

ОТЗЫВ

официального оппонента Молотовой Ирины Андреевны
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»

Актуальность диссертационной работы

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2035 г. ведется работа по проектированию и созданию инновационных атомных электростанций с реакторными установками (далее – РУ) с жидкометаллическими теплоносителями. Для расчетного обоснования безопасности эксплуатации объектов использования атомной энергии (далее – ОИАЭ) используются аттестованные в установленном порядке программы для ЭВМ.

В настоящее время в России и за рубежом существует ряд программ для ЭВМ, предназначенных для моделирования теплогидравлических процессов, протекающих в РУ с жидкометаллическими теплоносителями. К ним относятся следующие зарубежные программы для ЭВМ: «RELAP5-3D» (США), «CATHARE» (Франция), «ATHLET» (Германия), «TRAC» (США), «SPECTRA» (Нидерланды), «ACENA» (Китай), «GAMMA+» (Южная Корея), «LOCUST» (Китай), а также следующие российские программы для ЭВМ: «HYDRA-IBRAE/LM» (ИБРАЭ РАН), «КОРСАР/ЖМТ» (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»), «TRIANA-6/Ver2.0» (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), GRIF-SM (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»), DIN-800 (АО «ОКБМ Африкантов»), теплогидравлический модуль программ для ЭВМ «СОКРАТ-БН/В1» и «СОКРАТ-БН/В2» (ИБРАЭ РАН, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», АО «ОКБМ Африкантов», АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»). Большинство из перечисленных программ для ЭВМ являются зарубежными и не аттестованы в установленном порядке для проведения вышеупомянутых расчетов в России. Кроме того, для

зарубежных программ для ЭВМ не имеется возможности доработки и адаптации применительно к проектам российских РУ. В этой связи, развитие российских теплогидравлических программ для ЭВМ, к которым, в том числе относится программа для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM», безусловно является актуальной и практически значимой задачей. Поскольку работа Ильясовой О.Х. посвящена разработке теплогидравлических моделей и валидации программы для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM», актуальность тематики диссертации не вызывает сомнения.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является развитие моделей, реализованных в программе для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM», их валидация с использованием экспериментальных данных применительно к жидкометаллическим и водяному теплоносителям.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования состоит в том, что благодаря модернизации теплогидравлических моделей программы для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM» применительно к жидкометаллическим и водяному теплоносителям реализовано моделирование следующих процессов: дисперсно-кольцевого режима течения водяного теплоносителя; течения и теплообмена пароводяной смеси со свинцовым теплоносителем. Выполнена валидация программы для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM» на маломасштабных интегральных стендах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (HELIOS, Южная Корея; CIRCE, Италия; TALL и TALL-3D, Швеция). Кроме того, доработанная версия программы для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM» и оцененные погрешности расчета отдельных параметров использовались в АО «НИКИЭТ» для расчетного обоснования теплогидравлической устойчивости парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем: впервые для российской программы для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM» были реализованы модели для дисперсно-кольцевого режима течения водяного

теплоносителя (трехжидкостная модель и усовершенствованная модель расчета коэффициента межфазного трения). Получено и реализовано соотношение для описания гидравлических потерь на трение для тепловыделяющих сборок (далее – ТВС) РУ БРЕСТ-ОД-300. Впервые в программе для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM» реализована модель течения и теплообмена пароводяной смеси в свинце. Кроме того, на современном методическом уровне определены значения погрешностей расчёта параметров, важных для оценки безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300.

Содержание диссертации

Диссертация Ильясовой О.Х. содержит 125 страниц, включая 20 таблиц и 48 рисунков. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 111 источников, списка сокращений и условных обозначений.

Диссертация представляет собой самостоятельную завершённую научную работу, которая направлена на развитие моделей теплогидравлической программы для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM» и их валидацию. Автореферат соответствует содержанию диссертации и содержит основные положения и выводы диссертационного исследования.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на шести научно-технических конференциях, включая международные. Основные положения экспериментальных и расчетных исследований диссертанта с необходимой полнотой опубликованы в трех научных статьях в рецензируемых журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации научных положений, выводов и результатов подтверждается использованием современных подходов к моделированию теплогидравлических процессов, сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными, оценкой погрешности, которая проведена на современном методическом уровне.

Достоверность и обоснованность подтверждается выдачей аттестационного паспорта программы для ЭВМ (аттестационный паспорт программы для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM/V1.9» рег. № 577 от 15.06.2023), областью применения которого является, в том числе РУ БРЕСТ-ОД-300.

Замечания по диссертации

По диссертационной работе есть следующие замечания:

1. В главе 2 приводятся результаты валидации трехжидкостной модели, реализованной в программе для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM», на экспериментальных данных по динамике пленки и капель в обогреваемом канале при течении в нем пароводяной смеси, а также по определению критического теплового потока при кипении воды. Однако в диссертации не приведена информация о теплофизических свойствах воды, принимаемых при проведении расчетов по программе для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM», со ссылкой на источник информации;

2. В главе 2 диссертации приводятся формулы для расчета трения и теплообмена со стенкой. Однако в диссертации не указаны значения абсолютной шероховатости канала, принимаемые при проведении расчетов трения со стенкой по программе для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM»;

3. В главе 4 представлена реализованная в программе для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM» модель для расчета гидравлических потерь на дистанционирующих решетках ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300, в которой используются коэффициенты трения о стенку в канале ($\xi_{тр}$) и локального сопротивления ($\xi_{лок}$). В диссертации указывается, что $\xi_{тр}$ выбирается в зависимости от геометрических параметров канала и от режима течения теплоносителя, а $\xi_{лок}$ — заимствован из справочных данных. Также для определения гидравлических потерь на дистанционирующих решетках ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300 используется зависимость $\xi_{лок}$ от числа Рейнольдса, в которую входят коэффициенты A, B, C, D, полученные из экспериментальных данных на установке ЭУСТ (АО «НИКИЭТ»). Однако в диссертации не приведены диапазоны значений коэффициента $\xi_{тр}$, а также коэффициентов A,

В, С, D для расчета $\xi_{\text{лок}}$, используемых при проведении расчетов по программе для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM».

4. В главе 5 диссертации на рисунке 5.7 представлены результаты валидации программы для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM» зависимости расхода жидкометаллического теплоносителя от расхода газа с использованием экспериментальных данных, полученных на интегральной установке CIRCE (Италия). Для расхода газа 7 л/с наблюдаются некоторые расхождения экспериментальных данных расхода жидкометаллического теплоносителя от рассчитанных с помощью программы для ЭВМ «HYDRA-IBRAE/LM». Однако в диссертации не приводится анализ причин возможных отклонений.

5. В работе имеются некоторые опечатки по тексту: 1) приведена некорректная размерность массовой скорости теплоносителя «кг/с/м²» (корректный вариант – кг/с·м²); 2) в диссертационной работе имеются следующие опечатки: «*параметры случайным варьировались*» (стр. 63); «*параметры оказывают наибольшее влияние*» (стр. 65); «*На рисунке 5.2 цифрами*» (стр. 70).

Указанные замечания носят частный характер и не снижают общей ценности проведенного исследования.

Диссертация О.Х. Ильясовой «Развитие моделей и валидация теплогидравлического программного комплекса HYDRA-IBRAE/LM для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями» является законченной научно-исследовательской работой, соответствует паспорту специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Изучение диссертационной работы и опубликованных О.Х. Ильясовой публикаций по теме диссертации позволяет сделать заключение о соответствии диссертации критериям, установленным пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 с последующими изменениями.

Автор диссертации, Ильясова Ольга Хисамовна, заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,

Старший научный сотрудник ФБУ «НТЦ ЯРБ»

кандидат технических наук

Молотова Ирина Андреевна

Подпись И.А. Молотовой заверяю

Заместитель директора ФБУ «НТЦ ЯРБ»

С.А. Шевченко

М.П.

«31» августа 2026 г.

Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Адрес: г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный Округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, к. 5.

Тел.: +7 (499) 753-05-24

Электронная почта: molotova@secnrs.ru