ОТЗЫВ

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

Работа Сивакова Н.С. посвящена решению прикладной задачи о численном моделировании процессов теплофизического и гидродинамического взаимодействия высокотемпературных расплавов с водой применительно к проблеме паровых взрывов и обеспечению безопасности ядерных энергетических установок. Необходимость анализа тяжёлых аварий с плавлением активной зоны связана с тем, что контакт расплава с теплоносителем может приводить к резкому вскипанию воды, распространению взрывных волн и нарушению целостности корпуса реактора и контейнмента. Полученные в работе результаты важны как для эксплуатируемых и проектируемых в России реакторов ВВЭР, так и для инновационных реакторов на быстрых нейтронах с тяжелометаллическим теплоносителем.

Целью работы является разработка и реализация математической модели многофазного взаимодействия с учётом фазовых переходов и сжимаемости сред, а также проведение трёхмерных численных расчётов локализованного и крупномасштабного взаимодействия расплава с водой для анализа механизмов фрагментации и формирования многофазной структуры течения.

В результате исследования разработан и реализован в пакете OpenFOAM расчётный модуль fciFoam, основанный на VOF-подходе и предназначенный для моделирования сжимаемых многофазных течений с интенсивным межфазным тепло- и массообменом. Диссертант не ограничился стандартными моделями пакета, а дополнил их описанием фазового перехода для сжимаемых сред. Проведены трёхмерные расчёты парового взрыва одиночной капли расплава в воде; установлено образование кумулятивных водяных микроструй, ранее не рассматриваемых при анализе механизмов взрывной фрагментации капель расплава в воде; получены новые данные о формировании многофазной смеси «вода – пар – расплав» при истечении воды в расплав. Расчёты выполнены в трёхмерной постановке с использованием адаптивных сеток, что позволило разрешать межфазные границы и мелкомасштабные структуры без равномерного измельчения всей области. Валидация проведена на известных экспериментальных данных, включая эксперименты Ciccarelli и Frost, а также данные по взаимодействию импульсной струи воды с расплавом; сопоставление показало согласие по основным интегральным характеристикам, хотя амплитуда первого расширения парового пузыря завышается примерно на 20%.

Научной новизной обладает математическая модель многофазных течений с фазовым переходом для сжимаемых жидкостей. Она отличается от стандартных моделей OpenFOAM описанием фазового перехода на основе локального теплового баланса без эмпирических коэффициентов и реализована в расчётном модуле fciFoam. К новым результатам относятся также трёхмерные расчёты, в которых рассмотрен процесс фрагментации неподвижной и

движущейся капель расплава в недогретой воде под действием импульса давления и установлено образование кумулятивных водяных микроструй.

Необходимо отметить, что результаты, полученные в диссертационной работе, были использованы в отчётах по проектам РНФ и по государственному заданию ИПМех РАН.

Вместе с тем к содержанию автореферата есть ряд замечаний:

1. Модуль fciFoam, на котором основана методика расчётов, описан в работе слишком кратко. Не указано, какой известный решатель OpenFOAM положен в его основу и что именно изменено по сравнению с ним.

2. В расчётах используются варианты с плотностью воды 500 и 2000 кг/м³, а также с коэффициентом теплопроводности 0.3 и 1.2 Вт/(м·К). Из текста работы неясно, являются ли эти варианты модельными тестами или отражают конкретные физические условия (при нормальных условиях плотность воды равна 1000 кг/м³, а её коэффициент теплопроводности – 0.6 Вт/(м·К)).

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости проведённых исследований.

Считаю, что диссертация Сивакова Н.С. представляет собой законченную научно-исследовательскую работу и соответствует критериям п.п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а её автор Сиваков Н.С. заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой кандидатской диссертации Сивакова Никиты Сергеевича, и на их дальнейшую обработку.

Доцент кафедры математического
и компьютерного моделирования СГУ,
к.т.н., доц. И.А. Панкратов

06.11.26

Служебный адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (СГУ), т. (8452) 51-84-80, e-mail: pankratovia@sgu.ru.

