Отзыв

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

При контакте горячих расплавленных материалов с водой возможно возникновение так называемых паровых взрывов. Это опасное явление может иметь место и приводить к тяжёлым последствиям, в частности, на АЭС при тяжёлой аварии с плавлением активной зоны. Полного понимания деталей и условий возникновения паровых взрывов в настоящее время нет, это – предмет исследования во многих лабораториях мира. Ввиду значительной трудности получения экспериментальной информации особую роль приобретает численное моделирование явлений, сопровождающих паровые взрывы. Диссертационная работа посвящена развитию математических методов и расчётному анализу тонких деталей, определяющих возможность парового взрыва. Это придаёт **актуальность** теме и результатам работы.

Автором разработана математическая модель для расчёта течения и интенсивного взаимодействия нескольких жидкостей с учётом фазовых переходов, основанную на VOF-подходе с отслеживанием межфазных границ (глава 2).

На основе разработанной модели численным путём решена важная для понимания условий возникновения парового взрыва задача о поведении одиночной первоначально сферической и окружённой паровым слоем капли расплава в воде при быстром повышении давления (глава 3). Показано, что малые возмущения формы поверхности капли растут, и в конечном счёте это приводит к фрагментации капли на более мелкие. К аналогичному результату приводит взаимодействие движущейся капли расплава с водой.

Автором решена также модельная задача об ударе водяной струи о поверхность расплава (глава 4). Показано, что в этом случае возникает

кумулятивная струя расплава в противоположном к водяной струе направлении. Это явление имеет прямое отношение к перемешиванию фаз в стратифицированной системе вода-пар-расплав, что способствует формированию парового взрыва.

Полученные автором расчётные результаты показали хорошее соответствие экспериментальным данным.

Изложенные в диссертации результаты являются **новыми. Впервые** расчётным путем подробно рассмотрен процесс фрагментации неподвижной и движущейся одиночных капель расплава в воде при скачке давления. **Впервые** получены данные о возможных механизмах перемешивания фаз при взаимодействии водяной струи с поверхностью расплава.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждается использованием современных проверенных физических подходов к описанию многофазных сред, численных методов решения математических задач модели, верификацией используемых расчётных методов и валидацией разработанных моделей на экспериментальных данных.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они могут быть использованы как важный элемент анализа и обоснования безопасности АЭС в части оценки возможности и характеристик парового взрыва при тяжёлой аварии с плавлением активной зоны и взаимодействия расплава с водой.

Замечание: в разделе о взаимодействии одиночной капли расплава с водой нет указаний на то, при какой скорости капли в воде её можно считать неподвижной, а при какой – движущейся. Не указано также то, насколько принятое в расчётах условие одновременного во всех точках объёма повышения давления соответствует реальному случаю, когда давление повышается при прохождении фронта ударной волны в воде через каплю.

Несмотря на указанное замечание, считаю, что работа заслуживает высокой оценки. Работа представляет собой завершенное научное исследование, вносящее существенный вклад в разработку методов анализа и

обоснования безопасности АЭС в части оценки вероятности и параметров паровых взрывов.

Содержание диссертации, судя по автореферату, соответствует паспорту специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Считаю, что диссертация Сивакова Н.С. «Моделирование многофазных течений при взаимодействии высокотемпературных расплавов с водой» удовлетворяет требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года, № 842 (в редакции Постановления от 26.05.2020 №751), а её автор Сиваков Никита Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук (01.02.05. Механика жидкости, газа и плазмы)
Главный научный сотрудник отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок ФГБУН Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН)

Семёнов Владимир Николаевич
«17» ноября 2026 г.

Подпись Семёнова В.Н. заверяю
Ученый секретарь ИБРАЭ РАН к.т.н

Калантаров В.Е.
«17» ноября 2026 г.

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН)
Почтовый адрес: 115191, Россия, г. Москва, ул. Большая Тульская, д.52
Телефон 8(495) 955-22-59, 8(903)766-32-15
Электронная почта sem@ibrae.ac.ru
Официальный сайт: http://www.ibrae.ac.ru/