

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
(УФИЦ РАН)

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное
подразделение Федерального государственного бюджетного
научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра
Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН)

На правах рукописи

Юсупова Рушана Усмановна

**ДИНАМИКА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН
В МНОГОФАЗНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

01.06.01 – Математика и механика
профиль Механика жидкости, газа и плазмы

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Уфа – 2024

Работа выполнена в Институте механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Научный руководитель:

Галимзянов Марат Назипович

Кандидат физико-математических наук, доцент, ИО директора Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Рецензенты

Болотнова Раиса Хакимовна

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Механика многофазных систем» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Гималтдинов Ильяс Кадирович

Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент АН РБ. Отделение математики, физики и машиноведения, заведующий кафедрой физики в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность Изучение волновых явлений в пузырьковых жидкостях играет ключевое значение для множества научных и технических областей. Динамика ударных волн в пузырьковой жидкости – сложный процесс, в котором взаимодействуют такие физические эффекты, как нелинейность, дисперсия и диссипация. Поэтому важно и актуально углубить уже имеющиеся знания в данной области и разработать математическую модель для численного исследования воздействия волн давления в канале, который содержит в себе пузырьковые кластеры разных форм.

Цель диссертационной работы

Целью данного исследования является применение математической модели для численного анализа волновых процессов в жидкостях с пузырьковыми кластерами полусферической и прямоугольной формы с целью изучения влияния формы и размеров пузырьковых кластеров на динамику ударных волн.

Задачи исследования:

1. Изучить и адаптировать математическую модель, описывающую динамику волн давления в жидкости с полусферической и прямоугольной пузырьковыми зонами.
2. Проанализировать взаимодействие волн давления с пузырьковыми зонами различных размеров и форм.
3. Рассмотреть частные случаи результатов обеих задач и сравнить их.
4. Исследовать влияние параметров пузырьковой зоны (размер, плотность пузырьков, распределение) на характеристики волн давления.

Научная новизна работы

С помощью комплекса программ и анализа полученных результатов показано, что воздействие волны на твердую стенку может быть эффективно контролируемо параметрами пузырькового кластера, такими как его радиус и объемное содержание пузырьков.

Практическая значимость

Полученные данные могут способствовать повышению эффективности технологических процессов в промышленности, где требуется управление кавитацией и акустическим воздействием на многофазные среды.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ динамики волны типа «ступенька» в канале с пузырьковым кластером полусферической формы.
2. Анализ динамики волны типа «ступенька» в канале с пузырьковым кластером прямоугольной формы.
3. Сравнительный анализ результатов обеих задач.

Достоверность полученных результатов

Достоверность исследования основывается на корректной постановке задач, применении уравнений механики пузырьковой жидкости в математической модели, а также на сравнительных тестовых расчетах. Результаты работы опубликованы и представлены на конференциях и конкурсах, что подтверждает надежность предложенных методов и выводов.

Апробация работы

Основные результаты данной научно-квалификационной работы были представлены и обсуждены на «Конкурсе научных докладов молодых ученых и аспирантов Института механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук» (Уфа, 2023) и «27 Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых» (Екатеринбург, 2023)

Публикации

1 тезисы по материалам доклада на конференции и 1 тезисы на конкурсе молодых ученых.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в исследование заключается в применении математической модели, проведении вычислений, обработке, оформлении и анализе полученных результатов. Совместно с научным руководителем выполнены постановка задач и обсуждение результатов.

Объем и структура работы

Научно-квалификационная работа состоит из 52 страниц, включающих введение, три главы, заключение и список литературы. Работа содержит 13 рисунков, иллюстрирующих результаты численных экспериментов.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулирована цель работы, заключающаяся в численном и аналитическом анализе ударных волн типа «ступенька» в канале с различными формами пузырьковых кластеров.

Сформулированы **основные задачи**, такие как:

1. Адаптация математических моделей для исследования динамики ударных волн в каналах с пузырьковыми кластерами различной формы.
2. Проведение численного анализа динамики давления для различных конфигураций кластеров.
3. Сравнение результатов расчётов с пузырьковыми кластерами разной формы и анализ полученных данных.

Во введении также указана практическая значимость работы, отмечена достоверность результатов и приведены основные положения, выносимые на защиту, а также информация об апробации работы на конференциях.

Первая глава представляет собой краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований, посвящённых изучению динамики ударных волн в жидкостях с пузырьковыми кластерами, и содержит основные уравнения механики пузырьковой жидкости, используемые в данном исследовании.

Во второй главе проведен численный анализ динамики ударных волн давления типа «ступенька» в цилиндрическом канале, содержащем пузырьковый кластер в форме полусферы и прямоугольный кластер, закрепленные на торце канала. Выполнены расчёты, позволяющие построить карту зависимости максимального давления от радиуса кластера и объемного содержания пузырьков, показывающие, как изменяются характеристики давления в зависимости от физических параметров кластера.

Третья глава посвящена задаче, в которой пузырьковый кластер имеет прямоугольную форму, закрепленную на торце канала. Сравнительный анализ полученных данных с результатами задачи с полусферическим кластером позволил выявить влияние формы кластера на динамику ударной волны. Этот сравнительный анализ подчеркивает, как изменение формы кластера влияет на распределение давления в системе.

Заключение содержит основные выводы, сделанные на основе численного анализа. Подведены итоги обоих численных экспериментов и сформулированы ключевые зависимости динамики давления от формы и размера пузырьковых кластеров.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность своему научному руководителю, канд. физ.-мат. наук Галимзянову Марату Назиповичу за его неизменную поддержку, мудрые наставления и профессиональное руководство на протяжении всего исследования. Его научная интуиция, терпение и внимание к деталям вдохновляли и помогали в решении сложных задач, а также в достижении научных результатов. Особую ценность имела возможность обсуждения ключевых вопросов исследования, которые направили работу в нужное русло.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Основой данного исследования является анализ процесса колебания воды в канале с учетом его длины L_c и радиуса R_c , где вода заполняет канал и содержит в себе кластер газовоздушных пузырьков радиусом R_{cl} полусферической формы. Пузырьковый кластер прикреплен к торцу канала таким образом, что его центр расположен на расстоянии Z_{cl} от границы $z=0$ на оси канала.

Необходим анализ поведения волны, имеющей форму «ступеньки», внутри канала при мгновенном повышении давления на границе $z=0$ после $t>0$, когда оно увеличится с обычного уровня до установленной амплитуды ΔP_0 . Чтобы понять, как волна распространяется в канале, будем использовать уравнения импульса, массы, давления и количества пузырьков для моделирования процессов внутри системы:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= 0 \quad (i=l, g), \quad \frac{dn}{dt} + n \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0, \quad \rho \frac{du}{dt} + \frac{\partial p_i}{\partial x} = 0, \\ \rho \frac{dv}{dt} + \frac{\partial p_i}{\partial y} &= 0, \quad \frac{dp_g}{dt} = - \frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a_0} q, \quad w = \frac{da}{dt}, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi n a^3, \\ \left(\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right), \quad \alpha_l + \alpha_g &= 1, \quad \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i, \quad \rho = \rho_g + \rho_l \end{aligned}$$

где a – радиус пузырьков, нижними индексами $i = l, g$ в дальнейшем отмечены параметры жидкой и газовых фаз, P_l и P_g – давление жидкой и газовой фаз соответственно, q – интенсивность теплообмена, n – число пузырьков в единице объёма, γ – показатель адиабаты для газа, ω – радиальная скорость пузырьков, ρ_l и ρ_g – истинные плотности жидкой и газовой фаз, α_l и α_g – объемные содержания жидкой и газовой фаз. Скорости u и v соответствуют движению вдоль координат x и y .

Запишем граничное условие для нашей задачи при повышении давления на границе $z_0 = 0$:

$$z=0: p_l(r, t) = \begin{cases} p_0 + \Delta p_l \times \exp\left(-\left(\frac{t - \frac{t_*}{2}}{\frac{t_*}{6}}\right)^2\right), & 0 < t < t_*/2 \\ p_0 + \Delta p_l, & t > t_*/2 \end{cases}$$

Амплитуда давления обозначается как Δp_l , характерное время повышения давления – t_* , а статическое давление – p_0 . На границе $r = R_{cl}$ используется условие, аналогичное воздействию на жесткую стенку.

Для анализа радиального движения примем общее радиальное перемещение w как сумму двух частей: $w = w_A + w_R$. Используем уравнение Релея-Ламба для нахождения значения w_R , а для расчета w_A обратимся к решению задачи о сферической разгрузке в жидкости:

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

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

С учетом акустической сжимаемости и калорического свойства уравнение состояния идеального газа принимает вид:

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

где B – газовая постоянная.

Определим тепловой поток q_g конечным соотношением:

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

$$Nu_g = \begin{cases} \sqrt{Pe_g}, & Pe_g \geq 100 \\ 10, & Pe_g < 100, \end{cases} \quad Pe_g = 12(\gamma_g - 1) \frac{T_0}{|T_g - T_0|} \frac{a|w|}{k_g}, \quad k_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g}.$$

Где используются обозначения $T_0 = const$ – температура жидкости, Nu и Pe - числа Нуссельта и Пекле, k_g - коэффициент температуропроводности газа, c_g и λ_g - теплоемкость и теплопроводность газа. Для вычисления этой системы уравнений будет использоваться запись в переменных Лагранжа.

Пузырьковый кластер прямоугольной формы

Изучим процесс колебания воды в канале с учетом его длины L_c и радиуса R_c . Вода заполняет канал и содержит в себе кластер газоздушных пузырьков радиусом R_{cl} . Пузырьковый кластер прикреплен к торцу канала таким образом, что его центр расположен на расстоянии Z_{cl} от границы $z=0$ на оси канала.

Произведем численный анализ динамики ударных волн давления типа «ступенька» в цилиндрическом канале, особенностью которого является пузырьковый кластер в форме полусферы, закрепленный торце канала (рис. 1).

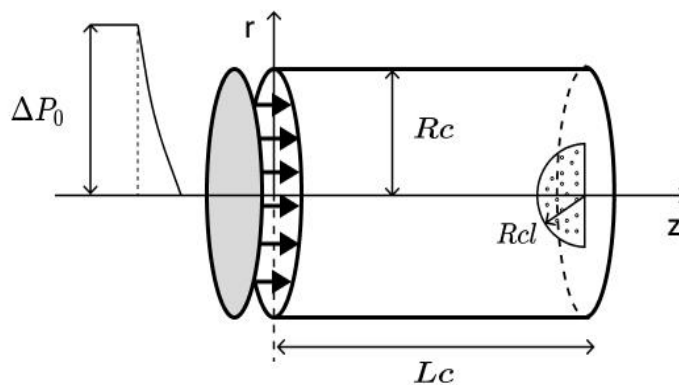


Рис. 1. Схема задачи.

Начальный радиус пузырьков был установлен 1 мм, длина канала $L_c = 1$ м, а его радиус $R_c = 0,1$ м. Для вычисления радиуса пузырькового кластера R_{cl} применялись диапазоны значений, варьирующиеся от 5% до

100% от радиуса канала с шагом 5%. Объемное содержание пузырьков в кластере α_g варьировалось от 0,001 до 0,03 с шагом 0,001.

Вводились следующие параметры для наших численных экспериментов:

$$C_g = 1006 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \text{К}, \quad \rho_{g0} = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \lambda_g = 0,025 \text{ м} \frac{\text{кг}}{\text{К}} \text{с}^3, \quad \gamma = 1,4, \quad \rho_l = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$C_l = 1500 \frac{\text{М}}{\text{с}}, \quad T_0 = 300 \text{ К}, \quad p_0 = 0,1 \text{ МПа}, \quad \Delta p_0 = 0,5 \text{ Мпа}, \quad R_c = 0,1 \text{ м},$$

$$h_{z0} = h_{r0} = 10^{-3} \text{ м}, \quad \tau = 10^{-8} \text{ с}.$$

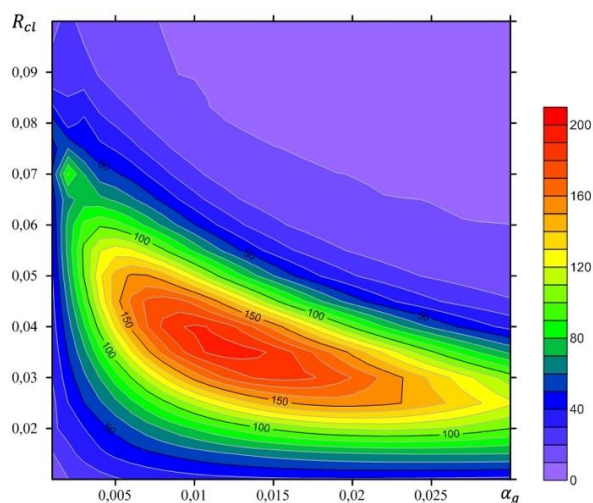


Рис. 2. Карта зависимости максимального давления от радиуса кластера и объёмного содержания пузырьков.

В процессе численного эксперимента были получены данные, представленные на рисунке 2. Проведён ряд расчетов, в результате которых была построена карта зависимости максимального давления от радиуса кластера и объёмного содержания пузырьков. Эта карта демонстрирует условия, при которых наблюдается усиление или ослабление давления в системе, что позволяет определить влияние ключевых параметров кластера на поведение ударной волны типа «ступенька». Можно заметить, что давление близко к нулю при объёмном содержании пузырьков в кластере равном 0,03 и радиусе кластера 90%. При объёмном содержании пузырьков в кластере равном 0,01 и радиусе кластера 40% давление имеет максимальное значение. Рассмотрим подробнее показания с виртуальных датчиков, расположенных в зонах с различными характерными значениями давления.

Частный случай (№ 1.1)

Рассмотрим показания датчиков в трех точках при радиусе пузырькового кластера $R_{cl}=40\%$, при объёмном содержании $\alpha_g=0,001;0,01;0,02$.

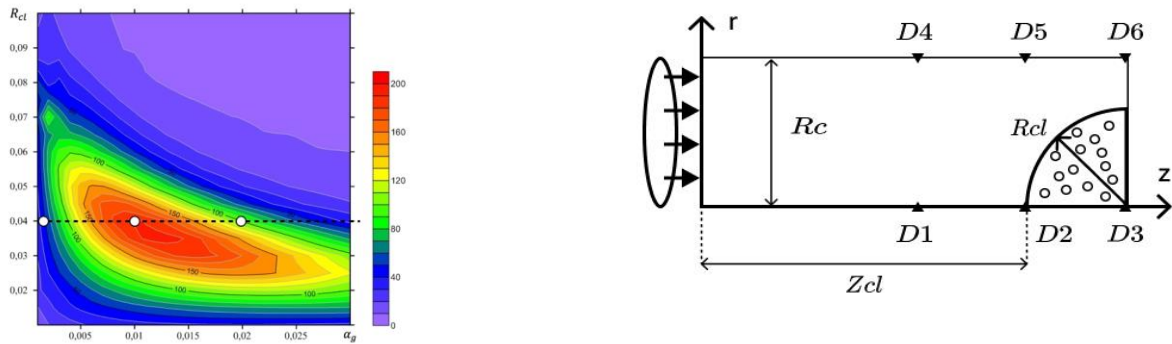


Рис.3. Случай $R_{cl}=40\%$ и $\alpha_g=0,001;0,01;0,02$. (левый фрагмент);
расчетная область, D1-D6 – датчики (правый фрагмент).

Рис. 3 (правый фрагмент) показывает расположение датчиков и пузырькового кластера, однако не содержит конкретных данных о радиусе пузырькового кластера и объёмном содержании.

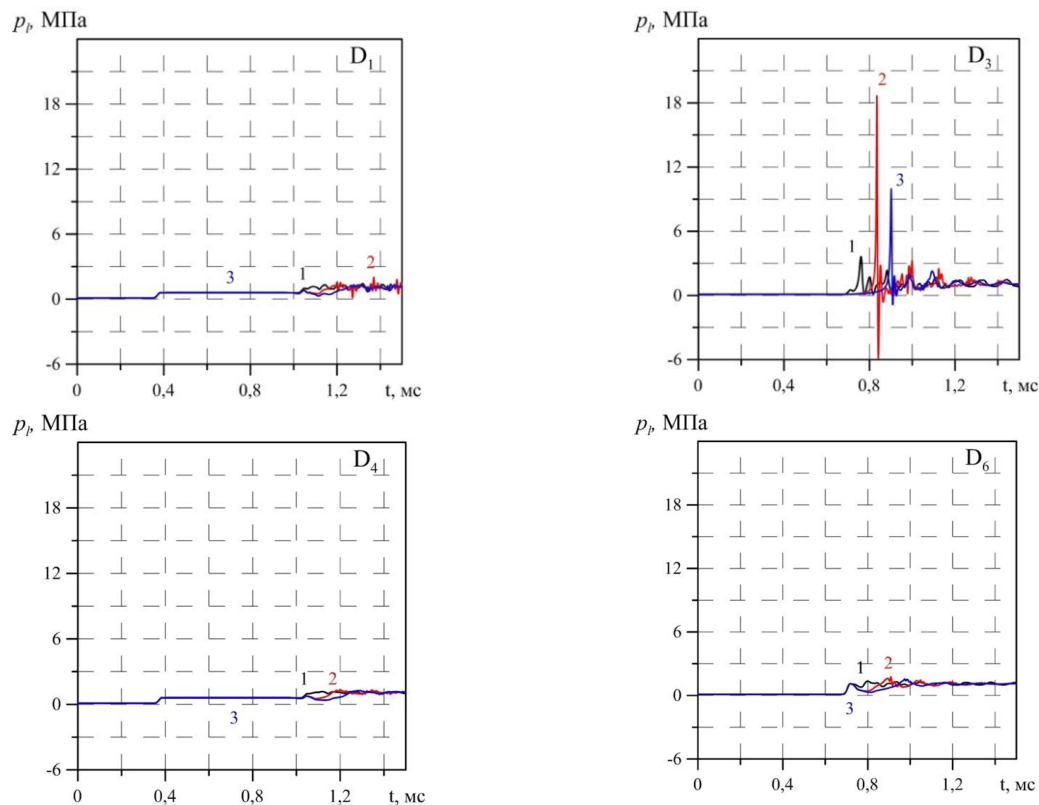


Рис. 4. Результаты осциллограмм при $R_{cl}=40\%$ и $\alpha_g=0,001;0,01;0,02$;
данные получены с датчиков D1, D3, D4, D6.

На рис. 4 представлены расчетные осциллограммы, на которых отображены показания с датчиков D1, D3, D4 и D6 для выбранного радиуса $R_{cl}=40\%$. Показания всех четырех датчиков фиксируют усиление воздействия давления на стенки, при $R_{cl}=40\%$ и объемном содержании 0,01 интенсивность воздействия максимальная.

Частный случай (№2.1)

Рассмотрим с тех же датчиков результаты, представленные в виде осциллограмм в случае объемного содержания $\alpha_g=0,01$, когда $R_{cl}=10\%;40\%;70\%$ (рис. 5).

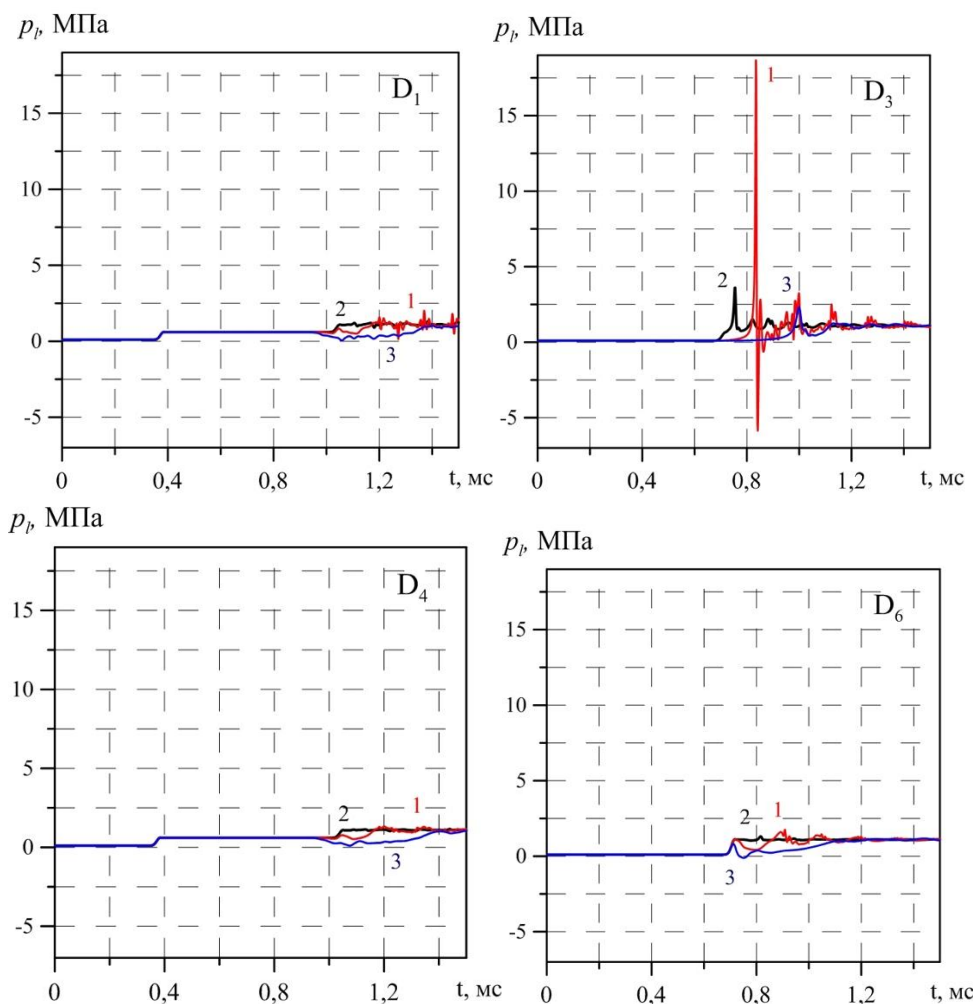


Рис. 5. Результаты осциллограмм при $\alpha_g=0,01$ и $R_{cl}=10\%;40\%;70\%$, данные получены с датчиков D1, D3, D4, D6.

На осциллограммах с датчика D3, расположенного за кластером на торце канала, наблюдается значительное увеличение уровня возмущений в

обоих исследуемых случаях. Максимальные возмущения фиксируются при определенных значениях объемного содержания пузырьков и радиуса кластера. В частности, при объемном содержании равно 0,01 и радиусе кластера $R_{cl} = 40\%$ уровень возмущений достигает максимума, что указывает на усиленное взаимодействие волны с пузырьковым кластером. В то же время остальные датчики, установленные вдоль канала, регистрируют лишь небольшие всплески возмущений.

На рис. 7 представлена 3D проекция случая, при котором объемное содержание равно 0,01 и радиус кластера $R_{cl} = 40\%$.

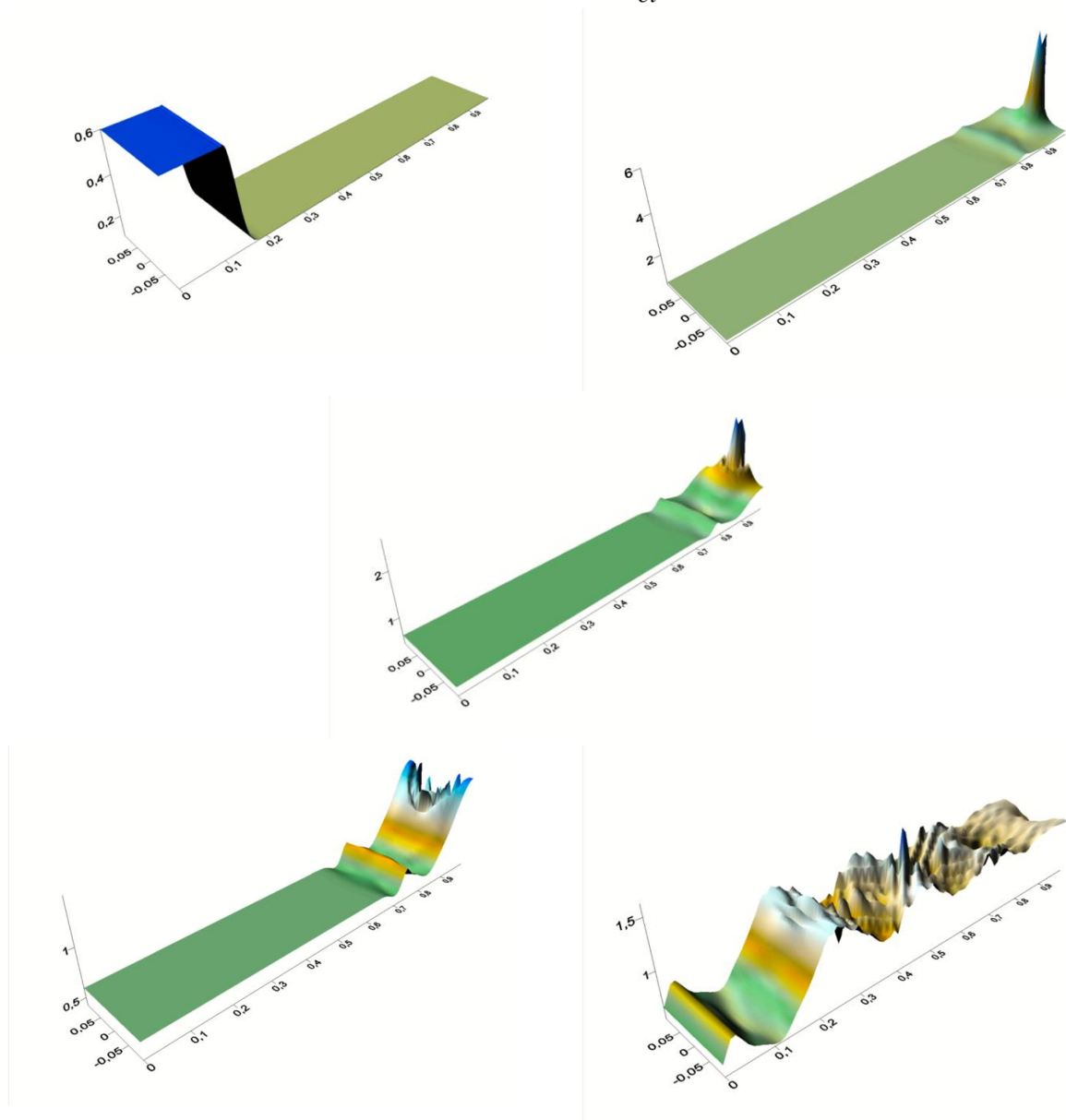


Рис.6. 3D - проекция при объемном содержании 0,01 и радиусе кластера $R_{cl} = 40\%$.

Пузырьковый кластер прямоугольной формы

Рассмотрим процесс колебания воды в канале с учетом его длины L_c и радиуса R_c . Вода заполняет канал и содержит в себе кластер газоздушных пузырьков ширины D . Пузырьковый кластер прикреплен к торцу канала, и его центр расположен на расстоянии Z_{cl} от границы $z=0$ на оси канала.

Выполним численный анализ динамики ударных волн давления типа «ступенька» в цилиндрическом канале, где кластер имеет форму прямоугольника и закреплен на торце канала (рис. 7).

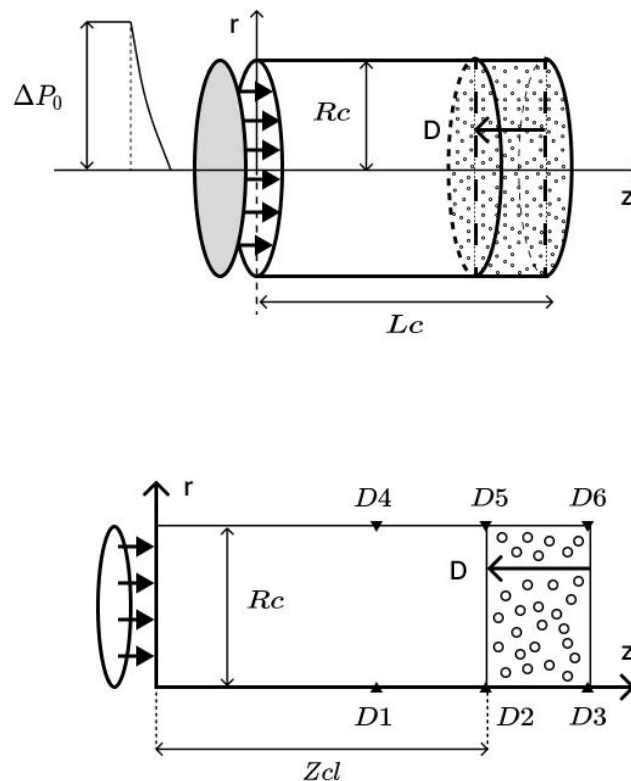


Рис. 7. Схематичное изображение задачи.

Начальный радиус пузырьков был установлен 1 мм, длина канала $L_c = 1$ м, а его радиус $R_c = 0,1$ м. Для вычисления ширины пузырькового кластера R_{cl} применялись диапазоны значений, варьирующиеся от 5% до 100% от радиуса канала с шагом 5%. Объемное содержание пузырьков в кластере α_g варьировалось от 0,001 до 0,02 с шагом 0,001.

Частный случай (№1.2)

Рассмотрим показания датчиков в тех же точках, что и в задаче с полусферическим кластером. Зафиксируем радиус пузырькового кластера $R_{cl}=40\%$, и рассмотрим динамику волны при объёмном содержании $\alpha_g=0,001;0,01;0,02$ (Рис. 8).

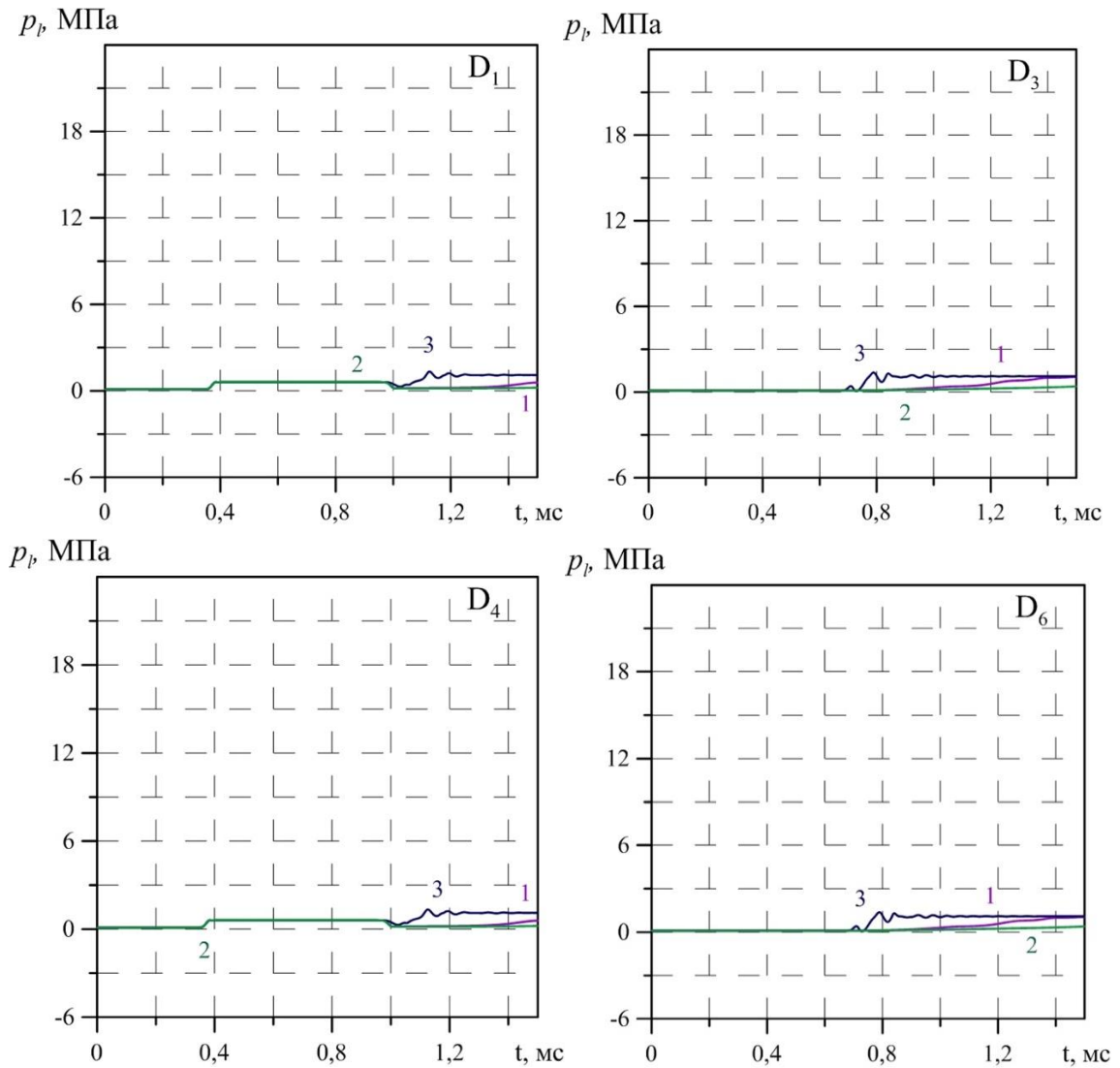


Рис. 8. Результаты осциллограмм при $R_{cl}=40\%$ и $\alpha_g=0,001;0,01;0,02$; данные получены с датчиков D1, D3, D4, D6.

Частный случай (№2.2)

Рассмотрим показания с тех же датчиков в случае объемного содержания $\alpha_g = 0,01$, когда $R_{cl} = 10\%$; 40% ; 70% (рис. 9).

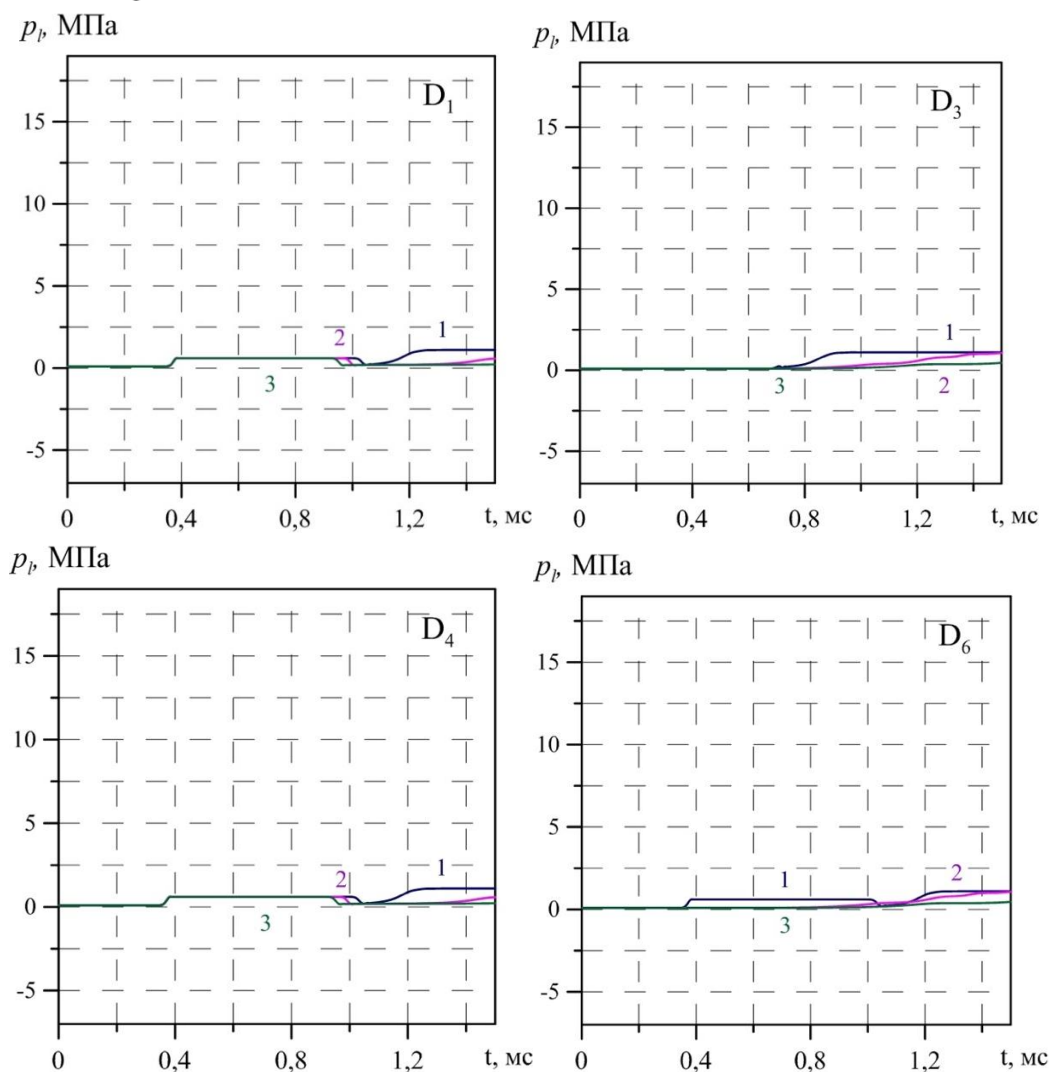


Рис 9. Результаты осциллограмм при $\alpha_g = 0,01$ и $R_{cl} = 10\%$; 40% ; 70% , данные получены с датчиков D1, D3, D4, D6.

В случае фиксированного радиуса кластера и варьирования объемного содержания пузырьков наблюдаются небольшие всплески возмущений, без значительных скачков давления (синий). При этом показания датчиков D1 и D4 совпадают, как и показания D4 и D6.

В задаче, где объемное содержание фиксированное, но радиус кластера меняется, показания датчиков D1 и D4 также совпадают, однако показания датчиков D4 и D6 различаются.

Сравнительный анализ

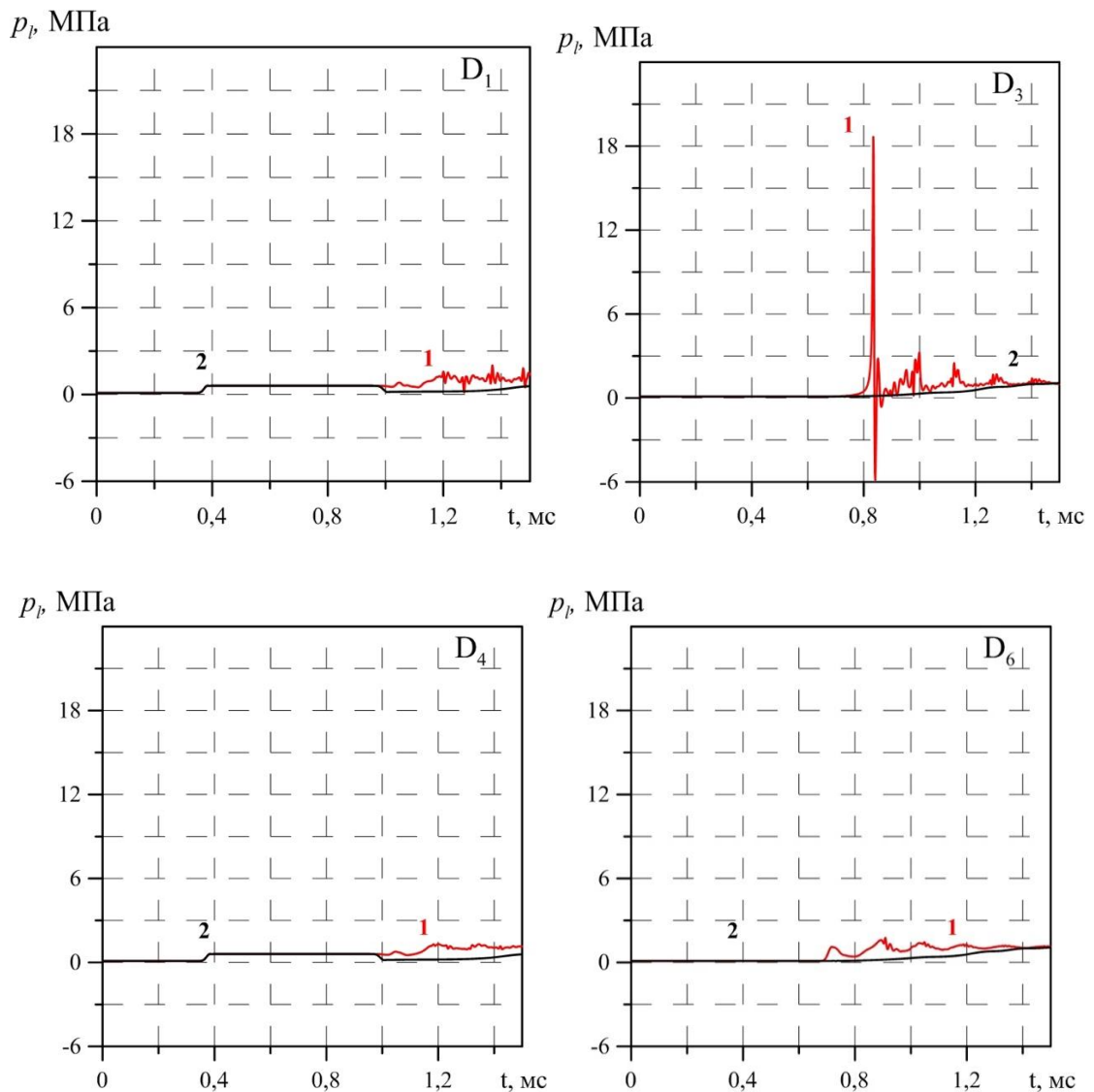


Рис 10. Результаты осциллограмм при $\alpha_g = 0,01$ и $R_{cl} = 10\% ; 40\% ; 70\%$,
данные получены с датчиков $D1, D3, D4, D6$;
1 – кластер полусфера, 2 – кластер прямоугольник.

При анализе динамики волны в задачах с различными геометрическими формами кластеров, такими как полусферический и прямоугольный, выявляются заметные различия в характере возмущений и скачков давления (см. Рис. 10).

В задаче с полусферическим кластером при фиксированном радиусе 40% и объемном содержании пузырьков 0,01 наблюдаются значительные всплески возмущений. Эти всплески достигают высоких значений давления, особенно в области, близкой к пиковым значениям, зафиксированным на осциллограмме. Визуальный анализ данных осциллограммы показывает характерную «башневидную» форму, что указывает на резкие скачки давления

и интенсивные колебания внутри кластера. В таких условиях пузырьки в кластере активно взаимодействуют с акустической волной, что приводит к увеличению энергии и динамики возмущений внутри кластера.

В отличие от полусферического случая, в задаче с прямоугольным кластером динамика волны показывает гораздо менее выраженные возмущения. Всплески давления здесь незначительные, что указывает на более стабильное поведение среды. В точке пика, аналогичной точке в полусферической задаче, существенного скачка давления не возникает. Волна, проходя через кластер, не вызывает таких резких изменений, как в случае с полусферой – это заметно на осциллограмме, где форма сигналов более сглажена и не демонстрирует «башневидных» всплесков.

Заключение

Исследование динамики ударных волн в многофазных средах с пузырьковыми кластерами различных геометрических форм, таких как полусферический и прямоугольный кластер, показало важные особенности поведения ударной волны типа «ступенька». Анализ характеристик волнового процесса, таких как всплески давления и поведение волн вблизи кластеров, демонстрирует ключевые различия.

Для полусферического кластера выявлены значительные скачки давления, достигающие максимальных значений в определенных точках. Например, на осциллограммах с датчиков фиксируются характерные «башневидные» всплески, указывающие на наличие интенсивных скачков давления в канале. Это объясняется активным взаимодействием пузырьков с ударной волной, что и вызывает значительные скачки давления.

Противоположная картина наблюдается в задаче с прямоугольным кластером. В этом случае, при тех же условиях радиуса и объемного содержания, всплески давления оказываются менее выраженными, и значительных скачков не наблюдается. Это указывает на более стабильное и равномерное поведение среды, где волновые возмущения менее интенсивны. Осциллограммы показывают сглаженные колебания, без явных пиков, характерных для полусферического кластера.

Геометрия пузырькового кластера и параметры пузырьков (радиус, объемное содержание) оказывают существенное влияние на характер распространения ударных волн в многофазных средах. Полусферические кластеры способствуют активному взаимодействию с волной, вызывая значительные всплески давления, в то время как прямоугольные кластеры демонстрируют более сглаженную динамику. Эти выводы важны для понимания поведения пузырьковых сред и могут быть полезны при проектировании систем, где критически важен контроль волновых процессов и давления.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НАУЧНО- КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

1. Динамика волн давления в жидкости, содержащей несколько пузырьковых зон Юсупова Р. У. // Многофазные системы. — 2023. — Т. 18, №2. — С. 80–81.
2. Динамика волн давления в жидкости, содержащей пузырьковую зону полусферической формы Юсупова Р. У. // ВКНСФ – 27. — 2023.—С. 227.