

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА  
Д 002.070.01 на базе Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного  
развития атомной энергетики Российской академии наук

ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 31 октября 2018 года № 3  
о присуждении Мосуновой Настасье Александровне, гражданство –  
Российская Федерация, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Развитие научно-методических основ и разработка интегрального программного комплекса для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями» по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации» принята к защите 24 июля 2018 года, протокол № 7, диссертационным советом Д 002.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, расположенного по адресу: 115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, д. 52. Диссертационный совет создан приказами Минобрнауки России № 75/нк от 15 февраля 2013 г., № 626/нк от 3 июня 2016 г., № 748/нк от 12 июля 2017 г., №92/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Мосунова Настасья Александровна 1982 года рождения. Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Математическое моделирование киральных волноведущих систем» защитил в 2007 году в диссертационном совете К 501.001.17 при Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова, работает заведующим отделением разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Диссертация выполнена в отделении разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Научный консультант – доктор физико-математических наук Стрижов Валерий Федорович, заместитель директора по разработке интегрированных программных комплексов анализа безопасности АЭС и ЯТЦ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Рачков Валерий Иванович, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Инновационно-технологический центр проекта «Прорыв» (Частное учреждение «ИТЦП «ПРОРЫВ»), научный руководитель НИОКР ПН «Прорыв»;

Мелихов Олег Игорьевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций» (АО «ЭНИЦ»), заместитель директора по научной работе – начальник Управления НИР и НИОКР в области теплофизики;

Мигров Юрий Андреевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский технологический институт имени А. П. Александрова» (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»), начальник отдела теплофизических исследований

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»), г. Димитровград в своем положительном отзыве, подписанном заместителем начальника отделения РИК по научной работе А. В. Бурукиным, секретарем заседания О. В. Ишуниной, научным руководителем по ядерной

безопасности реакторной установки БОР-60, экспертом – начальником лаборатории, доктором технических наук И. Ю. Жемковым, утвержденном заместителем директора – научным руководителем А. Л. Ижутовым, указала, что диссертация Мосуновой Н.А. является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему, обладающей высокой степенью новизны и практической значимости полученных результатов. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации» в части создания программных комплексов для моделирования нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, обеспечивающих расчетное обоснование облика и безопасности функционирования объектов ядерной техники. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертация удовлетворяет требованиям пунктов 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Мосунова Настасья Александровна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук.

Соискатель имеет 67 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 33 работы, из них опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 15 работ. Из 33 опубликованных работ по теме диссертации 8 – в научном журнале «Теплоэнергетика» (тираж – 200 экз.), 3 – в научном журнале «Атомная энергия» (тираж – 280 экз.), 1 – в научном журнале «Вопросы радиационной безопасности» (тираж – 300 экз.), 1 – в научном журнале «Annals of Nuclear Energy» (тираж – 300 экз.), 1 – в научном журнале «Теплофизика высоких температур» (тираж – 100 экз.), 1 – в научном журнале «Математическое моделирование» (тираж – 130 экз.), 18 – в сборниках докладов и тезисов докладов российских и международных научных конференций. В опубликованных работах приведены результаты, полученные лично автором или при его непосредственном участии, разработки физико-математических моделей теплогидравлических, термомеханических, нейтронно-физических и других процессов, разработки и верификации соответствующего современным требованиям интегрального

программного комплекса, предназначенного для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, использующих нитридное или оксидное топливо, и его отдельных программных модулей, разработки научно-методических основ создания и верификации интегральных программных комплексов, включая методику оценки неопределенностей результатов расчета для задач обоснования безопасности объектов использования атомной энергии, оценку теплофизических свойств жидкого свинца и другие актуальные вопросы.

Соискатель является одним из авторов трех программ для ЭВМ, на которые в Федеральной службе по интеллектуальной собственности получены 3 свидетельства о государственной регистрации – №2014619799, №2015660310, №2014619935, представляющих собой интегральный программный комплекс для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями и его отдельные модули.

Наиболее значимые научные работы соискателя:

1. Мосунова Н.А. Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 1: Базовые модели // Теплоэнергетика. 2018. №5. С. 69–84.

2. Моисеенко Е.В., Мосунова Н.А. Методика оценки неопределённости результатов расчёта для задач обоснования безопасности объектов использования атомной энергии // Вопросы радиационной безопасности. 2018. №2. С. 22–32.

3. Алипченков В.М., Болдырев А.В., Вепрев Д.П., Зейгарник Ю.А., Колобаева П.В., Моисеенко Е.В., Мосунова Н.А., Селезнёв Е.Ф., Стрижов В.Ф., Усов Э.В., Осипов С.Л., Горбунов В.С., Афремов Д.А., Семченков А.А. Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 2: Верификация // Теплоэнергетика. 2018. № 9. С. 57–72.

4. Алипченков В.М., Анфимов А.М., Афремов Д.А., Горбунов В.С., Зейгарник Ю.А., Кудрявцев А.В., Осипов С.Л., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф.,

Усов Э.В. Базовые положения, текущее состояние разработки и перспективы дальнейшего развития теплогидравлического расчетного кода нового поколения HYDRA-IBRAE/LM для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах // Теплоэнергетика. 2016. № 2. С. 54–64.

5. Савченко И. В., Лежнин С. И., Мосунова Н.А. Рекомендации по значениям и расчётным соотношениям для теплофизических и кинетических свойств жидкого свинца // Теплоэнергетика. 2015. №6. С. 51–54.

6. Большов Л.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Шмидт О.В. Расчетные коды нового поколения для новой технологической платформы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2016. Т. 120. Вып. 6. С. 303–312.

7. Бутов А. А., Усов Э. В., Лежнин С. И., Мосунова Н. А. Модель роста паровых снарядов в каналах энергетического оборудования с натриевым теплоносителем // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. №4. С. 570–575.

8. Mosunova N. Coupled calculations for the fast reactors safety justification with the EUCLID/V1 integrated computer code // Books of abstracts of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), 26–29 June 2017, Yekaterinburg, Russian Federation, IAEA-CN245-184. P. 156.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы из 13 организаций:

1. АО «ВНИИАЭС».

Отзыв подписали заместитель генерального директора – директор по технологическому развитию д.т.н. Н.Н.Давиденко, главный эксперт к.т.н. А.А.Дружаев.

Отзыв положительный. Замечания:

1. В автореферате отмечено, что интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 предназначен в том числе и для обоснования безопасности эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Согласно НП-001-15 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» обоснование безопасности должно быть выполнено для всех возможных состояний атомной станции и, соответственно, реакторной установки как ее составной части. Однако в тексте автореферата отмечено, что интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 не предназначен для моделирования

полного перечня проектных и запроектных аварий. Таким образом, данный программный комплекс не может в полной мере решить задачу обоснования безопасности АЭС с РУ на быстрых нейтронах во всех режимах ее работы. В тексте автореферата нет пояснения, почему они исключены из рассмотрения и существуют ли перспективы по расширению границ применимости программного комплекса ЕВКЛИД/V1

2. В автореферате приведен перечень физических явлений, обязательных к рассмотрению для обеспечения возможности моделирования режимов нормальной эксплуатации и режимов нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. При этом отмечено, что данный перечень физических явлений определен на основе обобщения опыта эксплуатации соответствующих реакторных установок в РФ и за рубежом. Исходя из специфики задач проектирования и анализа безопасности, для решения которых может быть применен программный комплекс ЕВКЛИД/V1, должны быть сформулированы критерии успешности решения данных задач. Эти критерии должны в себя включать допустимые ограничения на возможные значения конкретных параметров эксплуатируемого оборудования (например, максимально достигаемая температура топлива или оболочки твэла не должны превышать некоторого значения во всех возможных режимах работы реакторной установки за исключением запроектных аварий). Именно на основании выявленных критериев приемки должен быть определен перечень обязательных к моделированию процессов и явлений. Данная логика из автореферата не прослеживается
3. В Таблице 3 автореферата приведены погрешности расчетов параметров твэла с применением программного комплекса ЕВКЛИД/V1. Для параметра «Выход ГПД, МОКС топливо» заявлена погрешность в расчете  $\pm 2\%$ . Величина погрешности данного параметра отличается на порядок (в меньшую сторону) от погрешности аналогичного параметра для оксидного топлива и СНУП топлива. Видимо, получение такого низкого значения связано с недостаточностью экспериментальных данных, поскольку для ее определения были рассмотрены состояния только лишь двух твэлов. В тексте автореферата не приведен соответствующий анализ полученных погрешностей расчетных параметров, приведенных в таблицах 1-4.

## 2. АО «ВНИИНМ».

Отзыв подписали г.н.с. профессор В.М.Чернов, г.н.с. д.т.н. В.И.Волк.

Отзыв положительный. Замечания:

Следует отметить, что очевидные успехи в области моделирования поведения реакторных установок по многим рассматриваемым процессам и явлениям могут и должны быть распространены на задачи, возникающие при разработке новых конструкционных материалов, а также технологий обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами в части, например, прогнозирования поведения материалов в различных условиях. Указаний на эти применения разработанных в рамках диссертационного

исследования расчетных средств и методических подходов в автореферате нет, поэтому предлагаем это рассмотреть, как предложение по развитию работы.

### 3. НИЯУ МИФИ

Отзыв подписал профессор кафедры теплофизики профессор В.И.Деев.

Отзыв положительный. Замечания:

1. При выполнении теплогидравлических расчетов по-прежнему остаются нерешенными вопросы определения начального перегрева жидкости при кипении натриевого теплоносителя, а также выбора толщины образовавшейся оксидной пленки на поверхности теплообмена в случае тяжелого жидкометаллического теплоносителя (формула (1) автореферата).
2. В автореферате следовало бы отметить, в чем состоит новизна формулы (2), предложенной автором диссертации для расчета потерь давления на трение в двухфазном потоке.
3. Из автореферата не ясно, на каких фактах базируется составленная автором диссертации карта многофазных режимов течения тяжелых жидкометаллических теплоносителей, как определяются границы существования выделенных в работе пузырькового, снарядного и кольцевого режимов, каковы их количественные характеристики?

### 4. ФГУП «ПО «МАЯК»

Отзыв подписали инженер-технолог-физик-исследователь 1 кат. к.т.н. В.Ю.Самонин, главный инженер Д.Н.Колупаев.

Отзыв положительный. Замечания:

1. Автором не конкретизированы уровень его руководства (занимаемая должность) при решении названной научно-технической проблемы, имеющей довольно масштабный характер.
2. В описании разработанной и предлагаемой методики оценки погрешностей результатов расчёта, получаемых по программным комплексам, в части исключения вычислительных неопределённостей не указан применённый автором количественный критерий для оценки близости результатов.
3. В автореферате приведены полученные погрешности верификационных расчётов различных параметров (таблицы 2, 3, 4, описание раздела б), но не дана оценка значимости этих величин с позиций их практической приемлемости.
4. Из текста автореферата не ясно, планируется ли получение аттестационного паспорта Ростехнадзора на разработанный ИПК ЕВКЛИД/VI.

### 5. НИЦ «Курчатовский институт»

Отзыв подписали научный руководитель Курчатовского комплекса атомной энергетики, д.т.н. М.А.Калугин, начальник отдела реперных расчетов ядерных реакторов, к.ф.-м.н. Д.А.Шкаровский.

Отзыв положительный. Замечания:

1. В автореферате приведена информация о рекомендованных свойствах жидкого свинцового теплоносителя и отсутствуют данные о том, какие свойства следует использовать при моделировании свинцово-висмутового, натриевого или водяного теплоносителей.
2. На страницах 35 – 39 в таблицах размещена обобщающая информация по погрешности расчета отдельных параметров. Было бы целесообразно разместить графическую информацию о степени соответствия результатов экспериментальных измерений и расчетов хотя бы для некоторых режимов работы реакторных установок БН-600 или БН-800.
3. Для широкого применения созданного программного комплекса рекомендуется завершить его аттестацию в установленном порядке в Ростехнадзоре.
4. Для верификации диффузионного модуля интегрального программного комплекса, кроме указанных в автореферате экспериментальных данных и бенчмарк-задач, целесообразно использовать кросс-верификацию с аттестованными программами на базе метода Монте-Карло, например, MCU-BR.

## 6. ТПУ

Отзыв подписал доцент отделения ядерно-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий д.т.н. Д.Г.Видяев.

Отзыв положительный. Замечания:

1. В тексте автореферата не приведены такие характеристики интегрального программного комплекса, как количество уравнений и моделируемых переменных, что не позволяет в полной мере оценить объем работы наиболее важной части диссертационного исследования.
2. В методике оценки погрешностей результатов расчета программного комплекса на третьем этапе указываются «некоторая предопределенная доверительная вероятность  $\alpha$ » и «некоторая вероятность  $\beta$ », которые из текста автореферат не ясно как задавать или подбирать и одинаковы ли эти значения при расчетах для различных параметров, по отношению к которым потенциально наиболее чувствителен результат моделирования.
3. В описании проверки качества расчетных моделей на стр.39 возможно ошибочно используется слово «квалификация», вероятно автор имеет ввиду «верификация».



## 7. АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

Отзыв подписал начальник лаборатории д.ф.-м.н. К.Ф.Раскач.

Отзыв положительный. Замечание:

Ни в автореферате, ни в полном тексте диссертации не продемонстрированы примеры практических расчетов для РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем. Между тем, проведение подобных расчетов входит в область применимости интегрального кода, и, кроме того, в РФ разработан наиболее продвинутый проект РУ такого типа – СВБР-100.

## 8. ИТ СО РАН

Отзыв подписал заведующий лабораторией академик РАН С.В.Алексеев.

Отзыв положительный. Без замечаний.

## 9. Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» по реализации капитальных проектов.

Отзыв подписал заместитель директора Технологического департамента – руководитель управления основных технологий по реализации капитальных проектов В.В.Семишин.

Отзыв положительный. Замечания:

1. В таблице 2 автореферата приведены погрешности расчёта программным комплексом ЕВКЛИД/V1 теплогидравлических параметров для контуров с жидкометаллическими и воздушным теплоносителями, однако не указаны погрешности расчёта параметров контура с водяным теплоносителем.
2. Для суждения о точности моделирования было бы целесообразно поместить более детальную информацию о сравнении результатов расчётов переходных режимов с данными, полученными на действующих реакторных установках БН-600, БН-800, БОР-60.
3. Для демонстрации возможностей интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 было бы целесообразно привести результаты расчёта, полученные в составе полномасштабной расчётной математической модели опытно-демонстрационного энергокомплекса с РУ БРЕСТ-ОД-300.

## 10. АО «ОКБМ Африкантов»

Отзыв подписали главный специалист д.т.н. Ю.П.Сухарев, главный специалист к.т.н. С.Л.Осипов.

Отзыв положительный. Замечания:

1. В автореферате (стр. 15) отмечено, что на защиту выносятся База данных по свойствам материалов и теплоносителей, но достаточного обоснования этого постулата для установок БН не приведено. Необходима большая

конкретизация информации о новизне Базы данных и для каких быстрых реакторов она создана.

2. В автореферате отмечено, что для описания нейтронно-физических процессов используется диффузионный модуль DN3D. Непонятно, как в этом модуле используется принципиально другие приближения на основе  $S_N$  метода с  $P_M$  приближением для учета анизотропии рассеяния.
3. Замечания по таблице 3 автореферата. Необходимо объяснить очень большие погрешности в расчете выхода ГПД для топлива  $UO_2$  (+74%) и для СНУП топлива (+45%) по сравнению с МОКС топливом ( $\pm 2\%$ ). Отметим, что для реактора БН-600 имеется обширный экспериментальный и расчетный материал по выходу ГПД из облученных твэл.

## 11. АО «АТОМПРОЕКТ»

Отзыв подписали директор научно-конструкторского управления д.т.н. Безлепкин В.В., ведущий инженер-проектировщик отдела обоснования безопасности и НИОКР Токарь О.В.

Отзыв положительный. Замечания:

1. В разделе автореферата «Основные задачи работы» не отмечен важный результат исследовательской работы по составлению перечня физических процессов и явлений - это пределы диапазона изменения основных параметров реакторных установок в нормальных режимах эксплуатации и в режимах с нарушениями условий нормальной эксплуатации РУ с жидкометаллическим теплоносителем. Именно этот диапазон параметров должен быть обязательно «покрыт» достоверными экспериментальными данными из матрицы верификации, и именно для этого диапазона должна быть проведена верификация интегрального программного комплекса.
2. В разделе 2 автореферата предложено новое соотношение для расчета потери давления на трение двухфазного потока о стенки канала (2), которое, как отмечает автор диссертационной работы, более точно описывает литературные данные последних 60 лет. Было бы логично в этом разделе представить в графическом или статистическом виде сравнение зависимости (2) и соотношения типа Локкарта-Мартинелли с экспериментальными данными.
3. В разделе 5 автореферата описана методика оценки погрешности результатов расчета программным комплексом при моделировании аналитических задач, экспериментов или прикладных задач (прогнозные расчеты). Как следует из описания, на третьем этапе этой методики (этап «В»), независимо от типа задачи, выполняются многовариантные расчеты в пределах некоторой ограниченной области изменения выделенных параметров или входных данных задачи. Рассмотрим конкретный тип задачи, например, экспериментальные исследования теплогидравлических процессов или явлений, которые, как правило, проводятся сериями. В

каждой серии экспериментов дискретно изменяется только один параметр, а остальные режимные или граничные параметры поддерживаются постоянными. Причем экспериментальный диапазон изменения определенного параметра в серии довольно значительный и на порядки больше области варьирования, задаваемой в соответствии с методикой оценки погрешности. Есть ли смысл в выполнении многовариантных расчетов в задачах оценки погрешности при сравнении результатов расчета с экспериментальными данными?

4. В динамических экспериментах погрешность измеряемого параметра определяется погрешностью измерительного канала, которая состоит из двух слагаемых - статической погрешности канала (прибора) и динамической погрешности канала (прибора), которая зависит от инерционных характеристик измерительного канала и скорости изменения измеряемого параметра. Как учитывается полная приборная погрешность измерения в динамических экспериментах в методике оценки погрешности результатов расчета?

## 12. АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Отзыв подписал ведущий конструктор к.т.н. Климов Н.Н.

Отзыв положительный. Замечания:

1. Недостаточное внимание в автореферате уделено реакторным установкам со свинцово-висмутовым теплоносителем: не приведено программное средство TRIANA-4, используемое в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» для обоснования проектов реакторных установок с свинцово-висмутовым теплоносителем, не выполнен анализ теплофизических свойств свинцово-висмутовой эвтектики, не показаны примеры расчётов отдельных режимов.
2. В таблице 2 приведены погрешности расчёта кодом ЕВКЛИД/VI теплогидравлических параметров для реакторных установок с натриевым теплоносителем, а также для реакторных установок со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем. Причем для некоторых параметров, таких например, как истинное объемное паросодержание натриевого теплоносителя, абсолютное давление в первом контуре с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем в пределах аварийного модуля парогенератора в режиме, вызванном исходным событием «разрыв трубок парогенератора», а также расхода в первом контуре тяжелого жидкометаллического теплоносителя в режиме естественной циркуляции, значения погрешностей получены на основе анализа результатов одного динамического эксперимента, что является недостаточным и требует дальнейшего подтверждения на новых экспериментальных данных, которые, судя по автореферату, запланированы при проведении дальнейших исследований.

## 13. АО «НИКИЭТ»

Отзыв подписал заместитель генерального директора по НИОКР д.т.н. Лопаткин А.В.

Отзыв положительный. Замечания:

1. В автореферате сказано, что автору удалось устранить неточности при обработке экспериментальных данных, в части неучёта продольной теплопроводности в жидком металле. Не ясно, как это было сделано, так как учесть процесс кондуктивного переноса тепла можно только расчетным путем.
2. В автореферате сказано, что для трения двухфазного потока о стенку автором диссертационной работы разработано новое соотношение, более точно описывающее литературные данные последних 60 лет. Вместе с тем, не конкретизировано, в чем состоит новизна подхода и к каким положительным последствиям это привело.
3. При моделировании по коду ЕВКЛИД/VI режима работы РУ БРЕСТ-ОД-300, вызванного исходным событием «разрыв трубки парогенератора», для максимальной температуры топлива получена существенная неопределенность расчета уже в исходном, стационарном, состоянии - порядка 150°C (см. рисунок 5). Это требует объяснения, тем более что для режима «Ввод полного запаса положительной реактивности» такого эффекта не наблюдается.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор Рачков Валерий Иванович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Мелихов Олег Игорьевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник Мигров Юрий Андреевич являются известными учеными и признанными специалистами в области разработки физико-математических моделей, программных комплексов и выполнения расчетно-экспериментального обоснования безопасности реакторных установок, в том числе, с жидкометаллическими теплоносителями, Акционерное общество «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» является ключевым в мире научным центром в области экспериментального и расчетного обоснования работоспособности материалов и элементов активных зон действующих и перспективных ядерных реакторов, на территории которого расположена экспериментальная реакторная установка на

быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БОР-60 и сооружается многоцелевой реактор на быстрых нейтронах МБИР.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. На современной научной основе обобщены, проанализированы и систематизированы замыкающие соотношения, необходимые для выполнения расчетов в канальном приближении теплогидравлических процессов, протекающих в контурах реакторных установок 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. На основе этого: 1) верифицирована (доказана путем сравнения с результатами экспериментальных исследований) возможность использования существующих замыкающих соотношений для задач диссертационного исследования; 2) в случае обоснованной необходимости – выполнена модификация существующих и/или разработка новых замыкающих соотношений.

2. Развиты и адаптированы применительно к реакторным установкам на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и смешанному нитриднему уран-плутониевому топливу механистические физико-математические модели, разработанные ранее для описания процессов, протекающих в оксидном топливе водо-водяных реакторных установок.

3. Разработан интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1, включающий модели основных процессов и явлений для описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем, включающий, в частности:

– модели теплогидравлических процессов в канальном приближении в натриевом (однофазные и двухфазные), свинцовом (пары свинца не моделируются), свинцово-висмутовом (пары свинца и висмута не моделируются) и водяном (однофазные и двухфазные процессы) теплоносителях, содержащих неконденсируемые газы в газовой и жидкой фазах;

– модели теплогидравлических процессов в свинцовом или свинцово-висмутовом теплоносителе при поступлении водяного пара в жидкую фазу тяжелого жидкометаллического теплоносителя;

– модели для описания поведения ТВЭЛ с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем;

– модели для описания нейтронно-физических процессов в диффузионном и кинетическом приближениях;

– модели расчета выгорания топлива и остаточного энерговыделения;

– пре- и постпроцессор для подготовки исходных данных для выполнения расчетов и отображения их результатов.

4. Проанализированы и выбраны наиболее надежные теплофизические свойства жидкого свинцового теплоносителя, которые реализованы в разработанной базе данных по свойствам материалов и теплоносителей.

5. Развиты методические основы интеграции (взаимодействия) отдельных программных модулей в составе интегральных программных комплексов, которые реализованы в виде интегрирующей оболочки.

6. Предложена методика оценки погрешностей результатов расчетов, получаемых с помощью программных комплексов, соответствующая современным подходам к анализу неопределенностей и чувствительности и включающая оценку неопределенностей, обусловленных точностью используемых моделей физических процессов, входных данных, и вычислительных неопределенностей.

7. Разработаны матрицы верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 для действующих и проектируемых реакторных установок с натриевым теплоносителем и проектируемых реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (свинец или свинец-висмут) для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации.

8. Выполнены верификационные расчеты аналитических задач и экспериментов из матриц верификации с использованием интегрального

программного комплекса ЕВКЛИД/V1. На современном методическом уровне определены значения погрешностей расчета параметров, являющимися определяющими для оценки безопасности реакторных установок.

9. Интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1 выполнено моделирование отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300.

Тем самым подтверждены основные положения, выносимые на защиту (страницы 14 – 15 автореферата):

1. Интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1, предназначенный для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем с твэлами с оксидным или нитридным топливом с газовым подслоем.

2. Система замыкающих соотношений для выполнения расчетов теплогидравлических процессов, протекающих в контурах реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации.

3. Матрицы и результаты верификации отдельных программных модулей и интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 в целом для действующих и проектируемых реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем (натрий, свинец, свинец-висмут).

4. Методика оценки погрешностей результатов расчетов, получаемых по программным комплексам.

5. Методика интеграции программных модулей, отвечающих за моделирование отдельных физических процессов в составе интегрального программного комплекса.

6. Результаты расчетов отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной

эксплуатации реакторных установок БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 с использованием интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1.

7. База данных по свойствам материалов и теплоносителей, используемых при расчетах по интегральному программному комплексу ЕВКЛИД/V1, включая оцененные данные по теплофизическим свойствам жидкого свинцового теплоносителя.

Научная новизна исследования обоснована тем, что:

1. На современной научной основе обобщены, проанализированы и систематизированы замыкающие соотношения, необходимые для выполнения расчетов в канальном приближении 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. На основе этого: 1) верифицирована (доказана путем сравнения с результатами экспериментальных исследований) возможность использования существующих замыкающих соотношений для задач диссертационного исследования; 2) в случае обоснованной необходимости – выполнена модификация существующих и/или разработка новых замыкающих соотношений.

2. Развиты и адаптированы применительно к реакторным установкам на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и смешанному нитридному уран-плутониевому топливу механистические физико-математические модели, разработанные ранее для описания процессов, протекающих в оксидном топливе водо-водяных реакторных установок.

3. Разработан интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1, включающий модели основных процессов и явлений для описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем, включающий, в частности:

– модели теплогидравлических процессов в канальном приближении в натриевом (однофазные и двухфазные), свинцовом (пары свинца не



моделируются), свинцово-висмутовом (пары свинца и висмута не моделируются) и водяном (однофазные и двухфазные процессы) теплоносителях, содержащих неконденсируемые газы в газовой и жидкой фазах;

- модели теплогидравлических процессов в свинцовом или свинцово-висмутовом теплоносителе при поступлении водяного пара в жидкую фазу тяжелого жидкометаллического теплоносителя;

- модели для описания поведения ТВЭЛ с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем;

- модели для описания нейтронно-физических процессов в диффузионном и кинетическом приближениях;

- модели расчета выгорания топлива и остаточного энерговыделения;

- пре- и постпроцессор для подготовки исходных данных для выполнения расчетов и отображения их результатов.

4. Проанализированы и выбраны наиболее надежные теплофизические свойства жидкого свинцового теплоносителя, которые реализованы в разработанной базе данных по свойствам материалов и теплоносителей.

5. Развиты методические основы интеграции (взаимодействия) отдельных программных модулей в составе интегральных программных комплексов, которые реализованы в виде интегрирующей оболочки.

6. Предложена методика оценки погрешностей результатов расчетов, получаемых с помощью программных комплексов, соответствующая современным подходам к анализу неопределенностей и чувствительности и включающая оценку неопределенностей, обусловленных точностью используемых моделей физических процессов, входных данных, и вычислительных неопределенностей.

7. Разработаны матрицы верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 для действующих и проектируемых реакторных установок с натриевым теплоносителем и проектируемых реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (свинец или свинец-висмут) для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации.

8. Выполнены верификационные расчеты аналитических задач и экспериментов из матриц верификации с использованием интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1. На современном методическом уровне определены значения погрешностей расчета параметров, являющимися определяющими для оценки безопасности реакторной установки.

9. Интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1 выполнено моделирование отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок БН-1200 (стационарный режим работы на номинальном уровне мощности, начальная стадия аварии с потерей электроснабжения и отказом средств воздействия на реактивность) и БРЕСТ-ОД-300 (стационарный режим работы на номинальном уровне мощности, ввод полного запаса положительной реактивности, гильотинный разрыв трубки парогенератора).

Практическая значимость работы состоит в том, что результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, позволили:

1. Развить научно-методические основы разработки и верификации интегральных программных комплексов, предназначенных для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем: подходы к построению теоретических моделей, формулировки базовых систем уравнений, обобщенные замыкающие зависимости, систематизированные экспериментальные данные, ранжированные перечни процессов и явлений, современные методики оценки погрешностей результатов расчета и взаимодействия между отдельными программными модулями.

2. Обеспечить конструкторские организации, организацию – научного руководителя проектов реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, а также вовлеченных в соответствующие проекты исследователей современным верифицированным интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1, обеспечивающим расчетное обоснование безопасности действующих и проектируемых реакторных

установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителями.

3. Обеспечить независимость расчетного обоснования перспективных проектов отечественных реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем от зарубежных программных средств в области применимости интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1.

4. Выполнить расчетное обоснование безопасности отдельных режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200.

5. Включить разработанный интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 в полномасштабную расчетную математическую модель опытно-демонстрационного энергокомплекса с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300 и выполнить на ней расчетную проверку принятых проектных решений.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что достоверность полученных результатов подтверждается:

1. Применением научно обоснованных расчетных методик и физических моделей.

2. Результатами верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 на данных экспериментов, выполненных как в России, так и за рубежом, включая отдельные режимы действующих блоков БН-600 и БН-800 с натриевым теплоносителем.

3. Результатами экспертизы верификационного отчета интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 и его твэльного модуля БЕРКУТ, выполненной ФБУ «НТЦ ЯРБ», и аттестационным паспортом теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1.

4. Публикацией результатов в рецензируемых журналах и их представлением на ведущих российских и международных конференциях и семинарах, а также заседаниях Технического комитета проектного направления «Прорыв».

5. Публикацией полученных результатов в отчетах о научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, выпущенных в рамках проектного направления «Прорыв» и прошедших экспертизу ведущими специалистами отечественных предприятий атомной отрасли в области разработки и верификации расчетных кодов.

Личный вклад соискателя состоит в:

1. Научно-методическом руководстве, координации аналитических и научных исследований, сопряженных с созданием интегрального программного комплекса.

2. Формулировке перечня теплогидравлических и нейтронно-физических процессов и явлений, которые должны моделироваться для адекватного описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации проектируемых реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

3. Анализе и обосновании системы замыкающих соотношений для свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей, доработке отдельных моделей для натриевого теплоносителя для канального теплогидравлического модуля интегрального программного комплекса, разработке модели трения о стенку двухфазного пароводяного теплоносителя.

4. Развитии методики интеграции отдельных модулей в состав интегральных программных комплексов и ее программной реализации.

5. Под руководством и при непосредственном участии автора осуществлены:

- программная реализация интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1;
- верификация отдельных программных модулей и интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 в целом;
- анализ и оценка результатов верификационных расчетов, полученных с использованием интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, определение значений погрешностей расчетов отдельных параметров;

– расчеты отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 и анализ полученных результатов.

6. Анализе и выборе наиболее надежных данных по теплофизическим свойствам жидкого свинцового теплоносителя.

7. Программной реализации базы данных по свойствам материалов, необходимым для работы интегрального программного комплекса.

8. Разработке методики оценки погрешностей результатов расчетов, получаемых по программным комплексам.

В ходе заседания диссертационного совета по всем замечаниям, поступившим на диссертацию стороны оппонентов и ведущей организации, а также по замечаниям по автореферату соискателем даны четкие ответы, в ряде случаев аргументированные возражения, а в отношении рекомендаций и пожеланий выражена благодарность и заявлено намерение к их реализации.

На заседании 31 октября 2018 года диссертационный совет принял решение присудить Мосуновой Н.А. ученую степень доктора технических наук по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 8 докторов наук по специальности 05.14.03, участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных голосов – 0.

Председатель  
диссертационного  
совета  
академик РАН



Большов Л.А.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н.

Калантаров В.Е.

2 ноября 2018 года