

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИБРАЭ РАН)

На правах рукописи



ИЛЬЯСОВА ОЛЬГА ХИСАМОВНА

**РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ И ВАЛИДАЦИЯ
ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРОГРАММНОГО
КОМПЛЕКСА HYDRA-IBRAE/LM ДЛЯ РЕАКТОРНЫХ
УСТАНОВОК С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ**

Специальность 2.4.9 –

Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН)

**НАУЧНЫЙ
РУКОВОДИТЕЛЬ:** доктор технических наук
Мосунова Настасья Александровна

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ
ОППОНЕНТЫ:** Морозов Андрей Владимирович, доктор технических наук, Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), ученый секретарь;
Молотова Ирина Андреевна, кандидат технических наук, Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), старший научный сотрудник.

**ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Защита состоится 10 сентября 2026 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.496.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте <https://ibrae.ac.ru/contents/662/>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н.

И.И. Линге

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2035 г. ведется работа по проектированию и созданию инновационных атомных электростанций с реакторными установками (РУ) с жидкометаллическими теплоносителями, работающими в замкнутом ядерном топливном цикле, в числе которых РУ БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем и РУ БН-1200М с натриевым теплоносителем, которые позволят развивать атомную энергетику, снять ограничение на топливные ресурсы за счет воспроизводства топлива и реализовать принципы естественной безопасности. В настоящее время реализуется Государственная программа Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса», целями которой являются поддержание устойчивого развития атомной энергетики, безопасная эксплуатация объектов атомной отрасли, обеспечивающих лидирующие позиции России на мировом рынке. В работах этой государственной программы ИБРАЭ РАН принимает активное участие, создавая совместно с организациями Госкорпорации «Росатом» набор программных комплексов (далее – кодов) нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, проектирования АЭС, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла. Работы проводятся в рамках проектного направления «Прорыв».

При разработке проектов любых реакторных установок высочайший приоритет имеет безопасность, нормы которой устанавливаются на федеральном и международном уровне. Для расчетного обоснования безопасности используются верифицированные, валидированные и аттестованные программы для ЭВМ (далее также – программные комплексы или коды), которые являются незаменимым, а в некоторых случаях и единственным, инструментом при анализе безопасности. Для обеспечения проектного направления «Прорыв» подобными программными комплексами был инициирован проект «Коды нового поколения». Кроме того, что любая применяемая для обоснования безопасности АЭС программа для ЭВМ должна быть аттестована, к кодам нового поколения предъявляются повышенные требования: они должны быть основаны на современных физических

моделях и технологиях программирования и использовать эффективные вычислительные методы, допускать возможность независимого от разработчиков использования, для чего необходимо наличие полной и достаточной для освоения кода документации, и как минимум не уступать, а в перспективе превосходить отечественные и зарубежные аналоги, как по функциональному наполнению, так и по пользовательским качествам.

На данный момент в России и за рубежом уже существует ряд теплогидравлических программных комплексов, позволяющих проводить расчеты реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями, однако большинство из них не являются универсальными по типу теплоносителя и не имеют аттестационного паспорта. Кроме того, из-за отсутствия доступа к зарубежным кодам невозможна их доработка и адаптация применительно к российским установкам.

В связи с этим в число разрабатываемых кодов нового поколения включен каналный (системный) расчетный код HYDRA-IBRAE/LM, предназначенный для моделирования теплогидравлических процессов в реакторных установках с натриевым и свинцовым теплоносителем в режимах нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации, в том числе и при авариях. Разработка расчетного кода HYDRA-IBRAE/LM была начата в 2011 г. Все прошедшие годы расчетный программный комплекс развивался вместе с объектами, для моделирования которых он предназначен. Для расширения перечня моделируемых режимов и повышения реалистичности результатов расчетных исследований необходимы развитие моделей, тестирование, верификация и валидация расчетного кода. Последняя позволяет получить достоверную численную оценку того, насколько новые подходы повысили качество и сократили погрешность расчета отдельных параметров.

Расчетный программный комплекс позволяет моделировать процессы, протекающие не только в натриевых и свинцовых контурах, но и в водяном (парогенератор), и в воздушном (теплообменник). При этом описываются как однофазные, так и двухфазные режимы течения и теплообмена. Особое внимание уделяется моделированию дисперсно-кольцевого режима течения теплоносителя, который характеризуется

тем, что жидкая фаза распадается на две составляющие: капли и пленку. В этом режиме возможно пересыхание жидкой пленки, которое может привести к кризису теплоотдачи второго рода, однако физически корректное описание данного процесса в рамках двухжидкостного подхода, который используется в коде HYDRA-IBRAE/LM, сопряжено с рядом проблем. Еще одним важным для моделирования процессом в РУ БРЕСТ-ОД-300 является возможное нарушение герметичности трубок парогенератора, при котором пароводяная смесь попадает в жидкий свинец. Для правильного расчета данного процесса требуется специальная модель, которая учитывает динамику пароводяной смеси в свинце. Помимо моделирования процессов, протекающих в парогенераторе, ключевое значение имеет правильное определение характеристик первого контура – в частности, гидравлических потерь в ТВС.

Настоящая диссертационная работа посвящена вопросам развития моделей кода HYDRA-IBRAE/LM, их верификации и валидации применительно к жидкометаллическому и водяному теплоносителям. Был выполнен анализ исследуемых процессов, усовершенствованы и реализованы модели, позволяющие повысить точность расчетов отдельных параметров, проведены верификационные и валидационные расчеты, обобщены полученные результаты. Для всех приведенных в работе расчетов проводился анализ неопределенностей и чувствительности, позволяющий учесть влияние параметров на результаты расчетов для дальнейшего использования данной информации при построении и усовершенствовании моделей кода, а также при расчетных обоснованиях безопасности реакторных установок с натриевым и свинцовым теплоносителями.

Работа соответствует паспорту специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»: выполнены моделирование гидравлических процессов, создание программного комплекса, обеспечивающего достоверное расчетное обоснование объектов ядерной техники и их безопасное функционирование при эксплуатации.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является развитие моделей кода HYDRA-IBRAE/LM для повышения точности моделирования отдельных параметров при расчетном обосновании безопасности реакторных

установок типа БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200М, а также валидация кода HYDRA-IBRAE/LM на экспериментальных данных с целью определения значений погрешностей расчета отдельных параметров.

Основные задачи:

– Развитие, реализация и валидация моделей для дисперсно-кольцевого режима течения водяного теплоносителя: усовершенствованной модели расчета коэффициента межфазного трения для двухжидкостного подхода и трехжидкостной модели.

– Реализация и валидация модели течения и теплообмена пароводяной смеси со свинцовым теплоносителем.

– Разработка, реализация и валидация соотношения для описания гидравлических потерь на трение в тепловыделяющей сборке (ТВС) РУ БРЕСТ-ОД-300.

– Валидация кода на экспериментальных данных, полученных на маломасштабных интегральных стендах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Первая задача нацелена на повышение точности расчета процессов теплообмена в трубках парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200М, вторая – на повышение точности расчета процессов, которые могут протекать при разрыве теплообменных трубок парогенератора в РУ БРЕСТ-ОД-300, третья – на обеспечение возможности автоматического расчета по коду HYDRA-IBRAE/LM потерь на трение в ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300 (без задания пользователем значения местного сопротивления, соответствующего ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300), четвертая – на определение погрешностей при использовании кода HYDRA-IBRAE/LM при обосновании безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300.

При этом полученные по первой задаче результаты могут быть развиты также и для описания процессов в парогенераторе РУ с водяным теплоносителем.

Научная новизна работы

Впервые:

1. Для российского кода HYDRA-IBRAE/LM адаптирована и реализована трехжидкостная модель дисперсно-кольцевого потока водяного теплоносителя;

2. Выполнено усовершенствование модели расчета коэффициента межфазного трения для дисперсно-кольцевого режима течения в случае двухжидкостной модели;

3. В отечественном теплогидравлическом коде HYDRA-IBRAE/LM реализована модель течения и теплообмена пароводяной смеси в свинце;

4. Получено соотношение для описания гидравлических потерь на трение для ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300;

5. На современном методическом уровне определены значения погрешностей расчёта параметров, являющихся определяющими для оценки безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300: температуры свинца при попадании пароводяной смеси в свинцовый теплоноситель; доли капель и пленки при течении водяного теплоносителя; гидравлических потерь на участках полномасштабного макета ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300; температуры свинца при течении в ТВС; массового расхода при естественной циркуляции тяжелого жидкометаллического теплоносителя.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования

Полученные результаты валидации кода HYDRA-IBRAE/LM позволили получить аттестационный паспорт программы для ЭВМ регистрационный № 577 от 15 июня 2023 г., в котором в область применения программы включена РУ БРЕСТ-ОД-300.

Благодаря реализованным и доработанным моделям удалось получить следующие результаты:

– адаптированная и реализованная в коде HYDRA-IBRAE/LM трехжидкостная модель позволяет моделировать реальную структуру течения и динамику дисперсной фазы, а также снизить степень эмпиризма при описании дисперсно-кольцевого режима течения;

– модернизированная зависимость для расчета межфазного трения в дисперсно-кольцевом режиме для двухжидкостной модели позволяет повысить устойчивость расчета и сделать его более реалистичным, что важно для расчета точки начала кризиса кипения;

- реализованная в коде HYDRA-IBRAE/LM модель течения пароводяной смеси позволяет проводить реалистичные расчеты процессов, возникающих при разрыве трубок парогенератора;

- разработанное и реализованное в коде HYDRA-IBRAE/LM соотношение для определения гидравлических потерь на трение в ТВС позволяет проводить расчеты а.з. РУ БРЕСТ-ОД-300;

- доработанная версия кода HYDRA-IBRAE/LM и оцененные погрешности расчета отдельных параметров использовались АО «НИКИЭТ» для расчетных обоснований безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300, результаты которых вошли в предварительный отчет по обоснованию безопасности опытно-демонстрационного энергоблока с реактором на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ-ОД-300).

Так как код HYDRA-IBRAE/LM используется в качестве теплогидравлического модуля интегральных расчетных кодов ЕВКЛИД/V1 и ЕВКЛИД/V2, то реализованные модели и обоснованные погрешности распространяются также и на эти коды.

Методология и методы исследования

Методология диссертационного исследования основывается на математическом моделировании процессов, протекающих в контурах РУ с жидкометаллическими теплоносителями. В диссертационном исследовании применялись следующие методы:

- описание процессов, протекающих на изучаемом объекте, в виде системы уравнений;

- обзор и анализ современного состояния разработки теплогидравлических кодов применительно к моделированию установок с жидкометаллическими теплоносителями;

- разработка алгоритмов и численных методов решения систем уравнений;

- программная реализация моделей в виде компьютерного кода;

- тестирование кода с использованием аналитических тестов;

- обобщение и анализ экспериментальных данных, проведение валидационных расчетов;

– проведение многовариантных расчётов и статистический анализ результатов расчётов, оценка погрешностей расчётов отдельных параметров.

Положения, выносимые на защиту

Усовершенствованная модель расчета коэффициента межфазного трения для дисперсно-кольцевого режима течения водяного теплоносителя, реализованная в коде HYDRA-IBRAE/LM, позволяющая учитывать трение между газом и каплями.

Адаптированная и реализованная в коде HYDRA-IBRAE/LM трехжидкостная модель дисперсно-кольцевого потока водяного теплоносителя, которая позволяет по отдельности учитывать динамику капель и пленки при течении.

Полученное и реализованное в коде HYDRA-IBRAE/LM соотношение, позволяющее проводить расчет гидравлических потерь на трение в ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300.

Реализованная в коде HYDRA-IBRAE/LM модель динамики пароводяной смеси в свинце, которая позволяет проводить реалистичный расчет разрыва трубок парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300.

Результаты валидации кода HYDRA-IBRAE/LM на маломасштабных интегральных стендах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Погрешности расчета по коду HYDRA-IBRAE/LM следующих параметров: температуры свинца при попадании пароводяной смеси в свинцовый теплоноситель; доли капель и пленки при течении водяного теплоносителя; гидравлических потерь на участках полномасштабного макета ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300; температуры свинца при течении в ТВС; массового расхода при естественной циркуляции тяжелого жидкометаллического теплоносителя.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными. Достоверность и теоретическая значимость совершенствования расчетных методов, полученных результатов валидации подтверждается положительными итогами независимой экспертизы, выполненной при аттестации кода

HYDRA-IBRAE/LM в Ростехнадзоре, завершившейся выдачей аттестационного паспорта кода (регистрационный № 577 от 15 июня 2023 г.).

Личный вклад автора

Постановка задач исследования, анализ литературы и обобщение научных работ и результатов исследований других авторов.

Развитие, реализация и валидация в коде HYDRA-IBRAE/LM трехжидкостной модели дисперсно-кольцевого потока водяного теплоносителя.

Усовершенствование и валидация модели расчета коэффициента межфазного трения для дисперсно-кольцевого режима течения водяного теплоносителя.

Получение, реализация и валидация в коде HYDRA-IBRAE/LM соотношения для описания гидравлических потерь на трение для ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300.

Реализация в коде HYDRA-IBRAE/LM и валидация модели динамики пароводяной смеси в свинце.

Проведение расчетов по коду HYDRA-IBRAE/LM экспериментов на маломасштабных интегральных стендах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Анализ неопределенностей и чувствительности, а также проведение многовариантных расчетов для всех указанных выше экспериментов.

Апробация результатов работы

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

– XVII Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН «Безопасность и риски в энергетике», г. Москва, 21–22 апреля 2016 г.;

– XIX Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН «Безопасность и риски в энергетике», г. Москва, 22–23 ноября 2018 г.;

– XX Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН «Безопасность и риски в энергетике», г. Москва, 12–13 сентября 2019 г.;

– V Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2018), г. Москва, 2–5 октября 2018 г.;

– Всероссийская конференция «XXXIX Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 28 – 31 августа 2023 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, из них 3 статьи в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, 6 – в материалах российских и международных конференций и семинаров.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 111 библиографических ссылок, списка сокращений и условных обозначений. Общий объем работы составляет 125 страниц основного текста, включая 20 таблиц и 48 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, включая степень ее разработанности и соответствие паспорту специальности, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, достоверность результатов, личный вклад автора, информация об апробации работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены публикации по теме исследования.

В первой главе формулируется постановка задачи, проведен обзор литературы и рассматриваются основные подходы к моделированию теплогидравлических задач.

Подраздел 1.1 посвящен обзору литературы и описанию подходов к решению задач теплогидравлики. Приводится краткое описание одномерных теплогидравлических кодов, основные используемые приближения и допущения. В большинстве одномерных теплогидравлических кодов, к которым относится код HYDRA-IBRAE/LM, в базовом варианте решается система уравнений сохранения массы, энергии и количества движения для двух

рассматриваемых фаз (газ и жидкость). Для описания процессов трения и теплообмена на стенке и между фазами используются замыкающие соотношения.

В подразделе 1.2 приводится сравнение кода HYDRA-IBRAE/LM [1] с российскими и зарубежными аналогами: кодами RELAP5-3D, CATHARE и другими, проводится анализ мировых тенденций разработки теплогидравлических кодов. Отмечается, что в последние годы наблюдается тенденция к расширению списка используемых в расчетах теплоносителей (например, моделирование жидкометаллических, жидкосолевых реакторных установок) и увеличению валидационной базы за счет новых экспериментов, проведение связанных расчетов с использованием других кодов.

Во второй главе рассматривается развитие моделей для дисперсно-кольцевого режима течения водяного теплоносителя: приведено описание усовершенствованной модели расчета коэффициента межфазного трения для двухжидкостного подхода и трехжидкостной модели [2]. Показаны результаты расчетов экспериментов с использованием указанных моделей.

В подразделе 2.1 рассматривается доработанная модель расчета коэффициента межфазного трения, позволяющая проводить более стабильный расчет и обеспечивающая плавное изменение коэффициента межфазного трения за счет учета трения между газом и каплями. В доработанной модели сила межфазного трения, отнесенная на единицу объема, представляется в виде двух слагаемых:

$$\tau_i = \tau_1 + \tau_2,$$

где τ_i – суммарная сила межфазного трения, отнесенная на единицу объема; τ_1 – сила межфазного трения между газом и пленкой, τ_2 – сила межфазного трения между газом и каплями. Первое слагаемое учитывалось в базовой версии кода HYDRA-IBRAE/LM. Второе отсутствовало и было включено в модель в рамках настоящей работы:

$$\tau_2 = \frac{0,75 \cdot \xi_i \cdot \rho_g (\varphi_f - \alpha_{ff}) \cdot v_{gd}^2}{D_d}, \quad (1)$$

где ξ_i – коэффициент межфазного трения для дисперсного режима течения, ρ_g – плотность газовой фазы, φ_f – объемное содержание

жидкой фазы, α_{ff} – доля капель в жидкости, v_{gd} – относительная скорость капель, D_d – диаметр капель.

Приведены результаты моделирования экспериментов [3] с использованием данной модели. Показано, что реализованная доработанная модель позволяет сделать расчет более физически корректным, сглаживая значения расчетных параметров, влияющих на величину критического паросодержания.

В подразделе 2.2 представлено описание трехжидкостной модели для дисперсно-кольцевого режима течения. Этот случай характеризуется тем, что к двум рассматриваемым составляющим потока (газу и жидкой пленке) добавляется третья – капли, поэтому к базовой системе уравнений кода добавляются уравнения сохранения для дисперсной фазы, а в уравнения сохранения для газовой и жидкой фаз вносятся слагаемые, описывающие взаимодействие с каплями. Таким образом, к стандартной двухжидкостной модели добавляются соотношения для капель. Уравнение сохранения массы для дисперсной фазы записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_d \rho_d) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z}(A \varphi_d \rho_d v_d) = \Gamma_d, \quad (2)$$

где φ_d – объемное содержание фазы; ρ_d – плотность фазы; v_d – скорость фазы; A – площадь проходного сечения канала; Γ_d – интенсивность межфазного массообмена; z – пространственная переменная, направленная вдоль канала; t – время.

Уравнение сохранения энергии записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varphi_d \rho_d h_d) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z}(A \varphi_d \rho_d h_d v_d) - \varphi_d \frac{dP}{dt} =, \\ = Q_{wd} + Q_d - Q_{dg} - \Gamma_{id} h_{di} - S_D h_d + S_E h_f, \end{aligned} \quad (3)$$

где Γ_{id} – массовый поток за счет генерации/конденсации пара на межфазной границе с каплями (на поверхности капель); S_D – поток за счет осаждения капель; S_E – поток за счет уноса капель; Q_d – внешний источник энергии; Q_{wd} – тепловой поток на стенке; h_d и h_f – удельная

энтальпия капель и пленки; P – давление фаз; h_{di} – удельная энтальпия фазы на межфазной границе; Q_{idg} – интенсивность межфазного теплообмена.

Уравнение сохранения количества движения имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varphi_d \rho_d v_d) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z}(A \varphi_d \rho_d v_d v_d) + \varphi_d \frac{\partial}{\partial z} P =, \\ = -\tau_{dg} - \varphi_d \rho_d g \cdot \sin \vartheta - \Gamma_{id} v_{id} + S_E v_f - S_D v_d \end{aligned} \quad (4)$$

где τ_{dg} – межфазное трение; v_{id} – скорость капель на межфазной поверхности; ϑ – угол наклона канала к горизонтали; g – ускорение свободного падения.

При этом следует отметить, что отдельным важным вопросом использования трехжидкостной модели является описание взаимодействия капель с жидкой пленкой и газовой фазой, для которых в данной работе подобраны соответствующие замыкающие соотношения [4, 5].

В подразделе 2.3 приведены результаты валидации кода HYDRA-IBRAE/LM с использованием трехжидкостной модели на экспериментальных данных. Был проведен расчет экспериментов, посвященных уносу и осаждению капель. Благодаря использованию новой модели, удалось провести расчеты, в которых с помощью дополнительных уравнений определялась реальная динамика доли капель и пленки. Полученные результаты расчета, представленные на рисунке 1, показали хорошее согласие с экспериментальными данными. Погрешность расчета массовой расходной доли фаз составила $[-3-5; -3+5]$ %. Здесь и далее значения погрешностей результатов расчетов по программе для ЭВМ получены в соответствии с методикой ИБРАЭ РАН [6], основанной на рекомендациях приложения № 4 к РБ-166-20 «Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций». Погрешность результата расчёта определяется интервалом $[E-u_{tot}; E+u_{tot}]$, где E – среднее значение отклонения результата расчёта от экспериментальных данных, u_{tot} – значение неопределённости валидации, включающее неопределенность использованных для валидации экспериментальных данных.

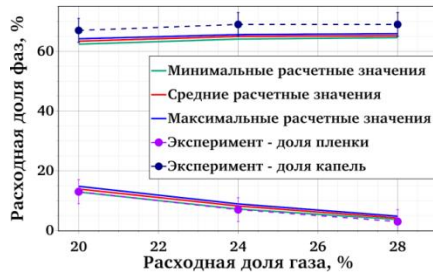


Рисунок 1 – Сравнение результатов расчета доли пленки и капель с экспериментальными данными [7]

Трехжидкостная модель для дисперсно-кольцевого режима течения позволяет проводить расчет кризиса теплообмена без использования опорных таблиц и специальных формул – за счет реалистичного моделирования динамики пересыхания жидкой пленки. Было проведено моделирование экспериментов из работы [7] по определению критического теплового потока. Результаты расчетов показаны на рисунке 2.

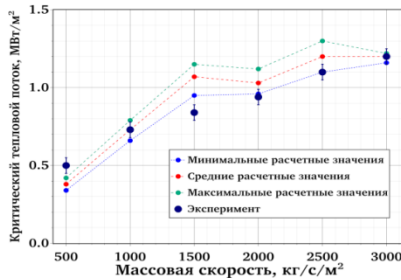


Рисунок 2 – Сравнение результатов расчетов критического теплового потока с экспериментальными данными [7]

Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными, погрешность составила [5–18; 5+18] %.

В третьей главе приводится описание модели течения пароводяной смеси в свинце. Предложенный авторами работы [8] подход был реализован в коде HYDRA-IBRAE/LM [1]. Была проведена валидация кода на экспериментах, выполненных в ИТ СО РАН.

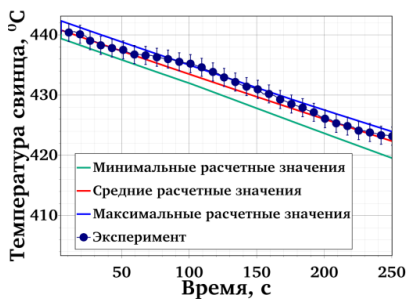
В подразделе 3.1 приведена модель пароводяной смеси [8], реализованная в коде HYDRA-IBRAE/LM.

При моделировании разрыва трубки с пароводяной смесью в парогенераторе реакторных установок со свинцовым теплоносителем необходимо учитывать возможность присутствия в паровых пузырьках воды. Для учета поведения влаги в пузырьках в стандартную двухжидкостную модель вводится дополнительный параметр – объёмная доля пара в пароводяной смеси ϕ , для которой получено следующее соотношение:

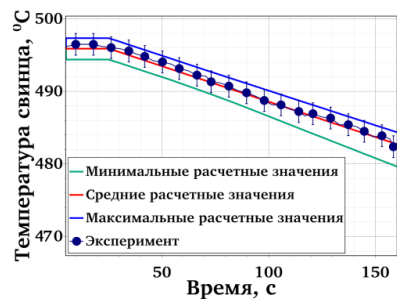
$$\phi = \frac{\rho_{l,sat} (h_g - h_{l,sat})}{\rho_{v,sat} h_{v,sat} - \rho_{l,sat} h_{l,sat} + h_g (\rho_{l,sat} - \rho_{v,sat})}. \quad (5)$$

Здесь $\rho_{v,sat}$, $\rho_{l,sat}$ – плотности пара и воды на линии насыщения; $h_{v,sat}$, $h_{l,sat}$ – удельные энтальпии пара и воды на линии насыщения, h_g – удельная энтальпия газовой фазы.

В подразделе 3.2 приведены результаты моделирования по коду HYDRA-IBRAE/LM экспериментов по захолаживанию свинца при впрыске в него пароводяной смеси, проведенных в ИТ СО РАН. В ходе экспериментов осуществлялась инжекция пароводяной смеси с разными расходами пара и жидкости и измерялась динамика температуры свинца в зависимости от времени. На рисунке 3 показаны результаты расчетов указанных экспериментов в сравнении с экспериментальными данными. Результаты расчетов были получены при использовании новой модели.



(а)



(б)

Рисунок 3 – Сравнение результатов расчета температур свинца для расхода пара 0,2 г/с и расхода жидкости 0,1 г/с (а) и для расхода пара 0,2 г/с и расхода жидкости 0,2 г/с (б) с экспериментальными данными ИТ СО РАН

Погрешность расчета температуры свинца составила $[-0,3-3,3; -0,3+ 3,3]$ К. Основные результаты по реализации модели пароводяной смеси и ее валидации приведены в работе [9].

В четвертой главе приведено описание полученного и реализованного в коде HYDRA-IBRAE/LM соотношения для моделирования локального сопротивления дистанционирующих решеток ТВС реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. Представлены результаты валидации кода на экспериментах, проведенных на установках в АО «НИКИЭТ» и в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».

В подразделе 4.1 приводится разработанная формула для расчета локального сопротивления дистанционирующих решеток ТВС реакторной установки БРЕСТ-ОД-300:

$$\xi_{\text{лок}} = A + B \cdot Re + \frac{C}{Re} + \frac{D}{Re^2}, \quad (6)$$

где Re – число Рейнольдса для теплоносителя в соединении, ближайшем к локальному сопротивлению; A, B, C, D – коэффициенты, полученные на основании анализа экспериментов, проведенных на установке ЭУСТ (АО «НИКИЭТ», Россия). Формула применима для чисел Рейнольдса от $1,3 \cdot 10^4$ до $8,2 \cdot 10^4$.

Подраздел 4.2 посвящен результатам верификации и валидации кода на экспериментах по исследованию потерь давления и теплообмена в тепловыделяющих сборках при течении в них разных теплоносителей. Представлены результаты моделирования экспериментов на установках, расположенных в АО «НИКИЭТ» и в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».

На установке в АО «НИКИЭТ» были проведены эксперименты по исследованию гидравлических потерь и теплообмена при течении свинцового теплоносителя в тепловыделяющей сборке. Целью первых экспериментов было исследование гидравлических потерь на участках полномасштабного макета бесчехловой ТВС центральной зоны реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. Погрешность расчетов потерь давления составила $[5 - 31; 5 + 31]$ %. В экспериментах по теплообмену изучалась теплоотдача в макете ТВС, конструктивно подобном натурной ТВС центральной зоны РУ БРЕСТ-ОД-300, в диапазонах расходов, соответствующих как режимам нормальной эксплуатации, так и нарушений нормальной эксплуатации.

Погрешность расчетов температуры свинца для стационарных экспериментов составила $[-0,5 - 2,7; -0,5 + 2,7]$ К, для динамических – $[0,1 - 2,7; 0,1 + 2,7]$ К.

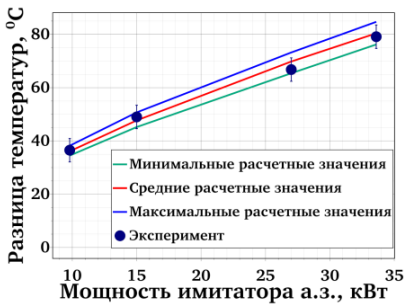
Эксперименты, проведенные в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», также были посвящены исследованию теплообмена при течении жидкометаллического теплоносителя (в данном случае – эвтектики натрий-калий) в модельной тепловыделяющей сборке периферийной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300. Представлены результаты моделирования теплообмена при течении теплоносителя при разных расходах и начальных температурах. Погрешность расчета температуры эвтектического сплава натрий-калий составила $[0,0 - 0,5; 0,0 + 0,5]$ К.

В пятой главе изложены результаты моделирования с использованием кода HYDRA-IBRAE/LM экспериментов на маломасштабных интегральных установках: HELIOS (Южная Корея), CIRCE (Италия), TALL и ее модифицированная версия – установка TALL-3D (Швеция).

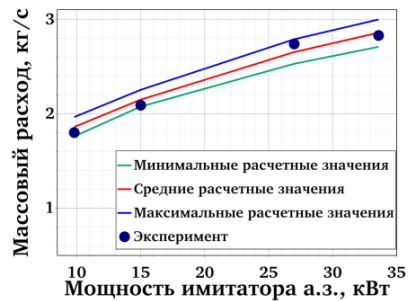
В экспериментах исследовались различные процессы, протекающие в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе: потери давления на локальных сопротивлениях, циркуляция теплоносителя за счет газлифта, естественная циркуляция теплоносителя. Для всех экспериментов проведен анализ неопределенностей и чувствительности: в начале проведения расчетов определялись параметры, к изменению которых может быть чувствителен расчет. После этого для каждого экспериментального пуска проводились расчеты с варьированием указанных параметров в заданных диапазонах неопределённости.

В подразделе 5.1 приведены результаты моделирования экспериментов по исследованию потерь давления на местных сопротивлениях на установке HELIOS [10] (Южная Корея), погрешность расчетов составила $[0,2 - 20,5; 0,2 + 20,5]$ %, и экспериментов по циркуляции за счет эффекта газлифта на установке CIRCE [11] (Италия), погрешность расчетов массового расхода составила $[-5 - 4; -5 + 4]$ %. Основные результаты диссертационного исследования в части валидации кода на установке CIRCE приведены в статье [12].

В подразделе 5.2 рассмотрены результаты моделирования экспериментов по исследованию естественной циркуляции теплоносителя. Эксперименты были проведены на трех установках: HELIOS [13] (Южная Корея), TALL [14] и TALL-3D [15] (Швеция). Результаты проведенных расчетов приведены в работе [16]. Сценарии экспериментов были схожи: в одной из частей установок подводилось тепло, которое далее отводилось с помощью теплообменника. Во всех случаях моделировался замкнутый контур, рассчитывались температуры и расход теплоносителя. На рисунке 4 приведены результаты расчетов эксперимента на установке HELIOS.



(а)



(б)

Рисунок 4 – Сравнение результатов расчета разницы температур (а) и массового расхода теплоносителя (б) с экспериментальными данными [13] (HELIOS)

Погрешности расчета температуры и расхода свинцово-висмутовой эвтектики при естественной циркуляции теплоносителя составили:

- 1) установка HELIOS (Южная Корея): расход – $[5,8 - 3,2; 5,8 + 3,2]\%$, температура – $[-2,0 - 4,7; -2,0 + 4,7]$ К;
- 2) установка TALL (Швеция): расход – $[-0,01 - 0,02; -0,01 + 0,02]$ кг/с, температура – $[-2,0 - 14,6; -2,0 + 14,6]$ К;
- 3) установка TALL-3D (Швеция): расход – $[0,03 - 0,15; 0,03 + 0,15]$ кг/с, температура – $[-2,2 - 7,8; -2,2 + 7,8]$ К.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В рамках диссертационного исследования поставленная цель была достигнута: выполнено развитие моделей кода HYDRA-IBRAE/LM для повышения точности моделирования отдельных

параметров при расчетном обосновании безопасности реакторных установок типа БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200М, проведена валидация кода HYDRA-IBRAE/LM на экспериментальных данных, определены значения погрешностей расчета отдельных параметров.

В результате выполненной работы:

- проведено развитие, реализация, валидация моделей для дисперсно-кольцевого режима течения водяного теплоносителя: трехжидкостной модели и усовершенствованной модели расчета коэффициента межфазного трения для двухжидкостного подхода. Данные модели позволили более реалистично моделировать дисперсно-кольцевой режим течения водяного теплоносителя;

- реализованы и валидированы модели течения и теплообмена пароводяной смеси со свинцовым теплоносителем. Данный подход позволяет повысить точность моделирования аварийной ситуации, возникающей при разрыве труб парогенератора;

- разработано, реализовано, верифицировано и валидировано соотношение для описания гидравлических потерь на трение в ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300;

- выполнена валидация кода на экспериментальных данных, полученных на маломасштабных интегральных стендах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Для всех проведенных расчетов был выполнен анализ неопределенностей и чувствительности. На современном методическом уровне в соответствии с РБ-166-20 была выполнена оценка погрешностей результатов расчетов.

Разработанные и реализованные в рамках диссертационной работы модели позволили расширить область применения и повысить точность кода HYDRA-IBRAE/LM применительно к моделированию реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями. Результаты расчетов, выполненные в рамках данного диссертационного исследования, позволили получить аттестационный паспорт программы для ЭВМ регистрационный № 577 от 15 июня 2023 г., в котором в область применения программы включена РУ БРЕСТ-ОД-300.

Версия кода HYDRA-IBRAE/LM с реализованными моделями использовалась в АО «НИКИЭТ» для расчетного обоснования безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300 в режимах с межконтурными течениями

парогенератора и продолжает использоваться в АО «НИКИЭТ» и ИБРАЭ РАН в составе кодов ЕВКЛИД/V1 и ЕВКЛИД/V2 для расчетного обоснования безопасности РУ БР-1200 в режимах нарушений нормальной эксплуатации, при проектных и запроектных авариях.

Дальнейшее развитие исследования предполагает уточнение замыкающих соотношений кода, расширение валидационной базы и развитие многомерных моделей для повышения точности расчетных обоснований.

Исследования, результаты которых представлены в диссертации, являются частью работ, выполненных в рамках проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» и Государственного контракта на выполнение научно-исследовательских работ «Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования атомных электростанций, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла (Государственные контракты № Н.4х.44.9Б.14.1037 от 17.02.2014, № Н.4х.241.9Б.17.1018 от 20.02.2017 и № Н.4о.241.19.21.1068 от 14.04.2021).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Alipchenkov V.M., Grudtsyn Ya.V., **Пыасова О.Н.**, Mosunova N.A. Simulation of the processes occurring during steam generator tube rupture in the lead cooled reactor unit using HYDRA-IBRAE/LM code // Progress in Nuclear Energy. – 2022. – Т. 149. – 104278.

Вклад автора: реализация в коде и валидация модели динамики пароводяной смеси в свинце.

2. **Пыасова О.Н.**, Alipchenkov V.M., Mosunova N.A., Grudtsyn Ya.V. Simulation of natural circulation experiments for heavy liquid metal coolant using HYDRA-IBRAE/LM code // Progress in Nuclear Energy. – 2024. – Т. 173. – 105233.

Вклад автора: валидация кода на экспериментах по естественной циркуляции теплоносителя на маломасштабных интегральных стендах.

3. Grudtsyn Y.V., Alipchenkov V.M., Mosunova N.A., **Пыасова О.Н.**, Morkin M.S. Simulation of the gas-lift effect for lead and

lead-bismuth coolants in HYDRA-IBRAE/LM thermohydraulic code // Progress in Nuclear Energy. – 2024. – Т. 173. – 105275.

Вклад автора: валидация кода на экспериментах по исследованию газлифта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программа для решения задач нестационарной теплогидравлики применительно к реакторным установкам и экспериментальным стендам с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Версия 1.9 (HYDRA-IBRAE/LM/V1.9) с препроцессором. Алипченков В.М., Беликов В.В., Беликова Г.В., Бутов А.А., Вабищевич Н.П., Веретенцев В.А., Власенко А.Е., Грудцын Я.В., Дробышевская И.Н., Ильясова О.Х., Исаков А.Б., Климонов И.А., Кудашов И.Г., Мосунова Н.А., Назарова С.Н., Палагин А.В., Стрижов В.Ф., Чухно В.И., Усов Э.В., Хачатрян К.С. – 2022. – № 2022617904.

2. Alipchenkov V. M., Nigmatulin R. I., Soloviev S. L., Stonik O. G., Zaichik L. I., Zeigarnik Y. A. A three-fluid model of two-phase dispersed-annular flow // International journal of heat and mass transfer. – 2004. – Т. 47. – №. 24. – С. 5323–5338.

3. Becker K. M., et al. An Experimental Investigation of Post Dryout Heat Transfer, KTH-NEL-33. – Royal Institute of Technology, 1983.

4. Hewitt G. F., Govan A. H. Phenomenological modelling of non-equilibrium flows with phase change // International journal of heat and mass transfer. – 1990. – Т. 33. – №. 2. – С. 229–242.

5. Kataoka I., Ishii M., Mishima K. Generation and size distribution of droplet in annular two-phase flow. – 1983.

6. Моисеенко Е.В., Мосунова Н.А. Методика оценки неопределённостей результатов расчёта для задач обоснования безопасности объектов использования атомной энергии // Вопросы радиационной безопасности – 2018 – № 2 (90). – С. 24 – 34.

7. Sugawara S. Analytical prediction of CHF by FIDAS code based on three-fluid and film-dryout model // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1990. – Т. 27. – №. 1. – С. 12–29.

8. Исхаков А.Ш., Мелихов В.И., Мелихов О.И. Численное моделирование гидродинамического воздействия на трубки парогенератора реактора «БРЕСТ-300» при аварии «межконтурная неплотность» // Вестник МЭИ. – 2017. – №. 3. – С. 33–40.

9. Alipchenkov V.M., Grudtsyn Ya.V., **Пыасова О.Н.**, Mosunova N.A. Simulation of the processes occurring during steam generator tube rupture in the lead cooled reactor unit using HYDRA-IBRAE/LM code // Progress in Nuclear Energy. – 2022. – Т. 149. – 104278.

10. OECD/NEA, Benchmarking of thermal-hydraulic loop models for Lead-alloy-cooled advanced nuclear energy systems (LACANES) // Task Guideline for Phase 1: Isothermal forced convection case. – 2012.

11. Benamati G., Foletti C., Forgone N., Oriolo F., Scaddozzo G., Tarantino M. Experimental study on gas-injection enhanced circulation performed with the CIRCE facility // Nuclear Engineering and Design. – 2007. – Т. 237. – №. 7. – С. 768–777.

12. Grudtsyn Y.V., Alipchenkov V.M., Mosunova N.A., **Пыасова О.Н.**, Morkin M.S. Simulation of the gas-lift effect for lead and lead-bismuth coolants in HYDRA-IBRAE/LM thermohydraulic code // Progress in Nuclear Energy. – 2024. – Т. 173. – 105275.

13. Shin Y.H., Cho J., Lee J., Ju H., Sohn S., Kim Y., Noh H., Hwang I.S. Experimental studies and computational benchmark on heavy liquid metal natural circulation in a full height-scale test loop for small modular reactors // Nuclear Engineering and Design. – 2017. – Т. 316. – С. 26–37.

14. Ma W., Karbojian A., Sehgal B. R. Experimental study on natural circulation and its stability in a heavy liquid metal loop // Nuclear Engineering and Design. – 2007. – Т. 237. – №. 15–17. – С. 1838–1847.

15. Grishchenko D., Papukchiev A., Liu C., Geffray C., Polidori M., Kööp K., Jeltsov M., Kudinov P. TALL-3D open and blind benchmark on natural circulation instability // Nuclear Engineering and Design. – 2020. – Т. 358. – 110386.

16. **Пыасова О.Н.**, Alipchenkov V.M., Mosunova N.A., Grudtsyn Ya.V. Simulation of natural circulation experiments for heavy liquid metal coolant using HYDRA-IBRAE/LM code // Progress in Nuclear Energy. – 2024. – Т. 173. – 105233.

Ильясова Ольга Хисамовна

Развитие моделей и валидация теплогидравлического программного комплекса
HYDRA-IBRAE/LM для реакторных установок с жидкометаллическими
теплоносителями

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ...
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз.
Печать на аппарате Rex-Rotary.
ИБРАЭ РАН. 115191, Москва, ул. Большая Тульская, 52
Телефон: 8-495-955-22-66