

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*

**Файзуллина Эльнара Айдаровна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВСКИПАЮЩЕЙ СТРУИ  
ВОДЯНОГО ПАРА**

01.06.01 – Математика и механика

Механика жидкости, газа и плазмы

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Уфа – 2025

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:**

**Болотнова Раиса Хакимовна,**

доктор физико-математических наук, с.н.с., 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

**Рецензенты:**

**Исаев Константин Петрович**

доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой функционального анализа и программирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Уфимский университет науки и технологий

**Агишева Ульяна Олеговна**

кандидат физико-математических наук, старший 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

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В современном мире множество природных явлений и технологических процессов связано с газожидкостными системами. Эти уникальные структуры представляют собой сложные образования, где газовая фаза (в виде пузырьков пара или газа) распределена в жидкой среде, выполняющей роль несущей фазы.

Подобные системы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Они активно используются в энергетическом секторе, а также играют ключевую роль в химической, нефтяной и газовой отраслях.

Особого внимания заслуживает поведение газожидкостных сред при значительном содержании газовой фазы (когда коэффициент газосодержания превышает 0,3). В таких условиях проявляется уникальное физическое свойство: скорость распространения звуковых волн в смеси существенно снижается. Это снижение впечатляет своими масштабами: показатель оказывается примерно в 10 раз меньше, чем в чистом газе, и в 100 раз ниже, чем в жидкости.

Данное явление получило всестороннее подтверждение. Его существование было доказано как в ходе практических экспериментов (исследования Г.Б. Уоллиса, 1972), так и посредством теоретических расчётов (работы Р.И. Нигматулина, 1987). Эти исследования заложили фундаментальную основу для понимания особенностей поведения газожидкостных сред.

Изучение процессов взрывного вскипания жидкости в сосудах под высоким давлением, которое происходит при резком падении давления из-за разгерметизации, представляет собой важную задачу из-за множества практических применений. Моделирование подобных явлений помогает предсказывать и предотвращать аварийные ситуации на промышленных предприятиях в сфере нефтяной и атомной энергетики, особенно при разрывах теплоносителей. В таких условиях характеристики пароводяных смесей могут приближаться к критической точке, что увеличивает вероятность возникновения режимов взрывного кипения.

**Целью научно - квалификационной работы** является проведение комплексного исследования динамических процессов в вскипающих потоках и особенностей функционирования газокапельных сред. Научно-исследовательская работа направлена на детальный анализ указанных процессов, при этом основное внимание уделяется совершенствованию механизмов фазовых переходов — парообразования и конденсации, что позволит не только повысить эффективность существующих технологических

решений и создать инновационные методы управления тепловыми процессами, но и обеспечить стабильность работы энергетического оборудования.

#### **Задачи исследования:**

1. Анализ процессов фазовых переходов и теплообмена для оптимизации технологий в теплоэнергетике, также теоретических моделей и экспериментальных методов для изучения динамики вскипающих струй.

2. Изучить поведение газочапельной смеси при точечном взрыве с использованием аналитического решения Л.И. Седова.

3. Оценить свойства демпфирующих газочапельных смесей по сравнению с газовой средой при заданной интенсивности взрыва.

4. Провести расчеты и визуализацию распределения массовых скоростей пароводяного потока при различных условиях насыщения и выявить закономерности, способствующие улучшению технологий в теплоэнергетике и смежных областях на основе полученных данных.

#### **Научная новизна работы**

Научная новизна исследования определяется разработкой инновационных подходов к теоретическому и численному анализу газо-парожидкостных сред, основанных на создании пространственных моделей многофазных систем. Методология базируется на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии для каждой фазы в трёхмерной системе координат с применением одно- и двухскоростных, а также двухтемпературных моделей. Существенным вкладом в развитие теории является комплексный учёт межфазного взаимодействия, включая сопротивление между фазами, процессы контактного теплообмена, а также механизмы энерго- и массопереноса при фазовых переходах испарения и конденсации.

#### **Практическая значимость**

Практическая реализация полученных результатов будет способствовать развитию современных технологий в сфере теплоэнергетики и других смежных производственных областей, что в перспективе приведёт к существенному улучшению показателей энергоэффективности и надёжности промышленного оборудования.

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

1. Проведено исследование динамики поведения газа и газочапельной смеси при точечном взрыве с применением аналитического решения Л.И. Седова.

2. Также изучена динамика образования вскипающей струи водяного пара с сверхкритическими характеристиками, проходящей через узкое сопло. Численное моделирование выполнялось в OpenFOAM с использованием уравнений двухфазной смеси.

3. Проведено численное моделирование динамики формирования вскипающей струи перегретой воды при сверхкритических параметрах. Использована двухфазная модель парожидкостной смеси с учетом контактного теплообмена и неравновесных массообменных процессов.

4. Проведены численные расчеты в OpenFOAM, где показан эффект полного раскрытия потока и визуализация в Paraview подтвердила динамику изменения скорости струйного потока и установила режим раскрытия струи.

### **Публикации**

По результатам проведенных исследований опубликованы 8 статей в журналах, входящих в РИНЦ.

### **Личный вклад автора**

Постановка задач, анализ полученных результатов и написание статей выполнены под руководством научного руководителя. Численная реализация проведенных расчетов, обработка и оформление результатов, подготовка части публикаций проведены автором самостоятельно.

### **Объем и структура работы**

Научно – квалификационная работа объемом 74 страниц состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 74 наименований и приложения. Работа содержит 10 рисунков.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность и искреннюю признательность своему руководителю во время обучения в аспирантуре доктору физ.-мат. наук Раисе Хакимовне Болотновой за постановку задач и ценные советы.

Автор искренне благодарит консультанта кандидата физ.-мат. наук Коробчинскую Валерию Александровну за помощь в решении поставленных задач.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Проведено исследование динамики поведения газа и газокапельной смеси при точечном взрыве с применением аналитического решения Л.И. Седова. При энергии взрыва 100 Дж в газокапельной смеси по сравнению с газовой средой зафиксировано существенное снижение параметров ударной волны: двукратное уменьшение давления и скорости её фронта, 30%-е падение массовой скорости, а также восьмикратное снижение температуры при одновременном трёхкратном увеличении плотности среды.

2. Изучена динамика образования вскипающей струи водяного пара с сверхкритическими характеристиками, проходящей через узкое сопло. Численное моделирование выполнялось в OpenFOAM с использованием уравнений двухфазной смеси.

3. Показана визуализация в Paraview интенсивного расширения струи со сверхзвуковыми скоростями. Выявлено формирование висячего скачка уплотнения и диска Маха на границе струи. Установлено, что вихревые зоны у оси симметрии генерируют акустические волновые импульсы, вызывающие пульсации. Результаты согласуются с данными других исследований.

4. Проведено численное моделирование динамики формирования вскипающей струи перегретой воды при сверхкритических параметрах. Использована двухфазная модель парожидкостной смеси с учетом контактного теплообмена и неравновесных массообменных процессов. Численные расчеты в OpenFOAM показали эффект полного раскрытия потока при начальных условиях  $p_0 = 85.7$  бар,  $T_0 = 573$  К. Визуализация в Paraview подтвердила динамику изменения скорости струйного потока и установила режим раскрытия струи на момент времени  $t = 0.012$  с.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НАУЧНО – КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

1. Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., **Нурисламова Э.А.** Моделирование процесса ослабления сферического взрыва применением водной пены // Многофазные системы. 2019. Т. 14, № 2. С. 108–114. (РИНЦ)

2. Болотнова Р.Х., **Нурисламова Э.А.** Исследование динамики кавитирующей струи // Многофазные системы.. 2020. Т. 15, № 1-2. С. 21. (РИНЦ)

3. Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Коробчинская В.А., **Файзуллина Э.А.** Моделирование пространственных динамических процессов в водных пенах и вскипающих струях // Сборник трудов международной научной конференции «УОМШ-2020». Т.2, Уфв: Аэтерна 2020. С. 180-182. (РИНЦ)

4. Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., **Файзуллина Э.А.** Исследование динамики газа и газокапельной смеси при точечном взрыве на основе аналитического решения Седова // Многофазные системы. 2021. Т. 16, № 1. С. 14-19. (РИНЦ)

5. Коробчинская В.А., Гайнуллина Э.Ф., **Файзуллина Э.А.** Моделирование процесса истечения вскипающей воды через тонкое сопло // Многофазные системы. 2024. Т. 19, № 1s. С. 69-70. (РИНЦ)

6. Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., **Файзуллина Э.А.** Аналитическое уравнение состояния азота для жидкой и газовой фаз // Теплофизика и аэромеханика. 2024. том31, № 6. С. 1187-1194. (РИНЦ)

7. Болотнова Р.Х., **Файзуллина Э.А.** Обзор исследований различных режимов формирования экстремально расширяющихся струй криогенных жидкостей // Многофазные системы. 2025. Т. 20, № 1. С. 12-19. (РИНЦ)

8. Болотнова Р.Х., **Файзуллина Э.А.** Численное моделирование вскипания струи перегретой воды при истечении через канал малого диаметра // Многофазные системы. 2025. Т. 20, № 1с. С. 23-24. (РИНЦ)

## **СВИДЕТЕЛЬСТВА о государственной регистрации для ЭВМ**

1. Коробчинская В.А., Файзуллина Э.А. Определение параметров газочапельной смеси при ударно-волновом сжатии в результате точечного взрыва Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021661096 Москва. Роспатент 06.07.2021г.

2. Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Файзуллина Э.А. Программный комплекс для расчета уравнения состояния азота жидкой и газовой фаз // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024689014. Москва. Роспатент. 03.12.2024 г.