



УТВЕРЖДАЮ

Ректор НИЯУ МИФИ

Д. ф.-м. н. В.И. Шевченко

«07» 07 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ильясовой Ольги Хисамовны «Развитие моделей и валидация теплогидравлического программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Диссертационная работа Ильясовой Ольги Хисамовны посвящена развитию программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM с целью повышения точности моделирования при расчетном обосновании безопасности реакторных установок типа БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200М с жидкометаллическими теплоносителями, а также валидации кода на экспериментальных данных для определения значений погрешностей расчета определяющих параметров. В ходе диссертационного исследования адаптированы и реализованы модели для расчета процессов при течении водяного и жидкометаллических теплоносителей. Значительное внимание уделено моделированию процессов, протекающих в парогенераторах реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями.

Актуальность темы диссертационного исследования

Актуальность темы диссертационного исследования определяется инновационностью рассматриваемых ядерных установок (БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем и БН-1200М с натриевым теплоносителем), а также требованием современного российского законодательства о необходимости выполнения обязательного расчетного обоснования безопасности реакторных установок при их проектировании, развитии и использовании, с применением современных верифицированных, валидированных и аттестованных расчетных кодов. Одним из таких кодов является программный комплекс 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.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (111 библиографических ссылок). Диссертационная работа изложена на 125 страницах, включает 20 таблиц и 48 рисунков.

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

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы, в котором автором представлены основные подходы к решению теплогидравлических задач, указаны их достоинства и недостатки. Сделан обзор отечественных и зарубежных аналогов кода HYDRA-IBRAE/LM. Поставлены задачи исследования.

Во второй главе рассматриваются вопросы развития моделей для дисперсно-кольцевого режима течения водяного теплоносителя. Для двухжидкостного подхода в коде HYDRA-IBRAE/LM автором диссертационной работы реализована усовершенствованная модель расчета коэффициента межфазного трения. Также адаптирована и реализована трехжидкостная модель. С помощью указанных моделей было проведено моделирование нескольких экспериментов. Результаты проведенных расчетов показали, что реализованные модели позволили более реалистично отследить динамику дисперсной фазы при течении водяного теплоносителя, а также сделать расчеты более устойчивыми и стабильными.

В третьей главе представлено описание модели динамики пароводяной смеси в свинце, которая была реализована автором в расчетном коде HYDRA-IBRAE/LM. Данная модель может использоваться для расчетов течения и теплообмена пароводяной смеси со свинцовым теплоносителем при разрыве трубы в парогенераторе реакторной установки. В качестве примера работы кода с использованием разработанной модели приведены результаты валидационных расчетов, сопоставленные с экспериментальными данными Института теплофизики СО РАН.

В четвертой главе приведено полученное и реализованное автором соотношение для моделирования локального сопротивления дистанционирующих решеток тепловыделяющей сборки реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. С использованием полученного соотношения было проведено моделирование ряда экспериментов, выполненных на установках, расположенных в АО «НИКИЭТ» и в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Пятая глава посвящена валидации расчетного кода HYDRA-IBRAE/LM. Показаны результаты моделирования экспериментов, выполненных на ряде маломасштабных интегральных стендов: HELIOS (Южная Корея), CIRCE (Италия), TALL и TALL-3D (Швеция). Следует отметить, что для всех расчетов был проведен анализ неопределенностей и чувствительности, результаты которого приведены в диссертационной работе и подробно разобраны автором. Все погрешности расчетов были определены на современном методическом уровне в соответствии с приложением № 4 к РБ-166-20 «Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций».

Диссертационная работа носит целостный и законченный характер, выполнена на высоком научно-техническом уровне, написана технически грамотным языком. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Степень обоснованности и достоверности

Обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается:

- сравнением результатов расчетов с данными, полученными на различных экспериментальных стендах;
- положительными итогами независимой экспертизы, выполненной при аттестации кода HYDRA-IBRAE/LM в Ростехнадзоре, которая была завершена выдачей аттестационного паспорта кода (регистрационный № 577 от 15 июня 2023 г.)

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на различных российских и международных конференциях. По теме диссертационной работы 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.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что впервые в коде HYDRA-IBRAE/LM были реализованы и доработаны модели, с помощью которых удалось повысить точность моделирования, сделать расчеты более реалистичными и получить следующие результаты:

- реализованная модернизированная модель для расчета межфазного трения в дисперсно-кольцевом режиме для двухжидкостной модели позволила сделать расчет более устойчивым и реалистичным;
- благодаря трехжидкостной модели, которая была адаптирована и реализована в программном комплексе HYDRA-IBRAE/LM, в расчетах удалось воспроизвести

реальную структуру дисперсно-кольцевого режима течения пароводяной смеси, отследить динамику дисперсной фазы, что привело к снижению степени эмпиризма кода;

- реализованная в коде модель динамики пароводяной смеси в свинце позволяет проводить реалистичные расчеты аварийной ситуации при попадании пароводяной смеси в жидкий свинец, которая может иметь место при разрыве трубок парогенератора;
- разработанное и реализованное в расчетном коде HYDRA-IBRAE/LM соотношение для описания гидравлических потерь на трение в тепловыделяющей сборке реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 позволило повысить надежность обоснования теплогидравлических характеристик активной зоны данной установки.

Кроме того, на современном методическом уровне были определены значения погрешностей расчета параметров, являющихся определяющими для оценки безопасности реакторной установки 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 тепловыделяющей сборки реакторной установки БРЕСТ-ОД-300;
- температуры свинца при течении в тепловыделяющей сборке;
- массового расхода при естественной циркуляции тяжелого жидкометаллического теплоносителя.

Практическая значимость полученных результатов для науки и производства

Практическая значимость диссертационной работы Ильясовой Ольги Хисамовны заключается в том, что результаты проведенной валидации позволили получить аттестационный паспорт кода HYDRA-IBRAE/LM, в область применения которого включена реакторная установка БРЕСТ-ОД-300. Разработанные и реализованные автором модели позволяют надежно моделировать целый ряд процессов и явлений, важных для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями.

Следует отметить, что поскольку код HYDRA-IBRAE/LM входит в состав расчетных комплексов ЕВКЛИД/V1 и ЕВКЛИД/V2, то результаты диссертационной работы распространяются также и на эти коды. Доработанная версия кода HYDRA-IBRAE/LM и оцененные погрешности расчета отдельных параметров использовались

АО «НИКИЭТ» для расчетного обоснования безопасности реакторной установки БРЕСТ-ОД-300.

Результаты диссертационного исследования успешно используются в АО «НИКИЭТ» для обоснования безопасности перспективных реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в развитии и валидации теплогидравлических моделей для программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями, начиная от постановки задач и анализа литературы до реализации моделей в расчетном коде. Для кода HYDRA-IBRAE/LM автор самостоятельно провела адаптацию и реализацию моделей для дисперсно-кольцевого режима течения водяного теплоносителя, реализовала модель динамики пароводяной смеси, разработала и реализовала соотношения для описания гидравлических потерь на трение для тепловыделяющей сборки реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. Также автором была проведена валидация кода с использованием указанных моделей. Кроме того, по коду HYDRA-IBRAE/LM было проведено моделирование экспериментов, выполненных на маломасштабных интегральных стендах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. При валидации кода автором проводился анализ неопределенностей и чувствительности, а также многовариантные расчеты.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Программный комплекс HYDRA-IBRAE/LM с доработанными и валидированными моделями рекомендуется использовать для проведения расчетов по анализу безопасности действующих и проектируемых реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями. Расчетный код может использоваться как автономно, так и в качестве теплогидравлического модуля интегральных расчетных кодов ЕВКЛИД/V1 и ЕВКЛИД/V2.

Замечания по диссертационной работе

По содержанию диссертации имеются следующие замечания:

1. В описании выполненных валидационных расчетов отсутствуют нодализационные схемы моделируемых экспериментов, параметры расчетных сеток, информация об исследовании сеточной сходимости. При проведении вариантных расчетов в большинстве случаев не указан использованный закон распределения случайных значений варьируемых параметров (указан только в таблицах 5.9 и 5.11). Кроме того, было бы желательно явно описать в работе методику определения величины неопределенности валидации u_{tot} .

2. В разделе 2.3 в качестве одного из результатов валидирования трехфазной модели дисперсно-кольцевого режима течения двухфазного потока воды представлено сопоставление экспериментальных данных по критическому тепловому потоку с расчетными в зависимости от массовой скорости потока (рис. 2.6). Однако в случае дисперсно-кольцевого режима в качестве параметра кризиса теплоотдачи принято рассматривать значение граничного паросодержания $x_{гр}^0$. При достижении этого значения паросодержания в круглых трубах в диапазонах режимных параметров $p \approx 3\div 16$ МПа и $rw \approx 500\div 2500$ кг/(м²·с) характер зависимости $q_{кр}$ от x сильно изменяется. Представление расчетных значений $q_{кр}$ как функции x позволило бы показать, что модель воспроизводит особенности этой зависимости, характерные для дисперсно-кольцевого режима.

3. В разделе 3.1 на стр. 44 отмечается, что температура капель воды в паровых пузырях соответствует температуре насыщения при давлении в локальном участке контура жидкометаллического теплоносителя. Для обоснования этого допущения было бы целесообразно представить оценку прироста давления в пузыре пара, обусловленного действием силы поверхностного натяжения со стороны свинца.

4. На стр. 53 не указано с использованием какого характерного размера гидравлического диаметра определялось число Рейнольдса при расчете коэффициента локального гидравлического сопротивления дистанционирующей решетки (формула (4.2)). Не приведены значения параметрических коэффициентов в этой формуле.

Указанные выше замечания не снижают научную ценность и высокую практическую значимость результатов диссертационного исследования.

Заключение

Диссертационная работа Ильясовой Ольги Хисамовны «Развитие моделей и валидация теплогидравлического программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями» является законченной научно-квалификационной работой, в которой последовательно изложены полученные и обоснованные автором результаты, имеющие практическую значимость.

Цель диссертации – 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 для определения значений погрешностей расчета отдельных параметров, достигнута. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертационной работы. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК.

Диссертационная работа О.Х. Ильясовой соответствует паспорту специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность», а по своей актуальности, научной новизне, объему, содержанию, в том числе значимости полученных результатов отвечает требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842.

Автор диссертационной работы Ильясова Ольга Хисамовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Отзыв подготовлен на основании положительного заключения, сделанного по итогам проведенного семинара Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ с участием специалистов кафедры теплофизики, выступления О.Х. Ильясовой и обсуждения диссертации (протокол № 1/07-2026 от 01 июля 2026 г.). В обсуждении диссертации приняли участие 7 кандидатов и 3 доктора наук. Отзыв подготовил к.т.н., доцент кафедры теплофизики Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ В.С. Харитонов.

Доцент Кафедры теплофизики
Института ядерной физики и
технологий НИЯУ МИФИ
кандидат технических наук



Харитонов Владимир Степанович

Заместитель директора
Института ядерной физики и
технологий НИЯУ МИФИ
доктор физико-математических наук



Тихомиров Георгий Валентинович

Председатель совета по аттестации и
подготовке научно-педагогических
кадров НИЯУ МИФИ
доктор физико-математических наук



Кудряшов Николай Алексеевич

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Почтовый адрес: Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

Телефон: + 7 (495) 788 5699

Адрес электронной почты: info@mephi.ru

Официальный сайт: <https://mephi.ru/>