

ISSN: 2658–5782

Номер 1

2023

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Исследование динамики волн давления в канале со сферическим пузырьковым кластером

Фаттахов С.Р.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Особенности распространения волн в пузырьковой жидкости связаны с совокупным взаимодействием нелинейных, дисперсионных и диссипативных эффектов. В жидкости с пузырьками свойства практически несжимаемой жидкости, являющейся несущей фазой, кардинально меняются при небольшом по объему (тем более по массе) добавлении газа (пузырьков), являющегося дисперсной фазой. Особенность пузырьковых жидкостей обусловлена их высокой статической сжимаемостью при сохранении высокой плотности, близкой к плотности жидкости, что в свою очередь приводит к малой равновесной скорости звука. В настоящей работе изучены двумерные осесимметричные волновые возмущения в канале с водой, содержащей сферический кластер, заполненный водовоздушной пузырьковой смесью и расположенный у одной из торцевых границ. По результатам численных расчетов проанализирована зависимость максимальной амплитуды давления, формирующейся в канале, от геометрических параметров кластера. Установлено, что наличие приторцевого пузырькового кластера может существенно как увеличить, так и уменьшить воздействие падающего на стенку волнового сигнала в зависимости от подбора размеров кластера и его характеристик.

Ключевые слова: цилиндрический канал, пузырьковый кластер, пузырьковая жидкость, волна давления, сферический пузырьковый кластер

1. Введение

Интересной особенностью пузырьковой жидкости в динамических процессах является проявление инерции жидкости при изменении объема смеси за счет сжатия или расширения пузырьков [1]. К настоящему времени одномерные волны в пузырьковой жидкости хорошо изучены ([1, 2]) и на данный момент активно исследуются двумерные волны. Одной из интереснейших задач волновой динамики пузырьковой жидкости, в которой ярко проявляются многомерные эффекты, является взаимодействие ударной волны с пузырьковым кластером в жидкости.

В [3] проведены исследования по воздействию на пристеночную сферическую пузырьковую заве-

су волновым сигналом в виде «ступенька». Показано, что взаимодействие волны с кластером в жидкости приводит к генерации уединенной волны давления с амплитудой, значительно превышающей амплитуду ударной волны. Объемное содержание пузырьков в завесе бралось равным $\alpha_g = 0.01$. Из-за существенных изменений свойств пузырьковой жидкости при различных объемных содержаниях пузырьков (разность скорости распространения волны, сжимаемости среды и т.д.) возник вопрос о проведении исследований при других значениях начального объемного содержания пузырьков в завесе α_g . Настоящая работа является продолжением этих исследований и в ней рассмотрен диапазон объемных содержаний α_g от 0.001 до 0.05.

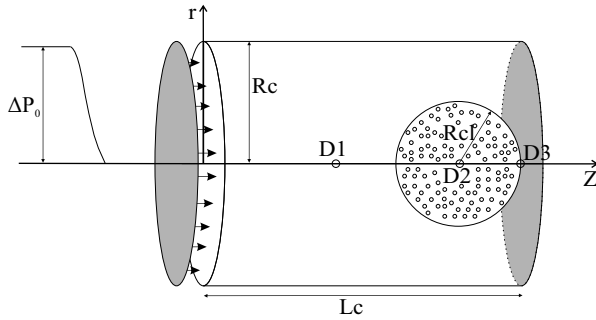


Рис. 1. Схема расчетной области, где R_{cl} – характерный радиус пузырьковой области, R_c – радиус канала, L_c – длина канала, ΔP_0 – амплитуда волны давления, D1–D3 – датчики давления

2. Постановка задачи и основные уравнения

Пусть в канале, заполненном жидкостью, находится прилегающая к одному из торцевых границ канала пузырьковая зона в форме сферы (рис. 1). Рассмотрим двумерные волновые возмущения. Такая ситуация может реализоваться, например, при воздействии на систему граничным давлением $p = p^0(r, t)$ при $z = z_0$. В настоящей работе рассмотрен случай, когда волновое движение в канале инициируется мгновенным повышением давления на границе $z = 0$ от равновесного p_0 до некоторого амплитудного значения Δp_{l0} и поддерживается все время расчета. Требуется определить динамику волнового процесса в канале при $t > 0$.

Для описания волнового движения запишем систему макроскопических уравнений масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках в приближении цилиндрической симметрии [1]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{v_r}{r} + \rho_i \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= 0 \quad (i = l, g), \\ \frac{dn}{dt} + n \frac{v_r}{r} + n \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= 0, \\ \rho \frac{dv_r}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial r} = 0, \quad \rho \frac{dv_z}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial z} &= 0, \\ \frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a} q, \quad w = \frac{da}{dt}, \\ \left(\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_r \frac{\partial}{\partial r} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right), \\ \alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi n a^3, \\ \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i, \quad \rho = \rho_g + \rho_l, \end{aligned}$$

где a – радиус пузырьков; γ – показатель адиабаты для газа; t – время; p_i – давления фаз; ρ_i^0 – ис-

тинные плотности фаз; α_i – объемные содержания фаз; q – интенсивность теплообмена; n – число пузырьков в единице объема; w – радиальная скорость пузырьков; v_r, v_z – радиальная и осевая составляющие скорости. Нижними индексами $i = l, g$ отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

При описании радиального движения в соответствии с уточнением, предложенным в [4], будем полагать, что $w = w_R + w_A$, где w_R определяется из уравнения Рейля–Ламба, а w_A – из решения задачи о сферической разгрузке на сфере радиуса a в несущей жидкости в акустическом приближении:

$$a \frac{dw_R}{dt} + \frac{3}{2} w_R^2 + 4\nu_l \frac{w_R}{a} = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0}, \quad w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}},$$

где ν_l – вязкость жидкости; C_l – скорость звука в «чистой» жидкости.

Будем полагать, что жидкость является линейно сжимаемой, а газ – calorически совершенным:

$$p_l = p_0 + C_l^2 (\rho_l^0 - \rho_{l0}^0), \quad p_g = \rho_g^0 R T_g,$$

где R – газовая постоянная. Здесь и в дальнейшем нижним индексом «0» снабжены параметры, относящиеся к начальному невозмущенному состоянию.

Тепловой поток q задается приближенным конечным соотношением [1]:

$$q = \text{Nu} \lambda_g \frac{T_g - T_0}{2a}, \quad \frac{T_g}{T_0} = \frac{p_g}{p_0} \left(\frac{a}{a_0} \right)^3,$$

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

$$\text{Pe} = 12(\gamma - 1) \frac{T_0}{|T_g - T_0|} \frac{a|w|}{\kappa_g}, \quad \kappa_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g^0}.$$

где $T_0 = \text{const}$ – температура жидкости; c_g и λ_g – теплоемкость и теплопроводность газа; Nu и Pe – числа Нуссельта и Пекле.

Методика численного расчета представлена в работе [5].

3. Начальные и граничные условия

Для проведения численных экспериментов используются следующие условия.

Начальные условия при $t = 0$ и $z > 0$, соответствующие состоянию покоя неоднородной пузырьковой смеси в канале, запишутся в виде:

$$p = p_0, \quad v_r = v_z = 0, \quad \rho = \rho_0.$$

Сферический кластер, соприкасающийся с торцевой стенкой канала ($0 < R_{cl} \leq R_c$) (рис. 1):

$$\begin{cases} (z - z_{cl})^2 + r^2 \leq R_{cl}^2 : \alpha_g = \alpha_{g0}, p_g = p_0, a = a_0, \\ \rho = \rho_{l0}^0 (1 - \alpha_{g0}), w = 0, \\ (z - z_{cl})^2 + r^2 > R_{cl}^2 : \rho = \rho_{l0}^0, \end{cases}$$

где z_{cl} — координата центра кластера по оси z , а R_{cl} — его радиус;

Граничные условия: на оси симметрии ($r_0 = 0$) и на стенке трубы ($r_0 = R_c$) задается условие непротекания жидкости $v_r = 0$.

На торцевой границе $z_0 = 0$ — граничное давление в виде «ступеньки»:

$$z_0 = 0: \quad p_l(r_0, t) = p_0 + \Delta p_{l0}, \quad 0 < r_0 < R_c.$$

На другой торцевой границе ($z_0 = L_z$) используется условие непротекания жидкости $v_z = 0$.

4. Результаты численных расчетов

Дальнейшие численные расчеты проводились при следующих теплофизических параметрах: $c_g = 1006$ Дж/кг·К, $\rho_{g0} = 1.29$ кг/м³, $\lambda_g = 0.026$ м·кг/К·с³, $\gamma = 1.14$, $\kappa_g = 2.003 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $a_0 = 10^{-3}$ м (для воздуха); $C_l = 1500$ м/с, $\rho_{l0} = 10^3$ кг/м³, $\nu_l = 6 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $T_0 = 293$ К, $p_0 = 0.1$ МПа (для воды). При расчетах для h_{z_0} , h_{r_0} и τ применялись следующие значения: $h_{z_0} = h_{r_0} = 10^{-3}$ м, $\tau = 10^{-7}$ с.

Рассмотрим случай, когда пузырьковый кластер сферической формы соприкасается с правой торцевой стенкой (см. рис. 1). Как и описано выше, в некоторый момент времени на нашу систему воздействуют импульсным давлением по направлению образующей канала. Длина и радиус канала равны $L_z = 0.5$ м и $R_c = 0.1$ м. Амплитуда волнового импульса $\Delta p_{l0} = 0.5$ МПа.

Показания датчиков, расположенных на оси канала и на стенке, представлены на рис. 2. В рас-

четах радиус пузырькового кластера R_{cl} принимал следующие значения: 0.025 м, 0.05 м, 0.075 м, 0.1 м. Объемное содержание пузырьков в кластере α_{g0} изменялось в диапазоне от 0.001 до 0.05. На графике рис. 2(а) представлены показания датчика, расположенного в середине сферического пузырькового кластера, а на рис. 2(б) — показания датчика, расположенного на торцевой границе на оси симметрии канала.

Из представленных результатов можно сделать вывод, что наибольшее давление внутри кластера фиксируется при радиусе кластера равном 0.025 м. Для всех остальных рассмотренных для данных параметров случаев датчик D_2 фиксирует значения давления ниже. Причем увеличение радиуса несущественно влияет на максимальное значение давления. Это можно объяснить следующим механизмом. Для представленных объемных содержаний скорость распространения волны в пузырьковой области мала (до 110 м/с), плюс к этому вносит свою диссипацию большой радиус. Несмотря на то, что на границе пузырькового кластера фиксируется постоянное воздействие волнового сигнала, из-за большого расстояния до середины завесы и малой скорости распространения волны кластер гасит волновые возмущения, которые распространяются к середине. Большой радиус пузырькового кластера играет двоякую роль. Как следует из показаний датчика D_2 , предмет, помещенный в середину пузырькового кластера чувствует небольшое увеличение волнового воздействия для $\alpha_g \leq 0.02$ и практически не чувствует воздействия

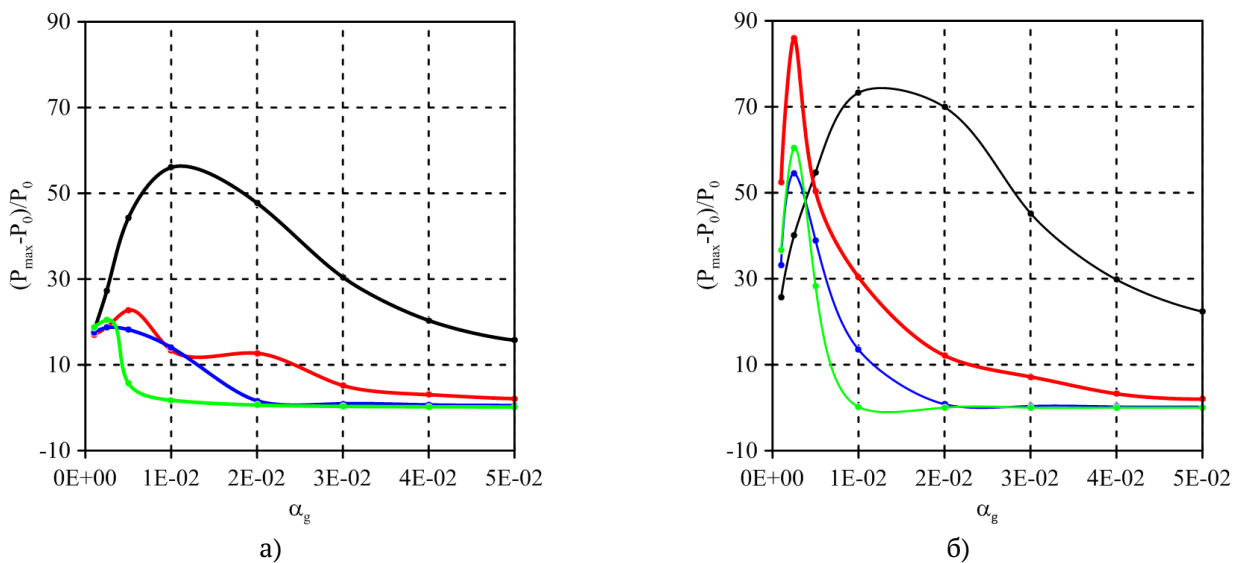


Рис. 2. Максимальное отношение разности давлений к начальному давлению при радиусе завесы $R_{cl} = 0.025$ м (черный), 0.05 м (красный), 0.075 м (синий) и 0.1 м (зеленый): а) показания датчика D_2 , б) показания датчика D_3

для $\alpha_g > 0.02$. При этом, если посмотреть показания датчика D_3 , то видим, что воздействие на твердую стенку за кластером носит совсем иной характер. Воздействие для всех рассмотренных случаев практически одинаково. Отметим отдельно случай, когда радиус кластера равен половине радиуса канала. Здесь фиксируется максимальное значение давления на торцевой стенке. Наряду с тем, что основная волна «огибает» кластер, со стороны кластера движется вторичная волна, сгенерированная «дыханием» кластера. суммарное воздействие этих двух волн дает максимальное воздействие. В остальных случаях данное воздействие носит чуть меньший характер (см. рис. 2(б)).

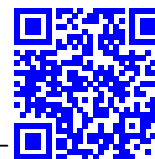
5. Заключение

Исследована динамика волн типа «ступенька» в канале с водой, содержащей сферический пузырьковый кластер с начальным объемным содержанием в диапазоне от 0.001 до 0.05. Получены значения максимального воздействия на торцевую стенку в зависимости от объемного содержания при четырех значениях радиуса кластера. На основе численных расчетов и согласно рис. 2 установлены следующие закономерности:

- при определенных параметрах кластера происходит фокусировка волны давления на торцевой стенке оси цилиндрического канала;
- увеличение радиуса кластера приводит к уменьшению амплитуды волны в середине кластера, но к увеличению амплитуды волны, которая воздействует на торцевую стенку трубы за кластером.

Список литературы

- [1] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1, 2. М.: Наука, 1987. 360 с., 464 с.
- [2] Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2000. 435 с.
- [3] Галимзянов М.Н. Динамика импульсного сигнала в цилиндрическом канале с жидкостью, содержащем сферический пузырьковый кластер // Вестник Башкирского университета. 2022. Т. 27, № 2. С. 275–286.
DOI: [10.33184/bulletin-bsu-2022.2.5](https://doi.org/10.33184/bulletin-bsu-2022.2.5)
- [4] Шагапов В.Ш., Вахитова Н.К. Волны в пузырьковой системе при наличии химических реакции в газовой фазе // Физика горения и взрыва. 1989. № 6. С. 14–22.
https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=120135&ARTICLE_ID=135857
- [5] Галимзянов М.Н. Волны давления в трубе, заполненной жидкостью при наличии в ней пузырьковой области в форме тора // Многофазные системы. 2021. Т. 16, № 3–4. С. 112–120.
DOI: [10.21662/mfs2021.3.015](https://doi.org/10.21662/mfs2021.3.015)



Study of pressure wave dynamics in a channel with a spherical bubble cluster

Fattakhov S.R.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

The features of wave propagation in a bubbly liquid are associated with the combined interaction of nonlinear, dispersive, and dissipative effects. In a liquid with bubbles, the properties of a practically incompressible liquid, which is a carrier phase, change dramatically with a small volume (and even more so, mass) addition of gas (bubbles), which is a dispersed phase. The peculiarity of bubbly liquids is due to their high static compressibility while maintaining a high density close to that of the liquid, which in turn leads to a low equilibrium speed of sound. In this paper, we study two-dimensional axisymmetric wave perturbations in a channel with water containing a spherical cluster filled with a water-air bubble mixture and located at one of the end boundaries. Based on the results of numerical calculations, the dependence of the maximum pressure amplitude formed in the channel on the geometrical parameters of the cluster is analyzed. It has been established that the presence of a near-end bubble cluster can significantly both increase and decrease the effect of the wave signal incident on the wall, depending on the size of the cluster and its characteristics.

Keywords: cylindrical channel, bubble cluster, bubble liquid, pressure wave, spherical bubble cluster

References

- [1] Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media. New York: Hemisphere, 1991. Vols. 1 and 2. P. 360 and P. 464.
- [2] Kedrinskii V.K. Gidrodinamika vzryva: eksperiment i modeli [Explosion hydrodynamics: experiment and models]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000 (in Russian).
- [3] Galimzyanov M.N. Dynamics of a pulsed signal in a cylindrical channel with a liquid containing a spherical bubble cluster // Vestnik Bashkirskogo Universiteta. 2022. V. 27, No. 2. Pp. 275–286 (in Russian).
DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2022.2.5
- [4] Shagapov V.Sh., Vakhitova N.K. Waves in a bubble system in the presence of gas-phase chemical reactions // Combust Explos Shock Waves. 1989. V. 25. Pp. 669–677.
DOI: 10.1007/BF00758728
- [5] Galimzyanov M.N. Pressure waves in a tube filled with a liquid with a bubble region in it in the form of a torus // Multiphase Systems. 2021. V. 16, No. 3–4. Pp. 112–120 (in Russian).
DOI: 10.21662/mfs2021.3.015