

## ОТЗЫВ

официального оппонента Мелихова Олега Игорьевича на диссертацию Мосуновой Настасьи Александровны «Развитие научно-методических основ и разработка интегрального программного комплекса для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

**Актуальность** темы диссертации Н.А. Мосуновой следует из необходимости создания интегрального программного расчетного комплекса, предназначенного для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым), использующих смешанное нитридное уран-плутониевое или оксидное топливо, позволяющего исследовать тепловые, гидравлические и нейтронно-физические процессы в связанной постановке с целью создания новых объектов ядерной техники, обоснования их безопасной эксплуатации, повышения их технико-экономических показателей, который должен соответствовать современному уровню развития научных представлений в данной области.

**Научная новизна диссертации в наибольшей степени характеризуется следующими положениями:**

- В диссертационной работе на базе современных научных представлений были обобщены, проанализированы и систематизированы замыкающие соотношения, необходимые для выполнения в канальном приближении расчётов теплогидравлических процессов, протекающих в контурах РУ на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, включая возможность моделирования процессов в водяном контуре и воздушных теплообменниках.
- Развита и адаптирована применительно к реакторным установкам на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и смешанному нитридному уран-плутониевому топливу механистические физико-математические модели, ранее разработанные для описания процессов, протекающих в оксидном топливе водо-водяных реакторных установок.

- Разработан современный интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1, включающий модели основных процессов и явлений для описания нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем.
- Разработаны матрицы верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 для действующих и проектируемых реакторных установок с натриевым теплоносителем и проектируемых реакторных установок с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (свинец или свинец-висмут) для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации.
- Выполнены верификационные расчёты аналитических задач и экспериментов из матриц верификации с помощью интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что в результате ее выполнения был создан современный верифицированный интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1, позволяющий проводить расчётное обоснование безопасности действующих и проектируемых реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителями. В настоящее время этот комплекс широко используется в организациях атомной отрасли.

**Полнота изложения материалов диссертации является достаточной.** Основные результаты диссертации Н.А. Мосуновой опубликованы в 33 печатных работах, включая 15 статей в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежном научных журналах из перечня ВАК, что позволяет сделать вывод о достаточной обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы.

### **Структура диссертации**

Диссертация изложена на 333 страницах и состоит из введения, семи разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка литературы (284 наименования), списка иллюстративного материала. Работа содержит 91 рисунок и 69 таблиц.

### **Содержание диссертации**

**Во введении** охарактеризована тематика исследований, актуальность темы, приведены общие характеристики работы.

Материалы **первого раздела** диссертации содержат общую информацию об интегральном программном комплексе ЕВКЛИД/V1. Сформулировано его назначение, приведены группы режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации, моделирование которых должно быть обеспечено этим комплексом. На основе обобщения, систематизации и анализа отобранных и признанных надёжными экспериментальных данных и опыта эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах в России и за рубежом определены перечни процессов и явлений для реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым и тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем, которые должны моделироваться для корректного описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок. Исходя из этого перечня процессов и явлений, сформирован модульный состав программного комплекса.

**Во втором разделе** дано описание моделей процессов, важных для корректного описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителями с твэлами с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем, разработанных на основе современных научных представлений.

Теплогидравлические процессы описываются в канальном приближении в рамках двухжидкостной модели. Карты режимов течения и замыкающие соотношения, описывающие межфазные взаимодействия и взаимодействия фаз со стенками канала, были разработаны на основе обобщения и детального анализа имеющихся экспериментальных данных и замыкающих зависимостей, реализованных в отечественных и зарубежных расчётных кодах. Следует отметить, что для трения двухфазного потока о стенку автором диссертационной работы разработано новое соотношение, более точно описывающее литературные данные последних 60 лет.

При разработке моделей поведения твэла за основу приняты модели расчётного кода SFPR. Моделирование процесса переноса тепла в твэле осуществляется путём решения уравнения теплопроводности в цилиндрической системе координат. Для определения напряжённо-деформированного состояния произвольной осевой ячейки используются уравнения статического равновесия Навье, кинематические

соотношения в виде условий совместности перемещений и деформаций Коши, условия совместности деформаций Сен-Венана и уравнения, связывающие напряжения и деформации. Для описания выхода продуктов деления из топлива и распухания топлива предложены два подхода: 1) по эмпирическим корреляциям, обобщающим имеющиеся экспериментальные данные, 2) с помощью комплексной модели, разработанной на основе моделей наиболее важных процессов, описывающих поведение свежего и облучённого топлива при различных режимах работы реактора.

Для описания протекания нейтронно-физических процессов решается трёхмерное многогрупповое нестационарное уравнение переноса нейтронов в диффузионном приближении с учётом запаздывающих нейтронов.

**В третьем разделе диссертации** даны сведения о разработанной под руководством диссертанта базе данных по свойствам материалов и теплоносителей, необходимой для выполнения расчетов программным комплексом ЕВКЛИД/V1. База данных реализована программно. Разработан удобный механизм использования базы данных в программных комплексах в виде динамически подключаемых библиотек расчётных функций, существенно сокращающих время разработки программных комплексов в части операций, необходимых для реализации свойств материалов и механизмов работы с ними.

**Четвёртый раздел** посвящен описанию разработанной диссертантом методики интеграции отдельных программных модулей в интегральные программные комплексы и подходов к программной реализации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1. Необходимо отметить, что интеграция отдельных программных модулей в единый комплекс является сложной задачей, эффективное решения которой будет определять успешность функционирования всего комплекса. Методика интеграции программных модулей в состав интегральных программных комплексов заключается в помещении программных модулей под интегрирующую оболочку в виде динамически загружаемых, реализующих стандартизованный интерфейс взаимодействия с управляющей программой интегрирующей оболочки. Управляющая программа организует расчёт конкретной задачи, загружая необходимые для расчёта программные модули, реализует главный временной цикл, а также осуществляет обмен данными и ввод-вывод. В этом разделе также описаны

ключевые особенности реализации в теплогидравлическом и твэльном модулях алгоритмов параллельных вычислений на основе технологии OpenMP.

**В пятом разделе** изложена методика оценки погрешностей результатов расчёта, получаемых по программным комплексам, в случае моделирования аналитических задач, экспериментов или при выполнении конкретных расчётов стационарных режимов, разработанная Н.А. Мосуновой на основе современных подходов к анализу неопределённостей и чувствительности. Методика включает в себя оценку погрешностей на базе анализа неопределённостей, обусловленных точностью используемых моделей физических процессов, входных данных и вычислительных неопределённостей. Методика базируется на проведении многовариантных расчетов, количество которых определяется формулой Уилкса.

**Шестой раздел** посвящен описанию верификации программного комплекса ЕВКЛИД/V1. В данном разделе приведены матрицы верификации интегрального программного комплекса применительно к действующим и проектируемым реакторным установкам с натриевым теплоносителем и проектируемым реакторным установкам с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем и представлены результаты верификационных расчётов. Погрешность расчётов отдельных параметров была оценена по разработанной и описанной в пятом разделе методике. Кроме того был определён перечень недостающих экспериментальных данных.

**В седьмом разделе** приведены результаты моделирования интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1 трех режимов работы РУ БРЕСТ-ОД-300 со СНУП топливом и двух режимов работы РУ БН-1200 с МОКС топливом.

Были рассмотрены следующие режимы работы РУ БРЕСТ-ОД-300:

- 1) стационарный режим работы на номинальном уровне мощности;
- 2) ввод полного запаса положительной реактивности путём извлечения из активной зоны всех рабочих органов системы управления и защиты с максимальной проектной скоростью при работе РУ на номинальной мощности со срабатыванием защиты главного циркуляционного насосного агрегата;
- 3) режим, вызванный исходным событием «разрыв трубки парогенератора», до момента срабатывания аварийной защиты.

Были рассмотрены следующие режимы работы РУ БН-1200:

- 1) стационарный режим работы на номинальном уровне мощности;

2) начальная стадия аварии с потерей электроснабжения и отказом средств воздействия на реактивность.

Для каждого режима на основе результатов анализа чувствительности, выполненного в ходе верификационных расчётов, и экспертных оценок были определены параметры для выполнения многовариантных расчётов и рассчитаны неопределённости моделирования основных параметров.

В **заключении** диссертации излагаются общие итоги проведённой работы – интегральный программный комплекс для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, разработанный в соответствии с научно-методическими основами, развитыми диссертантом. В результате его применения осуществляется согласованное моделирование процессов, протекающих в реакторных установках БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации с оценкой параметров твэла и существенно снижается степень эмпиризма расчетного обоснования безопасности. На основании этого можно утверждать, что диссертационная работа Н.А. Мосуновой и по формуле специальности (*... расчетное и экспериментальное обоснование ...*), и по области исследования (*разработка методов обоснования безопасности*) отвечает специальности 05.14.03, по которой представлена диссертация.

**Возвращаясь к анализу диссертации по основным признакам** следует отметить, что она полностью соответствует **критериям новизны** вследствие комплексности подхода, оригинальности программных разработок для интегрального расчетного комплекса, объёма привлекаемого верификационного материала и его глубокого анализа, моделированием важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300.

**Научная значимость** работы определяется тем, что в результате её выполнения были созданы научно-методические основы разработки и верификации интегральных программных комплексов, предназначенных для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.

**Достоверность** результатов диссертационной работы обеспечивается применением научно обоснованных расчётных методик и физических моделей и результатами выполненной верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1.

**Личный вклад соискателя в получение результатов, изложенных в диссертации,** заключается в том, что существенная часть исследований, результаты которых вошли в диссертацию, были выполнены непосредственно соискателем.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. В диссертации отсутствует обзор работ по теме исследования. Вместо него диссертант в части введения, озаглавленной *«Степень разработанности темы исследования»* дал по существу аннотацию этого обзора на 4 страницах. Конечно, этот материал дает некоторое представление о работах предшественников, однако он не заменяет полноценного обзора, охватывающий работы в данной области и показывающий место и значение работы, представленной в диссертации.

2. В диссертации отсутствует раздел, посвященный описанию численных методов, с помощью которых осуществляется интегрирование определяющих уравнений. За кадром остается самое интересное для коллег – разработчиков подобных расчетных комплексов: каким образом получаются численные решения, представленные в диссертации. Известно, что численное интегрирование уравнений механики многофазных сред является чрезвычайно сложным делом, поэтому всякое новое достижение в этой области, например, создание новой численной схемы или улучшение существующей схемы всегда вызывает интерес в научном сообществе. Кроме того, описание метода, с помощью которого были получены результаты, всегда вызывает дополнительное доверие к их достоверности.

3. Введение члена, описывающего молекулярную теплопроводность, в уравнение энергии (2.7) на странице 39, мотивированное тем, что теплопроводность жидких металлов на два порядка больше, чем у воды, поднимает вопрос, почему не учитывается турбулентная теплопроводность, которая в турбулентных течениях, реализующихся в контурах реакторов, как правило, выше молекулярной. Каких-либо обоснований в диссертации не приведено.

4. В пятом разделе диссертации, посвященном оценкам погрешностей результатов расчетов, на стр. 154 написано, что *«Должны быть исключены вычислительные неопределенности за счет использования детальных расчетных сеток и малых временных шагов. Для этого следует выполнить расчеты с некоторыми фиксированными значениями исходных данных на последовательности сеток и с использованием нескольких значений шага по времени...»*. Это положение, справедливое, например, для уравнения теплопроводности, на практике, в некоторых

случаях, может оказаться неприменимым к уравнениям двухжидкостной модели, когда они теряют гиперболичность, и только стабилизирующие свойства конечно-разностных схем, реализующиеся при относительно больших пространственных шагах расчетной сетки, позволяют получить устойчивые численные решения. При уменьшении шага численное решение становится неустойчивым.

5. В том же пятом разделе на стр. 162 написано «Пространственное измельчение расчетной модели минимизирует неопределенности, связанные с конечным размером расчетных ячеек. При этом остаются неопределенности, связанные с подходом к выбору расчетной модели (нодализация схемы) как таковой. Неопределенности такого рода практически невозможно выразить численно, поэтому они не учитываются в данной методике. При этом в рамках верификации могут и, вообще говоря, должны приводиться пояснения по выбору подхода к построению расчетной модели. В общем случае, должна быть проведена отдельная работа с анализом результатов, полученных для различных расчетных моделей, и выбором лучшей из них для описания рассматриваемых процессов и явлений.». Это безусловно справедливое положение не было в полном объеме реализовано в седьмом разделе диссертации при описании расчетных схем РУ БН-1200 и РУ БРЕСТ-ОД-300. Не были приведены альтернативные расчетные схемы для этих установок и, соответственно, отсутствовали результаты расчетов по этим схемам.

6. Уравнения сохранения количества движения (2.3) и (2.4) на стр.38 приведены только для дисперсно-кольцевого режима течения. Для полноты описания двухжидкостной модели необходимо было представить уравнения сохранения количества движения и для других режимов течения.

Еще три замечания редакционного характера:

1. В тексте диссертации отсутствует пояснение названию ЕВКЛИД для разработанного программного комплекса.

2. На стр. 34 диссертант использует термин «робастный результат». Слово «робастный» еще не вошло в лексикон русскоязычной научной литературы, и лучше было бы использовать другие термины.

3. На стр. 48 при определении числа Грасгофа не пояснено обозначение  $\Delta T$ .

Эти замечания, конечно, не уменьшают мою высокую оценку диссертационной работы.



