

УТВЕРЖДАЮ  
ВРИО директора ИБРАЭ РАН  
доктор физико-математических наук



Л. В. Матвеев

2018 г.

### Заключение

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

Диссертация «Развитие научно-методических основ и разработка интегрального программного комплекса для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями» выполнена в Отделении разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС.

Научный консультант – Стрижов Валерий Федорович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, заместитель директора.

В период подготовки диссертации соискатель, Мосунова Настасья Александровна работала в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук в Отделении разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС в должности научного сотрудника, заведующего отделом, заведующего отделением.

В 2004 г. Н. А. Мосунова с отличием окончила Физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, ей присуждена квалификация физик по специальности «физика».

В 2007 г. защитила диссертацию «Математическое моделирование киральных волноведущих систем» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ в диссертационном совете К 501.001.17 при Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова.

По результатам обсуждения диссертации Н. А. Мосуновой «Развитие научно-методических основ и разработка интегрального программного комплекса для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями» принято следующее заключение:

Диссертация Н. А. Мосуновой выполнена на высоком научном уровне, в ней решена важная научно-техническая проблема по разработке соответствующего современным требованиям интегрального программного 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 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.**

**Цели диссертационной работы** состояли в:

1) развитии научно-методических основ, разработке и верификации интегрального программного комплекса для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями с твэлами с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем;

2) анализе отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 с использованием разработанного интегрального программного комплекса.

**Личный вклад соискателя** заключается в том, что им:

1. Осуществлено научно-методическое руководство, координация аналитических и научных исследований, сопряжённых с созданием интегрального программного комплекса.

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

3. Выполнены анализ и обоснование системы замыкающих соотношений для свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей, доработаны отдельные модели для натриевого теплоносителя для канального теплогидравлического модуля интегрального программного комплекса, разработана модель трения о стенку двухфазного пароводяного теплоносителя.

4. Развита методика интеграции отдельных модулей в состав интегральных программных комплексов, выполнена её программная реализация.

5. Под руководством и при непосредственном участии соискателя выполнены:
- программная реализация интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1;
  - верификация отдельных программных модулей и интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 в целом;
  - анализ и оценка результатов верификационных расчётов, полученных с использованием интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, определение значений погрешностей расчётов отдельных параметров;
  - расчёты отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 и анализ полученных результатов.

6. Проведены анализ и выбор наиболее надёжных данных по теплофизическим свойствам жидкого свинцового теплоносителя.

7. Выполнена программная реализация базы данных по свойствам материалов, необходимым для работы интегрального программного комплекса.

8. Разработана методика оценки погрешностей результатов расчётов, получаемых по программным комплексам.

**Достоверность** полученных результатов и выводов диссертационного исследования подтверждается:

1. Применением научно обоснованных расчётных 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 отчёта интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 и его твэльного модуля БЕРКУТ (рекомендован к аттестации на заседании Секции №4 Экспертного совета по аттестации программных средств при Ростехнадзоре 29 мая 2018 г.), выполненной ФБУ «НТЦ ЯРБ», и

аттестационным паспортом теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 (аттестационный паспорт программного средства №426 от 27 февраля 2018 г.).

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 отчётах 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 расчётных кодов.

**Научная новизна** заключается в том, что в работе впервые:

1. На современной научной основе обобщены, проанализированы и систематизированы замыкающие соотношения, необходимые для выполнения расчётов 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 путём сравнения с результатами экспериментальных исследований) возможность использования существующих замыкающих соотношений для задач диссертационного исследования; 2) в случае обоснованной необходимости – выполнена модификация существующих и/или разработана новых замыкающих соотношений.

2. Развита 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 водородных 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 тяжёлого жидкометаллического теплоносителя;

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

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

- модели расчёта выгорания топлива и остаточного энерговыделения;

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

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

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

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

7. 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.

8. Выполнены верификационные расчёты аналитических задач и экспериментов из матриц верификации с использованием интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1. На современном методическом уровне определены значения погрешностей расчёта параметров, являющихся 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 РУ 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 ценность** состоит в том, что результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, позволили

1. обеспечить конструкторские организации, организацию – научного руководителя проектов реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, а также вовлечённых в соответствующие проекты исследователей современным верифицированным интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1, обеспечивающим расчётное обоснование безопасности действующих и проектируемых реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителями;

2. обеспечить независимость расчётного обоснования перспективных проектов отечественных реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем от зарубежных программных средств в области применимости интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1;

3. 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, обобщённые замыкающие зависимости, систематизированные экспериментальные данные, ранжированные перечни процессов и явлений, современные методики оценки погрешностей результатов расчёта и взаимодействия между отдельными программными модулями;

4. выполнить расчётное 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 расчётную математическую модель опытно-демонстрационного энергокомплекса с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300 и выполнить на ней расчётную проверку принятых проектных решений.

Диссертация соответствует специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации» и отрасли науки «технические науки». Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми, научно обоснованными. Их внедрение позволит внести значительный вклад в расчётное обоснование безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем, включая оценку неопределённостей расчётных параметров на современном методическом уровне.


Материал диссертации с достаточной полнотой изложен в 33 печатных работах (из них 15 – в ведущих реферируемых отечественных и зарубежном журналах из списка ВАК при Минобрнауки России, 18 – в материалах международных и российских конференций, семинаров). По результатам диссертационного исследования получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, выпущено одно учебное пособие:

Диссертация «Развитие научно-методических основ и разработка интегрального программного комплекса для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями» Мосуновой Настасьи Александровны рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

Заключение принято на заседании Отделения разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС и Отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок ИБРАЭ РАН.

Присутствовало на заседании 48 человек. Результаты голосования: «за» – 48 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек, протокол № 4 от 20.06.2018 г.

Заведующий отделением анализа  
безопасности ядерных энергетических  
установок ИБРАЭ РАН  
доктор технических наук

26.06.2018  


Киселев Аркадий Евгеньевич