

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Галимзянова Марата Назиповича «Волны давления в жидкости с парогазовыми пузырьками и задачи акустической устойчивости», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Галимзянова М.Н. посвящена теоретическому и численному исследованию динамики двумерных волн в пузырьковой жидкости, а также вопросам устойчивости перегретых жидкостей с парогазовыми пузырьками при акустическом воздействии. Отметим, что исследованию пузырьковых сред посвящено достаточное количество работ, однако детальное изучение динамики волн в пузырьковых жидкостях на сегодняшний день не потеряло своей актуальности. **Тема диссертации является актуальной** как с точки зрения развития волновой динамики многофазных сред, так и с точки зрения приложений. Пузырьковые жидкости широко распространены в природе и являются рабочими телами во многих технологических процессах. В качестве примера можно отметить течения кавитирующих жидкостей в технологически устройствах, использование пузырьковых завес для охраны подводной фауны при проведении подводных взрывных работ и другие приложения. Автор настоящей работы выполнил детальный параметрический анализ сложных не одномерных нестационарных волновых процессов в жидкостях с парогазовыми пузырьками в рамках достаточно апробированных моделей пузырьковых сред. Результаты решения задач, представленные в диссертации, представляют значительный фундаментальный и прикладной интерес.

Основные новые результаты диссертации:

– Проведено параметрическое исследование термодинамической устойчивости при слабых возмущениях жидкости с парогазовыми пузырьками. Определены границы устойчивости при различных значениях

начального давления и перегрева жидкости. Установлено, что наличие нерастворимого газа в пузырьках расширяет границы устойчивости по сравнению с жидкостью с чисто паровыми пузырьками.

– Аналитически изучено взаимодействие гармонических волн с границей раздела между чистой и пузырьковой жидкостью при их нормальном и наклонном падении. Показано, что при падении низкочастотной волны (с частотой, меньшей собственной частоты колебаний пузырьков) со стороны пузырьковой жидкости происходит ее полное отражение. При падении волны со стороны чистой жидкости при любом угле падения волна проходит в пузырьковую жидкость.

– Выполнено численное моделирование взаимодействия волн давления типа «ступенька» в жидкости с пузырьковыми газожидкостными кластерами различной формы (шар, цилиндрический слой, сплошной цилиндр) и разного расположения в трубе. На плоскости «начальный радиус пузырьков – начальное объемное содержание газа» построены карты режимов усиления волн давления. Показано, что в случае шарового кластера формируется пик давления, амплитуда которого может многократно превысить начальную амплитуду волны.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов работы обеспечивается использованием фундаментальных уравнений механики многофазных сред при построении математических моделей, использованием апробированных методов численного моделирования, а также сопоставлением полученных результатов с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Научная и практическая значимость. Результаты данной работы являются весомым вкладом в развитие волновой динамики многофазных сред. Полученные численные решения задач об усилении волн давления представляют значительный практический интерес для возможных при-

ложений в химических технологиях, теплоэнергетике и инженерных разработках.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 243 страницы, включая 70 рисунков и список литературы, состоящий из 258 наименований.

Во введении представлена общая характеристика работы. Показана актуальность выбранной темы исследования. Определены цели и задачи исследования. Сформулированы выносимые на защиту положения. Указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен обзор основных теоретических и экспериментальных работ, исследующих волновые процессы и устойчивость жидкости с газовыми, паровыми и парогазовыми пузырьками.

Во второй главе выписаны основные допущения и уравнения модели динамики пузырьковой жидкости с газовыми и парогазовыми пузырьками. Для описания межфазных тепломассообменных процессов использована схема, основанная на решении уравнений переноса для отдельного пузырька, таких, как уравнения теплопроводности и диффузии. Получено дисперсионное уравнение, уравнения для равновесной скорости звука, равновесного радиуса и критического объёмного содержания пузырьков в рассматриваемых средах. Выполнен их анализ.

В третьей главе рассмотрены особенности отражения и преломления гармонических волн при нахождении на границу между «чистой» жидкостью и жидкостью, содержащей пузырьки с парогазовой смесью, как при нормальном, так и при наклонном их падении. Исследованы зависимости от частоты колебаний коэффициентов отражения и преломления звука. Изучена устойчивость при слабых возмущениях жидкости с парогазовыми пузырьками.

В четвёртой главе выполнен анализ эволюции волн давления в заполненной чистой жидкостью цилиндрической трубе при наличии в ней

пузырьковой области в форме шара. Исследовано влияние объёмного содержания пузырьков, размера и расположения пузырьковой области на динамику волны типа ступенька. Показана возможность усиления волны сжатия. Построены карты режимов усиления.

В пятой главе продолжены исследования четвертой главы и проведен анализ динамики волн в случае, когда пузырьковая область является цилиндрическим слоем или сплошным цилиндром конечных размеров. Построена карта усиления волн сжатия в зависимости от начального объёмного содержания пузырьков и протяжённости пузырьковой зоны.

В конце каждой главы сформулированы выводы.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

По содержанию диссертации можно высказать следующие **замечания**.

1. При анализе падения волн на границу между чистой и пузырьковой жидкостями не выделена роль воздуха в парогазовых пузырьках (вывод 2), хотя новизна работы состоит в исследовании волн в смеси воды с пузырьками воздуха и пара.

2. Автор пользуется терминами «прямое» и «косое» падение волн на границу между чистой и пузырьковой жидкостями вместо общепринятых терминов нормальное и наклонное падение.

3. Глава 2 называется «Специфика распространения звука в воде с парогазокапельными пузырьками», однако, в тексте капли не упоминаются, и не анализируется возможность их появления и влияние на волновые процессы.

4. В п.4.2.2 принцип построения разностной схемы и методика численного моделирования не изложены. Описано лишь построение разностной сетки.

5. На с.137 написано: «Отметим, что случай задания давления на границе соответствует разрыву мембраны между камерой высокого давления, заполненной газом, и рабочей камерой, в которой находится исследуемая система». Это выражение не точное. Постановка задачи, использованная в работе, соответствует задаче о поршне.

6. В работе неоднократно упоминается о возможности гашения ударных волн пузырьковыми экранами, хотя этот случай не рассматривался и соответствующие результаты расчетов в диссертации не приведены.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение.

Работа является законченным диссертационным исследованием, выполнена на достаточно высоком научном уровне, а ее результаты имеют научно-практическую значимость. Основные результаты диссертации доложены на ряде международных и всероссийских конференций и опубликованы в научной печати, в том числе в 16 работах, 4 из которых – в изданиях индексируемых WoS и Scopus, 9 статей в журналах, индексируемых RSCI, и три статьи в непереводных российских журналах из перечня ВАК. Автореферат верно отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа по актуальности, научной новизне, основным положениям и выводам соответствует требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Галимзянов Марат Назипович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук (специальность 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»), профессор, главный научный сотрудник Тюменского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, 625026, г. Тюмень, а/я 1507, +7 (3452) 68-27-45, e-mail: A.A.Gubaidullin@yandex.ru

Губайдуллин Амир Анварович

26.11.2024.

Тюменский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, 625026, г. Тюмень, а/я 1507, +7 (3452) 68-27-45, e-mail: A.A.Gubaidullin@yandex.ru

Подпись А.А. Губайдуллина заверяю.

Ученый секретарь ТюмФ ИТПМ СО РАН

С.Л. Бородин

