

Научная статья

УДК 538.951

DOI 10.18101/2306-2363-2025-1-49-55

Моделирование распространения звука в жидкости с пузырьками воздуха

© Пригожих Владимир Александрович

инженер-исследователь,

Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

wp100@mail.ru

© Дамдинов Баир Батуевич

доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник,

Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79;

Институт физического материаловедения СО РАН

Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

bdamdinov@sfu-kras.ru

Аннотация. В данной статье представлено исследование распространения звуковых волн в жидкости, содержащей воздушные пузырьки, с использованием численного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Основное внимание уделено анализу влияния газовых включений на акустические свойства среды, в том числе дисперсии, поглощения и нелинейных эффектов. Моделирование проводилось для водной среды при стандартных условиях ($P = 1$ атм, $T = 293.15$ К) в резервуаре размером $0.1 \times 0.1 \times 0.5$ м с жесткими границами. Исследованы два случая: при частоте 8333,3 Гц (длина волны равна двум диаметрам пузырька) и 16 667 Гц (длина волны равна диаметру пузырька). Результаты показали, что при меньшей частоте пузырек слабо влияет на распространение волны, вызывая лишь локальные возмущения, тогда как при увеличении частоты наблюдается усиленное рассеяние, формирование сложной интерференционной картины и локальное усиление акустического давления. Полученные данные подтверждают эффективность COMSOL Multiphysics для моделирования акустических процессов и открывают перспективы для дальнейших исследований, включая анализ нелинейных эффектов в ультразвуковом диапазоне и систем с множественными пузырьками.

Ключевые слова: акустика, звуковые волны, воздушные пузырьки, численное моделирование, COMSOL Multiphysics, дисперсия, интерференция, резонанс.

Для цитирования

Пригожих В. А., Дамдинов Б. Б. Моделирование распространения звука в жидкости с пузырьками воздуха // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2025. Вып. 1. С. 49–55.

Введение

Исследование распространения звука в жидкостях с газовыми включениями (пузырьками) является актуальной задачей акустики, имеющей широкий спектр приложений — от гидроакустики до биомедицины. Присутствие газовых включений существенно модифицирует акустические свойства среды, приводя к дис-

персии, поглощению и нелинейным эффектам. В случае дисперсии наблюдается зависимость фазовой скорости звука от частоты, обусловленная резонансными колебаниями пузырьков. Резонансная частота пузырька определяется его радиусом и свойствами окружающей жидкости. Также энергия звуковой волны поглощается за счет вязкого трения в жидкости, теплообмена между пузырьком и жидкостью. При высоких интенсивностях звукового поля наблюдаются нелинейные эффекты, связанные с колебаниями пузырьков, такие как генерация высших гармоник, образование ударных волн и кавитация [1, 2, 3].

В настоящем исследовании предложена графическая визуализация процесса распространения акустических волн в жидкостях, содержащих газовые пузырьки. Для численного анализа использовалась модель, реализованная в среде COMSOL Multiphysics, которая демонстрирует высокую эффективность при решении широкого круга акустических задач. Это подтверждается многочисленными исследованиями, включая моделирование параметров резонатора Гельмгольца на основе уравнений Навье-Стокса, анализ проникновения звуковых волн в среды с различными коэффициентами поглощения, а также расчет полного акустического давления и его пространственного распределения для модели акустического датчика. Применение данного инструмента позволяет получить детальные результаты, значимые для дальнейших исследований в области акустики и гидродинамики [4, 5].

Описание модели исследования

Моделирование распространения акустических волн проведено для жидкостного резервуара, аппроксимируемого параллелепипедом размером $0.1 \times 0.1 \times 0.5$ м. На границах резервуара задано условие жесткости, что предполагает полное отражение звуковых волн без диссипативных потерь. В качестве рабочей среды использована вода при стандартных термодинамических параметрах $P=1$ атм и $T=293.15$ К. Акустическое возбуждение осуществляется двумя источниками, расположенными на левой боковой грани резервуара. Для учета влияния газовых включений принято приближение несжимаемости среды.

Численный анализ выполнен с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics, реализующего расчет на основе уравнения Гельмгольца:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p \cdot q_d) - \frac{K_{eq}^2}{\rho_c} \rho_t \right) &= Q_m, \\ \rho_t &= \rho + \rho_b, \\ K_{eq}^2 &= \left(\frac{\omega}{C_c} \right)^2. \end{aligned}$$

Результаты исследования модели с пузырьком воздуха диаметром 0,09 м

Для данной модели средствами программного комплекса COMSOL Multiphysics построена вычислительная сетка, используемая для моделирования распространения звуковых волн (рис. 1).

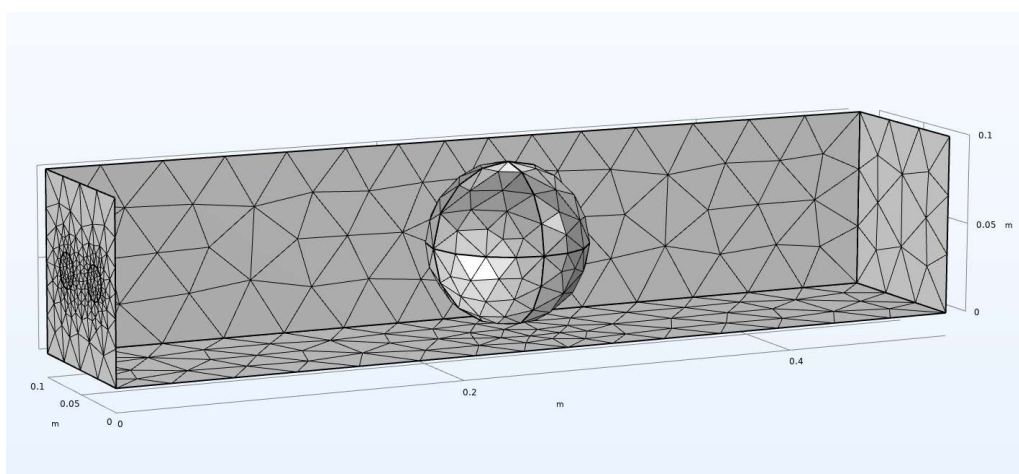


Рис. 1. Сетка для расчета распределения акустического давления в системе

В численном моделировании сетка играет ключевую роль, определяя точность и эффективность расчетов. Она представляет собой разбиение расчетной области на элементы конечного объема или конечных элементов, внутри которых численно решаются уравнения акустики.

Максимальный размер элемента установлен как $\lambda/5$, где λ — максимальная длина акустической волны в среде. Этот параметр выбирается исходя из требований к дискретизации волновых процессов, обеспечивая адекватное разрешение звуковых волн. Минимальный размер элемента в два раза меньше максимального. Это повышает точность расчетов в областях с высокой градиентностью акустического поля, например, вблизи границ объектов и пузырька. Сделано также загущение сетки в области источника звука, что позволяет точно моделировать процессы генерации и распространения волн. Как правило, вблизи источника наблюдаются резкие изменения акустического давления, требующие более детализированной сетки.

Созданная сетка используется для численного решения уравнения Гельмгольца, описывающего распространение звука в рассматриваемой системе. Качественное построение сетки позволяет минимизировать численные ошибки, избежать дисперсионных искажений волнового фронта, а также повысить сходимость метода конечных элементов.

На рисунке 2 представлено распределение полного акустического давления в расчетной области при частоте 8333,3 Гц, соответствующей длине волны, равной двум диаметрам пузырька. Данный расчет выполнен на основе ранее представленной вычислительной сетки, обеспечивающей достаточное разрешение волновых процессов.

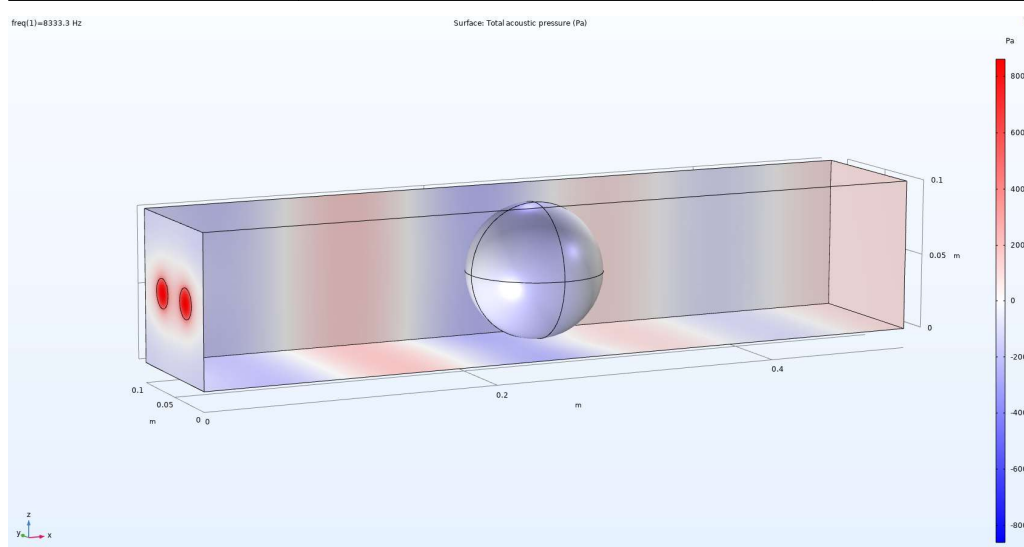


Рис. 2. Распределение акустического давления при частоте, соответствующей длине волны, равной двум диаметрам пузыря (8333,3 Гц)

В данной модели наблюдается огибание пузырька звуковой волной. Пузырек оказывает сравнительно небольшое влияние на распространение акустической волны. Это объясняется тем, что длина волны значительно превышает размер препятствия, что приводит к проявлению эффекта дифракции и слабому рассеянию волны на пузырьке. Основной фронт акустической волны остается практически неизменным за пузырьком, что указывает на слабую акустическую жесткость пузырька при данной частоте возбуждения.

Наблюдается наличие локальных возмущений вблизи пузырька. Несмотря на общий характер огибания, вблизи пузырька наблюдаются небольшие локальные вариации акустического давления. Это связано с взаимодействием падающей волны с границей газового включения и образованием зон слабого акустического контраста. Эти возмущения указывают на возможное формирование слабых рассеянных волн, однако их амплитуда недостаточна для существенного изменения общей картины распространения звука.

Также в данной модели наблюдаются стоячие волны и интерференция. В пределах расчетной области наблюдается характерная интерференционная картина с чередующимися зонами положительного и отрицательного акустического давления. Четкие полосы давления свидетельствуют о формировании стоячих волн между стенками сосуда, что ожидаемо для замкнутых акустических систем с жесткими границами.

Результаты моделирования демонстрируют, что при данной длине волны влияние пузырька на акустическое поле минимально, а доминирующим фактором в системе остается интерференция волн, обусловленная отражениями от жестких стенок сосуда. В дальнейшем анализе рассмотрено поведение системы при частоте, сравнимой с резонансной частотой пузырька, где ожидаются более выраженные эффекты рассеяния и поглощения звука.

На рисунке 3 представлено распределение полного акустического давления при частоте 16 667 Гц, что соответствует длине волны, равной диаметру пузырька. Данный случай принципиально отличается от предыдущего (рис. 2), так как соотношение размеров пузырька и длины волны приближается к резонансным условиям рассеяния.

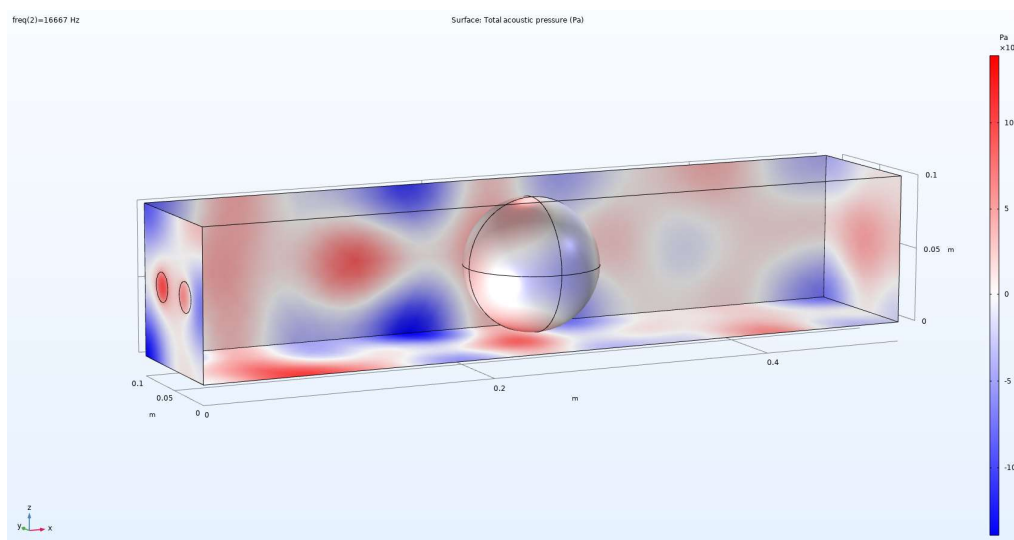


Рис. 3. Распределение акустического давления при частоте, соответствующей длине волны, равной целому диаметру пузыря (16667 Гц)

В моделируемой системе наблюдаются такие физические эффекты, как усиление рассеяния на пузырьке. В отличие от случая с большей длиной волны (рис. 2) здесь наблюдается выраженное взаимодействие звуковой волны с пузырьком. Вокруг пузырька формируются отчетливые зоны повышенного и пониженного давления, что указывает на значительный вклад пузырька в процесс рассеяния акустической волны. Это подтверждает известные теоретические результаты, согласно которым рассеяние звука на сферических включениях наиболее выражено, когда длина волны сравнима с размером рассеивателя.

В системе также формируются сложные интерференционные картины. В расчетной области видна сложная структура чередующихся зон положительного и отрицательного акустического давления, что свидетельствует о развитии интерференционных процессов. Пузырек не только рассеивает падающую волну, но и взаимодействует с отраженными волнами, что приводит к возникновению сложных стоячих волн внутри ограниченного объема. Это согласуется с экспериментальными наблюдениями акустических резонансных явлений в жидких средах с включениями.

Кроме того, наблюдается локальное усиление акустического давления. Вблизи пузырька заметны области локального увеличения амплитуды акустического давления. Данный эффект может быть связан с образованием частичных стоячих волн вблизи границы пузырька, что типично для акустических резонаторов. При

дальнейшем увеличении частоты можно ожидать усиления подобных эффектов вплоть до нелинейных явлений в среде.

Таким образом, результаты моделирования при частоте 16667 Гц показывают значительное влияние пузырька на распространение акустической волны, включая выраженное рассеяние, локальное усиление давления и сложные интерференционные эффекты. В дальнейшем анализе целесообразно исследовать поведение системы при еще более высоких частотах, близких к резонансной частоте пузырька, а также рассмотреть вклад возможных нелинейных эффектов при интенсивных звуковых полях.

Заключение

Исследование подтвердило, что программный комплекс COMSOL Multiphysics является мощным инструментом для моделирования акустических процессов в жидкостях с газовыми включениями. Его использование позволило визуализировать распространение звуковых волн с высокой детализацией, а численный анализ продемонстрировал точность и надежность расчетов. Гибкость метода конечных элементов, реализованного в программном продукте, делает его эффективным средством для исследования сложных акустических явлений, таких как рассеяние, интерференция и взаимодействие волн с пузырьками.

Дальнейшие исследования будут направлены на анализ поведения системы при более высоких частотах, включая ультразвуковой диапазон, где ожидается усиление нелинейных эффектов. Особый интерес представляет влияние интенсивных звуковых полей на формирование кавитации и других резонансных явлений, что может иметь практическое значение для различных технологических и биомедицинских применений. Расширение модели на системы с множественными пузырьками позволит глубже понять механизмы взаимодействия звуковых волн с неоднородной средой и открыть новые возможности для управления акустическими свойствами жидких сред.

Литература

1. Doinikov A. A. Translational motion of a spherical bubble in an acoustic standing wave of high intensity. *Physics of Fluids*. 2002; 14(4): 1420–1426.
2. Исследование объемной вязкости наносuspензий методом акустической спектроскопии / А. В. Минаков, М. И. Пряхников, Б. Б. Дамдинов, И. В. Немцев // Акустический журнал. 2022. Т. 68, № 2. С. 182–189. Текст: непосредственный.
3. Губайдуллин Д. А., Федоров Ю. В. Звуковые волны в жидкостях с полидисперсными парогазовыми пузырьками // Акустический журнал. 2016. Т. 62, № 2. С. 178–186. Текст: непосредственный.
4. Дамдинов Б. Б., Пригожих В. А. Предварительное моделирование распространения звука в жидкой среде с примесями // Акустический журнал. 2024. Т. 70, №5. С. 63. Текст: непосредственный.
5. Буркова Е. Н., Кондрашов А. Н., Рыбкин К. А. Система автоматизированных расчетов Comsol: учебное пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2019. 133 с. Текст: непосредственный.

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 24.06.2025.

Modeling the Propagation of Sound in a Liquid Containing Air Bubbles

Vladimir A. Prigozhikh

Research Engineer

Siberian Federal University

79 Svobodniy pereulok, 660041 Krasnoyarsk, Russia

wp100@mail.ru

Bair B. Damdinov

Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Prof., Senior Researcher

Siberian Federal University

79 Svobodniy pereulok, 660041 Krasnoyarsk, Russia

Institute of Physical Material Science SB RAS

6 Sakhyanovoy St., 670047 Ulan-Ude, Russia

bdamdinov@sfu-kras.ru

Abstract. The article shows an investigation of sound wave propagation in a liquid containing air bubbles using numerical modeling in the COMSOL Multiphysics software environment. The primary focus is on analyzing the impact of gas inclusions on the acoustic properties of the medium, including dispersion, absorption, and nonlinear effects. The modeling was conducted for a water-based medium under standard conditions ($P = 1 \text{ atm}$, $T = 293.15 \text{ K}$) within a $0.1 \times 0.1 \times 0.5 \text{ m}$ tank with rigid boundaries. Two cases were examined: at a frequency of 8,333.3 Hz (wavelength equal to twice the bubble diameter) and 16,667 Hz (wavelength equal to the bubble diameter). The results showed that at the lower frequency, the bubble has minimal influence on wave propagation, causing only local disturbances, whereas at the higher frequency, enhanced scattering, the formation of complex interference patterns, and local amplification of acoustic pressure were observed. The findings confirm the effectiveness of COMSOL Multiphysics for modeling acoustic phenomena and provide a foundation for further research, including the analysis of nonlinear effects in the ultrasonic range and systems with multiple bubbles.

Keywords: acoustics, sound waves, air bubbles, numerical modeling, COMSOL Multiphysics, dispersion, interference, resonance.

For citation

Prigozhikh V. A. Damdinov B. B. Modeling the Propagation of Sound in a Liquid Containing Air Bubbles. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2025; 2: 49–55 (in Russ.).

The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 24.06.2025.