

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской
академии наук, академик РАН, доктор
физико-математических наук, профессор



С.В. Алексеенко

« 24 » ноября 2016 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
на диссертационную работу Бондаревой Надежды Сергеевны «Численное
исследование сопряженного конвективного теплопереноса в системах, содержащих
материалы с фазовым переходом», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы. Для решения целого ряда проблем теплоэнергосбережения, связанных с разработкой эффективных систем обеспечения теплового режима энергетических установок, электронных устройств и аппаратов, а также объектов строительной индустрии, бывает целесообразно использовать материалы с изменяемым фазовым состоянием. Такие материалы отличаются от традиционных способностью достаточно быстро переходить из одного состояния в другое с выделением или поглощением больших объемов энергии практически при постоянной температуре. Отмеченное обстоятельство широко применяется в западных странах (Германия, Норвегия, Франция, США) для создания эффективных систем пассивного охлаждения теплонагруженных элементов в микроэлектронике, для охлаждения крупных центров обработки и хранения данных, а также для создания

современных систем энергосбережения при строительстве объектов социального и производственного назначения. Для реализации таких пассивных систем обеспечения теплового режима необходимо детальное изучение процессов плавления и кристаллизации, протекающих в материалах с изменяемым фазовым состоянием, при наличии сосредоточенных источников энергии, моделирующих локальное тепловыделение. Следует отметить, что корректное комплексное изучение отмеченных явлений возможно только на основе математического моделирования гидродинамики и теплопереноса в областях, содержащих материалы с фазовым переходом, с применением вычислительной техники и современных численных методов механики жидкости и газа. Под комплексным изучением в данном случае имеется в виду одновременное получение характеристик полей скорости и температуры в нестационарных режимах при наличии подвижной границы раздела твердой и жидкой фаз. Экспериментально получить аналогичные полевые (а не в отдельных точках) данные, особенно в непрозрачном жидком металле (и одновременно поля температуры в твердом теле), невозможно. Поэтому, диссертационная работа Бондаревой Надежды Сергеевны, посвященная математическому моделированию сопряженного конвективного теплообмена в нестационарных режимах плавления материала с изменяемым фазовым состоянием в замкнутых двумерных и трехмерных областях с локальными источниками энергии, в том числе при воздействии однородного магнитного поля, является актуальной. Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента РФ от 07 июля 2011 года № 899) (п. 8. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика) и связана с реализацией критических технологий Российской Федерации (п. 25. Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств; п. 26. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 132 страницах, состоит из введения, 3 глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 107 наименований. Материал содержит 53 рисунка и 5 таблиц.

В первой главе представлен краткий обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований конвективного теплопереноса в областях, заполненных материалом с изменяемым фазовым состоянием.

Во второй главе представлена физико-математическая модель двумерной задачи конвективного теплопереноса с учетом плавления материала внутри замкнутой квадратной полости с локальным источником энергии. Детально описаны используемые приближенные методы решения рассматриваемой задачи. Автором проведено тестирование разработанных модели и алгоритма на задачах, при исследовании которых получены численные и экспериментальные данные другими авторами. Проанализированы ранее полученные численные данные, описывающие продвижение фронта плавления внутри полости при наличии и отсутствии влияния однородного магнитного поля. В данной главе представлены результаты исследований влияния ориентации вектора магнитной индукции и величины числа Гартмана на процессы локального теплообмена. Численные исследования проведены в условиях ламинарной термогравитационной конвекции в диапазонах чисел Рэлея $4 \cdot 10^5 \leq Ra \leq 5 \cdot 10^7$ и Гартмана $0 \leq Ha \leq 100$, в диапазоне углов наклона вектора магнитной индукции относительно горизонтали $0 \leq \alpha \leq \pi/2$. Исследования проведены в условиях плавления веществ, расплавы которых имеют значения чисел Прандтля $Pr = 0,0216$ (галлий) и $48,36$ (n-октадекан). Определены границы перехода от плавления в режиме теплопроводности к режимам сопряженного конвективного теплообмена на фронтах плавления.

Третья глава посвящена моделированию трехмерных режимов конвективного теплопереноса в замкнутом кубическом объеме с локальным тепловыделяющим элементом. Сформулирована вычислительная модель в преобразованных переменных «векторный потенциал – вектор завихренности», представлена численная методика реализации описанной краевой задачи. Проведена верификация разработанного алгоритма путем решения тестовой задачи естественной конвекции в дифференциально обогреваемой кубической полости и сравнения полученных результатов с численными данными других авторов. Представлен анализ трехмерных распределений скорости и температуры, а также локальных чисел Нуссельта. Определены границы применимости плоского приближения для описания трехмерных процессов.

В заключении описаны основные выводы, полученные в рамках выполнения диссертационной работы.

Научную новизну диссертационной работы определяют следующие результаты исследований:

1. Разработаны новые вычислительные модели плавления материала в замкнутых областях при наличии локальных источников энергии с учетом влияния однородного магнитного поля, имеющего различную ориентацию относительно вектора силы тяжести, в двухмерном приближении на основе преобразованных переменных «функция тока – завихренность» и в трехмерном случае с использованием переменных «векторный потенциал – вектор завихренности».

2. Проведен детальный численный анализ нестационарных режимов плавления материала внутри замкнутой области при наличии локального источника энергии. Показано, что при увеличении числа Рэлея существенно усложняется пространственная форма течения и процесс теплопереноса – наблюдается формирование нескольких факелов над тепловыделяющим элементом. Установлено, что в случае формирования двух восходящих потоков между ними появляется центральное нисходящее течение, приводящее к локальному росту числа Нуссельта на верхней стенке тепловыделяющего элемента.

3. Исследовано влияние однородного магнитного поля на интенсивность естественной конвекции при плавлении галлия с числом Прандтля $Pr = 0,0216$. Показано, что при больших значениях числа Гартмана снижается интенсивность конвективного течения и это приводит к более однородному плавлению материала. Среднее число Нуссельта на поверхности источника энергии является возрастающей функцией угла наклона при повороте от горизонтали к вертикали вектора магнитной индукции в изученном диапазоне чисел Рэлея и убывающей функцией числа Гартмана.

4. Впервые проведено сравнение результатов двумерного и трехмерного приближений в рамках рассматриваемого класса задач, позволяющее данные двумерной модели использовать для предварительного описания процесса в пространственном случае. Определены области применимости двумерной постановки задачи.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные новые вычислительные модели, описывающие нестационарные процессы плавления

материала внутри замкнутых областей с локальным источником энергии и при возможном воздействии однородного магнитного поля, а также численные алгоритмы для их реализации позволили получить новые физические результаты в области теории свободноконвективного сопряженного теплообмена и расширяют возможности численного моделирования процессов плавления и кристаллизации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Полученные результаты могут применяться в исследованиях, проводимых в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Национальном исследовательском Томском государственном университете, Томском государственном архитектурно-строительном университете, Новосибирском государственном техническом университете, Новосибирском государственном архитектурно-строительном университете (Сибстрин), Институте теплофизики СО РАН, Институте теоретической и прикладной механики СО РАН, Пермском государственном национальном исследовательском университете, Национальном исследовательском Московском энергетическом институте, Институте проблем механики РАН и других исследовательских центрах.

По рецензируемой диссертации необходимо сделать следующие **замечания**:

1. На страницах 61, 100 и 104 диссертационной работы использованы понятия «ламинарно-турбулентного перехода», «переходного режима конвекции» и «ламинаризации». Поскольку применяемые в работе математические модели в принципе не описывают явление турбулентности, то и упоминать вышеперечисленные термины категорически неприемлемо. Переход от стационарного ламинарного течения к нестационарному, но ламинарному течению, это далеко не ламинарно-турбулентный переход.

2. В работе отсутствует информация о размерностях используемых сеток и методике выбора достаточно адекватной размерности сеток. Нет информации о том, где использовались равномерные сетки, а где сетки со сгущением у стенок или у фронтов плавления. Процедура идентификации положения фронта плавления так же не объясняется. Нет объяснения процедуры определения вихря скорости у криволинейного фронта плавления. Вопрос о размерности сетки наиболее актуален при анализе полученных решений трехмерной задачи, например, в разделе 3.9.2 (ошибочно обозначенного как 2.9.2 на стр. 97). На рис. 43а (стр. 104) видно, что

размерность сетки $60 \times 60 \times 60$ недостаточна. Соответственно, сопоставление этих результатов с расчетами в двумерной постановке задачи, полученными с использованием сетки 200×200 (на стр. 103 рис. 42) некорректно.

3. В разделе 3.9.1 (ошибочно обозначенного как 2.10.1 на стр. 83) для решения задач использовался метод контрольного объема, но методические особенности использования метода не раскрываются.

4. В пунктах 2.9.2, 3.10.1 и 3.9.3 не указано вещество расплава и его теплофизические свойства в жидкой и твердой фазах (теплопроводность) за исключением числа Прандтля.

5. Положения, выносимые на защиту, сформулированы формально и абстрактно и не отражают адекватно содержания, объема и физической сути реально полученных результатов.

6. В тексте диссертации допущен ряд опечаток и неточностей. Например, на стр. 39 в тексте работы указано, что таблица 1 содержит, в том числе, и результаты работы [80]. Однако таблица 1 составлена из собственных данных автора и данных работ [79], [81], [82] и [83].

Сформулированные замечания не являются принципиальными и не снижают общей высокой положительной оценки диссертационной работы.

Заключение. В целом диссертация Бондаревой Надежды Сергеевны «Численное исследование сопряженного конвективного теплопереноса в системах, содержащих материалы с фазовым переходом» является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему, и содержит новое решение актуальной научной задачи математического моделирования нестационарных режимов сопряженного конвективного теплообмена в замкнутых областях, заполненных материалами с изменяемым фазовым состоянием, при наличии локальных источников энергии, имеющей значение для развития механики жидкости и газа и теории теплообмена. Работа написана хорошим, ясным, литературным языком, стиль изложения доказательный. Выводы по диссертации аргументированы и отражают существо работы в целом. Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в периодической научной литературе и хорошо апробированы на научных конференциях и семинарах разного уровня от международных до региональных. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Работа соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ, 24.09.2013), а автор диссертации, Бондарева Надежда Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв обсужден и одобрен на семинаре отдела термогазодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук 10 ноября 2016 года, протокол № 5-2016.

Отзыв подготовили:

Заведующий лабораторией свободноконвективного теплообмена ИТ СО РАН,
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)



Бердников Владимир Степанович
(383) 316-53-32, berdnikov@itp.nsc.ru

Научный сотрудник лаборатории
термохимической аэродинамики ИТ СО РАН,
кандидат физико-математических наук
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)



Сахнов Алексей Юрьевич
(383) 316-50-32, aleksei_sakhnov@mail.ru

24 ноября 2016 г.

Подписи В.С. Бердникова и А.Ю. Сахнова удостоверяю:

Ученый секретарь ИТ СО РАН,
доктор физико-математических наук



П.А. Куйбин

Сведения об организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1.

Телефон: (383) 330-70-50. E-mail: aleks@itp.nsc.ru. Web-сайт: <http://www.itp.nsc.ru>.