

Взаимодействие волны давления с пузырьковой областью

Галимзянов М.Н., Агишева У.О.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Введение

Проблема создания гидроакустических аналогов лазерных систем заключается в фокусировке энергии волн в жидкости. Эти системы способны поглощать и увеличивать амплитуду внешнего воздействия, а затем переизлучать его с возможной концентрацией энергии в определенном направлении [1]. В исследованиях также рассматривается анализ фокусировки энергии волн в пузырьковых средах. Например, в работе [2] изучается динамика распространения импульсных сигналов в жидкости с пузырьковой завесой конечных размеров. Показано, что в зависимости от временной протяженности начального импульса внутри завесы может происходить увеличение амплитуды давления выше, чем у исходного сигнала. В работе [3] были проведены численные исследования процесса «накачки» сферического пузырькового кластера и формирования в нем башнеобразного импульса давления в рамках модели Иорданского, Когарко, Виингардена (ИКВ). Экспериментально показано, что изменение объемной концентрации газовой фазы позволяет регулировать координату фокусировки волны. Кроме того, амплитуда волны, излучаемой кластером в жидкость, может превышать амплитуду волны, вызывающей возбуждение кластера, на 1–2 порядка. Результаты численного моделирования ударной волны с пузырьковым кластером в форме полого цилиндра в жидкости и возникновения направленного излучения в жидкость представлены в работе [4].

Работа [5] посвящена экспериментальному изучению взаимодействия плоской ударной волны с сферическим пузырьковым кластером в жидкости. В результате исследования было обнаружено, что такое взаимодействие приводит к образованию уединенной волны давления с амплитудой, значительно превышающей амплитуду ударной волны. Установлено, что структура этой уединенной волны зависит не только от параметров кластера и амплитуды ударной волны, но также от соотношения диаметров кластера и рабочего участка. В работе [6] проведено экспериментальное исследование эволюции и структуры ударной волны умеренной амплитуды в жидкости с пузырьковыми кластерами. Полученные данные о скорости и структуре таких ударных волн были сравнены с теоретическими моделями. Экспериментально показано, что для волн небольшой амплитуды уравнение Буссинеска хорошо описывает структуру переднего фронта осциллирующей ударной волны. Кроме того, обнаружено, что резонансное взаимодействие пузырьковых кластеров в волне может привести к увеличению амплитуды осцилляций в ударной волне

Основные уравнения

Запишем систему макроскопических уравнений, которая используется для решения подобных задач, в приближении цилиндрической симметрии. В эту систему входят уравнения сохранения масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках [8].

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

Здесь использованы следующие обозначения: α_i – объемные содержания фаз, v_r и v_z – радиальная и осевая составляющая скорости, a – радиус пузырьков, p – давления фаз, ρ_{i0} – истинные плотности фаз, γ – показатель адиабаты для газа, q – интенсивность теплообмена, n – число пузырьков в единице объема, w – радиальная скорость пузырьков. Нижними индексами $i = l, g$ отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

Согласно исследованиям из [9], скорость движения границы пузырьков w бралась, как сумма двух составляющих $w = w_R + w_A$. w_R определяется из уравнения Релея–Ламба, а составляющая w_A бралась 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.

Тепловой поток q для расчета нелинейных волн принято задавать приближенным конечным соотношением [8]

$$q = \text{Nu} \lambda_g \frac{T_g - T_0}{2a}, \quad \frac{T_g}{T_0} = \frac{p_g}{p_0} \left(\frac{a}{a_0} \right)^3, \quad \text{Nu} = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}}, & \text{Pe} \geq 100, \\ 10, & \text{Pe} < 100, \end{cases}$$

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

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

Здесь стоит отметить, что из этой математической модели в частном случае при $\alpha_{g0} = 0$ следует волновое уравнение для линейно сжимаемой жидкости. При исследовании взаимодействия волн в «чистой» жидкости с пузырьковой средой это обстоятельство в свою очередь позволяет использовать сквозные методы расчета.

Заключение

Исследована динамика волн типа «ступенька» в канал с водой, содержащей соосный пузырьковый кластер в виде сферы, полого и сплошного цилиндра. Полюй цилиндр рассматривался в двух случаях: соприкасающийся с боковой поверхностью канала и расположенный на оси канала без соприкосновений. На основе численных расчетов установлены следующие закономерности:

- взаимодействие волны типа «ступенька» со сферическим пузырьковым кластером в жидкости приводит к генерации уединенной волны давления с амплитудой, значительно превышающей амплитуду ударной волны. Уменьшение радиуса пузырьков и объемного содержания газа приводит к увеличению амплитуды уединенной волны из-за увеличения акустической жесткости пузырькового кластера;

- в случае кластера сферической формы, прилегающего к торцевой поверхности канала, воздействие на торцевую стенку с наибольшей амплитудой волны происходит в случае кластера с радиусом равным половине радиуса канала. Данное воздействие может в десятки раз превышать случай отсутствия пузырьковой кластера;

- в случае кластера в форме полого цилиндра не соприкасающегося с боковой поверхностью существует предельное значение ширины слоя «чистой» жидкости, окружающий пузырьковый кластер, увеличение которого не приводит к увеличению максимального значения амплитуды давления на оси трубы. Для рассмотренных расчетов это значение составило $R_c = 0.3$ м;

- сравнение пузырьковых областей в виде полого и сплошного цилиндров показало, что взаимодействие импульса со сплошным цилиндром приводит к формированию волны с амплитудой, в разы превышающий случай взаимодействия с пузырьковым кластером в виде полого цилиндра;

- для рассмотренных случаев проанализировано влияние протяженности пузырьковых областей и начального объемного содержания на динамику волны внутри пузырьковой области и в канале.

Данные исследования дополняют результаты, полученные в ранних работа авторов [10, 11, 12].

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности №075-00570-24-01 ("Гидрогазодинамика многофазных, термовязких и микродисперсных сред").

Список литературы

- [1] Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. С. 435.
- [2] Галимзянов М.Н., Гималтдинов И.К., Шагапов В.Ш. Двумерные волны давления в жидкости, содержащей пузырьки // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа, 2002, № 2, С. 139–147. DOI: 10.1023/A:1015818602291
- [3] Кедринский В.К., Шокин Ю.И., Вшивков В.А., Дудникова Г.И., Лазарева Г.Г. Генерация ударных волн в жидкости сферическими пузырьковыми кластерами // Доклады академии наук, 2001, Т. 381, № 6, С. 773–776. DOI: 10.1134/1.1433529
- [4] Кедринский В.К., Вшивков В.А., Дудникова Г.И., Шокин Ю.И., Лазарева Г.Г. Фокусировка осциллирующей ударной волны, излученной тороидальным облаком пузырьков // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2004, Т. 125, № 6, С. 1302–1310. DOI: 10.1134/1.1777626
- [5] Донцов В.Е. Взаимодействие ударной волны со сферическим газожидкостным кластером // Прикладная математика и технифеская физика, 2004, Т. 45, № 1, С. 3–11. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17249170>
- [6] Донцов В.Е. Распространение волн давления в газожидкостной среде кластерной структуры // Прикладная математика и технифеская физика, 2005, Т. 46, № 3, С. 50–60. DOI: 10.1007/s10808-005-0084-7
- [7] Шагапов, В.Ш. Динамика гетерогенных сред при наличии физико-химических превращений // Дисс... д-ра физ.-мат. наук. 1987.
- [8] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. I. М.: Наука, 1987. С. 464.
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Галимзянов М.Н., Гималтдинов И.К., Агишева У.О. О фокусировке волн давления в тороидальном пузырьковом кластере // Вестник Башкирского университета, 2022, Т. 27, № 1, С. 9–17. DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2022.1.2
- [12] Галимзянов М.Н., Гималтдинов И.К., Кочанова Е.Ю. Взаимодействие волны давления в цилиндрическом канале со сферическим пузырьковым кластером // Прикладная механика и техническая физика, 2023, Т. 64, № 2, С. 96–104. DOI: 10.15372/PMTF202215182