



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИБРАЭ РАН
доктор физико-математических наук


Л.В. Матвеев
«02» Октября 2025 г.

Заключение

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук
(ИБРАЭ РАН)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Развитие моделей и валидация теплогидравлического программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями» выполнена соискателем Ильясовой Ольгой Хисамовной в Лаборатории численного моделирования процессов тепломассопереноса № 71 ИБРАЭ РАН.

В период подготовки диссертации О.Х. Ильясова работала в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук в Лаборатории теоретической теплогидродинамики, Лаборатории моделирования процессов тепломассопереноса, Лаборатории численного моделирования процессов тепломассопереноса в должностях инженера и младшего научного сотрудника.

В 2015 г. О.Х. Ильясова окончила Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова по специальности «Прикладная математика и информатика».

В период с 10 октября 2023 года по 10 апреля 2024 О.Х. Ильясова являлась соискателем аспирантуры Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. За время прикрепления она на «отлично» сдала кандидатские экзамены, после чего ей была выдана справка о сдаче кандидатских экзаменов.

Научный руководитель – Мосунова Настасья Александровна, доктор технических наук, заместитель директора ИБРАЭ РАН.

По итогам обсуждения диссертации О.Х. Ильясовой «Развитие моделей и валидация теплогидравлического программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями» на семинаре Отделения разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС ИБРАЭ РАН, состоявшегося 23.10.2025, принято следующее заключение.

Диссертационная работа соискателя О.Х. Ильясовой «Развитие моделей и валидация теплогидравлического программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями» выполнена на высоком научном уровне, является научно-квалификационной работой, в результате выполнения которой:

– 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 трубок парогенератора;
- разработано, реализовано, верифицировано и валидировано соотношение для описания гидравлических потерь на трение в ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300;
- выполнена валидация программного комплекса 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.

Актуальность работы

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2035 г. ведется работа по проектированию и созданию инновационных атомных электростанций с реакторными установками 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.

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 программные комплексы, также называемые кодами, которые являются незаменимым, а в некоторых случаях и единственным, инструментом при анализе безопасности.

Научно-практическая проблема, на решение которой направлена диссертационная работа, заключается в развитии моделей программного комплекса 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.

Цель диссертационной работы: развитие моделей программного комплекса 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 программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM на экспериментальных данных с целью определения значений погрешностей расчета отдельных параметров.

Научная новизна заключается в том, что:

- Для российского программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM адаптирована и реализована трехжидкостная модель дисперсно-кольцевого потока водяного теплоносителя;
- Выполнено усовершенствование модели расчета коэффициента межфазного трения для дисперсно-кольцевого режима течения в случае двухжидкостной модели;
- В отечественном теплогидравлическом программном комплексе HYDRA-IBRAE/LM реализована модель течения и теплообмена пароводяной смеси в свинце;
- Получено соотношение для описания гидравлических потерь на трение для ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300;
- 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 состоит в том, что:

– адаптированная и реализованная в программном комплексе 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 программном комплексе HYDRA-IBRAE/LM модель течения пароводяной смеси позволяет проводить реалистичные расчеты процессов, возникающих при разрыве трубок парогенератора;

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

– доработанная версия программного комплекса 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 программный комплекс 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.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационного исследования подтверждается сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными. Достоверность полученных результатов валидации подтверждается положительными итогами независимой экспертизы, выполненной при аттестации программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM в Ростехнадзоре, завершившейся выдачей аттестационного паспорта кода (регистрационный № 577 от 15 июня 2023 г.).

Личный вклад соискателя состоит в:

– постановке задач исследования, анализе литературы и обобщении научных работ и результатов исследований других авторов;

– развитии, реализации и валидации в программном комплексе HYDRA-IBRAE/LM трехжидкостной модели дисперсно-кольцевого потока водяного теплоносителя;

– усовершенствовании и валидации модели расчета коэффициента межфазного трения для дисперсно-кольцевого режима течения водяного теплоносителя;

– получении, реализации и валидации в программном комплексе HYDRA-IBRAE/LM соотношения для описания гидравлических потерь на трение для ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300;

– реализации в программном комплексе HYDRA-IBRAE/LM и валидации модели динамики пароводяной смеси в свинце;

– проведении расчетов по программному комплексу HYDRA-IBRAE/LM экспериментов на маломасштабных интегральных стендах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем;

– анализе неопределенностей и чувствительности, а также проведении многовариантных расчетов для всех указанных выше экспериментов.

Диссертация О.Х. Ильясовой является завершенной научно-квалификационной работой, соответствует специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» и отрасли наук «технические науки». При заимствовании материалов в диссертации присутствуют ссылки на автора или источник заимствования материалов. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в которых с достаточной полнотой изложены полученные результаты, из них 3 статьи в журналах из перечня, утвержденного ВАК Минобрнауки России, или входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science.

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

– 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.

Диссертация О.Х. Ильясовой «Развитие моделей и валидация теплогидравлического программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Заключение принято на семинаре Отделения разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС. На заседании присутствовало 45 человек, в том числе 5 докторов наук и 15 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 45 человек, «против» – 0 человек, «воздержались» – 0 человек.

Заместитель директора по
разработке интегрированных программных
комплексов анализа безопасности АЭС и ЯТЦ
д-р техн. наук

Мосунова Н.А.