

Том 21
Номер 2

eISSN 2658-5782

2026

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

электронный
научный журнал

MULTIPHASE
SYSTEMS

online
journal

<https://multiphasesystems.online>



Институт
механики
им. Р.Р. Мавлютова



Численное решение начально-граничной задачи о повторном воздействии ударного импульса на пузырьковую жидкость

А.С. Родионов✉, Э.Р. Закирова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Российская Федерация

E-mail: artrodionov@mail.ru

Аннотация. Начально-граничная задача об эволюции волнового импульса в ударной трубе, инициированного распадом разрыва, решена численно на основе метода контрольного объема. Так как опыты по изучению ударно-волновых импульсов проводят на установках, представляющих из себя ударные трубы, то расчетная область выбрана соответствующей подобным установкам. Моделируется процесс распада разрыва, когда из-за разницы давлений в камерах высокого и низкого давления происходит разрушение диафрагмы и формируется ударно-волновой импульс. В модели также присутствует область, соответствующая секции газожидкостной среды, где в рассматриваемом случае находится жидкость, насыщенная пузырьками. Камера низкого давления и секция газожидкостной среды оснащены датчиками давления. Сделана постановка задачи, включающая уравнение сохранения масс, импульсов и энергии. Постановка задачи записана для газовой фазы и пузырьковой жидкости. Построены эпюры для изучения пространственного распределения давления в описанной области. Рассчитаны данные, получаемые датчиками и построены осциллограммы давления. Рассмотрено изменение радиуса пузырьков от времени, выявлена связь между изменением радиуса пузырьков и резкими скачками давления в пузырьковой жидкости. Рассматривается случай повторного отражения ударно-волнового импульса от пузырьковой жидкости и увеличение его амплитуды в газожидкостной смеси. Выявлено увеличение амплитуды при повторном прохождении ударно-волнового импульса через пузырьковую жидкость. С помощью дискретного преобразования Фурье получен спектр импульса в пузырьковой жидкости. Проведено сравнение частотного спектра при первом и втором прохождении волны в пузырьковой жидкости. Выявлены частоты, которые вносят больший вклад в частотный спектр.

Ключевые слова: граничная задача; система уравнений в частных производных; ударная труба; распад разрыва; пузырьковая жидкость; численный метод; численные расчеты

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-11-00274, <https://rscf.ru/project/24-11-00274>

Цитирование: Родионов АС, Закирова ЭР. Численное решение начально-граничной задачи о повторном воздействии ударного импульса на пузырьковую жидкость. *Многофазные системы*. 2026;21(2):72–80.

Numerical solution of the initial boundary value problem of the repeated impact of a shock pulse on a bubbly liquid

A.S. Rodionov✉, E.R. Zakirova

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ufa State Petroleum Technological University”, Ufa, Russian Federation

E-mail: artrodionov@mail.ru

Abstract. The initial-boundary value problem of the evolution of a wave pulse in a shock tube initiated by discontinuity decay is solved numerically using the control volume method. Since experiments studying shock-wave pulses are conducted in shock tube setups, the computational domain is chosen to correspond to similar setups. The discontinuity decay process is modeled, where the pressure difference in the high- and low-pressure chambers causes the diaphragm to rupture and a shock-wave pulse to form. The model also includes a domain corresponding to the gas-liquid section, which in this case contains a bubble-saturated liquid. The low-pressure chamber and the gas-liquid section are equipped with pressure sensors. A problem formulation is developed, including the conservation equations for mass, momentum, and energy. The problem formulation is written for the gas phase and the bubbly liquid. Pressure diagrams are constructed to study the spatial pressure distribution in the described domain. The data obtained by the sensors are calculated, and pressure oscillograms are plotted. The change in bubble radius over time is examined, and a relationship between this change and sudden pressure surges in a bubbly liquid is identified. A case of repeated reflection of a shock wave pulse from a bubbly liquid and an increase in its amplitude in a gas-liquid mixture is considered. An increase in amplitude is observed upon repeated passage of the shock wave pulse through the bubbly

liquid. Using a discrete Fourier transform, the pulse spectrum in the bubbly liquid is obtained. The frequency spectrum for the first and second passages of the wave in the bubbly liquid is compared. Frequencies that contribute most to the frequency spectrum are identified.

Keywords: boundary value problem; system of partial differential equations; shock tube; fracture decay; bubbly fluid; numerical method; numerical calculations

Funding: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation no. 24-11-00274, <https://rscf.ru/project/24-11-00274/>

Cite: Rodionov AS, Zakirova ER. Numerical solution of the initial boundary value problem of the repeated impact of a shock pulse on a bubbly liquid. *Multiphase Systems*. 2026;21(2):72–80.

1. Введение

Интерес к изучению распространения волн в насыщенной пузырьками жидкостью связан с применением результатов исследований в области сейсмологии [1], при конструкции защитных сооружений, например, при проектировании пузырьковых завес, и использовании гидроразрыва пласта [2, 3]. Постановка подобных задач приводит к необходимости решения начально-граничных задач, состоящих из системы уравнений в частных производных.

Скорость ударной волны при распространении в пузырьковой жидкости определяется начальным газосодержанием, уменьшается при повышении газовой фазы пузырьковой среды [4] и давлением падающей волны (увеличивается с повышением амплитуды давления) [4]. Также на скорость оказывает влияние размер пузырьков, полидисперсность влияет на профиль волны.

Структура волны при этом может быть как монотонной, в случае малых газосодержаний и слабых волн, так и осцилляторной (пульсационной) — при высоких давлениях и концентрациях газа [4, 5].

Наличие химических реакций может приводить к усилению волны или детонации. Детонация возникает в случае пузырьковых сред с химически активной газовой фазой. Например, в [6] показана возможность интенсификации процесса образования гидратов за счет увеличения дробления пузырьков из-за роста амплитуды волны, обусловленного геометрией канала.

При образовании в жидкости сферического пузырькового кластера, который может быть возбужден ударной волной, данный кластер может выступать в качестве активной среды. Такая среда способна поглощать внешнее возмущение, усиливать его и переизлучать в виде мощного акустического импульса [7].

В [8] на основе системы уравнений двухфазного сжимаемого вязкого течения проведено двумерное численное моделирование проникновения ударной волны в воду с пузырьками воздуха и её последующего распространения в пузырьковой жидкости. Показано хорошее согласование с экспериментом при 2–3% содержании воздушных пузырьков, однако авторы отмечают, что при меньшей доле пузырьков наблюдаются заметные расхождения.

В работе [9] исследовано распространение слабо нелинейных волн давления в пузырьковой жидкости, в ходе чего было выведено уравнение Кортвега–де Вриза–Бюргерса (KdVB) учитывающее нелинейность,

диссипацию и дисперсию волн. В отличие от предыдущих исследований, данное уравнение учитывает взаимодействие пузырьков между собой.

В [10] представлено исследование распространения акустических волн в жидкостной среде, содержащей воздушные пузырьки, с применением численного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Проводится анализ воздействия газовых включений на акустические характеристики среды, включая дисперсионные свойства, процессы поглощения и нелинейные эффекты. Показано, что при уменьшении частоты звуковых волн влияние пузырьков на распространение волны минимально и ограничивается локальными возмущениями, а при увеличении частоты наблюдается значительное рассеяние акустической энергии, формирование сложной интерференционной структуры и локальное усиление акустического давления.

Разработаны математические модели [11] для описания распространения ударных волн в гетерогенных средах с пузырьками и динамики высокоскоростных потоков вскипающей жидкости при разгерметизации сосудов высокого давления. В исследовании термодинамических характеристик среды использовано уравнение состояния воды и пара на основе экспериментальных данных по сжимаемости.

Ударные волны могут распространяться в пористых средах, насыщенных пузырьковой жидкостью, например, в [12] численно решена начальная краевая задача о воздействии ударного импульса, падающего из газа в порошкообразную среду, насыщенную газожидкостной смесью. Установлено, что в порошкообразной среде, заполненной газожидкостной смесью, основной вклад в общее напряжение вносит давление поровой газожидкостной смеси.

Теоретическая модель, развитая в рамках континуального подхода и позволяющая описывать динамику акустических волн в полидисперсной вязкоупругой пузырьковой среде с учётом межфазного теплообмена, представлена в [13]. Показано, что учёт упругости несущей фазы приводит к сдвигу пиковых значений кривых фазовой скорости и коэффициента затухания в сторону более высоких частот по сравнению с моделью, не учитывающей упругость.

Авторами [14] предложен новый подход, позволяющий координировать изменение давления в жидкости с колебаниями пузырька и использовать нелинейный

резонанс при неперриодическом воздействии внешнего поля давления умеренной амплитуды. В ходе проведения численного анализа показано, что с уменьшением радиуса пузырьков отклик пузырьковой смеси в режиме резонансного возбуждения усиливается. Таким образом, метод позволяет достигать экстремально высоких давлений и температур газа в пузырьках, что качественно подтверждается профилями давления, температуры и радиуса пузырьков.

Подобные задачи часто решаются с применением различных численных методов. При описании распространения ударных волн или волн сжатия в пузырьковой жидкости при одномерном приближении [15] применяется метод Годунова, являющийся вариантом метода контрольного объема. Для многомерных задач — методы конечных объемов или прямое численное моделирование [16]. Прямое численное моделирование применяется для детального изучения межфазных взаимодействий.

В данной работе численно исследуется эволюция волнового импульса в ударной трубе и в слое пузырьковой жидкости.

2. Постановка начально-граничной задачи

Опыты по изучению динамики УВИ проводят в установке «Ударная труба» [17], поэтому задачу о повторном отражении импульса от слоя пузырьковой жидкости будем изучать для схемы ударной трубы приведенной на рис. 1. Ударная труба включает камеру высокого давления (КВД) в области $0 \leq x \leq L_h$, камеру низкого давления (КНД) для $L_h < x \leq L_s$ и секцию газожидкостной среды (СГС) — $L_s < x \leq L_w$. В начальный момент вре-

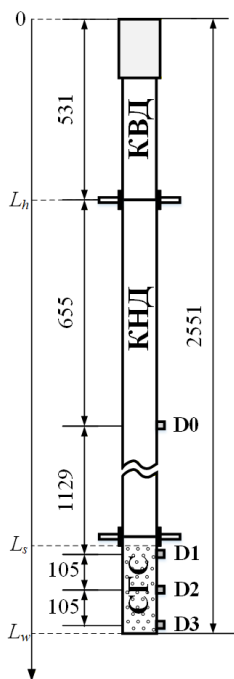


Рис. 1. Ударная труба, оснащенная секцией газожидкостной среды и датчиками давления D0–D3

мени $t=0$ в КВД ударной трубы имеется сжатый газ (воздух); КНД заполнена невозмущенным атмосферным газом и слоем жидкости, насыщенной пузырьками, находящейся в секции газожидкостной среды СГС. В КНД и СГС находятся датчики, регистрирующие давление газа (D0 — 1186 мм) и жидкости (D1 — 2315 мм, D2 — 2420 мм, D3 — 2525 мм). В момент времени $t = 0$ диафрагма между КВД и КНД «разрушается», в КНД устремляется поток воздуха образуя ударно-волновой импульс (УВИ). Требуется изучить динамику отражения и прохождения УВИ в трубе, содержащей слой пузырьковой жидкости в СГС.

Описанная выше проблема сводится к начально-граничной задаче, приведенной ниже. Постановка задачи включает общепринятые допущения, используемые при описании газовой фазы и пузырьковых жидкостей [12, 18].

В области $0 \leq x \leq L_h$, соответствующей газовой фазе, приняты следующие уравнения:

$$\frac{\partial \rho_g^0}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g^0 v_g}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_g^0 v_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g^0 v_g^2}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_g^0 u_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g^0 u_g v_g}{\partial x} + p \frac{\partial v_g}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Здесь p_g — давление в газе; v_g — скорость газа; u_g — удельная внутренняя энергия.

Так как газ считается калорически совершенным, то использованы следующие уравнения состояния и энергии:

$$p = \rho_g^0 R T_g, \quad u_g = c_{vg} T_g, \quad (4)$$

где c_{vg} — теплоемкость при постоянном объеме газа; R — газовая постоянная.

Уравнения, описывающие динамику волны в пузырьковой жидкости $L_s < x \leq L_w$, имеют вид:

$$\frac{\partial \rho_{l+g}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{l+g} v_l}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial n_b}{\partial t} + \frac{\partial n_b v_l}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_{l+g} v_l}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{l+g} v_l^2}{\partial x} + \alpha_g \frac{\partial p_l}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

В (5) и (6) приняты обозначения, аналогичные газовой фазе, индекс $l + g$ указывает, что величина взята для пузырьковой жидкости; α_g — объемное содержание газа; n_b — концентрация пузырьков в жидкости.

Вспользуемся уравнением Рэля–Ламба для определения составляющей w_R радиальной скорости $w = w_R + w_A$

$$\rho_{l0}^0 \left(a w_R + \frac{3}{2} w_R^2 \right) = p_g - p_l - \frac{2\Sigma}{a} - 4\mu_l \frac{w_R}{a}, \quad (7)$$

$$w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_{l0}^0 C_l x_{g0}^{1/3}}. \quad (8)$$

Уравнение состояния для жидкости показано ниже:

$$p_l = p_0 + C_l^2(\rho_l^0 - \rho_{l0}^0),$$

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g w}{a} - \frac{3(\gamma - 1)}{a} q. \tag{9}$$

Здесь $q = \lambda_g \text{Nu} (T_g - T_0) / 2a$ определяет интенсивность межфазного теплообмена; C_l — скорость звука в «чистой» жидкости; x_{g0} — доля газа в пузырьковой жидкости; ρ_g^0 — истинная плотность газа; ρ_l^0 — истинная плотность жидкости; μ_l — динамическая вязкость жидкости; a — радиус пузырьков.

Число Нуссельта рассчитано по формуле

$$\text{Nu} = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}}, & \text{Pe} \geq 100 \\ 10, & \text{Pe} < 100 \end{cases}$$

где число Пекле

$$\text{Pe} = \frac{12(\gamma - 1)T_0 a |w|}{|T_g - T_0| \kappa_g};$$

κ_g — коэффициент температуропроводности; T_g — температура.

Итак, начально-граничную задачу можно сформулировать следующим образом: в начальный момент времени $t = 0$ в области $0 \leq x \leq L_h$ имеется сжатый газ (воздух); пространство $L_h < x \leq L_s$ последовательно заполнено невозмущенным атмосферным газом, а $L_s < x \leq L_w$ — пузырьковой жидкостью. Требуется изучить динамику отражения и прохождения ударных импульсов, образующихся в ударной трубе, при взаимодействии со слоем пузырьковой жидкости при $t > 0$, т.е. найти функции p_g, ρ_g, v_g, T_g , удовлетворяющие системе уравнений (1)–(9) и начальным условиям.

Начальные и граничные условия сформулированной задачи, схематично изображенной на рис. 1, имеют следующий вид:

$$p_g = p_{g1}, \quad \rho_g^0 = \rho_{g1}^0, \quad T_g = T_0, \\ v_g = 0, \quad \alpha_g = 1, \quad (0 \leq x \leq L_h);$$

$$p_g = p_0, \quad \rho_g^0 = \rho_{g0}^0, \quad T_g = T_0, \\ v_g = 0, \quad \alpha_g = 1, \quad (L_h < x \leq L_s); \tag{10}$$

$$p_g = p_0, \quad \rho_g^0 = \rho_{g0}^0, \quad T_g = T_0, \quad \alpha_g = \alpha_{g0}, \\ \rho_i = \alpha_i \rho_i^0, \quad \rho_{g1} = \rho_l + \rho_g, \quad i = (l, g), \\ \alpha_{g0} = \frac{4}{3} \pi a^3 n_b, \quad \alpha_l + \alpha_g = 1, \quad (L_s < x \leq L_w).$$

Нижними индексами 0 отмечены невозмущенные параметры системы, на торцах трубы задаются в виде условия непротекания

$$v_g = 0, \quad v_l = 0, \quad v_s = 0 \quad (x = 0, x = L_w). \tag{11}$$

Задача (1)–(11) решается численно, с помощью метода контрольного объема [19]. Расчеты выполнены при следующих значениях термодинамических параметров газовой и дисперсной фаз: $p_0 = 0.101$ МПа,

$T_0 = 290$ К, $\rho_{g0}^0 = 1.19$ кг/м³, $\gamma = 1.4$, $c_{vg} = 720$ м²/(с²·К), $\mu_g = 1.81$ кг/(м·с), $a = 1$ мм, $\rho_{l0}^0 = 1000$ кг/м³, $C_l = 1500$ м/с, $\rho_{g0}^0 = 1.29$ кг/м³, $\lambda_g = 0.0258$ Вт/(м·К), $c_g = 716$ Дж/(кг·°С), $\Delta x = 1$ мм, $\Delta t = 0.1$ мкс.

В работе использовано преобразование Фурье основанное на представлении сигнала в виде суммы гармонических колебаний с разными частотами, амплитудами и фазами, что позволяет провести исследование вклада разных частот в общий сигнал. Поэтому по результатам расчетов сделан анализ частотного спектра, полученного с помощью дискретного преобразования Фурье

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n k e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}.$$

Здесь X_k — спектр сигнала; x_n — значения сигнала, полученного по результатам моделирования, в дискретных временных точках n ; k — номер частотного компонента; N — количество компонент разложения.

3. Численные расчеты

Расчетные профили давления при отражении для первого прохождения УВИ через жидкость, насыщенную пузырьками, представлены на рис. 2. УВИ, образованный в результате распада разрыва, обладает амплитудой 15 кПа к моменту времени $t = 0.4$ мс. При этом, в области КНД распространяется ударная волна, а в КВД — волна разрежения. Скорость ударной волны составляет примерно 360 м/с. Отражение от пузырьковой жидкости приводит к увеличению амплитуды отраженной волны из-за разницы акустических сопротивлений в два раза до 30 кПа ($t = 4.9$ мс). В область пузырьковой жидкости ($L_s < x \leq L_w$) УВИ проходит с увеличенной амплитудой, происходит растяжение переднего фронта ($t = 5.3$ мс), на профиле волны появляются колебания ($t = 6.7$ мс), обусловленные радиальной инерцией пузырьковой жидкости [9].

Профили давления при переотражении (второе прохождение УВИ через пузырьковую жидкость) представлены на рис. 3. УВИ, отраженный от верхнего торца трубы, движется в направлении пузырьковой жидкости со скоростью также около 365 м/с. Как видно из анализа эпюры в момент времени $t = 0.4$ мс, при отражении от пузырьковой жидкости происходит аномальное увеличение амплитуды до 60 кПа. Дальнейшее прохождение УВИ через слой пузырьковой жидкости приводит к появлению колебаний и увеличению амплитуды до 80 кПа в момент времени $t = 0.4$ мс. Это указывает на наложение падающей волны и волны, многократно отражающейся в области $L_s < x \leq L_w$. Также может оказывать влияние изменения параметров пузырьковой жидкости по сравнению с первым прохождением УВИ, например, изменение диаметра пузырьков.

Для анализа распределения давления УВИ по времени, рассмотрим осциллограммы для датчиков D0–D3 (рис. 4), датчик D0 показывает давление в газе, а датчики D1–D3 — в пузырьковой жидкости. Эпюра 1 соответствует падающему импульсу, 1r — отраженному от

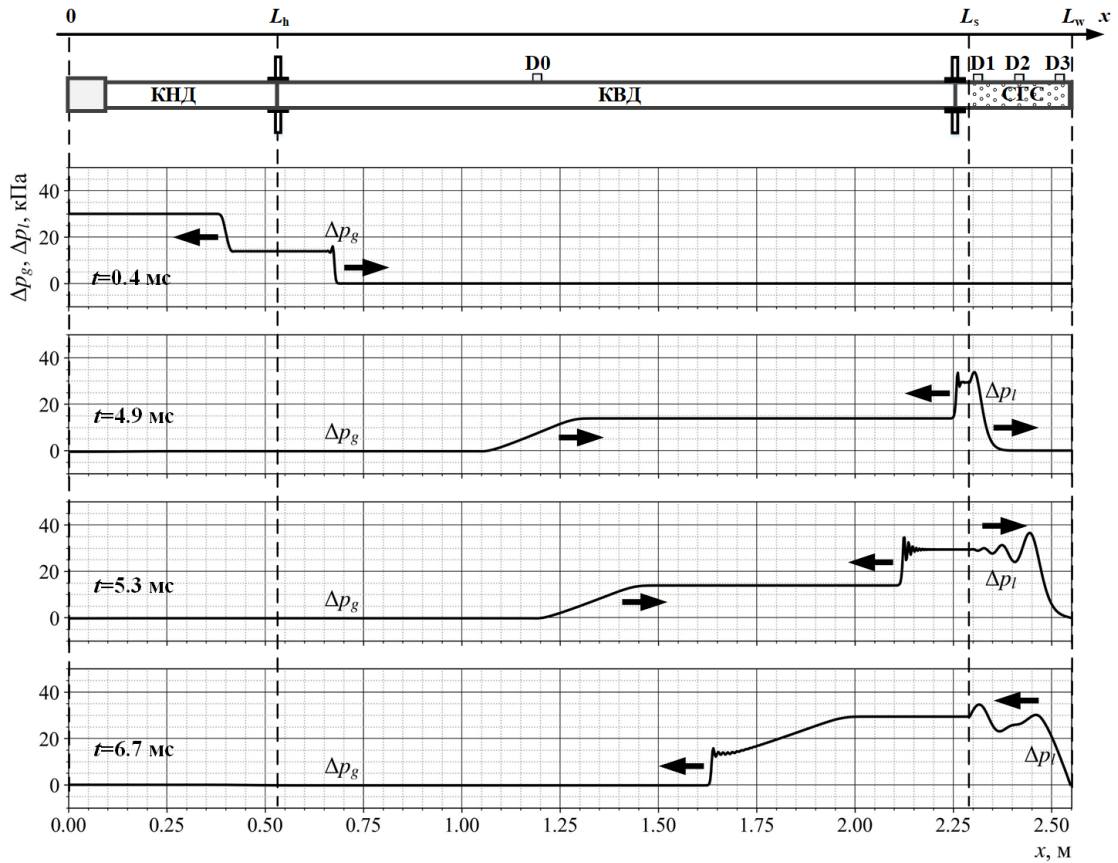


Рис. 2. Схема ударной трубы и эпюры ударно-волнового импульса при первом прохождении через пузырьковую жидкость в разные моменты времени

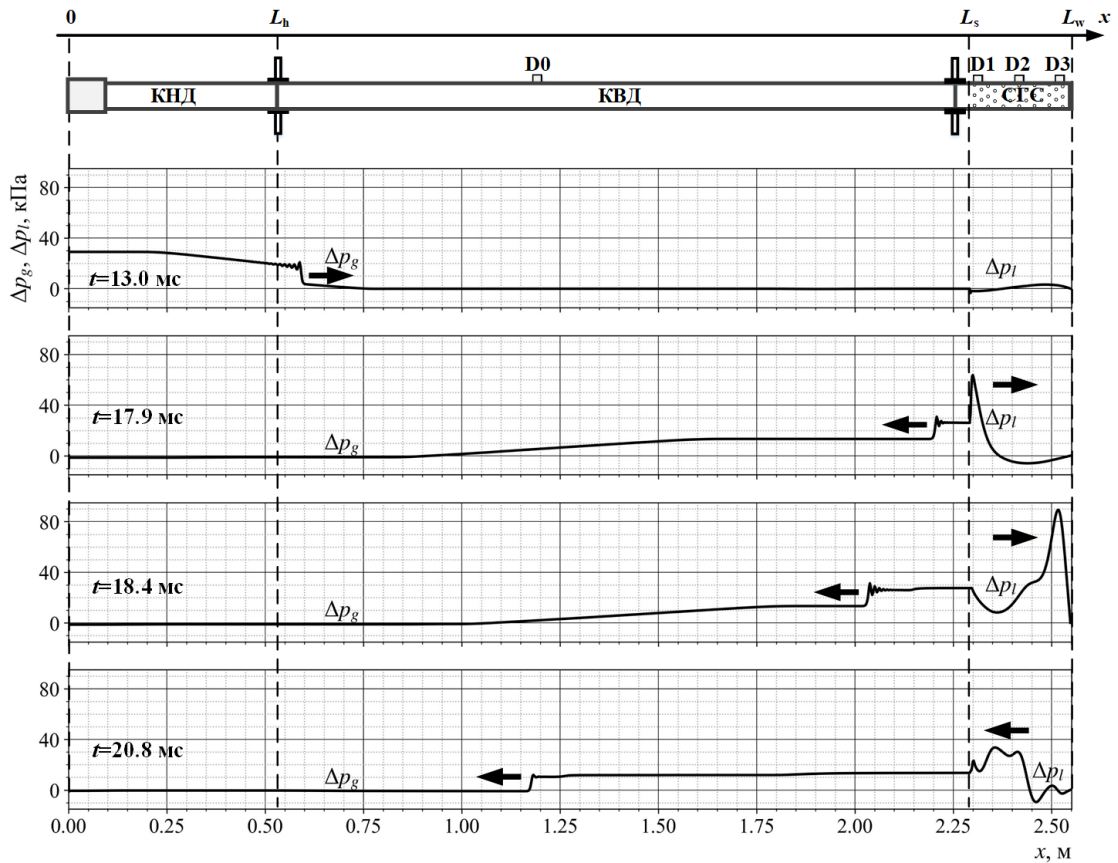


Рис. 3. То же что и на рис. 2, но для переотраженного импульса

пузырьковой жидкости импульсу. Амплитуда импульса около 15 кПа, протяженность около 3 мс, передний фронт импульса имеет крутую форму, задний — плавную. Также из осциллограммы для газа видно, что последующие отраженные и переотраженные импульсы не отличаются от падающего (эпюра 1). Прохождение УВИ в пузырьковую жидкость сопровождается двухкратным увеличением амплитуды (до 30 кПа, см. датчик D1), что было показано и на рис. 2.

Из показаний датчиков D1–D3 следует, что амплитуда импульса, прошедшего в пузырьковую жидкость уменьшается с 30 (1a) до 25 кПа (1c). Дошедший до нижнего торца трубы импульс отражается и циркулирует в области $L_s \leq x \leq L_w$, также происходит его наложение с «давящим» на жидкость падающим импульсом. Циркулирующий в $L_s \leq x \leq L_w$ импульс остается и когда падающий импульс полностью отразится от жидкости и будет двигаться в обратном направлении, об этом свидетельствует наличие колебаний между 1b и 2b.

Повторное прохождение УВИ через пузырьковую жидкость приводит, как уже было упомянуто, к аномальному увеличению амплитуды. На участке осциллограммы 2b для датчика D2 видно, что максимальный скачок амплитуды равен примерно 105 кПа, что превышает исходный падающий импульс (1 для D0) в 7 раз. Отметим, что эти скачки амплитуды очень кратковременные, протяженность подобных пиков не больше 0.5 мс.

На рис. 5 показаны осциллограммы давления и радиуса пузырьков для датчиков, расположенных в жидкости (D1–D3). Сравнивая осциллограммы для давления и радиусов пузырьков, можно сделать вывод, что моменты появления пиков связаны со сжатием пузырьков (соответственно и с уменьшением газосодержания в эти моменты). Следовательно, увеличение амплитуды может быть объяснено изменением затухания волны из-за меньшего объема пузырьков, с последующим наложением на импульс, переотражающийся в СГС.

Рассмотрим сравнение частотного спектра сигнала при первом и втором прохождении УВИ каждого датчика (рис. 6). Для датчика D0 выбраны импульсы 1 протяженностью которого задана временем $0 \leq t < 6.2$ мс и $1r - 6.2 \leq t < 12.4$ мс (рис. 4). На датчиках D1–D3 в качестве первого прохождения взяты импульсы 1a, 1b, 1c протяженностью $0 \leq t < 12.5$ мс, в качестве второго 2a, 2b, 2c для времен $12.5 \leq t < 25.0$ мс.

Как уже было сказано, осциллограммы для падающего и отраженных импульсов практически не меняются, поэтому их спектры тоже почти полностью идентичны (диаграмма для D0 на рис. 5). В спектре сигнала на D0 основной вклад вносит частота 150 Гц, также значительную мощность имеет частота 485 Гц.

По частотным спектрам сигнала на D1 можно сделать вывод, что при втором прохождении происходит заметное смещение частот спектра в область средних

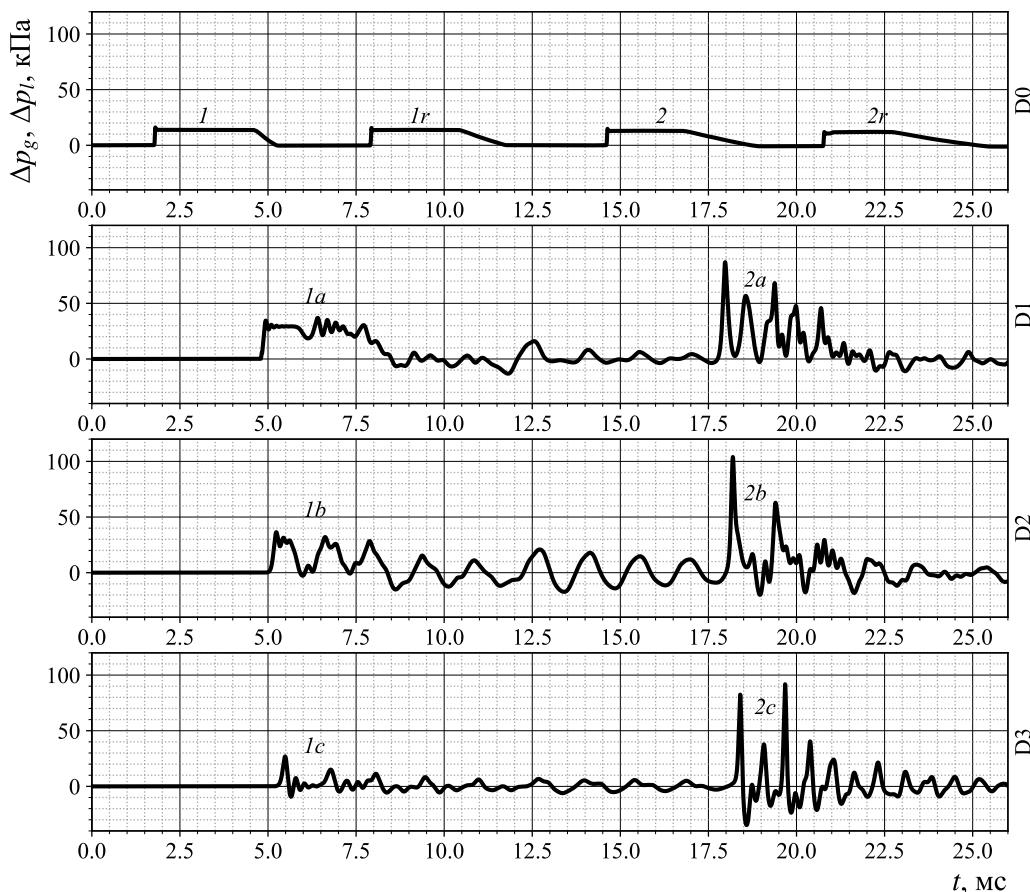


Рис. 4. Осциллограммы давления для датчиков D0–D3, параметры как на рис. 1

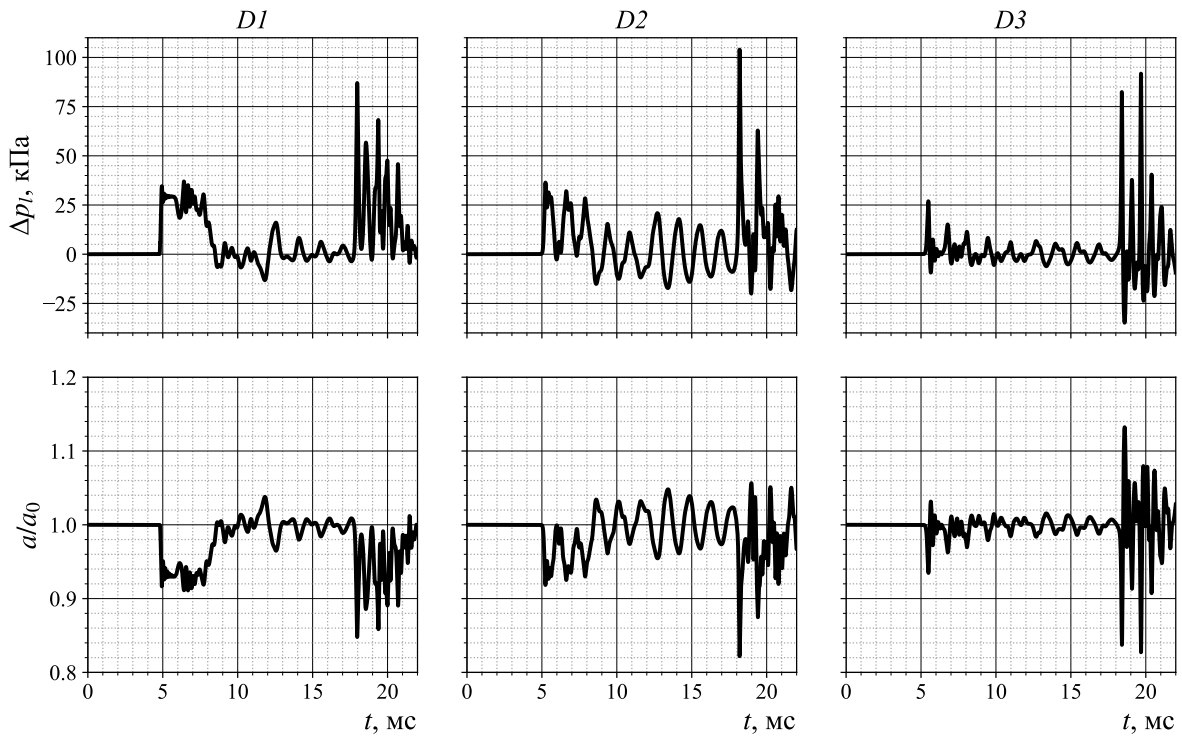


Рис. 5. Осциллограммы давления, радиуса пузырьков и объемного содержания газа для датчиков D1–D3

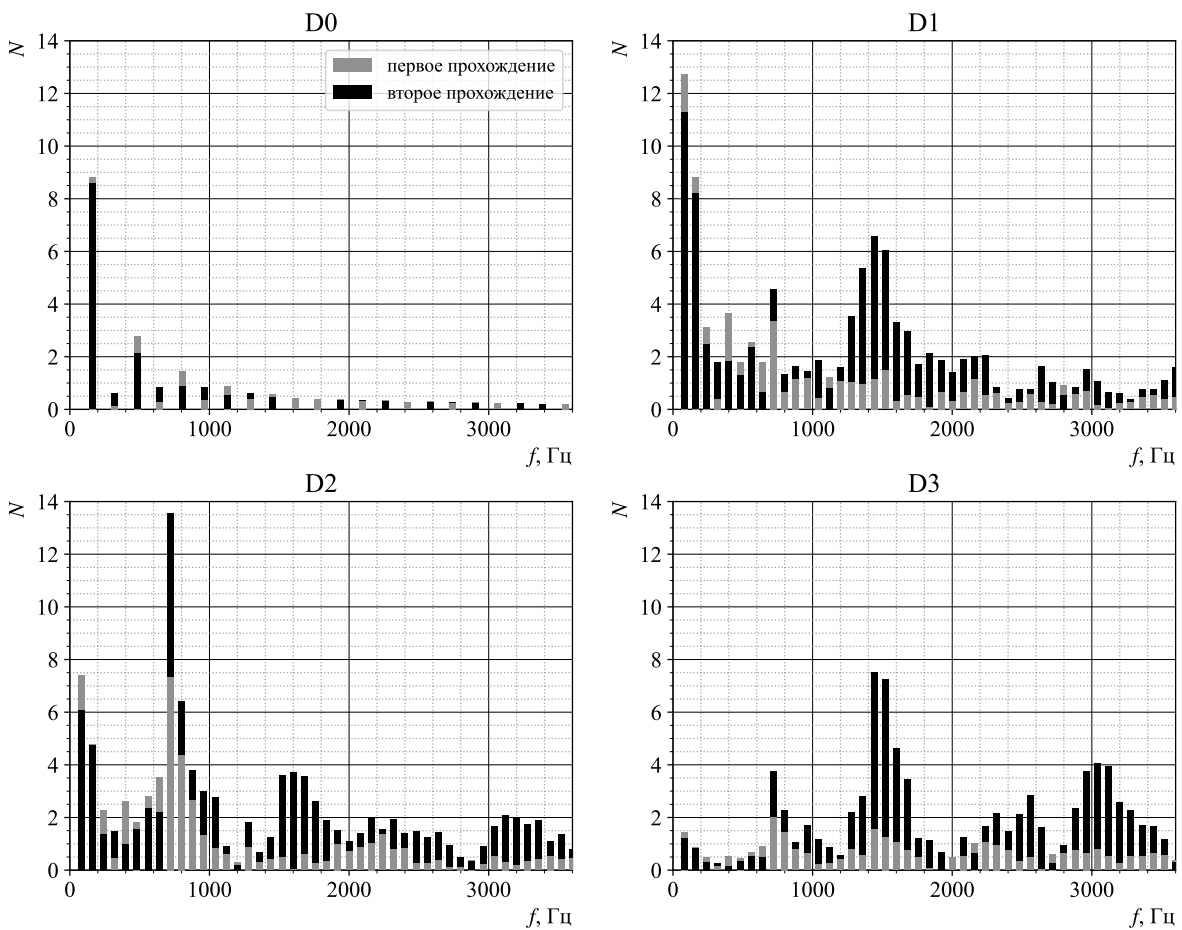


Рис. 6. Частотный спектр для первого и второго прохождения импульса на датчиках D0-D3

частот, помимо частот 78 и 165 Гц имеющих большую мощность в обоих случаях, можно выделить диапазон 1300–1700 Гц, где происходит пятикратное увеличение вклада частот в общую картину.

На диаграммах для D2 и D3 также можно сделать вывод об усилении колебаний в области средних и высоких частот. На D2 примечательной является частота 710 Гц, где происходит самый большой скачок амплитуды, что соответствует двукратному увеличению мощности на этой частоте. На D3 также следует отметить увеличение амплитуды высокочастотных колебаний. Этот эффект соответствует описанным ранее преотражениями УВИ в области пузырьковой жидкости. На всех диаграммах, кроме D3, частоты выше 6000 Гц имеют очень малую мощность.

Частичное смещение частот к значениям 3000–4000 Гц может свидетельствовать о проявлении резонансной частоты пузырьков (частота Минаерта). Результаты, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о сжатии пузырьков до 12%, таким образом, частота Минаерта при параметрах расчета может варьироваться от 3260 до 3700 Гц, что объясняет наличие заметной мощности в указанном диапазоне на рис. 6.

4. Заключение

Таким образом, в статье исследована начально-граничная задача (1)–(11) о воздействии ударно-волнового импульса на пузырьковую жидкость и возбуждения в ней волны давления. С помощью метода контрольного объема установлено следующее утверждение. Повторное прохождение ударно-волнового импульса через слой жидкости, насыщенной пузырьками, может вызвать резкое кратковременное увеличение амплитуды давления протяженностью до 0.5 мс. Рост амплитуды может составлять более семи раз по сравнению с падающим импульсом.

В частотном спектре сигнала при повторном прохождении появляются более высокие частоты (до 6000 Гц) по сравнению с первым прохождением, где основными являются частоты до 1000 Гц.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов / Author Contributions

Концептуализация / Conceptualization: ACP (ASR); Методология / Methodology: ACP (ASR); Программное обеспечение / Software: ACP (ASR); Создание черновика рукописи / Writing – original draft: ACP (ASR), ЭРЗ (ERZ); Создание рукописи и ее редактирование / Writing – review & editing: ACP (ASR), ЭРЗ (ERZ); Визуализация / Visualization: ACP (ASR), ЭРЗ (ERZ);

Список литературы / References

- [1] Зайцев ВЮ, Колпаков АВ, Назаров ВЕ. Детектирование акустических импульсов в речном песке. Эксперимент. *Акустический журнал*. 1999;45(2):235–241. https://www.akzh.ru/pdf/1999_2_235-241.pdf
- [2] Дучков АД, Дучков АА, Дугаров ГА, Дробчик АН. Скорости ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду, лёд или гидраты метана и тетрагидрофурана (лабораторные измерения). *Доклады Академии наук*. 2018;478(1):94–99. <https://doi.org/10.7868/S086956521801019X>
- [3] Gubaidullin AA, Pyatkova AV. Specificities of Heat Transfer in a Vibrating Cylindrical Cavity at the Transition of the Exposure Frequency Through Resonance. *Lobachevskii J. Math.* 2022;43:1069–1075. <https://doi.org/10.1134/S1995080222080121>
- [4] Сычев АИ. Сильные ударные волны в пузырьковых средах. *Журнал технической физики*. 2010;80(6):31–35. <https://elibrary.ru/rctszx>
- [5] Sychev AI. Intense shock waves in bubble media. *Technical Physics*. 2010;55(6):783–788. <https://doi.org/10.1134/S1063784210060058>
- [6] Суров ВС. К расчёту ударно-волновых процессов в пузырьковых жидкостях. *Журнал технической физики*. 1998;68(11):12–19. <https://elibrary.ru/rynyub>
- [7] Surov VS. Calculating shock-wave processes in bubbly liquids. *Tech. Phys.* 1998;43:1280–1287. <https://doi.org/10.1134/1.1259184>
- [8] Галимзянов МН, Лепихин СА, Чиглинцев ИА. Распространение нелинейных волн в каналах переменного сечения, сопровождаемое образованием гидрата газа. *Вестн. СамГУ. Естественнонаучн. сер.* 2012;(3/1(94)):103–115. <https://elibrary.ru/pjfbzt>
- [9] Galimzyanov MN, Lepikhin SA, Chiglintsev IA. Propagation of Nonlinear Waves in Channels With Variable Cross-Section, Led to the Gas Hydrate Formation. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*. 2012;(3/1(94)):103–115. (in Russian)
- [10] Кедринский ВК, Шокин ЮИ, Вшивков ВА, Дудникова ГИ, Лазарева ГГ. Генерация ударных волн в жидкости сферическими пузырьковыми кластерами. *Доклады Академии наук*. 2001;381(6):773–776. <https://elibrary.ru/mjuaby>
- [11] Kedrinskiĭ VK, Shokin YuI, Vshivkov VA, Dudnikova GI, Lazareva GG. Generation of shock waves by spherical bubble clusters in a liquid. *Doklady Physics*. 2001;46(12):856–859. <https://doi.org/10.1134/1.1435529>
- [12] Авдеев КА, Аксенов ВС, Борисов АА, Тухватуллина РР, Фролов СМ, Фролов ФС. Численное моделирование воздействия ударной волны на пузырьковую среду. *Горение и взрыв*. 2015;8(2):45–56. <https://elibrary.ru/vqzwlj>
- [13] Avdeyev KA, Aksenov VS, Borisov AA, Tuxvatullina RR, Frolov SM, Frolov FS. Numerical Modeling of the Impact of Shockwave on Bubbly Environment. *Combustion and explosion – Gorenĭe i vzryv*. 2015;8(2):45–56. (in Russian)
- [14] Hemmi K, Kanagawa T. Impact of a bubble-bubble interaction on nonlinear acoustic properties of pressure waves in a non-dilute bubbly liquid. *Results in Engineering*. 2025;25:103752. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103752>
- [15] Пригожих ВА, Дамдинов ББ. Моделирование распространения звука в жидкости с пузырьками воздуха. *Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика*. 2025;(1):49–55. <https://doi.org/10.18101/2306-2363-2025-1-49-55>
- [16] Prigozhikh VA, Damdinov BB. Modeling the Propagation of Sound in a Liquid Containing Air Bubbles. *BSU bulletin. Chemistry. Physics*. 2025;(1):49–55. (in Russian)
- [17] Галимзянов МН, Болотнова РХ, Агишева УО, Бузина ВА. Гидродинамика ударных волн и вскипающих потоков в пузырьковых жидкостях. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011;(4--3):700–701. <https://elibrary.ru/rufbmj>
- [18] Galimzyanov MN, Bolotnova RKh, Agisheva UO, Buzina VA. Hydrodynamics of Shock Waves and Boiling Flows in Bubbly Liquids. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011;(4--3):700–701. (in Russian)
- [19] Gimaitdinov IK, Rodionov AS, Valiakhmetova OYu. Initial-boundary Value Problem of the Transfer of a Shock Impulse Falling from a Gas into a Powdered Medium Saturated with a Gas-Liquid Mixture. *Lobachevskii J. Math.* 2025;46:3298–3306. <https://doi.org/10.1134/S1995080225608793>
- [20] Губайдуллин ДА, Никифоров АА. Акустические волны в вязкоупругих пузырьковых средах. *Теплофизика высоких температур*. 2019;57(1):150–153. <https://doi.org/10.1134/S0040364419010290>
- [21] Gubaidullin DA, Nikiforov AA. Acoustic Waves in Viscoelastic Bubbly Media. *High Temperature*. 2019;57(1):133–136. <https://doi.org/10.1134/S0018151X1806010X>
- [22] Нигматулин РИ, Губайдуллин АА, Берегова ОШ. Метод сверхсильного резонансного сжатия пузырьковой жидкости умеренным непериодическим воздействием. *Доклады Академии наук*. 2000;374(4):489–492. <https://elibrary.ru/xbmgh>
- [23] Nigmatulin RI, Gubaidullin AA, Beregova OSh. Method of resonance overcompression in a bubble liquid by a moderate aperiodic action. *Doklady Physics*. 2000;45(10):539–542. <https://doi.org/10.1134/1.1327326>
- [24] Губин СА, Сверчков АМ, Сумской СИ. Моделирование генерации и распространения ударных волн и волн сжатия в пузырьковых средах. *Горение и взрыв*. 2021;14(1):47–58. <https://doi.org/10.30826/CE21140106>
- [25] Waves in Sand Samples Containing Water, Ice, or Methane and Tetrahydrofuran Hydrates (Laboratory Measurements). *Dokl. Earth. Sc.* 2018;478:74–78 (2018). <https://doi.org/10.1134/S1028334X18010014>

- Gubin SA, Sverchkov AM, Sumskey SI. Simulation of Generation and Propagation of Shock/compression Waves in Bubbly Media. *Combustion and explosion – Gorenie i vzryv*. 2021;14(1):47–58. (in Russian)
- [16] Delale C, Nas S, Tryggvason G. Direct numerical simulations of shock propagation in bubbly liquids. *Physics of Fluids*. 2005;17:121705. <https://doi.org/10.1063/1.2158431>
- [17] Ахметов АТ, Гималтдинов ИК, Азаматов МА, Мухаметзянов АФ, Богданов ДР. Зондирование водогазонасыщенных насыпных сред преотраженными волнами непосредственно после воздействия ударной волны. *Письма в Журнал технической физики*. 2022;48(1):23–26. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.01.51874.18834>
- Akhmetov AT, Gimaltidinov IK, Azamatov MA, Mukhametzyanov AF, Bogdanov DR. Sounding of Water-Gas-Saturated Bulk Media by Rereflected Waves Immediately after the Impact of a Shock Wave. *Technical Physics Letters*. 2022;48:97–102. <https://doi.org/10.1134/s1063785022040022>
- [18] Нигматулин РИ. Динамика многофазных сред. Часть 1. М.: Наука; 1987. 464 с.
- Nigmatulin RI. Dynamics of Multiphase Media. Vol. 1. Hemisphere, N.Y.; 1990. 532 p.
- [19] Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат. 1984; 152 с.
- Patankar SV. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere. 1980; 214 p.

Сведения об авторах / Information about the Authors

Артем Сергеевич Родионов

кандидат физ.-мат. наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический
университет», Уфа, Российская Федерация

Artem Sergeevich Rodionov

Ph.D. (Phys. & Math.), Assist. Prof.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education “Ufa State Petroleum Technological University”

artrodionov@mail.ru

ORCID: [0009-0007-0425-5130](https://orcid.org/0009-0007-0425-5130)

Эльнора Расимовна Закирова

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический
университет», Уфа, Российская Федерация

Elnara Rasimovna Zakirova

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education “Ufa State Petroleum Technological University”

elnara.zakirova@list.ru

ORCID: [0009-0001-2098-4276](https://orcid.org/0009-0001-2098-4276)