

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель Федерального  
государственного бюджетного научного  
учреждения Уфимского федерального  
исследовательского центра Российской  
академии наук (УФИЦ РАН)  
доктор биологических наук  
Мартыненко Василий Борисович



*Ю.И. Мавлютов*  
\_\_\_\_\_

2024 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
Уфимского федерального исследовательского центра  
Российской академии наук

Диссертация «Волны давления в жидкости с парогазовыми пузырьками и задачи акустической устойчивости» выполнена в 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 (ИМех УФИЦ РАН).

В период подготовки диссертации и по настоящее время соискатель Галимзянов Марат Назипович работает в ИМех УФИЦ РАН в должности и.о. директора. В 1998 году окончил с отличием Башкирский государственный университет по специальности «Прикладная математика». Диссертацию на

соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы на тему «Динамика двумерных волн в пузырьковой жидкости» защитил в 2004 году в диссертационном совете Д.212.013.09, созданном на базе Башкирского государственного университета. Ученое звание доцента по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы» присвоено в 2013 году.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Актуальность темы.** Во многих технологических процессах нефтегазовой отрасли, теплоэнергетики и химической промышленности течение жидкостей происходит в широком диапазоне температур и давлений. Нередко значения физических параметров (давление, температура и т.д.) соответствуют условиям метастабильности. Поведение жидкостей в метастабильных состояниях зависит от фонового излучения, наличия в составе жидкостей примеси газовых зародышей или твердых частиц и прочих факторов. Переход системы из метастабильного состояния в устойчивое при незначительном изменении внешнего воздействия способен вызвать аварийные последствия. Поэтому определение диапазона параметров устойчивости парогазожидкостных систем является актуальной проблемой современной механики.

Распространенным и достаточно универсальным диагностическим инструментом мониторинга состояния газожидкостных систем являются акустические волны. Дистанционные методы акустического зондирования используются для обнаружения и изучения метановых «факелов» на дне океанов и морей, мониторинга уровня жидкостей в межтрубном пространстве, исследования процесса вскипания жидкостей. В связи с этим необходимо развитие исследований по акустике пузырьковых сред для научно обоснованных технических и технологических решений при проектировании устройств акустического контроля.

Важнейшим условием безопасности трубопроводных систем, транспортирующих широкие фракции легких углеводородов, является

понимание механизмов возбуждения и усиления амплитуды волновых процессов. Пузырьковые системы, как пассивные, так и содержащие взрывчатые газовые смеси, могут рассматриваться в качестве среды, возбуждение которой ударными волнами может привести к существенному усилению волнового поля и генерации мощного ударно-волнового импульса. Наряду с этим пристеночные пузырьковые зоны из-за фокусировки в них внешнего волнового поля интенсифицируют процесс кавитационной эрозии. Таким образом, пузырьковые среды в качестве инициатора значительного роста давления в смеси представляют несомненный интерес.

К настоящему времени накоплен весомый теоретический задел в области акустических и одномерных нелинейных волн в пузырьковой жидкости. Отметим исследователей, которые внесли весомый вклад в изучение акустических и ударных волн в пузырьковой жидкости: Акуличев В.А., Гасенко В.Г., Гельфанд Б.Е., Губайдуллин А.А., Губайдуллин Д.А., Донцов В.Е., Лежнин С.И., Кедринский В.К., Накоряков В.Е., Нигматулин Р.И., Осипцов А.Н., Петров А.Г., Прибатурин Н.А., Скрипов П.В., Сычев А.И., Шагапов В.Ш., Lahey R.T., Matsumoto Y., Kanagawa T., Leroy V., Wallis G.B. и др. Тем не менее, остается круг важных и перспективных для изучения теоретических лакун. Необходимость более подробного изучения акустических свойств пузырьковой жидкости и двумерных волн возникает, например, при распространении волн давления в однородной жидкости при наличии в ней зоны конечных размеров, содержащей пузырьки газа, или в случае сосредоточенного удара по пузырьковой жидкости.

Все вышеизложенное обуславливает актуальность темы диссертации необходимостью развития теории волновой динамики гетерогенных сред, расширения и углубления теоретических представлений о нестационарных волновых процессах в пузырьковых системах, интенсивным использованием многофазных смесей в технике, потребностями обеспечения безопасности при эксплуатации взрывоопасных гетерогенных систем.

**Целью данной работы** является развитие теоретических моделей, построение и анализ зон устойчивости перегретой водовоздушной пузырьковой среды, отражения и преломления акустических волн на границе воды и смеси воды с парогазовыми пузырьками, а также численное исследование фокусировки волны пузырьковыми кластерами различной формы.

В соответствии с представленной целью в диссертационной работе решены следующие **задачи**:

1. Исследование распространения слабых возмущений в перегретой водовоздушной пузырьковой среде, когда в пузырьках помимо водяного пара присутствует инертный газ, не участвующий в фазовых превращениях.

2. Исследование устойчивости парогазожидкостной смеси в зависимости от уровня перегрева жидкости в широком диапазоне частот внешних возмущений.

3. Изучение особенностей отражения и преломления гармонических волн на границе раздела «чистой» жидкости и жидкости с пузырьками с парогазовой смесью при прямом и «косом» их падении.

4. Построение и развитие теоретических моделей фокусировки волны давления пузырьковыми кластерами различной формы.

#### **Научная новизна результатов, выносимых на защиту.**

1. Впервые построены карты зон устойчивости парогазожидкостных систем в зависимости от степени перегрева жидкости. Проанализировано влияние начальной степени перегрева на эволюцию гармонических волн. Для неустойчивых систем изучена зависимость инкремента от радиуса пузырьков при увеличении степени перегрева воды.

2. Впервые изучены и установлены особенности отражения и преломления гармонических волн на границе раздела «чистой» жидкости и жидкости с пузырьками с парогазовой смесью при нормальном и «косом» их падении. Выписано дисперсионное соотношение, и проведен численный анализ влияния частот возмущений в диапазоне от 10 до  $10^6$  с<sup>-1</sup> на

взаимосвязь угла преломления и угла падения для нескольких значений равновесной температуры.

3. Карты зон достижения максимального значения давления в системе в зависимости от начального объемного содержания пузырьков  $\alpha_{g0}$  и радиуса пузырькового кластера  $R_{cl}$  (в случае сферического кластера) или протяженности пузырькового кластера  $\Delta z$  (в случае цилиндрического кластера). Анализ влияния начального объемного содержания пузырьков и геометрических размеров пузырьковой области на кумуляцию или демпфирование волны давления посредством пузырькового экрана.

**Обоснованность и достоверность результатов диссертации** обеспечивается применением фундаментальных уравнений механики многофазных сред при построение математических моделей, использованием апробированных методов численного расчета. Обоснованность результатов гарантируется верификацией расчетов с экспериментами и данными расчетов других исследователей в некоторых частных случаях.

**Теоретическая и практическая значимость результатов работы.** Полученные в работе результаты расширяют знания о физических процессах, протекающих в многофазных средах, а также могут быть использованы для объяснения механизмов гашения и усиления волн давления с использованием пузырьковых завес. Разработанные модели, алгоритмы и программы могут быть использованы, при разработке и эксплуатации различных подводных объектов. Результаты исследований можно также целенаправленно использовать на практике, например, путем создания различных пузырьковых завес возле конструкций в жидкости для гашения падающих на них интенсивных волн и тем самым избегать разного рода разрушений. Также эффекты ослабления или усиления волн в жидкости пузырьковыми завесами могут быть использованы при охране подводной фауны от ударных нагрузок, возникающих при проведении ремонтно-строительных работ с применением энергии взрыва.

Результаты исследований взаимодействия акустических волн с пузырьковыми средами, с границами раздела между однофазной и двухфазной средой могут быть использованы при проведении исследовательских работ в толще океана, при анализе состояния воды и подводной фауны.

Результаты по устойчивости рассматриваемых систем могут быть использованы в расчетах и проектировании инженерных сооружений и т.д.

**Методы исследования.** Для получения научных результатов в представленной диссертационной работе были применены методы и уравнения механики многофазных сред. Численное моделирование и исследование изучаемых процессов проводилось в среде программирования Microsoft Visual Studio. Для верификации построенных моделей применялся сравнительный анализ с результатами экспериментальных исследований.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

Результаты исследований динамики слабых гармонических возмущений в перегретой водовоздушной пузырьковой среде, когда в пузырьках помимо водяного пара присутствует инертный газ, не участвующий в фазовых переходах. Анализ карты зон устойчивости рассмотренных систем в зависимости от степени перегрева жидкости, составленной в координатах объемное содержание–радиус пузырьков в диапазоне равновесного давления от 0.1 до 10 МПа. Оценка влияния начального перегрева (от сотых долей до одного градуса) и повышения давления на дисперсию гармонических волн, а также зависимость инкремента от радиуса пузырьков для неустойчивых систем.

Закономерности отражения и преломления гармонических волн на границе раздела «чистой» жидкости и жидкости с пузырьками с парогазовой смесью при прямом и «косом» падении волн на эти границы. Дисперсионные уравнения и их анализ для широкого диапазона частот, теплофизических параметров и параметров смеси (объемного содержания и дисперсности).

Оценка критических углов, при которых происходит явление полного внутреннего отражения.

Теоретические модели фокусировки волн давления в канале, заполненном водой и содержащем пузырьковые кластеры различной геометрии. Анализ максимальных значений амплитуды волны, реализующихся на оси цилиндрического канала и его стенках в силу фокусировки импульса, в зависимости от параметров задачи.

**Личный вклад.** Основные научные результаты получены автором самостоятельно. В работах, выполненных в соавторстве, диссертант, как правило, участвовал во всех этапах исследования от постановки задачи и выбора метода ее решения до получения и анализа результатов. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

**Апробация работы.** Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001; Нижний Новгород, 2006, 2011; Казань, 2015; Уфа, 2019; Санкт-Петербург, 2023);
- VI Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2006) (Санкт-Петербург, 2006);
- Российская научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2006);
- Школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2007, 2010);
- Международная конференция «Потоки и структуры» (Санкт-Петербург, 2007; Москва, 2009);
- Всероссийская конференция, посвященная памяти академика А.Ф. Сидорова (Абрау-Дюрсо, 2006, 2008, 2012);

- Международная научная школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 2017, 2022, 2023);
- Российская конференция «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения» и школа молодых ученых «Газовые гидраты -- энергия будущего» (Уфа, 2017, 2024);
- Всероссийская конференция и школы для молодых ученых «Математические проблемы механики сплошных сред», посвященная 100-летию академика Л.В. Овсянникова (Новосибирск, 2019).

Кроме того, результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах в Институте механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН под руководством Академика АН РБ, профессора В. Ш. Шагапова и профессора С. Ф. Урманчеева; на семинаре Института механики МГУ под руководством профессора А.Н. Осипцова (Москва); в Тюменском филиале ИТПМ СО РАН под руководством профессора А.А. Губайдуллина (Тюмень); на семинаре Института механики и машиностроения КазФИЦ РАН под руководством чл.-корр. РАН Д.А. Губайдуллина (Казань); на семинаре Института теплофизики СО РАН под руководством чл.-корр. РАН Н.А. Прибатурина (Новосибирск).

**Основные результаты диссертации** опубликованы в 36 работах, в том числе 12 статей в научных изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, либо в научных изданиях, индексируемых в базе данных RSCI, 4 научные работы в изданиях, включенных в базы данных Web of Science и Scopus, 20 статей в других изданиях. Получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

**В изданиях, переводные версии которых входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science, Scopus:**

№	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
1	Propagation of a Pressure Wave in	Fluid Dynamics. 2023.	Galimzyanov M.N., Agisheva U.	Участие в постановке задачи, разработке

	a Tube Filled with Liquid Containing of a Bubble Cluster in the Form of a Hollow Cylinder	Vol. 58, № 8. Pp. 1495–1501. DOI: 10.1134/S0015462823602759.	О.	математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
2	Динамика волны давления в цилиндрическом канале, содержащей кольцевую пузырьковую зону	Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96, № 4. С. 1008– 1016. DOI: 10.1007/s10891-023-02764-3.	Гималтдинов И.К., Галимзянов М.Н., Кочанова Е.Ю.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
3	Acoustic Waves Propagation in Heated Water with Vapor Bubbles	Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical modelling, programming and computer software. 2020. Vol. 13, № 1. Pp. 28–38. DOI: 10.14529/mmp200102.	Agisheva U.O., Galimzyanov M.N.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
4	Особенности распространения звука в теплой воде с воздушными	Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91, № 4. С. 912–921.	Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Вдовенко И.И., Хабеев Н.С.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных

	пузырьками	DOI: 10.1007/s10891-018-1809-9.		задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
--	------------	------------------------------------	--	--

**В изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов Russian Science Citation Index (RSCI):**

№	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
5	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.	Галимзянов М.Н., Гималтдинов И.К., Кочанова Е.Ю.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
6	Focusing of Compression Waves in a Pipe Containing Annular Bubble Cluster	Lobachevskii Journal Mathematics. 2023. Vol. 44, № 5. Pp. 1564–1570. DOI: 10.1134/S1995080223050062	Agisheva U. O., Galimzyanov M.N.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
7	Распространение волны давления в канале,	Физико-химическая кинетика в	Галимзянов М.Н., Агишева У. О.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели;

	заполненном жидкостью при наличии в ней пузырькового кластера тороидальной формы	газовой динамике. 2022. Т. 23, № 6. DOI: 10.33257/PhChG D.23.6.1029.		разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
8	Уединенные волны в газожидкостной пузырьковой смеси	Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20, № 2. С. 232–240. DOI: 10.18500/1816-9791-2020-20-2-232-240.	Галимзянов М.Н., Агишева У.О.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
9	Wave equation for bubble liquid in Lagrangian variables	Lobachevskii Journal Mathematics. 2019. Vol. 40, № 11. Pp. 1922–1928. DOI: 10.1134/S199508021911009X.	Agisheva U.O., Galimzyanov M.N.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
10	Особенности устойчивости и акустических свойств перегретой жидкости	Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 5. С. 748–754.	Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Вдовенко И.И.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и

	газовыми зародышами при повышении давления	DOI: 10.1134/S0018151X19050146.		отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
11	Акустика и устойчивость перегретой жидкости с газовыми зародышами	Прикладная механика и техническая физика. 2019. Т. 60, № 3. С. 85–95. DOI: 10.15372/PMTF20190309.	Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Вдовенко И.И.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
12	Особенности отражения и прохождения акустических волн на границе «чистой» и пузырьковой жидкости при «косом» их падении	Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 3. С. 464–468. DOI: 10.1134/S0018151X19020184	Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Вдовенко И.И.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
13	Особенности отражения и прохождения акустических волн на границе «чистой» и пузырьковой жидкости при прямом их падении	Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 2. С. 284–290. DOI: 10.1134/S0018151X1901022X	Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Вдовенко И.И.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также

	падении			осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
--	---------	--	--	---

**В изданиях, включенных в перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации (ВАК РФ):**

№	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
14	Динамика импульсного сигнала в цилиндрическом канале жидкостью, содержащем сферический пузырьковый кластер	Вестник Башкирского университета. 2022. Т. 27, № 2. С. 275–286. sDOI: 10.33184/bulletin-bsu-2022.2.5.	Галимзянов М.Н.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
15	О фокусировке волн давления в тороидальном пузырьковом кластере	Вестник Башкирского университета. 2022. Т. 27, № 1. С. 9–17. DOI: 10.33184/bulletinbsu-2022.1.2.	Галимзянов М.Н., Гималтдинов И.К., Агишева У.О.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
16	Волновое уравнение для пузырьковой жидкости переменных Лагранжа	Вестник Башкирского университета. 2019. Т. 24, № 2. С. 278–284.	Галимзянов М.Н., Агишева У. О.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и

		DOI: 10.33184/bulletin- bsu-2019.2.4.		отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
--	--	---	--	--

### В других изданиях:

№	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
17	Волны давления в каналах с жидкостью, содержащих пузырьковые кластеры	Материалы Третьей международной летней конференции «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения», Уфа. 2023. С. 36.	Галимзянов М.Н.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.
18	Волны давления в трубе, заполненной жидкостью, содержащей пузырьковую зону в виде цилиндра	Сборник материалов 14-ой международной конференции - школы молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах», Москва. 2023. С. 16–19.	Агишева У. О., Галимзянов М. Н.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.
19	Взаимодействие волны давления в цилиндрическом канале с пузырьковым кластером тороидальной формы	Сборник тезисов докладов XIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, Санкт-Петербург. 2023. С. 927–930.	Агишева У. О., Галимзянов М. Н.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.
20	Focusing of a compression waves in a toroidal bubble cluster	Journal of Physics: Conf. Series. 2022. Vol. 2388. 012113. DOI:	Gimaltdinov I. K., Nasyrov A. A., Gimaltdinova A.A., Gizatullina A. A.,	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов

		10.1088/1742-6596/2388/1/012113.	Galimzyanov M.N., Kochanova E. Yu.	решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
21	Акустическая устойчивость перегретой жидкости с парогазовыми пузырьками	Материалы 13-ой международной научной школы молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах», Москва. 2022. С. 27–30.	Агишева У. О., Вдовенко И. И., Галимзянов М. Н.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.
22	Волны давления в трубе заполненной жидкостью, содержащий пузырьковую область конечных размеров	Материалы 13-ой международной научной школы молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах», Москва. 2022. С. 24–27.	Агишева У. О., Галимзянов М. Н.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.
23	Modeling of heat and mass transfer processes in petroleum industry	Book of abstract V International Workshop «Thermal Methods for Enhanced Oil Recovery: Laboratory Testing, Simulation and Oilfields Applications» ThEOR2022, Baku. 2022. Pp. 84.	Agisheva U. O., Galimzyanov M. N.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.
24	Волны давления в трубе, заполненной жидкостью при наличии в ней пузырьковой области в форме	Многофазные системы. 2021. Т. 16, № 3–4. С. 112–120. DOI: 10.21662/mfs2021.3.015.	Галимзянов М. Н.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели, проведение расчетов, анализ и подготовка статьи для публикации.

	тора			
25	Особенности устойчивости и акустических свойств перегретой жидкости с газовыми зародышами	Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 8. DOI: 10.21662/mfs2020.2.	Агишева У. О., Галимзянов М. Н.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели, проведение расчетов, анализ и подготовка статьи для публикации.
26	Acoustic properties of overheated liquid with gas nuclei during temperature increasing	Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1400. 077044. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077044	Galimzyanov M.N., Agisheva U.O.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
27	Взаимодействие акустической волны с многослойной средой, содержащей слой пузырьковой жидкости	Многофазные системы. 2019. Т. 14, № 4. С. 233–242. DOI: 10.21662/mfs2019.4.030.	Агишева У. О., Галимзянов М. Н.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели, проведение расчетов, анализ и подготовка статьи для публикации.
28	Acoustic waves in a superheated liquid with a gas nuclei	Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1158. 022007. DOI: 10.1088/1742-6596/1158/2/022007.	Agisheva U.O., Vdovenko I.I., Galimzyanov M.N.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
29	Влияние диффузии	Многофазные	Агишева У. О.,	Участие в постановке

	на акустические свойства пузырьковой жидкости	системы. 2019. Т. 14, № 3. С. 165–175. DOI: 10.21662/mfs2019.3.023.	Вдовенко И. И., Галимзянов М. Н.	задачи, разработке математической модели, проведение расчетов, анализ и подготовка статьи для публикации.
30	Evolution of pressure waves acting on a bubble liquid through adjacent boundaries	Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1158. 022008. DOI: 10.1088/1742-6596/1158/2/022008.	Agisheva U.O., Galimzyanov M.N.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
31	Акустические свойства и устойчивость перегретой жидкости с газовыми зародышами	Сборник трудов XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике, Уфа. 2019. С. 982–984.	Галимзянов М. Н., Вдовенко И. И.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.
32	Волны давления слабой интенсивности в стратифицированной пузырьковой жидкости	Сборник трудов XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике, Уфа. 2019. С. 979–981.	Галимзянов М. Н., Агишева У. О.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.
33	Low-intensity pressure waves in a stratified bubbly liquid	Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1400. 077045. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077045.	Agisheva U.O., Galimzyanov M.N.	Участие в постановке задачи, разработке математической модели; разработка алгоритмов решения поставленных задач, разработка и отладка компьютерных

				программ для проведения расчетов, а также осуществление анализа полученных результатов и формулирование выводов, участие в подготовке статьи.
34	Устойчивость и акустические свойства перегретой жидкости с газовыми зародышами при повышении давления	Материалы всероссийской конференции и школы для молодых ученых «Математические проблемы механики сплошных сред», посвященной 100-летию академика Л.В. Овсянникова, Новосибирск. 2019. С. 16.	Галимзянов М. Н., Агишева У. О.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.
35	Эволюция волн давления в стратифицированной пузырьковой жидкости	Материалы VII международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Экологические проблемы нефтедобычи», Уфа. 2018. С. 8–10.	Агишева У. О., Галимзянов М. Н.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.
36	Эволюция волн давления в жидкости, содержащей пузырьковые зоны	Материалы международной научной конференции «Дифференциальные уравнения и смежные проблемы», Sterlitamak. 2018. С. 46–50.	Агишева У. О., Вахитова Н. К., Галимзянов М. Н., Заляева Э. З.	Участие в подготовке статьи и доклада для публикации, обзор литературных источников по исследуемой теме.

## Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

№	Название статьи	Выходные данные	Авторы	Личный вклад
1	«Двумерные волны в пузырьковой жидкости: гидродинамический симулятор для моделирования волн давления в каналах с жидкостью при наличии в ней пузырьковой области»	Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023687121 от 12.12.2023 г.	Фаттахов С. Р., Сафиуллин А. Р., Галимзянов М. Н.	Участие в реализации модели.
2	«Акустические волны в жидкости с парогазовыми зародышами: гидродинамический симулятор для моделирования динамики акустических волн в жидкости с парогазовыми зародышами».	Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660458 от 07.05.2024 г.	Сафиуллин А. Р., Фаттахов С. Р., Галимзянов М. Н.	Участие в реализации модели.

**Обоснование выбранной специальности и отрасли науки диссертации.** Специальность 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, поскольку результаты включают в себя исследования на основе механики сплошной среды процессов и явлений, сопровождаемых фазовыми переходами. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам раздела «Области исследований» паспорта данной специальности:

п. 7. «Течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии).», поскольку в работе рассматривают пузырьковые среды и взаимодействие

волн давления с ними;

п. 9. «Физико-химическая гидромеханика (течения с химическими реакциями, горением, детонацией, фазовыми переходами, при наличии излучения и др.)», поскольку в работе решении задач учтена роль и влияние фазовых переходов;

п. 15. «Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах», поскольку в работе исследуются гармонические волны и волны давления в виде «ступенька». Рассматривается взаимодействие гармонических волн с границей раздела между «чистой» жидкостью и пузырьковой жидкостью. Волны давления вида «ступенька» воздействуют на пузырьковый кластер;

п. 19. «Точные, асимптотические, приближенные аналитические, численные и комбинированные методы исследования уравнений континуальных и кинетических моделей однородных и многофазных сред», поскольку в диссертационной работе для получения результатов выполнено математическое моделирование поставленных задач с использованием различных численных методов, к тому же получены аналитические решения задачи о взаимодействии гармонической волны с границей раздела между «чистой» жидкостью и пузырьковой жидкостью.

Отрасль науки – физико-математическая, поскольку приведены результаты исследований, соответствующие семи пунктам паспорта специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы; в качестве аппарата исследований преобладают математические методы, результаты получены с опорой на численные расчеты и аналитические решения.

Диссертация «Волны давления в жидкости с парогазовыми пузырьками и задачи акустической устойчивости» Галимзянова Марата Назиповича является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в редакции Постановления Правительства РФ от 25.01.2024 г. № 62), в которой содержатся научно обоснованные результаты, расширяющие знания

об устойчивости пузырьковых систем, о физических процессах, протекающих в многофазных средах, а также могут быть использованы для объяснения механизмов гашения и усиления волн давления с использованием пузырьковых завес. Разработанные модели, алгоритмы и программы могут быть использованы, при разработке и эксплуатации различных подводных объектов, при охране подводной фауны от ударных нагрузок, возникающих при проведении ремонтно-строительных работ с применением энергии взрыва.

Диссертация Галимзянова М.Н. рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято 25 июня 2024 г. на расширенном научном семинаре лаборатории «Механика многофазных систем» Института механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН. Присутствовало на заседании 21 человек. Результаты голосования: «за» – 21, «против» – нет, «воздержались» – нет. Протокол № 6.

Заместитель руководителя семинара лаборатории  
«Механика многофазных систем» ИМех УФИЦ РАН,  
кандидат физико-математических наук, доцент

Михайленко Константин Иванович

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Уфимский федеральный исследовательский центр  
Российской академии наук (УФИЦ РАН)  
Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное  
подразделение УФИЦ РАН (ИМех УФИЦ РАН)  
Россия, 450054, Республика Башкортостан, г. Уфа, пр. Октября, 71.  
Телефон: 8(347)235-52-55  
E-mail: imran@anrb.ru

Подпись Михайленко К.И. заверяю  
Ученый секретарь ИМех УФИЦ РАН  Э.Ф. Гайнуллина  
« 10 » июня 2024 г.

