

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента,

Морозова Андрея Владимировича

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 учёной степени кандидата технических наук по

специальности 2.4.9 Ядерные энергетические установки, топливный цикл,

радиационная безопасность

Диссертационная работа Ильясовой Ольги Хисамовны посвящена научным исследованиям в области развития моделей кода HYDRA-IBRAE/LM, их верификации и валидации применительно к жидкометаллическому и водяному теплоносителям.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью развития и валидации современного теплогидравлического программного комплекса (расчетного кода) HYDRA-IBRAE/LM для моделирования реакторных установок (РУ) с жидкометаллическими теплоносителями. Базовая версия программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM позволяла моделировать процессы в натриевом и свинцовом теплоносителях, а также в водяном и воздушном контурах соответствующих реакторных установок. Для расширения возможностей программного комплекса и повышения реалистичности результатов расчетных исследований необходимы развитие моделей, тестирование, верификация и валидация расчетного кода.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что благодаря полученным автором результатам валидации программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM, данный расчетный код был аттестован в ФБУ «НТЦ ЯРБ» и выдан аттестационный паспорт программы для ЭВМ регистрационный № 577

от 15 июня 2023 г., в котором в область применения программы включена РУ БРЕСТ-ОД-300, ранее отсутствовавшая в обоснованной области применения кода.

Реализованные и усовершенствованные модели позволили повысить точность расчетов, сделать моделирование ряда процессов более реалистичным и стабильным. Также доработанная версия расчетного кода HYDRA-IBRAE/LM и оцененные погрешности расчета отдельных параметров уже используются в отрасли, в частности, в АО «НИКИЭТ» при расчетных обоснованиях безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300. Поскольку расчетный 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.

**Научная новизна** выполненной автором диссертационной работы заключается в следующем:

- Впервые для российского программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM была адаптирована и реализована трехжидкостная модель дисперсно-кольцевого потока водяного теплоносителя;
- Впервые в программном комплексе HYDRA-IBRAE/LM было выполнено усовершенствование модели расчета коэффициента межфазного трения для дисперсно-кольцевого режима течения в случае двухжидкостной модели;
- Впервые в отечественном теплогидравлическом программном комплексе HYDRA-IBRAE/LM была реализована модель течения и теплообмена пароводяной смеси в свинце;
- Впервые получено и внедрено в программный комплекс HYDRA-IBRAE/LM соотношение для описания гидравлических потерь на трение для ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300;
- Впервые на современном методическом уровне определены значения погрешностей расчёта параметров, являющихся важными для обоснования

безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300: температуры свинца при попадании пароводяной смеси в свинцовый теплоноситель; температуры свинца при течении в ТВС; массового расхода при естественной циркуляции тяжелого жидкометаллического теплоносителя; гидравлических потерь на участках полномасштабного макета ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300.

**Достоверность и обоснованность** результатов диссертационного исследования подтверждаются сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными и положительными итогами независимой экспертизы, выполненной при аттестации расчетного кода HYDRA-IBRAE/LM в Ростехнадзоре, завершившейся выдачей аттестационного паспорта.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти 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 диссертации в полной мере отражает суть выполненного исследования и соответствует названию работы.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлена информация о научной новизне, обоснованы теоретическая и практической значимость работы, приведены методология и методы исследования, показаны достоверность результатов, личный вклад автора и информация об апробации работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены публикации по теме исследования.

**В первой главе** приведен обзор литературы, краткое описание одномерных теплогидравлических кодов, основные используемые приближения и допущения. По итогам обзора российских и зарубежных аналогов кода HYDRA-IBRAE/LM выделены актуальные тенденции развития одномерных теплогидравлических кодов. Среди основных направлений

отмечено расширение списка используемых теплоносителей (например, моделирование РУ с жидкометаллическими теплоносителями).

**Вторая глава** посвящена вопросам усовершенствования и развития моделей для расчета дисперсно-кольцевого режима течения водяного теплоносителя. Первой рассматривается модель расчета коэффициента межфазного трения, которая обеспечивает более плавное изменение коэффициента межфазного трения за счет учета трения между газом и каплями. Это приводит к более стабильному расчету параметров дисперсно-кольцевого режима.

Далее приведено описание трехжидкостной модели для дисперсно-кольцевого режима течения, в которой к стандартной двухжидкостной модели добавляются дополнительные уравнения для дисперсной фазы, что позволяет более корректно моделировать динамику жидкой пленки и капель. Благодаря усовершенствованным моделям удалось сделать расчет более стабильным. Валидация кода выполнена на экспериментах, в которых определялась реальная динамика капель и пленки. Получено хорошее согласие между экспериментальными и расчетными данными.

**В третьей главе** приведена модель течения пароводяной смеси в свинце, которая может использоваться при моделировании разрыва трубок парогенератора реакторных установок со свинцовым теплоносителем. Учет присутствия в паровых пузырьках воды позволил повысить точность моделирования данного процесса, что подтверждено путем валидации на экспериментах, проведенных в ИТ СО РАН.

**Четвертая глава** посвящена полученному и реализованному в программном комплексе HYDRA-IBRAE/LM соотношению для моделирования локального сопротивления дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок РУ БРЕСТ-ОД-300. В результате анализа экспериментальных данных по проливкам ТВС была получена формула, которая далее была верифицирована и

валидирована. Представлены результаты моделирования экспериментов на установках, расположенных в АО «НИКИЭТ» и в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».

**В пятой главе** приведены результаты моделирования ряда экспериментов на маломасштабных интегральных установках: HELIOS (Южная Корея), CIRCE (Италия), TALL и TALL-3D (Швеция). Рассмотрены эксперименты с вынужденной циркуляцией теплоносителя (в том числе посредством газлифта), отдельный подраздел посвящен моделированию экспериментов с естественной циркуляцией тяжелого жидкометаллического теплоносителя. В диссертационной работе автор анализирует влияние различных параметров на процесс естественной циркуляции жидкометаллического теплоносителя.

Также следует отдельно отметить, что для всех приведенных в диссертационной работе расчетов был проведен анализ неопределённостей и чувствительности, а для оценки погрешности использовались современные подходы, основанные на рекомендациях приложения № 4 к РБ-166-20. Это позволило сделать объемный анализ проведенных расчетов, на современном методическом уровне определить точность полученных результатов.

**В заключении** диссертационной работы обобщены результаты проведенного исследования, предложены направления для развития темы диссертации.

**Основные результаты работы опубликованы** в девяти научных работах, из них три статьи в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, шесть – в материалах российских и международных конференций и семинаров.

По диссертационной работе можно сделать несколько замечаний и привести следующие рекомендации:

1. Представленный в первой главе диссертации обзор зарубежных и отечественных системных кодов носит в основном описательный характер. Было бы полезно привести более детальное сравнение программного комплекса

HYDRA-IBRAE/LM с другими кодами по физическим моделям, диапазонам валидации, возможностям моделирования процессов в различных теплоносителях.

2. Валидация модели пароводяной смеси в свинце (третья глава диссертационной работы) выполнена только на экспериментах ИТ СО РАН при низких расходах пара и жидкости (0,2 г/с и 0,1–0,3 г/с соответственно), что существенно ниже расходов, ожидаемых при реальном разрыве труб парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300. Желательно было бы пояснить, насколько корректен перенос полученных результатов на натурные условия реакторной установки.

3. В пятой главе работы представлены результаты моделирования экспериментов на установке TALL-3D. Получено хорошее согласие между расчетными и экспериментальными значениями на стационарном участке. Однако при колебаниях массового расхода и температуры в начале расчета наблюдаются различия между расчетными и экспериментальными результатами. В диссертационной работе отсутствует анализ причин данных различий.

Приведенные выше замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы О.Х. Ильясовой и не ставят под сомнение основные результаты её исследования. Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 2.4.9 Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность. Автореферат отражает основные положения диссертационной работы.

Диссертация «Развитие моделей и валидация теплогидравлического программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями» полностью соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней (постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 (с последующими изменениями)) к кандидатским диссертациям, а её автор, Ильясова Ольга Хисамовна,

заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Официальный оппонент

ученый секретарь

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

доктор технических наук, доцент

Морозов Андрей Владимирович

«4» августа 2026 г.

Доктор технических наук по специальности 05.14.03. Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Блок научного руководителя, группа ученого секретаря

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)

Почтовый адрес: 249033, г. Обнинск, Калужской обл., пл. Бондаренко, д. 1

Тел.: (484) 399-70-00 (доб. 81-19), Электронная почта: avmorozov@ippe.ru

