

На правах рукописи

Сиваков Никита Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
РАСПЛАВОВ С ВОДОЙ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН).

Научный руководитель: **Якуш Сергей Евгеньевич**
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор, директор,
г.н.с. лаборатории термогазодинамики и горения
ИПМех РАН

Официальные оппоненты: **Стрижак Павел Александрович**,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор,
зав. лаб. тепломассопереноса ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

Рыжков Сергей Витальевич,
д.ф.-м.н., профессор кафедры «Теплофизика»
ФГАОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Объединенный институт
высоких температур Российской академии наук
(ОИВТ РАН)

Защита состоится «10» декабря 2026 г. в 15 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета 24.1.098.01 при Институте проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН по адресу: 119526, г. Москва, проспект
Вернадского, д. 101, к.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМех РАН
<https://ipmnet.ru/files/diss/2026/5/Sivakov-diss.pdf>.

Автореферат разослан « » сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.098.01,
к.ф.-м.н.

Е.А. Лямина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Работа посвящена изучению процессов теплофизического и гидродинамического взаимодействия высокотемпературных расплавов с водой, применительно к проблеме паровых взрывов. Важность изучения явлений такого типа особенно высока в связи с проблемой обеспечения безопасности ядерных реакторов в атомной энергетике. При тяжелых авариях с плавлением активной зоны опасность представляет контакт высокотемпературного расплава с теплоносителем (водой), вызывающий резкое вскипание воды и распространение взрывных волн, способных нарушить целостность корпуса реактора, нарушить герметичность контейнмента, а в конечном итоге – повлечь за собой выход радиоактивности в окружающую среду.

Выполненные в диссертационной работе исследования актуальны с точки зрения обеспечения безопасности как широко эксплуатируемых и проектируемых в России водо-водяных реакторов ВВЭР (внутрикорпусное и внекорпусное взаимодействие расплава активной зоны с водой), так и для инновационных реакторов на быстрых нейтронах с тяжелометаллическим теплоносителем (аварии с разрывом теплообменной трубки парогенератора с выходом воды в расплав свинца).

В России исследования многофазного взаимодействия высокотемпературных расплавов с жидкостями, быстрых фазовых переходов и теплогидравлики жидкометаллических теплоносителей ведутся в ИТ СО РАН, ИБРАЭ РАН, ОИВТ РАН, ИПМех РАН, ГНЦ РФ–ФЭИ, НИКИЭТ, ОКБМ им. И. И. Африкантова, НИУ МЭИ. За рубежом значительный объем исследований выполняется во Франции (CEA, ASNR), Италии (ENEA), Швеции (KTH), Словении (JSI), Республике Корея (KAERI), Японии (JAEA), научных центрах и университетах США и Китая. В этих организациях ведутся экспериментальные и расчетные исследования, создаются специализированные установки и программные комплексы.

Значительный вклад в развитие теории многофазных течений и исследование процессов межфазного взаимодействия внесли Х. А. Рахматулин, Р. И. Нигматулин, С. С. Кутателадзе, В. Е. Накоряков, С. В. Алексеенко, А. И. Леонтьев, Д. А. Лабунцов, Б. Г. Покусаев, В. В. Ягов, M. Ishii, G. B. Wallis, G. F. Hewitt, C. E. Brennen, N. Zuber, W. M. Rohsenow и другие известные ученые.

Исследованию взаимодействия высокотемпературных расплавов с жидкими теплоносителями, процессов фрагментации и перемешивания расплава с жидкостью, развития паровых взрывов посвящены работы M. L. Corradini, H. K. Fauske, S. J. Board, T. G. Theofanous, G. Berthoud,

D. F. Fletcher, D. Magallon, R. Meignen, T. N. Dinh, P. Kudinov, B. R. Sehgal, отечественных исследователей Ю. А. Зейгарника, Ю. П. Ивочкина, О. А. Синкевича, Л. А. Домбровского, Ю. И. Загоруйко, В. И. Мелихова, О. И. Мелихова, С. Е. Якуша, Н. А. Прибатурина и многих других.

Экспериментальное изучение возникающих при взаимодействии высокотемпературных расплавов с водой многофазных течений является сложным и дорогостоящим, а многие характеристики протекающих процессов не поддаются прямому измерению в опытах. Поэтому высокую **актуальность**, а также важнейшее фундаментальное и прикладное значение имеет развитие и применение методов численного моделирования таких взаимодействий, составляющее основное содержание данной работы.

Целью диссертационной работы является развитие и применение методов численного моделирования для исследования многофазных течений при взаимодействии высокотемпературных расплавов с водой, сопровождающихся фазовыми переходами, развитием межфазных неустойчивостей, деформацией и фрагментацией границ раздела фаз.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Анализ современных экспериментальных и численных исследований, посвященных изучению как локальных механизмов, так и крупномасштабных интегральных характеристик взаимодействия высокотемпературных расплавов с водой.
2. Разработка и реализация математической модели многофазного взаимодействия с учетом фазовых переходов и сжимаемости сред для описания тепловых и гидродинамических процессов взаимодействия расплава с охладителем.
3. Проведение трехмерных численных расчетов локализованного высокоинтенсивного межфазного взаимодействия при паровом взрыве одиночной капли расплава, инициированного внешним импульсом давления.
4. Исследование крупномасштабной динамики многофазных течений путем проведения трехмерных численных расчетов взаимодействия импульсной и непрерывной струй воды с расплавом.
5. Анализ роли фазового перехода, межфазных неустойчивостей и фрагментации границ раздела в формировании и развитии сложной структуры многофазного течения.
6. Валидация полученных результатов на известных экспериментальных данных, включающая качественное сопоставление структуры течения и количественное сравнение основных интегральных характеристик взаимодействия.

Научная новизна:

1. Разработана и реализована математическая модель многофазного взаимодействия при течениях с наличием фазового перехода для сжимаемых жидкостей, отсутствующая в стандартном наборе моделей OpenFOAM.
2. Впервые рассмотрены трехмерные постановки ключевых задач о взаимодействии расплавов с водой и используются многоуровневые адаптивные расчетные сетки для задач такого типа.
3. В задачах с паровым взрывом одиночных капель расплава впервые рассмотрен процесс фрагментации неподвижной и движущейся капель расплава в недогретой воде под действием импульса давления.
4. В расчетах установлено образование кумулятивных водяных микроструй, ранее не рассматриваемых при анализе механизмов взрывной фрагментации капель расплава в воде.
5. Для задач с истечением воды в расплав при различных условиях получены новые данные о формировании многофазной смеси «вода — пар — расплав» и установлены количественные характеристики трехфазной области для последующего исследования возможной взрывной стадии.
6. Впервые использован подход, основанный на совместном применении трехмерного VOF-моделирования, адаптивной расчетной сетки и модели вскипания, позволивший получить наиболее достоверные результаты моделирования задачи взаимодействия струи воды с расплавом.

Практическая значимость. Представленные результаты исследования многофазных течений при взаимодействии расплавов с водой формируют научную основу для дальнейшего развития моделей многофазного взаимодействия и их применения в задачах безопасности ядерно-энергетических установок. Полученные результаты смогут найти практическое применение в атомной энергетике при создании систем безопасности атомных станций, позволяющих устранить или свести к минимуму опасности тяжелых запроектных аварий с плавлением активной зоны. Разработанные подходы и вычислительные модели могут найти практическое применение для анализа других явлений техногенного и природного типа (аварии в металлургической промышленности, подводные извержения вулканов, технологии струйной печати).

Научные исследования, вошедшие в диссертационную работу, выполнялись в рамках проектов РНФ №18-19-00289 и №21-19-00709, а также в рамках Госзадания ИПМех РАН № 124012500440-9.

Методология и методы исследования. Численные расчеты гидродинамических и тепловых явлений, сопровождающих взаимодействие воды с расплавом, проведены при помощи программного пакета с открытым кодом OpenFOAM. Для описания трехфазных систем «вода — пар — расплав» используется модель VOF (Volume of Fluid), в которой вводится эффективная жидкость, свойства которой зависят от объемных долей фаз. Выбор метода обусловлен его широким использованием применительно к проблемам многофазных взаимодействий, в том числе и высокотемпературных расплавов с водой. Используется авторский расчетный модуль fciFoam, в котором реализована модель сжимаемой среды с фазовыми переходами, отсутствующая в стандартном наборе моделей OpenFOAM. Разработанная модель верифицирована на тестовых задачах.

При решении рассматриваемых задач широко использовалась возможность OpenFOAM выполнять расчеты на многопроцессорных высокопроизводительных вычислительных системах с распределенной памятью. Применялось многоуровневое адаптивное измельчение сетки, обеспечивающее локальное повышение пространственного разрешения в областях интенсивного межфазного взаимодействия, для более детального описания мелкомасштабных элементов течения, включая капли, пузырьки и деформирующиеся межфазные границы.

Валидация результатов расчетов включала качественное сопоставление выявленных закономерностей с экспериментальными наблюдениями и количественное сравнение ключевых параметров, определяющих характер многофазного взаимодействия.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель для расчета многофазных течений с наличием фазового перехода для сжимаемых жидкостей.
2. Результаты трехмерных расчетов взаимодействия капель расплава с водой, валидированные на экспериментальных данных.
3. Механизмы фрагментации капель расплава в воде, их отличия для случаев симметричного схлопывания паровой пленки и асимметричного коллапса парового пузыря.
4. Результаты моделирования взаимодействия импульсной струйки воды с расплавом, воспроизводящие основные стадии процесса, подтвержденные экспериментальными данными.

5. Закономерности эволюции многофазного течения, полученные при моделировании взаимодействия непрерывной струи воды с расплавом тяжелого металла, согласующиеся с экспериментами.

Достоверность результатов диссертации подтверждается физической обоснованностью постановок задач, применением современных теоретических подходов и математических моделей в области многофазных течений, верификацией используемых численных методов на стандартных тестовых задачах, валидацией полученных качественных и количественных результатов на известных экспериментальных данных, сопоставлением результатов с данными, полученными при помощи других численных кодов, апробацией положений работы на многочисленных конференциях.

Апробация работы. Результаты настоящей работы докладывались лично автором и обсуждались на профильных всероссийских и международных конференциях:

1. VI Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Севастополь, 22–29 августа 2021 г.),
2. 12-я Международная конференция–школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 1–3 декабря 2021 г.),
3. Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна» (Москва, 1–30 апреля 2022 г.),
4. XXXIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» им. А.П. Сухорукова («Волны-2022») (Красновидово, Московская область, 5–10 июня 2022 г.),
5. Всероссийская конференция с международным участием «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 29–31 августа 2022 г.),
6. 13-я Международная конференция–школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 30 ноября–2 декабря 2022 г.),
7. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 г.),
8. 14-я Международная конференция–школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 28 ноября–1 декабря 2023 г.),
9. 51-я школа-конференция «Актуальные проблемы механики» (Великий Новгород, 19–21 июня 2024 г.),
10. IX Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Сочи, 8–15 сентября 2024 г.),

11. II Всероссийский конгресс с международным участием «Русский инженер» (Москва, 30 октября–1 ноября 2024 г.),
12. Всероссийская конференция с международным участием «XLI Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 7–10 октября 2025 г.),
13. 16-я Международная конференция–школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 2–5 декабря 2025 г.).

Результаты работы отмечены наградами на научных конкурсах:

1. Победитель конкурса лучших научных работ молодых ученых ИПМех РАН – поощрительная премия. Москва, 2022 год.
2. Победитель VIII Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов – III место. Орел, 2023 год.
3. Победитель конкурса лучших научных работ молодых ученых ИПМех РАН – III место. Москва, 2023 год.
4. Победитель секции на Всероссийской конференции с международным участием «XLI Сибирский теплофизический семинар», конкурс среди молодых ученых без степени – II место. Новосибирск, 2025 год.

В 2024 году соискатель удостоен стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов, проводящих научные исследования в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации.

Личный вклад. Автор внес существенный вклад в разработку математической модели многофазных течений с наличием фазового перехода для сжимаемых жидкостей, созданную совместно с научным руководителем С.Е. Якушем, и ее реализацию в виде расчетного модуля в программном пакете OpenFOAM, осуществлял отладку и тестирование модуля, проводил верификационные и валидационные расчеты. Постановка задач исследований [1–5] выполнена при непосредственном участии автора совместно с О.И. Мелиховым и В.И. Мелиховым, а постановка задач, представленных в работах [6; 7] — совместно с С.Е. Якушем. Соискателем лично проведены все вошедшие в диссертацию трехмерные расчеты поставленных задач [1–8], исследованы локализованные высокоинтенсивные процессы межфазного взаимодействия [6; 7] совместно с С.Е. Якушем, проанализированы закономерности формирования и развития крупномасштабных структур многофазных течений [1–5; 8] совместно с О.И. Мелиховым и В.И. Мелиховым, лично проведена визуализация всех результатов. Автором произведено сравнение

качественных и количественных результатов взаимодействия с известными экспериментальными данными [1—3; 6; 8]. Кроме этого, автор внес существенный вклад в подготовку и представление публикаций и докладов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 печатных изданиях, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК и имеющих категорию K1 [1—3; 6] , 4 — в международных научных журналах, индексируемых Scopus [4; 5; 7; 8] , 9 — в сборниках трудов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 143 страницы, включая 52 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 167 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в диссертационной работе; сформулирована цель работы, для достижения которой поставлены соответствующие задачи; изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов; описаны методы исследований; сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражен личный вклад автора в выполнение работы.

В **первой главе** проведен обзор современного состояния исследований взаимодействия расплава с водой. Показано, что наряду со значительным объемом экспериментальных данных существует широкий спектр подходов к численному моделированию таких процессов. Основными являются многожидкостные модели, ориентированные на описание интегральной динамики многофазных систем, и методы с разрешением межфазной поверхности, прежде всего VOF, позволяющие детально исследовать деформацию границ фаз, образование паровых объемов и фрагментацию расплава.

Несмотря на развитие этих подходов, число двух- и трехмерных расчетов взаимодействия воды с тяжелыми расплавами, учитывающих фазовый переход и детальную динамику межфазных границ, остается ограниченным, а применение VOF-подхода представлено лишь отдельными работами. В то же время накопленная экспериментальная база создает необходимые возможности для валидации таких моделей. Поэтому дальнейшее развитие трехфазных моделей с разрешением межфазных границ и их валидация на экспериментальных данных представляются важным и актуальным направлением исследований взаимодействия воды с высокотемпературными расплавами.

Во **второй главе** описана математическая модель многофазного взаимодействия. Для решения данного класса задач разработан расчетный модуль *fcFoam*, основанный на VOF-подходе и предназначенный для моделирования сжимаемых многофазных течений с интенсивным межфазным тепло- и массообменом. В модуле реализована модель фазового перехода вода – пар, в которой скорость испарения определяется на основе локального теплового баланса и не требует задания эмпирических коэффициентов. Для численной реализации математической модели используется метод конечных объемов. Перенос объемных долей фаз осуществляется с использованием TVD-схемы и алгоритма MULES. Для уменьшения численного размытия межфазных границ используется дополнительный сжимающий член. Связь полей давления и скорости обеспечивается алгоритмом PISO, а временной шаг автоматически изменяется с учетом ограничения максимального числа Куранта $Co_{\max} = 0.5$.

Дополнительной особенностью модуля является применение адаптивных динамически перестраиваемых сеток. Локальное измельчение ячеек в области межфазных границ позволяет повысить пространственное разрешение при описании капель, струй и других мелкомасштабных структур без равномерного увеличения числа ячеек во всей расчетной области.

Математическая модель верифицирована на задачах Стефана и пленочного кипения, что подтвердило корректность описания фазового перехода и возможность ее применения к расчетам взаимодействия высокотемпературных расплавов с водой.

В **третьей главе** представлены результаты численных расчетов парового взрыва одиночной капли расплава в воде, инициированного внешним импульсом давления при параметрах, описанных в разделе 3.1.

В разделе 3.2 рассмотрена фрагментация неподвижной капли расплава. Для моделирования начальных возмущений границы раздела вода – пар на ней задавались малые возмущения в форме полусферических выступов радиусом 0.3 мм, выпуклых в сторону капли. На рис. 1 показано взаимодействие расплава с водой для одного из расчетных вариантов. Поверхность расплава и граница раздела пар – вода представлены изоповерхностями объемных долей расплава α_m и пара α_v , построенными при значении 0.2.

Быстрое повышение давления на внешних границах расчетной области приводит к практически мгновенному распространению повышенного давления в воде и схлопыванию паровой пленки вследствие сжатия газовой фазы и конденсации на границе раздела вода – пар. Для первоначально

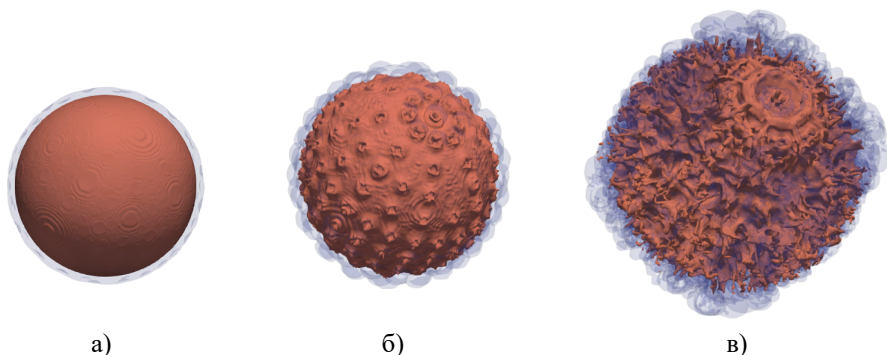


Рис. 1 — Поверхности капли расплава и парового пузыря в моменты времени 10 мкс (а), 40 мкс (б), и 800 мкс (в).

неподвижной капли расплава течение близко к сферически-симметричному. Однако вследствие наличия начальных возмущений границы раздела вода – пар первый удар воды о поверхность расплава происходит локально, а не одновременно по всей поверхности капли. Схлопывание паровой пленки (рис. 1а) приводит к образованию локальных областей прямого контакта расплава с водой, сопровождаемого повышением давления, вскипанием воды и последующим увеличением толщины паровой пленки. Возмущение поверхности расплава при ударе воды вызывает образование первичных всплесков в форме малых струек, которые затем фрагментируются на более мелкие капли. Паровой пузырь достигает максимального размера в момент $t = 40$ мкс (рис. 1б), после чего происходит его вторичное схлопывание. На этой стадии вода взаимодействует не только с основной поверхностью расплава, но и с первичными всплесками и мелкими фрагментами. Уже после первого колебания парового пузыря поверхность расплава утрачивает регулярность и представляет собой совокупность стохастических струек и мелких капелек. На поздней стадии взаимодействия (рис. 1в) хорошо видны многочисленные всплески расплава и мелкие фрагментированные частицы.

Выполнено качественное и количественное сопоставление численных результатов с экспериментальными данными (Ciccarelli J., Frost D.L., 1994). Сравнение форм парового пузыря показывает, что численное моделирование корректно воспроизводит основные особенности фрагментации капли расплава после схлопывания парового пузыря, выделенные в эксперименте: образование мелких струек и капелек расплава, сохранение нефраgmentированного центрального ядра капли. Оценка

изменения размеров капли расплава в расчете показала, что к моменту времени $t = 400$ мкс фрагментируется около 20 % ее первоначальной массы.

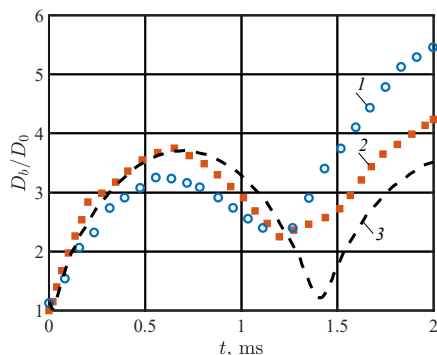


Рис. 2 — Изменение отношения диаметра пузыря к начальному диаметру капли: эксперимент (1); визуальная оценка по расчету (2); расчет через объем паровой фазы (3).

На рис. 2 представлены расчетные зависимости отношения диаметра пузыря D_b к начальному диаметру капли расплава D_0 от времени, а также экспериментальные данные (Ciccarelli J., Frost D. L., 1994). Видимый диаметр парового пузыря в расчетах определялся как его максимальный линейный размер. На рис. 2 также приведен эквивалентный диаметр парового пузыря, рассчитанный по текущему объему пара V_v .

Отчетливо видны колебания пузыря с периодом около 1.2 мс, что значительно превышает длительность инициирующего импульса давления, равную 20 мкс. Следовательно, колебания обусловлены связанными гидродинамическими и тепловыми процессами, инициированными внешним импульсом.

Сопоставление результатов на рис. 2 показывает согласование экспериментальных (точки 1) и численных (точки 2) данных в течение первого колебания парового пузыря. Период колебаний воспроизводится достаточно хорошо, однако расчет завышает амплитуду первого расширения пузыря примерно на 20 % и занижает скорость его последующего роста.

В разделе 3.3 рассмотрена фрагментация движущейся капли расплава. На рис. 3 для одного из расчетных вариантов в плоскости симметрии показаны поля объемных долей фаз и скорости, характеризующие развитие взаимодействия. Расчет проводится в системе отсчета, в которой капля неподвижна, а поток воды направлен вверх (стрелка на рис. 3а). Полученные результаты показывают, что механизм фрагментации движущейся капли существенно отличается от сферически-симметричного случая.

Рис. 3а соответствует моменту окончания воздействия импульса, после которого давление окружающей среды остается постоянным на протяжении всего дальнейшего расчета. За время действия импульса тонкая паровая пленка с тыловой стороны капли схлопывается, тогда как с кормовой стороны вода успевает ускориться, но еще не достигает

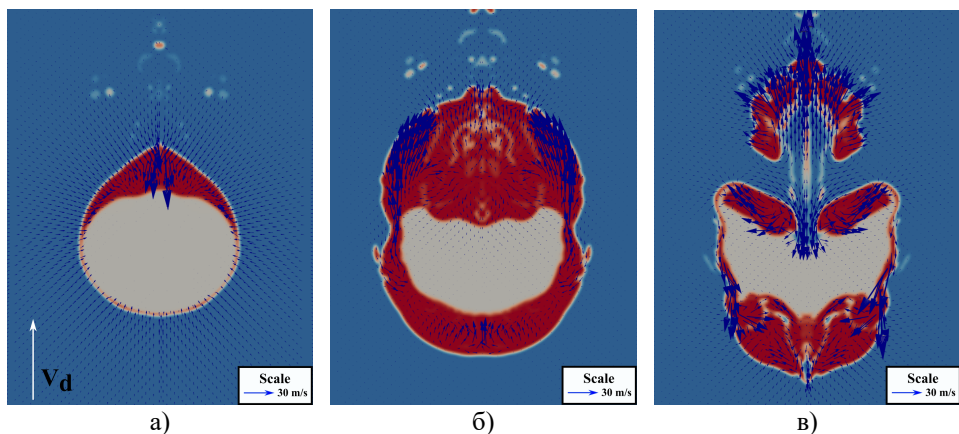


Рис. 3 — Взаимодействие воды с движущейся каплей расплава: а) $t = 0.02$ мс; б) $t = 0.4$ мс; в) $t = 0.9$ мс.

поверхности расплава. Поэтому вскипание воды и развитие паровой пленки на передней и задней сторонах капли происходят несинхронно (рис. 3б), что приводит к формированию вытянутого парового пузыря, который схлопывается в радиальном направлении, формируя поток воды к оси симметрии. Столкновение потоков приводит к образованию двух мощных осевых водяных струй, направленных соответственно вверх и вниз. Эти струи хорошо видны на рис. 3в, их осевая скорость значительно превышает скорость начального обтекания капли. Направленная вниз осевая водяная струя ударяет по поверхности капли расплава и пробивает ее, проникая в расплав вдоль оси и вызывая быструю деформацию и фрагментацию капли.

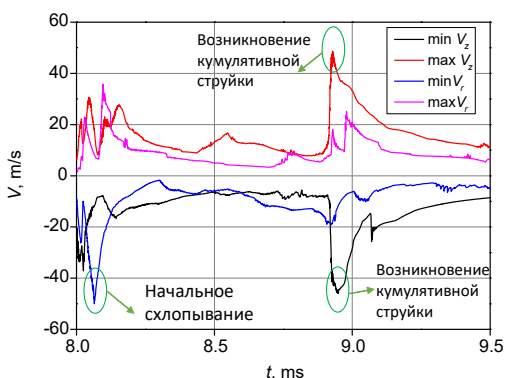


Рис. 4 — Изменение вертикальной и радиальной скорости воды.

На рис. 4 показано изменение экстремальных значений радиальной v_r и вертикальной v_z скоростей воды. На начальной стадии течения имеет преимущественно радиальный характер, тогда как к $t \approx 8.9$ мс наблюдается резкий рост вертикальной скорости до $v_z \approx 40\text{--}50$ м/с, соответствующий формированию кумулятивных струй (см. рис. 3в).

Более подробно процесс взаимодействия представлен

на рис. 5, где для расчета при скорости капли $v_d = 0.5$ м/с показаны трехмерные изображения поверхности расплава и формы парового пузыря. После удара осевой водяной струи в капле начинает формироваться каверна; этот процесс сопровождается фрагментацией расплава на мелкие частицы. Затем струя полностью пробивает каплю, в результате чего образуется тонкая цилиндрическая оболочка расплава, которая со временем полностью разрушается на мелкодисперсные фрагменты (рис. 5в).

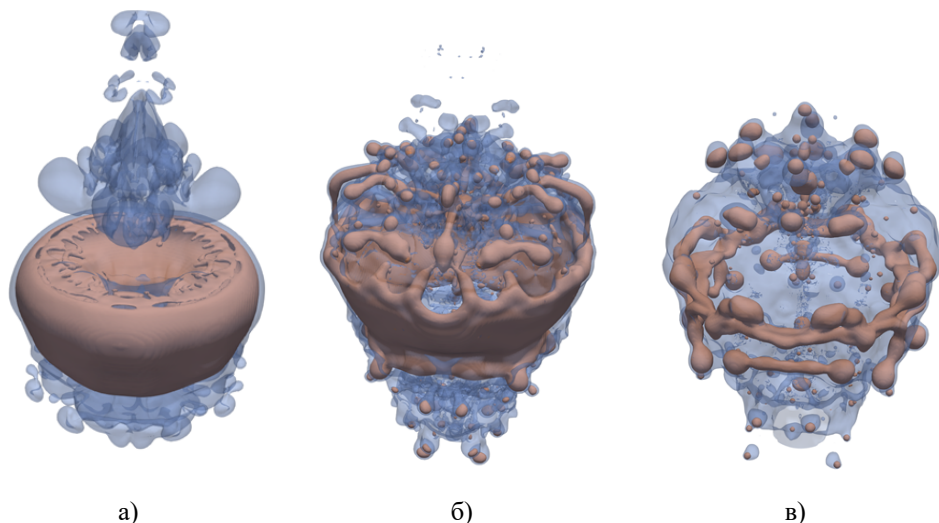


Рис. 5 — Поверхности капли расплава и парового пузыря в моменты времени 1 мс (а), 4 мс (б) и 8 мс (в). Начальная скорость капли $v_d = 0.5$ м/с.

Изменение начальной скорости капли приводило к формированию за ней кумулятивных струй с различными максимальными осевыми скоростями. Это обусловлено формой парового пузыря за движущейся каплей расплава: с увеличением скорости капли пузырь становится тоньше и сильнее вытягивается, что приводит к более интенсивному схлопыванию и образованию кумулятивной струи с большей скоростью. В зависимости от начальной скорости капли кумулятивная струя может либо полностью пробить ее с образованием цилиндрической оболочки, либо деформировать в полусферическую оболочку без сквозного проникновения.

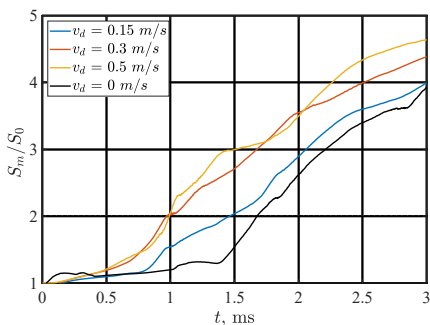


Рис. 6 — Изменение относительной площади поверхности расплава во времени.

стадии формирования полости, примерно через 0.8 мс после воздействия импульса давления, площадь поверхности расплава в вариантах со скоростями $v_d = 0.3$ м/с и $v_d = 0.5$ м/с существенно отличается от соответствующего значения для капли со скоростью $v_d = 0.15$ м/с. Именно в этот момент водяная струя ударяет по поверхности капли и затем глубоко проникает в расплав (см. рис. 3); в это же время достигаются максимальные осевые скорости.

Установлено, что при сферически-симметричном схлопывании площадь поверхности возрастает медленнее, чем в вариантах с движущейся каплей. Всплески скорости роста площади поверхности обусловлены ударами воды по расплаву. Следовательно, в данном случае изменение площади поверхности расплава существенно зависит от параметров волны давления, инициирующей взаимодействие.

Анализ результатов показывает, что характер взаимодействия определяется не только параметрами внешнего воздействия, но и конфигурацией парового пузыря к моменту его схлопывания. Форма и степень асимметрии паровой области влияют на направление и интенсивность сходящихся потоков воды и, как следствие, на возможность образования кумулятивных струй. Поэтому даже при близких параметрах импульса давления могут наблюдаться заметные различия в деформации и последующей фрагментации капли расплава. Для оценки этого эффекта в разделе 3.4 рассмотрен вариант с изначально асимметричной каплей расплава со сферической выемкой.

На рис. 7 показано развитие течения для данной постановки в виде распределения объемных долей фаз в плоскости симметрии. При первом

На рис. 6 приведены зависимости относительной площади поверхности расплава от времени для вариантов, в которых капля первоначально двигалась относительно воды, а также для варианта с неподвижной каплей расплава в покоящейся воде.

Наибольшая площадь поверхности получена в варианте с максимальной скоростью капли вследствие более интенсивного дробления расплава на мелкие фрагменты. Уже на начальной

схлопывании паровой области формируется направленная внутрь капли кумулятивная струя воды, которая проникает в расплав и образует вытянутую полость. После последующего расширения и повторного схлопывания парового пузыря возникает вторая кумулятивная струя, усиливающая деформацию и вытяжение полости. Последовательное воздействие двух струй приводит к сквозному пробитию капли, что подтверждает существенное влияние исходной формы парового объема на характер фрагментации расплава.

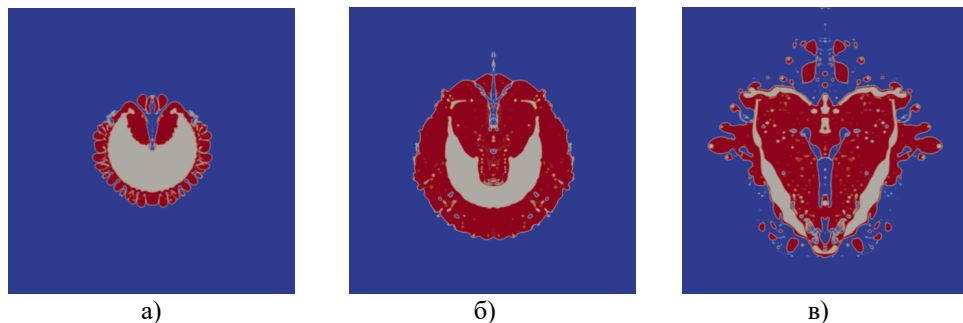


Рис. 7 — Формы капли расплава (двумерные сечения) в моменты времени:
а) $t = 0.2$ мс; б) $t = 0.5$ мс; в) $t = 2$ мс.

Таким образом, полученные в **главе 3** результаты раскрывают роль образования кумулятивных водяных микроструй как одного из механизмов, способствующих развитию неустойчивостей и фрагментации расплава, который ранее практически не рассматривался при анализе парового взрыва одиночной капли.

В **главе 4** представлены результаты численного моделирования взаимодействия импульсной и непрерывной струй воды с расплавом. В разделе 4.1 рассмотрено воздействие импульсной струи на расплав и проведено сопоставление с экспериментальными данными (Yakush S. E., Chashechkin Y. D. et al., 2021). На рис. 8 для одного из вариантов представлены формы поверхностей воды и расплава в последовательные моменты времени. Видимые поверхности фаз представлены изоповерхностями объемных долей $\alpha_w = 0.1$ и $\alpha_m = 0.1$.

Струя достигает поверхности расплава и растекается по ней, формируя тонкий радиальный слой (рис. 8а). Под действием струи образуется каверна с коронообразным всплеском, которая по мере углубления достигает дна бассейна и приобретает практически цилиндрическую форму (рис. 8б). После ослабления воздействия струи каверна схлопывается, формируя вторичный

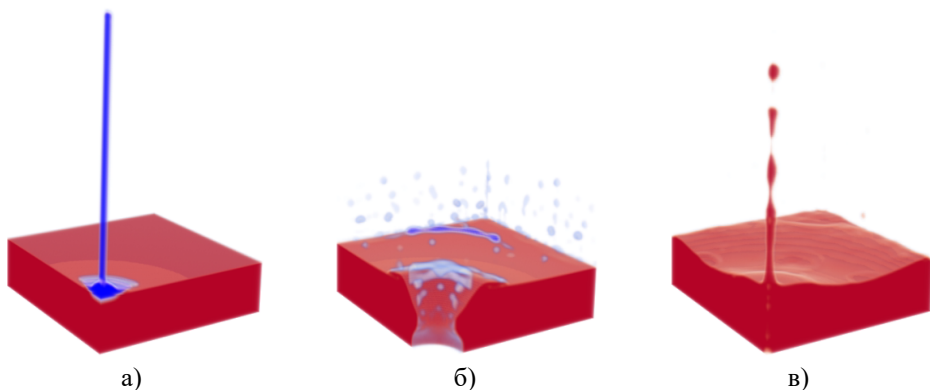


Рис. 8 — Изоповерхности объемных долей расплава и воды в моменты времени: а) $t = 4$ мс; б) $t = 40$ мс; в) $t = 150$ мс (только изоповерхность расплава).

всплеск в виде тонкой центральной струи расплава (рис. 8в), высота которой значительно превышает первичный всплеск.

Сопоставление численных форм струй с их видимыми мгновенными контурами, зарегистрированными в экспериментах, проводилось на основе трех вариантов, различающихся начальной скоростью и геометрией струи. Для некоторых моментов времени наблюдается достаточно хорошее согласие по высоте центральной струи (рис. 9б), тогда как в других случаях различия существенны (рис. 9а и рис. 9в). В целом расчетные струи расплава оказываются более тонкими, чем наблюдающиеся в экспериментах, что особенно отчетливо видно на рис. 9в в момент времени 94 мс. Расчетная максимальная высота подъема всплесков близка к среднему значению высот экспериментально наблюдавшихся фрагментов; момент максимального подъема также коррелирует со средним значением соответствующих времен.

Задача о всплеске расплава при ударе струи воды имеет непосредственное отношение к формированию зоны предварительного перемешивания при стратифицированных паровых взрывах. В связи с этим важно определить механизмы формирования направленного вверх течения расплава после схлопывания каверны и оценить влияние различных параметров задачи. Для этого была выполнена серия расчетов, приведенных в табл. 1.

В табл. 1 приведены характеристики полученных всплесков: h_1 и t_1 — высота первичного (коронаобразного) всплеска и момент ее достижения; h_2 и t_2 — аналогичные характеристики вторичного всплеска (центральной

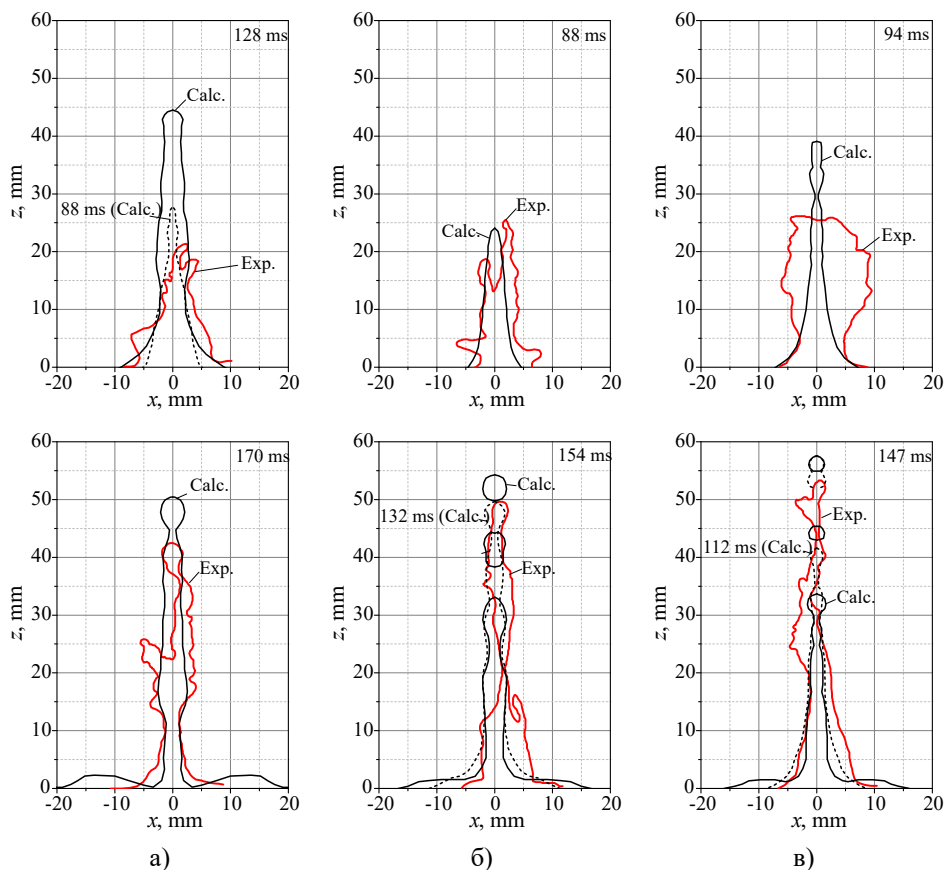


Рис. 9 — Расчетные и экспериментальные видимые контуры центральной струи: а) V1 (J3); б) V2 (J4); в) V3 (J5).

струи); R_c и H_c — максимальные радиус и глубина каверны; t_c — момент достижения максимальной глубины.

Влияние скорости и геометрии струи воды проанализировано в вариантах P1–P5 при постоянном начальном вертикальном импульсе струи. При одинаковых интегральных параметрах характер всплеска существенно зависит от соотношения массы воды и скорости: наименьшие всплески формируются в варианте P2 с большей массой воды и меньшей скоростью, а наиболее высокие — в варианте P3 для маломассивной высокоскоростной струи. Для всех вариантов вторичный всплеск оказывается более выраженным, чем первичный.

В вариантах P1–P5 температура и плотность расплава составляли 573 K и 9720 кг/м³. Для исследования их влияния варианты T4 и T5

Таблица 1 — Расчетные варианты параметрического исследования взаимодействия импульсной струи воды с расплавом

Вар.	V_0 , мл	v_w , м/с	r_0 , мм	z_0 , мм	h_1 , мм	t_1 , мс	h_2 , мм	t_2 , мс	R_c , мм	H_c , мм	t_c , мс
P1	1	6	4	20	10.8	30	23	136	18	12.7	48
P2	1.5	4	4.6	23	8.3	20	19	130	17.6	10.9	48
P3	0.3	20	2.7	13.4	15.6	32	44.2	142	20.4	13.9	50
P4	1.5	4	4	30	10.5	28	25.7	140	17.8	11.9	52
P5	0.3	20	4	6	14.2	48	33.2	142	17.4	12.2	50
T4	1.5	4	4	30	10.1	36	28.2	144	18.2	11.7	50
T5	0.3	20	4	6	12.2	22	30	138	17.9	12.4	48
R4	1.5	4	4	30	13.2	36	44	140	21.5	14	58
R5	0.3	20	4	6	15.3	20	52	142	23	14	56

рассчитывались при повышенной до 1273 К температуре, а R4 и R5 — при уменьшенной до 5000 кг/м³ плотности расплава. Повышение температуры оказывает лишь незначительное влияние на характеристики всплесков. Уменьшение плотности, напротив, приводит к увеличению высоты первичного всплеска на 10–30 %, а центральной струи — на 60–70 %.

Таким образом, даже при значительном превышении плотности расплава над плотностью воды схлопывание каверны приводит к формированию центральной струи и подъему расплава на несколько сантиметров. Интенсивность всплеска определяется не только параметрами водяной струи, но также формой каверны и плотностью расплава, что важно при оценке условий формирования зоны предварительного перемешивания.

В разделе 4.2 представлены результаты численного моделирования взаимодействия непрерывной струи воды со свинцово-висмутовым эвтектическим расплавом (LBE) в условиях эксперимента (Sibamoto Y., et al., 2002) при скорости истечения воды в диапазоне 4.7–6.2 м/с.

На рис. 10 представлены мгновенные формы поверхностей воды и расплава, соответствующие изоповерхностям объемных долей $\alpha_m = 0.5$ и $\alpha_w = 0.5$. Удар струи воды приводит к образованию каверны и обратного течения воды, сопровождающегося развитием межфазных возмущений и отрывом капель. Вскоре каверна сужается и разделяется на две части, дальнейшее схлопывание и интенсивное испарение сопровождаются деформацией поверхности расплава и образованием мелких капель.

На рис. 11 показано развитие течения в плоскости симметрии xz . На начальной стадии формируется чашеобразная каверна (рис. 11a), а на

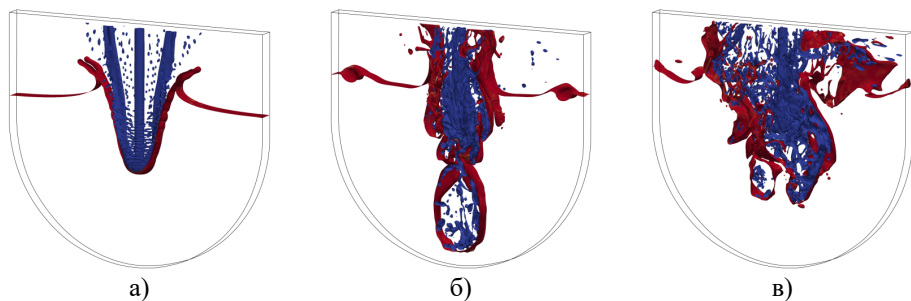


Рис. 10 — Поверхности расплава и воды: а) $t^* = 30$; б) $t^* = 105$; в) $t^* = 185$.

поверхности струи развивается неустойчивость Кельвина — Гельмгольца. При дальнейшем погружении возникает перетяжка каверны и происходит распад струи воды (рис. 11б). После достижения максимальной глубины формируется двухфазная пароводяная область, развивается неустойчивое кипение, каверна расширяется в поперечном направлении (рис. 11в). Наличие более легкой паровой фазы под слоем воды создает также условия для развития неустойчивости Рэлея – Тейлора.

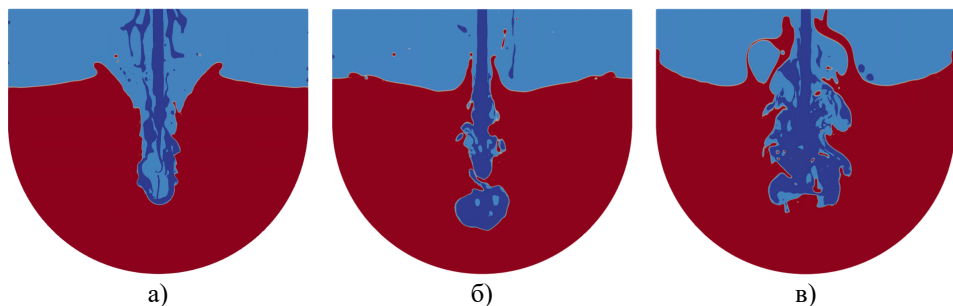
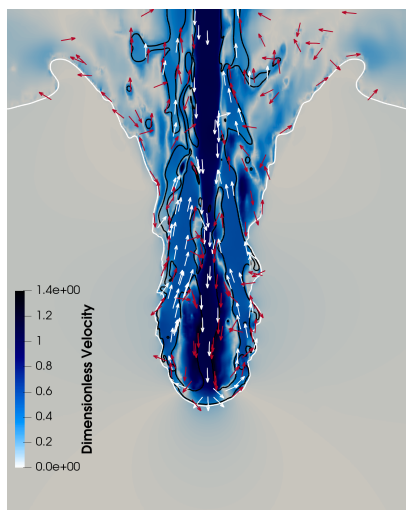
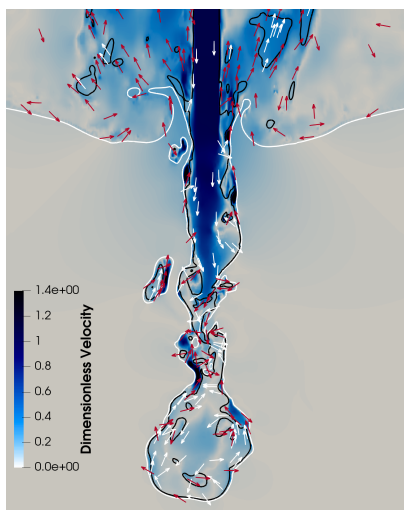


Рис. 11 — Многофазное взаимодействие в плоскости симметрии xz : а) $t^* = 45$; б) $t^* = 105$; в) $t^* = 150$.

На рис. 12 представлены мгновенные векторные поля безразмерной скорости среды $\langle U \rangle = |U|/v_j$. На начальной стадии образования каверны наблюдаются обратные потоки воды, формирующие совместно с осевой струей вихревую рециркуляционную зону (рис. 12а). После образования «перетяжки» струя разрушается, каверна разделяется на две части (рис. 12б). Возникает застойная зона с ограниченным поступлением воды, что способствует ее прогреву и интенсивному парообразованию.



а)



б)

Рис. 12 — Векторные поля безразмерной скорости многофазной среды. Наложены контуры струи и расплава. а) $t^* = 40$, б) $t^* = 100$.

Рассмотрены основные геометрические характеристики развития каверны: безразмерная глубина проникновения H_c/D_j и отношение продольного и поперечного размеров каверны H_c/W_c .

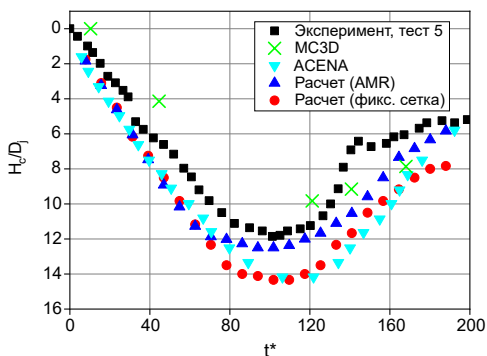


Рис. 13 — Сравнение относительной глубины каверны: эксперимент и численные расчеты.

качественно воспроизводят основные особенности динамики каверны и момент достижения максимальной глубины, $t^* \approx 100$. Использование адаптивной сетки в fciFoam обеспечивает наилучшее согласование

На рис. 13 показано сравнение безразмерной глубины каверны, полученной в расчетах, с экспериментальными данными, а также результатами расчетов многожидкостными кодами MC3D и ACENA. Такое сопоставление позволяет провести кросс-верификацию расчетных результатов. Для всех расчетных кодов на начальной стадии наблюдается завышение скорости проникновения струи относительно эксперимента. Вместе с тем все три кода

с экспериментом после $t^* \approx 70$ и наиболее близкое значение максимальной глубины каверны.

Формирование каверны определяется двумя основными механизмами: гидродинамическим воздействием струи и интенсивным испарением воды. Для оценки их отдельного вклада проведен дополнительный расчет без испарения на фиксированной сетке и выполнено сопоставление трех расчетных вариантов, позволяющее оценить влияние фазового перехода и адаптивной сетки на развитие каверны.

Зависимость отношения H_c/W_c от времени (рис. 14а) показывает, что практически на протяжении всего процесса расчетная ширина каверны остается меньше экспериментальной. До достижения максимальной глубины отношение H_c/W_c возрастает, после чего при $t^* \approx 100 \div 120$ происходит интенсивное поперечное расширение каверны при незначительном изменении ее глубины, хорошо согласующееся с экспериментом. При расчете без учета фазового перехода изменение безразмерной глубины H_c/D_j практически совпадает с результатом на той же фиксированной сетке с учетом вскипания, за исключением заключительного этапа ($t^* > 160$), где глубина проникновения оказывается больше. В то же время отношение H_c/W_c в расчете без фазового перехода наиболее существенно отличается от экспериментального и систематически завышается, что свидетельствует о меньшей ширине каверны по сравнению с экспериментом и расчетами с учетом вскипания.

Характеристикой поперечного развития каверны является безразмерная ширина каверны W_c/D_j (рис. 14б). До $t^* \approx 100$ для всех расчетных вариантов она составляет преимущественно $W_c/D_j \approx 4 \div 5$. После достижения максимальной глубины каверны ее поперечное расширение усиливается: в расчете без фазового перехода W_c/D_j достигает $6 \div 7$, а с учетом фазового перехода — ~ 12 , приближаясь к экспериментальному значению ~ 16 . Расчет на адаптивной сетке лучше воспроизводит также немонотонное изменение ширины при $t^* \approx 40 \div 80$. Резкий рост W_c/D_j при $t^* > 100$ указывает на определяющую роль вскипания воды на поздней стадии взаимодействия.

На рис. 15а показан объем воды в каверне, ограниченной уровнем начальной поверхности расплава. Штриховая кривая соответствует полному удержанию подаваемой воды; фактически ее часть уносится обратным потоком, а схлопывание каверны ограничивает поступление в нижнюю область. Расчет на адаптивной сетке значительно лучше согласуется с экспериментом, тогда как без AMR объем воды существенно занижен. После $t^* \approx 140$ объем воды уменьшается вследствие интенсивного вскипания

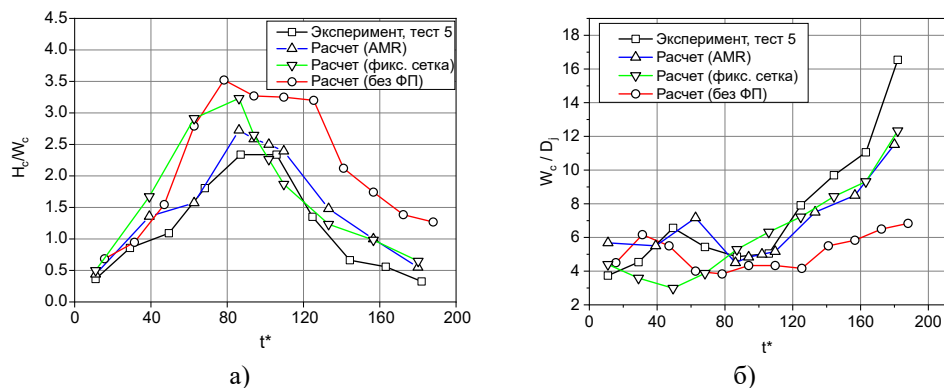


Рис. 14 — Влияние фазового перехода (ФП) на: а) отношение размеров каверны; б) отношение ширины каверны к начальному диаметру струи.

и вытеснения из каверны, в то время как для расчета без фазового перехода продолжает возрастать.

В расчетах получены значения объема пароводяной каверны, представленные на рис. 15б в безразмерном виде путем нормировки на теоретическое предельное значение объема каверны, которое достигается в момент времени $t^* \approx 80$ для всех расчетов и эксперимента. Для всех расчетных вариантов далее наблюдается более выраженный рост объема каверны. Это говорит о сложном нестационарном развитии каверны, которое затруднительно описать упрощенными моделями.

Сопоставление объемов каверны и воды показывает, что в расчете без фазового перехода паровая область формируется преимущественно за счет захвата газа над расплавом, а при AMR с фазовым переходом — вследствие испарения воды. На фиксированной сетке с фазовым переходом действуют оба механизма, что приводит к большему объему паровой фазы.

Полученные в **главе 4** результаты показывают, что для адекватного воспроизведения сложных многофазных течений необходимы вычислительные модели, учитывающие как физику процесса, так и свойства применяемых аппроксимаций и сеток. Адаптивная сетка повышает точность описания межфазных границ и мелкомасштабных неустойчивостей, а учет фазового перехода необходим для корректного воспроизведения структуры и динамики каверны. Совместное влияние этих факторов определяет возможность количественного описания взаимодействия воды с расплавом и формирования потенциально взрывоопасной трехфазной смеси.

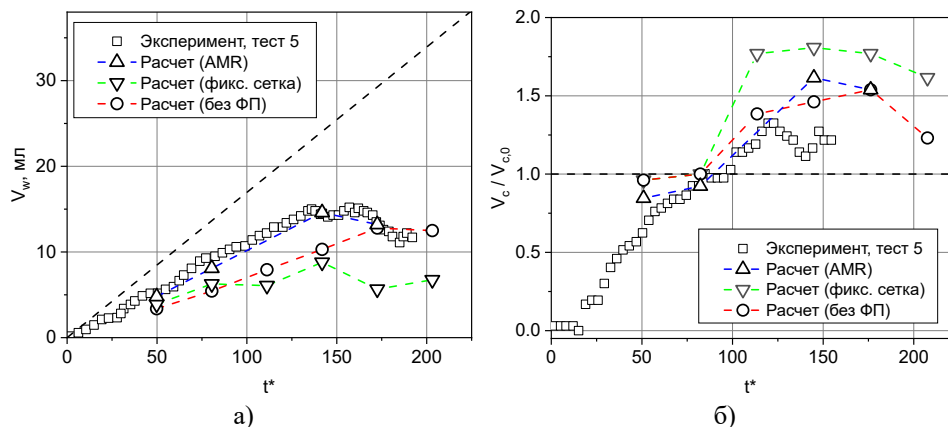


Рис. 15 — Влияние фазового перехода (ФП) на: а) объем воды, содержащейся в каверне; б) безразмерный объем каверны.

В **заключении** кратко формулируются основные выводы, полученные в диссертации.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработана и реализована математическая модель многофазных течений с фазовым переходом в сжимаемых средах. Модель верифицирована на тестовых задачах, она позволяет рассчитывать процессы теплового и гидродинамического взаимодействия расплава с охладителем, которые не могут быть адекватно описаны на основе стандартных моделей пакета OpenFOAM.
2. Проведены трехмерные расчеты взаимодействия сферической капли расплава с водой, инициированного схлопыванием паровой пленки, разделяющей фазы. Поверхность расплава испытывает значительные возмущения при ударе воды, вызванном внезапным повышением давления окружающей среды.
3. Установлены различия в механизмах фрагментации для случаев симметричного схлопывания паровой пленки и асимметричного коллапса парового пузыря. Показано, что в последнем случае формируются кумулятивные водяные микроструи, которые ранее не учитывались при анализе механизмов взрывной фрагментации капель расплава в воде.
4. Проведены трехмерные расчеты взаимодействия расплава с водой, инициированного ударом струйки воды. Воспроизведены основные стадии процесса: образования каверны на поверхности жидкости,

венца с разлетающимися каплями, и кумулятивной струйки, возникающей при схлопывании каверны. Получены количественные данные о влиянии параметров водяной струйки на характеристики всплеска расплава (скорость, высота подъема).

5. Трехмерные численные исследования взаимодействия непрерывной струи воды с высокотемпературным расплавом позволили выделить основные стадии развития пароводяной каверны: проникновение струи в расплав с вытеснением расплава из зоны взаимодействия, последующее вскипание воды, расширение паровой области, деформацию межфазных границ и формирование сложной трехфазной структуры течения.
6. Полученные результаты соответствуют известным экспериментальным данным. Для задачи о взрыве одиночной капли расплава отмечается согласование численных результатов и экспериментальных данных, полученных для колебаний парового пузыря. Достигнуто хорошее совпадение результатов с экспериментом для формы кумулятивной струи, возникающей при ударе струйки воды по расплаву. Расчеты воспроизводят основные стадии формирования каверны и особенности структуры многофазной области при взаимодействии непрерывной струи воды с расплавом.
7. Результаты исследований подтверждают высокий потенциал метода VOF в сочетании с адаптивным измельчением сеток (AMR) для моделирования сложных многофазных течений с теплообменом и фазовыми переходами. Показано, что данный подход позволяет детально описывать эволюцию границ раздела фаз, учитывая интенсивное парообразование, развитие межфазных неустойчивостей, фрагментацию жидкостей и формирование трехфазной структуры течения, а также получать наилучшее согласование с экспериментальными данными.

Автор выражает глубокую и искреннюю благодарность научному руководителю С.Е. Якушу за постоянную научную и методическую поддержку, а также за ценные знания и возможность перенять научный опыт в ходе работы над диссертацией.

Автор благодарит О.И. Мелихова и В.И. Мелихова за плодотворные обсуждения теплофизики и гидродинамики многофазных течений, во многом

сформировавших научную и методическую основу исследования, а также за помощь в постановке задач и интерпретации результатов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Yakush S. E., Sivakov N. S., Melikhov O. I., Melikhov V. I. Numerical modeling of water jet plunging in molten heavy metal pool // Mathematics. — 2024. — Vol. 12, no. 1. — P. 12.**
2. **Yakush S. E., Sivakov N. S., Melikhov O. I., Melikhov V. I. Three-phase VOF modeling of water jet–molten metal interaction // Nuclear Engineering and Design. — 2024. — Vol. 418. — P. 112893.**
3. **Сиваков Н. С. Численное исследование взаимодействия водяной струи с расплавом металла // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2026. — № 6.**
4. Yakush S. E., Sivakov N. S., Melikhov V. I., Melikhov O. I. Hot melt splash upon impingement of a water jet // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1666. — P. 012060.
5. Yakush S. E., Sivakov N. S., Melikhov V. I., Melikhov O. I. Modelling of water jet impact on molten metal // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2119, no. 1. — P. 012073.
6. **Yakush S. E., Sivakov N. S. Numerical modeling of high-temperature melt droplet interaction with water // Annals of Nuclear Energy. — 2023. — Vol. 185. — P. 109718.**
7. Yakush S. E., Sivakov N. S., Melikhov V. I., Melikhov O. I. Numerical modelling of melt droplet interaction with water // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2057, no. 1. — P. 012057.
8. Yakush S. E., Sivakov N. S. Numerical simulation of water jet impact on molten material layer // AIP Conference Proceedings. — 2023. — Vol. 2872. — P. 120052.

Сиваков Никита Сергеевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РАСПЛАВОВ С ВОДОЙ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать ИПМех РАН . . 2026 г. Заказ №

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 70 экз.

Отпечатано в типографии Постер-МГУ

119296, Москва, ул. Молодежная, 3.

