

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03  
на базе  
Федерального государственного учреждения  
"Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша  
Российской академии наук"  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от « 25 » мая 2017 г., № 8

О присуждении Григорьеву Сергею Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование процессов конвективного перемешивания и пристеночного массообмена в задачах анализа водородной безопасности АЭС при тяжелой аварии» по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 26 января 2017 года, протокол № 3, диссертационным советом Д 002.024.03 на базе ФГБУН Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл., д.4, приказ № 105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Григорьев Сергей Юрьевич, 1990 года рождения, в 2013 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ (ГУ)), в 2016 году окончил аспирантуру МФТИ (ГУ), на момент написания диссертации работал инженером в ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова».

Диссертация выполнена в лаборатории № 53 «Лаборатория прикладной механики сплошных сред» отдела № 5 «Отдел анализа безопасности АЭС с водо-водяными реакторами» Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН.

**Научный руководитель** – доктор технических наук, **Филиппов Александр Сергеевич**, заведующий лабораторией № 53 Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН.

### **Официальные оппоненты:**

1. **Мелихов Олег Игорьевич**, доктор физико-математических наук, Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций (АО «ЭНИЦ»), заместитель директора по научной работе;
2. **Будаев Михаил Александрович**, кандидат технических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», начальник лаборатории

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация – ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), Москва**, в своем положительном заключении, подписанном кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории ИПМех РАН, Федюшкиным Алексеем Ивановичем, указала, что диссертация Григорьева С.Ю. посвящена численному моделированию многокомпонентной и многофазной газодинамики внутри защитной оболочки реактора в условиях, характерных при тяжелой аварии на атомных электростанциях с водо-водяными реакторными установками, а также ... разработке и верификации специализированных математических моделей, предназначенных для задач анализа водородной безопасности АЭС... Григорьевым С.Ю. разработаны математические модели пристеночного тепло и массообмена, позволяющие моделировать процессы конденсации пара и поверхностной химии водорода, модель конденсатора-теплообменника в приближении пористой среды... Разработанные модели реализованы автором в виде подключаемой библиотеки прикладных программ... Практическая значимость работы определяется тем, что разработанные автором подходы и модели могут быть использованы при решении различных задач анализа водородной безопасности защитной оболочки АЭС при тяжелой аварии.

По работе имеются следующие замечания:

1. Автор диссертации не включил в обзор работы по смежной тематике обеспечения безопасности при хранении и эксплуатации ракетного топлива, в том числе по исследованию образования стратификации, концентрационному расслоению водорода, которые ведутся уже более полувека.
2. При использовании некоторых эмпирических корреляций для безразмерных чисел не указаны области их применимости.
3. Для отдельных численных экспериментов дано достаточно скудное описание постановок задач, в частности, геометрической схемы установки.

4. Диссертация изобилует узкоспециализированными не общепринятыми сокращениями, значение которых не всегда очевидно из контекста, что в значительной степени осложняет знакомство с текстом диссертации.

В диссертации имеются ссылки на 9 научных работ соискателя по теме диссертации в виде научных статей в отечественных и зарубежных журналах, в сборниках докладов российских и международных конференций, в том числе 4 статьи в журналах из списка ВАК и ведущих зарубежных рецензируемых научных журналах. Среди них:

1. Григорьев С.Ю., Филиппов А.С., Щукин А.А., Разработка и верификация модели конденсации для CFD расчетов задач водородной безопасности АЭС, Известия АН. Энергетика, 4(2014), 123-141.

2. С.Ю. Григорьев, А.Е. Киселёв, А.С. Филиппов, О некоторых факторах разогрева и теплообмена атмосферы защитной оболочки АЭС, вызванного её наддувом при течи из первого контура в процессе тяжёлой аварии, Известия АН. Энергетика, 6(2016), 86-100.

3. A.Filippov, S.Grigoryev, N.Drobyshevsky, A.Kiselev, A.Shyukin, T.Yudina, CMFD simulation of ERCOSAM PANDA spray tests PE1 and PE2, Nucl.Eng.Des., 299(2016), pp. 81-94.

4. Filippov A.S., Grigoryev S.Yu., Tarasov O.V., On the role of thermal radiation in severe accident containment atmosphere: CFD simulation of TOSQAN T114 air-He test. Nucl.Eng.Des.. 310(2016). pp. 175-186.

5. A.S.Filippov, S.Y.Grigoryev, O.V.Tarasov, T.A.Iudina, CFD simulation of PANDA and MISTRA cooler tests of ERCOSAM-SAMARA projects, In. Proc. ICONE, July 7-11, Prague, 2014, ICONE22-30557.

6. A.S.Filippov, S.Y.Grigoryev, A.E.Kiselev, O.V.Tarasov, T.A.Yudina, I.V.Ivanov, Complete CFD Analysis of ERCOSAM-SAMARA Exercises: A Step Towards Advanced Modeling of LWR Containment under Severe Accident Conditions, Proceedings of ICAPP 2015.

На автореферат диссертации поступил один положительный отзыв от кандидата физико-математических наук **Сорокина Андрея Александровича**, старшего научного сотрудника ИБРАЭ РАН. Отзыв не содержит замечаний. В отзыве отмечается, что «анализ водородной безопасности на АЭС является чрезвычайно важной и актуальной прикладной задачей, особенно принимая во внимание недавние события на АЭС Фукусима в Японии. Поэтому тема диссертационной работы является, безусловно, актуальной».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широко известной компетенцией в вопросах математического моделирования

и анализа безопасности ядерных энергетических установок. Высокий квалификационный уровень оппонентов и ведущей организации, а также знакомство с защищаемой проблематикой подтверждаются их многочисленными научными публикациями, такими как:

1. Мелихов О.И., Мелихов В.И., Ртищев Н.А., Тарасов А.Е., Численное моделирование процесса выделения водорода при взаимодействии расплава циркония с водой // Теплофизика высоких температур, 2016. – Т. 54. - №4. – С. 553-562.
2. М.А. Будаев, Ю.А. Звонарев, А.М. Волчек, В.А. Горбаев, В.Н. Загрязкин, Н.П. Киселев, др., Расчётный анализ удержания расплавленной активной зоны в корпусе реактора при тяжёлых авариях на АЭС с ВВЭР, Вопросы атомной науки и техники, Серия: Физика ядерных реакторов, 2(2012), стр. 93-107.
3. S. Basso, A. Konvalenko, S. E. Yakush and P. Kudinov. The Effect of Self-Leveling on Debris Bed Coolability Under Severe Accident Conditions. Nuclear Engineering and Design, 2016, V. 305, pp. 246–259.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований**

**1. разработаны:**

- численные модели пристеночного тепло и массообмена CoRe, в частности, модель пристеночной конденсации пара в присутствие неконденсируемых газов, модель рекомбинации водорода на каталитической поверхности и модель испарения воды из бака-приямка;

- численная модель конденсатора-теплообменника, представляющего собой сложную гетерогенную структуру, состоящую из пучка трубок;

2. разработанные модели **реализованы** в виде пакета прикладных программ, который подключается к универсальному CFD коду Fluent как сторонняя библиотека. Совместная работа расчетного кода Fluent в сопряжении с разработанным комплексом программ представляет собой оригинальную методологию, позволяющую проводить более детальный, по сравнению с существующими методиками, анализ атмосферы внутри защитной оболочки в условиях, характерных для тяжелой аварии на АЭС;

3. на примере численного моделирования новых интегральных экспериментов по газодинамике неоднородных газовых смесей на крупномасштабных установках **доказана** применимость разработанного подхода (Fluent + CoRe) к решению задач анализа водородной безопасности АЭС.

### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

диссертационная работа базируется на применении современных методов вычислительной гидродинамики, физических закономерностей, прошедших опытную проверку, на качественном согласии аналитических оценок в простой постановке с численными результатами и проверками по балансам тепла и массы в верификационных расчётах;

достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается верификацией разработанных численных моделей на широком наборе экспериментов и хорошим количественным совпадением результатов расчетов с большим массивом экспериментальных данных по полям температуры, составу газовой смеси, скорости среды.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что в диссертационной работе показана применимость и работоспособность разработанной методики (коммерческий код Fluent совместно с разработанным комплексом программ) к задачам численного анализа водородной безопасности АЭС; продемонстрировано ее преимущество перед существующими методиками (коды с сосредоточенными параметрами), как средства детальной оценки; на базе разработанных моделей проведены численные исследования процессов формирования и разрушения стратификации легкого газа, проясняющие особенности картины течения в условиях, характерных для тяжелой аварии на АЭС.

**Практическая значимость** полученных в диссертации результатов состоит в том, что на основе разработанных моделей было проведено исследование применимости CFD к задачам анализа состояния атмосферы внутри реальной защитной оболочки. Их применение в рамках расчетного сопровождения экспериментов по водородной безопасности АЭС позволило выявить и исправить ряд недостатков в постановке экспериментов, а также интерпретировать некоторые из их особенностей.

Разработанные модели и результаты расчётов могут быть применены при разработке и тестировании элементов систем безопасности, включая спринклеры, пассивные каталитические рекомбинаторы водорода, конденсаторы-теплообменники. Разработанная методология проведения CFD расчёта течения смесей газов в сложных физических условиях может служить средством улучшенной оценки относительно применяемых ныне для анализа водородной безопасности расчётных кодов с сосредоточенными параметрами.

**Личный вклад** соискателя состоит в получении следующих результатов, изложенных в диссертации:

- разработан единый подход к моделированию явлений пристеночного тепло- и массообмена в задачах анализа водородной безопасности АЭС с ВВЭР, на основе которого реализованы и верифицированы математические модели пристеночной конденсации, рекомбинации водорода на каталитической поверхности и модель испарения воды из бака-приямка. Разработана CFD модель конденсатора-теплообменника, который представляет собой трубчатую конструкцию сложной формы;
- разработанные математические модели реализованы в виде комплекса программ, внедрённого затем в широко используемый коммерческому CFD код ANSYS Fluent;
- с использованием разработанных моделей численно исследованы явления формирования и разрушения стратификации легкого газа, имитатора водорода, процессы тепло и массообмена в условиях, характерных для тяжелой аварии. Фиксирован ряд особенностей течения, важных для анализа состояния атмосферы защитной оболочки и интерпретации данных экспериментов.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, является научным достижением, в котором показаны и обоснованы возможности численного моделирования в реалистической постановке процессов, происходящих в атмосфере защитной оболочки водо-водяных реакторов при тяжёлой аварии с разрушением активной зоны, включая выход газа, формирование стратифицированной атмосферы в газовой смеси и действие систем безопасности.

На заседании 25 мая 2017 года диссертационный совет принял решение присудить Григорьеву Сергею Юрьевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Заместитель председателя  
диссертационного совета Д 002.024.03

Калиткин Н.Н.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.024.03  
25.05.2017

Корнилина М.А.