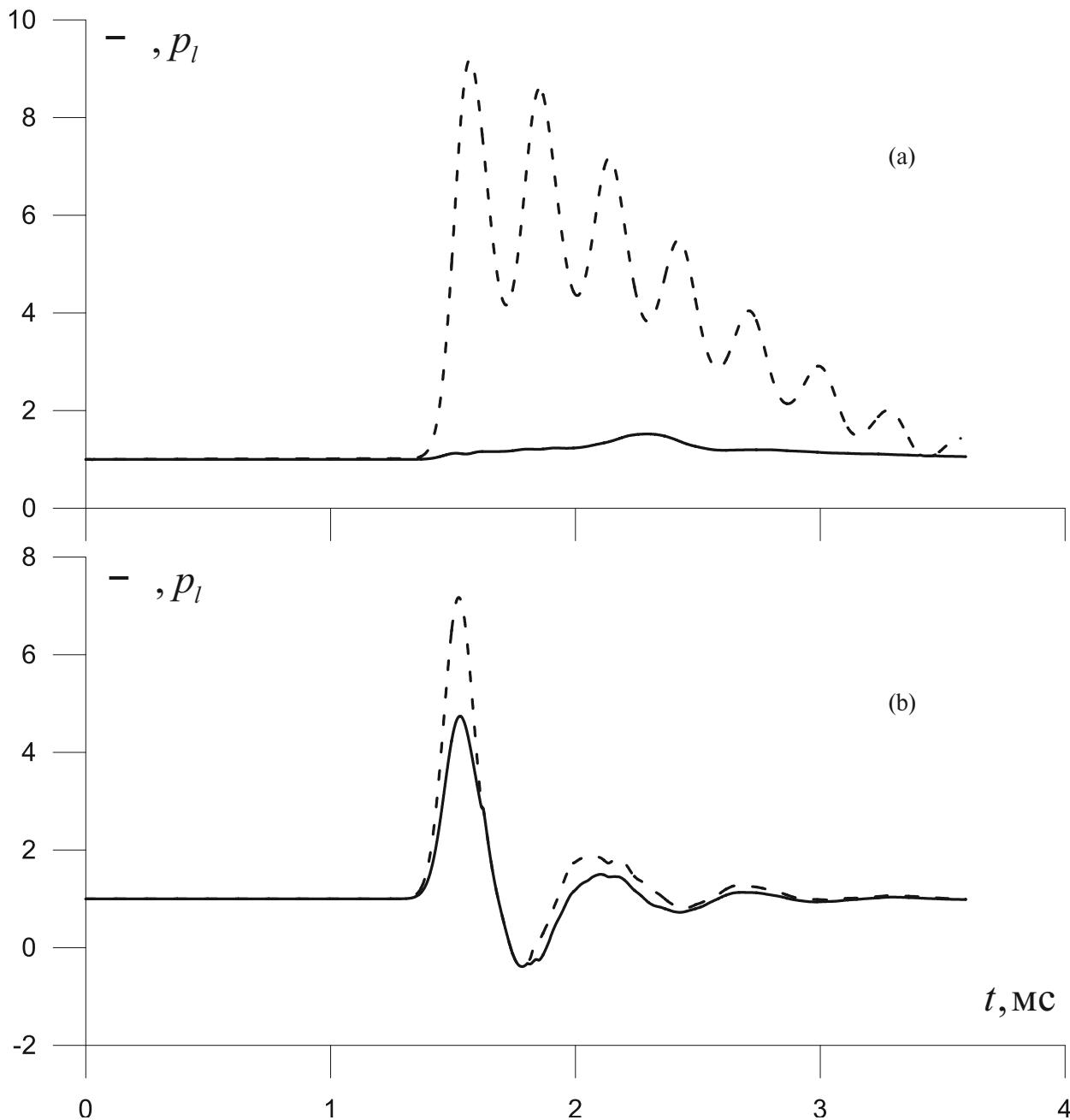


Рис. 5. То же, что на рис. 4. Сплошная и пунктирная линии соответственно  $\alpha_{l0} = 0.35$  и  $0.25$  ( $\alpha_{g0} = 0.001$ ,  $a_0 = 1$  мм), остальные начальные параметры расчета, такие же как на рис. 1. Остальные обозначения, как на рис. 4.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе численного исследования динамики волн в жидкости при наличии в ней пористой перегородки, насыщенной газированной жидкостью, установлено:

— существует критическое значение объемного содержания газа в пористой среде, насыщенной газированной жидкостью, и пористости, такие, что при меньших значениях импульсное возмущение отражается от границы “жидкость—пористая среда, насыщенная газированной жидкостью” как от жесткой стенки (без изменения фазы), а когда объемное содержание газа или пористость выше критических значений — отражение происходит как от свободной границы (с изменением фазы).



**Рис. 6.** Расчетные “осциллограммы” полного напряжения и давления в жидкости на датчике  $D_2$ . Сплошная и штриховая линии – соответственно полное напряжение  $\sigma = -\sigma_s + p_l$  и давление  $p_l$  в бар. Фрагмент *a* соответствует объемному содержанию газа в слое пористой среды  $\alpha_{g0} = 10^{-3}$ , *b* случаю насыщения пористого слоя “чистой” жидкостью – водой; остальные исходные параметры такие же, как на рис. 1.

— в случае насыщения пористого слоя газожидкостной средой с объемным содержанием газа выше 0.001 влияние давления в жидкости на полное напряжение несущественно.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-11-00274, <https://rscf.ru/project/24-11-00274/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев Е.И., Гельфанд Б.Е., Гумеров А.Г. Влияние пузырькового экрана на ударно-волновое возмущение в жидкости // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 3. С. 98–102.
2. Гималтдинов И.К., Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш. Эволюция волн давления в жидкости, содержащей зону жидкости с пузырьками // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2001. № 3. С. 133.
3. Губайдуллин Д.А. Падение акустической волны на многослойную среду, содержащую слой пузырьковой жидкости Д. А. Губайдуллин, Ю. В. Федоров // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 1. С. 109–116. DOI 10.7868/S056852811701008X. – EDN YKULQX.
4. Суров В.С. Моделирование взаимодействия подводной ударной волны с препятствием при наличии пузырькового экрана В. С. Суров // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 1. С. 86–93. – EDN TEJLGA.
5. 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. EDN KTOLRN.
6. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. В 2 ч. М.: Наука, 1987.
7. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск : Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2000.
8. Губайдуллин А.А. Волны в газожидкостных системах. Тюмень. Изд-во Тюменского гос. ун-та. 2008. 184 с.
9. 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. DOI 10.31857/S0040364420010081. EDN XJNXXH.
10. Neves, Diogo & Brito, Moises & Pires-Silva, Antonio & Fortes, Conceicao & Matos, Jorge Experimental Investigation of Air Bubble Curtain Effects on Water Wave Field. Defect and Diffusion Forum. 2022. 415. 81–99. 10.4028/p-9jm010.
11. Ali Kareem Hilo, Ji-Woo Hong, Ki-Seong Kim, Byoung-Kwon Ahn, Cheolsoo Park, Gun-Do Kim, Il-Sung Moon Experimental study on insertion loss of air bubble layer in freestream flow // Wave Motion, V. 123. 2023. p. 103227.
12. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Распространение возмущений давления в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. Физико-математические науки. 2015. Т. 157, № 1. С. 101–106. EDN TTMTWX.
13. Болдырева О.Ю., Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Кутушев А.Г. Численное исследование передачи ударно-волновой нагрузки экранируемой плоской стенке через слой порошкообразной среды и разделяющий их воздушный зазор // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 1. С. 132–142.
14. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Вахитова Н.К. Проявление сжимаемости несущей фазы при распространении волн в пузырьковой среде // ДАН СССР. 1989. Т. 304. № 5. С. 1077.
15. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.
16. Исакович М.А. Общая акустика / Уч. пособ. М.: Наука, Гл. редакция физико-математической лит, 1973 г. 496 с.

## EVOLUTION OF PRESSURE WAVES IN LIQUID CONTAINING A POROUS PARTITION SATURATED WITH A BUBBLE FLUID

I. K. Gimaltdinov<sup>a,\*</sup>, A. S. Rodionov<sup>a,\*\*\*</sup> and O. Yu. Valiakhmetova<sup>a,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Ufa Petroleum Technological State University, Ufa, Russia

\*e-mail: iljas\_g@mail.ru

\*\*e-mail: artrodionov@mail.ru

\*\*\*e-mail: v9174121007@gmail.com

**Abstract**—The distinctive features of pressure wave dynamics in the presence of a porous partition (layer) saturated with a bubbly fluid are considered. It is shown that, depending on the parameters of the gas mixture and the porous medium (volume gas content, bubble dispersion, and porosity), reflection of a wave pulse from the porous partition saturated with a bubbly mixture is similar to reflection from the free boundary or from the rigid wall.

**Keywords:** porous medium, bubbly fluid, waves, free boundary