



**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель директора ФИЦ КазНЦ РАН  
по научной работе профессор

Чернов В.М.

« 27 » ноября 2024 г.

### **ОТЗЫВ**

ведущей организации 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 научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность темы.** Газожидкостные среды широко распространены в природе, интенсивно используются в современной технике, являются весьма распространенной рабочей средой во многих отраслях народного хозяйства, например, в теплоэнергетике, криогенной технике, химической, нефтегазодобывающей отраслях промышленности. В связи с этим в настоящее время проводятся многочисленные исследования распространения волн в такого рода средах (акустика океана, оптика атмосферы, физика многофазных систем и т.п.). Для контроля различных технологических процессов в энергетических установках и аппаратах химической промышленности широко используются численное моделирование и физические измерения, связанные с распространением и поглощением волновых возмущений. Насущной задачей для многих областей современной науки является изучение неустойчивости при колебаниях пузырьков и характер распространения нелинейных волн в пузырьковых средах. Так, например, в трубопроводном транспорте пузырьковая завеса с неравномерным распределением пузырьков по пространству может служить эффективным барьером для распространения ударных волн, возникающих в результате технологических процессов. Аналогичные задачи могут возникать в нефтедобыче и нефтепереработке. Обычно параметры таких сред подвержены сильным пространственно-временным возмущениям. Одной из

областей, где в настоящее время достаточно интенсивно развиваются акустические технологии, является медицина, например: акустическое воздействие на опухоли, дробление камней, акустическая диагностика крови и др. В перечисленных примерах достаточно значимыми факторами являются газосодержание и свойства тканей, насыщенных жидкостью.

Особенности акустических свойств пузырьковой жидкости позволяют сканировать размеры и структуру пузырьковых облаков, образовавшихся при выбросах газа со дна водоемов. При этом наиболее интересными и важными являются волновые процессы в пузырьковых жидкостях, носящие нестационарный и многомерный характер. Наиболее интересными для практики свойствами распространения волн давления в пузырьковых жидкостях является диссипация из-за неравновесного теплообмена между газом в пузырьках и жидкостью, а также усиление волн, обусловленное локальной деформационной инерцией пузырьковой смеси. Импульсные волны могут затухать в процессе эволюции в результате нелинейных, диссипативных и дисперсионных эффектов.

Знание закономерностей протекания волновых процессов позволяет конструировать пузырьковые экраны, способные эффективно демпфировать динамическое воздействие ударных волн на преграды в жидкостях.

Таким образом, тема диссертации является актуальной, что обусловлено ее значительной практической значимостью. Поэтому можно заключить, что диссертационная работа Галимзянова Марата Назиповича является актуальным научным исследованием, соответствующими области исследований научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

**Оценка содержания диссертационной работы.** Диссертация объемом 243 страницы состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. В диссертации 70 рисунков, список литературы из 258 наименований.

Во введении показана актуальность работы, намечены цели и задачи исследования. Сформулированы научные результаты, выносимые на защиту, обосновывается достоверность. Приводится научная новизна полученных результатов и их научная, практическая значимость.

Первая глава содержит обзор литературных источников, посвященных

изучению волновых процессов в пузырьковых жидкостях, устойчивости жидкостей с газовыми и парогазовыми пузырьками.

Во второй главе построена математическая модель для описания динамики пузырьковой жидкости с газовыми и парогазовыми пузырьками. Для описания межфазных тепломассобменных процессов использована схема, основанная на решении уравнений переноса, таких как уравнения теплопроводности и диффузии. Получено дисперсионное соотношение для описания распространения акустических волн в жидкости, содержащей пузырьковую зону. Исследовано влияние начального объемного газосодержания, равновесного радиуса пузырьков и температуры на изменение фазовой скорости и коэффициента затухания слабой гармонической волны.

В третьей главе рассмотрены особенности отражения и преломления слабых гармонических возмущений при их взаимодействии с границей между «чистой» жидкостью и жидкостью, содержащей пузырьки с парогазовой смесью, как при прямом, так и при наклонном их падении. Исследовано воздействие частоты возмущений на коэффициенты их отражения и преломления при прямом падении. Получено дисперсионное уравнение и проведен численный анализ влияния частоты возмущений на зависимость угла их преломления от угла падения для трех значений равновесной температуры. Исследована величина критического угла падения, при котором реализуется то же отражение, от параметров двухфазной системы и частот возмущений. Изучена динамика слабых гармонических возмущений в перегретой водо-воздушной пузырьковой среде.

В четвертой главе рассматривается решение задачи о эволюции волн давления в заполненной чистой жидкостью цилиндрической трубе при наличии в ней пузырьковой области (кластера) сферической формы. Рассматриваются случаи расположения пузырькового кластера на оси и у стенки, примыкающей к торцевой поверхности. Исследуется влияние объёмного содержания пузырьков и геометрии пузырьковой области на динамику волновой картины течения. Построены карты максимальных давлений, достигаемых в трубе, в зависимости от значений указанных параметров.

В пятой главе проводится анализ динамики волн давления в трубе, заполненной жидкостью и содержащей пузырьковую область (кластер) конечных размеров в виде полого либо сплошного цилиндров. Пузырьковый кластер располагался как на оси трубы, так и на её боковой поверхности. Установлены критерии усиления и ослабления волны пузырьковым кластером. Построена карта зон достижения максимального значения давления в трубе в зависимости от начального объёмного содержания пузырьков и протяжённости пузырькового цилиндра.

В конце каждой главы приводятся краткие выводы, а в заключении сформулированы основные результаты работы.

Заключение и выводы, диссертационной работы четко сформулированы и полностью соответствуют ее цели и задачам. Основное содержание работы отражено в автореферате. По материалам диссертационного исследования опубликовано 36 работ, из которых 17 в изданиях, входящих в международные базы данных, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Научные публикации, представленные в автореферате, полностью отражают содержание диссертационной работы.

**Обоснованность и достоверность** результатов работы следует из того, что они получены с применением математических моделей, основанных на общих законах и уравнениях механики сплошных сред, с использованием апробированных методов численного решения, а также из того, что ряд результатов расчетов качественно и количественно согласуется как с результатами расчетов других авторов, так и известными экспериментальными данными.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в том, что в работе исследована динамика слабых гармонических возмущений в перегретой водовоздушной пузырьковой среде, когда в пузырьках помимо водяного пара присутствует не участвующий в фазовых переходах газ. Впервые построены карты зон устойчивости паро-газожидкостных систем в зависимости от степени перегрева жидкости. Проанализировано влияние начальной степени перегрева на эволюцию волновой картины течения. Для неустойчивых систем изучена зависимость инкремента от радиуса пузырьков при варьировании степени перегрева несущей жидкости. Получено, что с ростом

статического давления зона устойчивости для чисто парожидкостных систем расширяется, а для системы с газовой компонентой в пузырьках при одних и тех же значениях перегрева сужается. Рассмотрено влияние перегретости жидкости на величину фазовой скорости и коэффициента затухания, когда система находится в устойчивом состоянии. Установлено, что для мелкодисперсной смеси в зоне устойчивости перегрев несущественно влияет на изменение фазовой скорости и коэффициента затухания, что связано с достаточно высокой концентрацией инертного газа в пузырьках. Декремент затухания в устойчивой области меняется не более чем в два раза.

Впервые изучены и установлены особенности отражения и преломления гармонических волн на границе раздела «чистой» жидкости и жидкости с пузырьками парогазовой смеси при прямом и наклонном их падении с описанием теплопроводности пузырьках и жидкости, а также бинарной диффузии в пузырьках соответствующими уравнениями в частных производных. Выписано дисперсионное соотношение и проведён численный анализ влияния частот возмущений в широком диапазоне на зависимость угла преломления от угла падения для нескольких значений равновесной температуры. Изучена зависимость критического угла падения, при котором происходит аналогичное отражение, от характеристик двухфазной системы и частот воздействия. Исследована динамика слабых гармонических возмущений в перегретой водо-воздушной пузырьковой среде. Построены и проанализированы карты зон устойчивости рассмотренных систем в зависимости от степени перегрева жидкости на плоскости объемное содержание–радиус пузырьков с повышением равновесного давления от 0.1 до 10 МПа.

Впервые исследовано распространение волны давления вида «ступенька» в цилиндрической трубе с водой, содержащей шаровые пузырьковые кластеры. В представленных расчетах пузырьковый кластер располагался на оси трубы в двух первом случае - в центре трубы, а во втором - на ее торцевой стенке. Для обоих случаев построены карты областей реализации максимального значения давления в трубе в зависимости от начального объёмного содержания пузырьков и протяжённости кластера по осевой координате. Обнаружено, что при воздействии волны на кластеры в

жидкости образуется уединённая волна, чья амплитуда может превышать амплитуду первоначальной волны в десятки раз.

Также исследована динамика волн давления вида «ступенька» в канале, заполненном водой и содержащем соосный пузырьковый кластер в виде полого или сплошного цилиндра. Численно установлено, что для выбранных параметров задачи взаимодействие импульса с пузырьковой областью в виде сплошного цилиндра приводит к формированию волны давления с амплитудой, более чем в пять раз превышающей аналогичную для полого цилиндра.

#### **4. Научная и практическая значимость результатов работы**

Полученные в работе результаты могут быть использованы для объяснения механизмов гашения и усиления волн давления с применением пузырьковых завес. Разработанные модели, алгоритмы и программы могут быть применены для решения прикладных задач волновой динамики двухфазных сред. Установленные эффекты ослабления или усиления волн в жидкости пузырьковыми завесами могут употребляться при охране подводной фауны от взрывных волн, возникающих при проведении ремонтно-строительных работ с применением энергии взрыва, а также могут быть полезны при расчете и проектировании инженерных сооружений и т.д. Результаты, полученные в работе, расширяют и углубляют теоретические представления о волновых процессах в многофазных средах. Важность для науки и практики обусловлена широким распространением дисперсных сред в природе и современной технике. Знание акустических свойств данных сред необходимо при проектировании энергетических установок и других современных технических устройств, в которых используются такие среды.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в научно-исследовательских, проектных и общеобразовательных учреждениях, занимающихся изучением динамики акустических волн в многофазных полидисперсных средах и ее приложениями.

Результаты исследований могут быть использованы в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, в Институте механики и машиностроения КазНЦ РАН, в Казанском (Приволжском)

федеральном университете, Башкирском, Новосибирском и Тюменском государственных университетах.

### **Замечания и пожелания по диссертации**

1. Не указано, почему не учитывается диффузия газа в жидкости, хотя в пузырьке диффузия учитывается.

2. Как отмечено, новизна модели взаимодействия акустических волн с границей раздела между чистой и пузырьковой жидкостями состоит, во-первых, в том, что в ней тепловые эффекты в пузырьках и жидкости описываются непосредственно уравнениями теплопроводности. Во-вторых, она состоит в том, что диффузия газа в парогазовых пузырьках описывается непосредственно уравнением бинарной диффузии. Хотелось бы видеть демонстрацию преимуществ такого подхода по сравнению с упрощенным описанием эффектов теплопроводности и диффузии, например, сравнением с результатами других авторов.

3. Непонятно, чему физически соответствуют граничные условия на входной границе исследуемой области трубы с пузырьковыми кластерами в ситуации, когда возмущения из исследуемой области доходят до этой границы и отражаются от нее, что, по-видимому, происходит в рассматриваемых задачах.

4. В пятой главе используется численный метод для исследования динамики волн давления в трубе, содержащей различные пузырьковые области конечных размеров. Следовало бы более полно описать используемую методику численного алгоритма с проверкой сеточной сходимости решения.

5. Много неточных утверждений (постановка задачи без указания какой, «парогазокапельные» пузырьки, хотя рассматриваются только парогазовые, неконденсируемый газ называется инертным, используется выражение «уравнения переноса типа уравнений теплопроводности и диффузии» и т.д.), также имеются опечатки и неточности в тексте диссертации.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают значимость полученных в ней результатов.

### **Заключение по диссертационной работе**

Диссертационная работа Галимзянова Марата Назиповича «Волны давления в жидкости с парогазовыми пузырьками и задачи акустической устойчивости» является законченной научно-квалификационной работой, обладает внутренним единством, выполнена на высоком научном уровне и имеет важное научно-практическое значение. Работа соответствует областям исследования научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, российских и региональных научных конференциях и на научных семинарах с участием ведущих специалистов в области механики многофазных сред, теплофизики и математического моделирования.

По своему содержанию диссертационная работа Галимзянова М.Н. соответствует паспорту специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы. Исследование выполнено в соответствии со следующими пунктами паспорта специальности :

7. Течения многофазных сред (течения с химическими реакциями, горением, детонацией, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии.

14. Гидродинамическая устойчивость.

15. Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах.

19. Точные, асимптотические, приближенные аналитические, численные и комбинированные методы исследования уравнений континуальных и кинетических моделей однородных и многофазных сред.

Диссертационная работа Галимзянова М.Н. по актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.20013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор Галимзянов Марат Назипович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Работа докладывалась автором и обсуждалась на научном семинаре Института механики и машиностроения – структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки

