ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Сивакова Никиты Сергеевича «Моделирование многофазных течений при взаимодействии высокотемпературных расплавов с водой», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационное исследование выполнено в рамках направления повышения эффективности работы энергетических установок за счет контролируемой и безопасной интенсификации теплообмена при взаимодействии расплавов с водой. Основной акцент сделан на создании научных основ применения эффектов паровых взрывов для интенсификации отвода тепла от нагретых поверхностей установок, применяемых в атомной энергетике. В диссертации отмечено, что при тяжелых авариях с плавлением активной зоны опасность представляет контакт высокотемпературного расплава с теплоносителем. Он вызывает резкое вскипание воды и распространение взрывных волн, способных нарушить целостность корпуса реактора, герметичность контейнмента, а в конечном итоге – повлечь выход радиоактивности в окружающую среду. Ключевая проблема заключается в отсутствии на данный момент теории, которая бы достоверно описывала протекающие процессы. **Ниша диссертации** автора состоит в развитии и применении методов численного моделирования для исследования многофазных течений при взаимодействии высокотемпературных расплавов с водой, сопровождающихся фазовыми переходами, развитием межфазных неустойчивостей, деформацией и фрагментацией границ раздела фаз. В этой связи **тематика диссертационных исследований** является актуальной.

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки, технологии и техники РФ: п. 8 «Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика», направлению Н2 стратегии научно-технического развития России «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой

переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии».

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 143 страницы, включая 52 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 167 наименований.

Во введении автор сформулировал проблему, на решение которой направлены исследования, и обосновывал целесообразность их проведения с акцентом на применение совокупности экспериментальных и расчетных методов. Обоснована целесообразность применения комплексных методов и подходов. Основное внимание уделено численному моделированию с целью развития методов исследований и формирования базы данных для развития систем безопасности водо-водяных реакторов.

В первой главе диссертации выполнен анализ текущего состояния решаемой задачи. Представлен обзор современного состояния исследований взаимодействия расплава с водой. Показано, что наряду со значительным объемом экспериментальных данных существует широкий спектр подходов к численному моделированию таких процессов. Основными моделями являются многожидкостные, ориентированные на описание интегральной динамики многофазных систем. Также широко применяются методы с разрешением межфазной поверхности, позволяющие детально исследовать деформацию границ фаз, образование паровых объемов и фрагментацию расплава.

Во второй главе приведено описание разработанной математической модели многофазного взаимодействия. Для численной реализации математической модели использован метод конечных объемов. Математическая модель верифицирована на задачах Стефана и пленочного кипения, что подтвердило корректность описания фазового перехода и возможность ее применения к расчетам взаимодействия высокотемпературных расплавов с водой.

В третьей главе приведены результаты численных исследований. В частности, представлены результаты численных расчетов парового взрыва капли расплава в воде, инициированного внешним импульсом давления при параметрах. Также изучена фрагментация неподвижной капли расплава.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования взаимодействия импульсной и непрерывной струй воды с расплавом. Обосновано, что для адекватного воспроизведения сложных многофазных течений необходимы вычислительные модели, учитывающие как физику процесса, так и свойства применяемых аппроксимаций и сеток. Показано, что адаптивная сетка повышает точность описания межфазных границ и мелкомасштабных неустойчивостей, а учет фазового перехода необходим для корректного воспроизведения структуры и динамики каверны. Совместное влияние этих факторов определяет возможность количественного описания взаимодействия воды с расплавом и формирования потенциально взрывоопасной трехфазной смеси.

В заключении представлены выводы по результатам выполненных исследований.

Научная новизна основных результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Разработана и реализована математическая модель многофазного взаимодействия при течениях с наличием фазового перехода для сжимаемых жидкостей в качестве подмодели OpenFOAM.
2. Реализованы трехмерные постановки ключевых задач о взаимодействии расплавов с водой и применены многоуровневые адаптивные расчетные сетки для задач такого типа.
3. В задачах с паровым взрывом капель расплава рассмотрен процесс фрагментации неподвижной и движущейся капель расплава в недогретой воде под действием импульса давления.
4. Установлено образование кумулятивных водяных микроструй, ранее не рассматриваемых при анализе механизмов взрывной фрагментации капель расплава в воде.
5. Для задач с истечением воды в расплав при различных условиях получены новые данные о формировании многофазной смеси «вода – пар – расплав» и установлены количественные характеристики трехфазной области для последующего исследования взрывной стадии.

6. Использован подход, основанный на совместном применении трехмерного VOF-моделирования, адаптивной расчетной сетки и модели вскипания, позволивший получить наиболее достоверные результаты моделирования задачи взаимодействия струи воды с расплавом.

Практическая значимость основных результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Представленные результаты исследования многофазных течений при взаимодействии расплавов с водой формируют научную основу для дальнейшего развития моделей многофазного взаимодействия и их применения в задачах безопасности ядерно-энергетических установок.
2. Полученные результаты смогут найти практическое применение в атомной энергетике при создании систем безопасности атомных станций, позволяющих устранить или свести к минимуму опасности тяжелых запроектных аварий с плавлением активной зоны.
3. Развитые подходы и вычислительные модели могут найти практическое применение для анализа других явлений техногенного и природного типа (аварии в металлургической промышленности, подводные извержения вулканов, технологии струйной печати).

Сформулированные научные положения диссертационных исследований **обоснованы**. В тексте автореферата и диссертации приведены результаты, иллюстрирующие правомерность сделанных автором заключений.

Достоверность полученных результатов обеспечивается верификацией и валидацией моделей путем сравнения с экспериментальными данными, подтверждается применением сертифицированных программных комплексов для проведения численного моделирования, а также корректным использованием расчетного пакета.

Личный вклад автора сформулирован развернуто в автореферате и диссертации. Отмечено, что использование представленных в работе и выносимых на защиту результатов, полученных в ходе совместных исследований, согласовано с соавторами.

Анализ содержания рукописи и автореферата диссертации дает основание для формулирования следующих **замечаний и рекомендаций**:

1. Защищаемые положения сформулированы в общем виде. Целесообразно было в каждой формулировке добавить акценты на принципиальную новизну и конкретно ее отразить. В частности, при формулировании «Математическая модель …» важно добавить «отличающаяся от известных …» (важно раскрыть новые подмодели, зависимости, функциональные связи, учтенные факторы и эффекты).
2. В работе приводится сравнение авторских результатов численного моделирования с известными экспериментальными данными. Результаты в целом удовлетворительно согласуются, но для понимания причин рассогласований целесообразно более подробно описать эксперимент, условия проведения, средства измерения, воспроизводимость результатов в серии.
3. В работе приводятся изображения поверхности капли в разные моменты времени и при изменении внешних условий. Целесообразно было привести масштабные коэффициенты, чтобы корректнее понимать сутевые моменты изменения поверхностей.
4. На характеристики взаимодействия воды и расплава влияет совокупность входных параметров, к которым относятся как свойства поверхности расплава, так и жидкости. При этом они проявляются по-разному при варьировании температуры в зоне контакта. Целесообразно было в итоге диссертационных исследований структурировать вклад этих свойств от меньшего к большему (или наоборот), чтобы прогнозировать их роль.
5. В работе представлено много данных. В основном формат представления – поля функций и их изменение во времени. Для практического применения целесообразно было получить некие обобщенные зависимости в виде соотношений выходных и входных параметров. Применение безразмерных функций позволило бы их применять при варьировании масштабных параметров.

Сделанные замечания **не снижают высокой положительной оценки** диссертационной работы и носят в основном рекомендательный характер для развития исследований автора.

Тема диссертации соответствует паспорту специальности «1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы».

Содержание автореферата соответствует содержанию рукописи диссертации.

Результаты диссертационного исследования апробированы **на всероссийских и международных научных конференциях** и **публиковались в журналах,** рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций. Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 печатных изданиях, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК и имеющих категорию К1, 4 – в международных научных журналах, индексируемых Scopus, 9 – в сборниках трудов конференций.

Заключение

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации автора можно сделать вывод о том, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой приведены результаты решения крупной научно-практической задачи в области повышения эффективности работы систем отвода энергии от расплавов при контакте с водой. Диссертационная работа отвечает всем требованиям действующего Положения о порядке присуждения ученой степени кандидата наук, а ее автор, Сиваков Никита Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН,
профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова,
заведующий лабораторией тепломассопереноса
Национального исследовательского
Томского политехнического университета
Стрижак Павел Александрович
8 (3822), 701-777, доп. 1910

pavelspa@tpu.ru

Подпись П.А. Стрижака заверяю
Ученый секретарь Национального исследовательского Томского политехнического университета,
кандидат геолого-минералогических наук
Новикова Валерия Дмитриевна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, т. 8 (3822), 701-777, доп. 1910

10.11.2026

Я, Стрижак Павел Александрович, даю согласие на использование моих персональных данных при рассмотрении диссертации Сивакова Никиты Сергеевича.