

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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.** Диссертация Н.С. Бондаревой посвящена исследованию процессов естественной конвекции в материалах с изменяемым фазовым состоянием внутри замкнутых областей с локальным источником энергии. Актуальность темы обусловлена широким применением материалов с фазовым переходом при производстве микроэлектронных компонентов, катализаторов, металлокомпозиционных покрытий и т.д. Достаточно новой перспективной сферой использования материалов с изменяемым агрегатным состоянием является теплозащита и кондиционирование помещений, поскольку поглощение/выделение энергии при прямом и обратном фазовом переходе позволяет поддерживать постоянную температуру внутри заданного объема при изменении внешних условий.

Использованный в диссертационной работе подход, основанный на численном моделировании, позволяет детально исследовать тепловые и гидродинамические процессы, протекающие в материале с учетом плавления/кристаллизации и конвективного теплообмена внутри расплава, определять гидродинамические характеристики и температуру во всей области, отслеживать движение межфазной границы, а также учитывать воздействие магнитного поля.

**Содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Во введении обоснована актуальность исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описан личный вклад автора и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор работ, посвященных численным и экспериментальным исследованиям конвективных режимов тепло- и массопереноса в условиях фазового перехода. Показано, что, несмотря на актуальность проблемы, нестационарные режимы плавления в трехмерных областях под воздействием локальных источников тепловыделения изучены недостаточно.

Во второй главе приведена постановка 2D задачи о нестационарном плавлении материала внутри замкнутой области при наличии локальной области тепловыделения и воздействия однородного магнитного поля. Математическая модель включает уравнения движения в формулировке Обербека-Буссинеска для переменных «вихрь-функция тока», дополненных уравнением энергии в энтальпийной форме и уравнением теплопроводности для твердой фазы с учетом скрытой теплоты плавления. Приведенные к безразмерному виду уравнения содержат числа Прандтля, Рэлея, Стефана и Гартмана, характеризующие процессы теплообмена, естественной конвекции, плавления и магнитной индукции. Для

устранения разрыва энтальпии на границе раздела фаз используется сглаживающая функция. Теплоподвод в исследуемую область осуществляется за счет граничного условия для температуры на границах источника.

Для приближенного решения входящих в математическую модель уравнений используется метод конечных разностей. Уравнение Пуассона для функции тока решается с помощью метода последовательной верхней релаксации, а уравнения для функции завихренности и энергии - с помощью метода дробных шагов, что позволяет реализовать алгоритм в виде последовательных скалярных прогонок.

Разработанный 2D численный алгоритм верифицирован на тестовых примерах: термогравитационной конвекции воздуха внутри каверны с нагреваемыми стенками, естественной конвекции при воздействии магнитного поля и естественной конвекции в расплаве галлия внутри прямоугольной полости. Сравнение с численными и экспериментальными работами других авторов показало, что численная модель адекватно описывает процессы естественной конвекции, плавления с учетом конвективного теплопереноса и воздействие однородного магнитного поля.

Далее в 2D постановке численно решена задача о плавлении и естественной конвекции н-октадекана внутри замкнутой квадратной полости под воздействием тепловыделения от локального источника энергии, находящегося внутри области. В широком диапазоне изменения определяющих параметров получены поля скорости и температуры, отражающие основные закономерности процесса. Показано, что при умеренных значениях чисел Рэлея реализуются режимы с симметричным распределением изотерм и линий тока внутри зоны расплава. С ростом числа Рэлея конвективные процессы становятся более интенсивными, что с течением времени приводит к формированию несимметричного вихревого следа, аналогичного дорожке Кармана. Исследованы эффекты воздействия на течение расплава магнитного поля различной интенсивности и направленности. Показано, что в целом воздействие магнитного поля стабилизирует процесс течения, а в случае горизонтального направления вектора магнитной индукции происходит наиболее сильное подавление свободно-конвективного течения расплава.

В терминах числа Нуссельта проанализированы процессы теплообмена на границе источника теплоподвода в зависимости от угла наклона вектора магнитной индукции и числа Гартмана. Показано, что более низкие значения числа Нуссельта на верхней стенке источника теплоподвода по сравнению с значениями на боковых стенках получены вследствие снижения градиента температуры в температурном факеле, наблюдаемым над источником при  $Ra < 10^6$ . При перестройке структуры течения, происходящей при более высоких числах Рэлея, вследствие формирования нисходящего течения теплообмен на верхней стенке повышается.

Третья глава содержит математическую постановку, описание метода приближенного решения и результаты исследования нестационарных пространственных режимов плавления и естественной конвекции в материалах с изменяемым фазовым состоянием. Определяющие уравнения сформулированы в безразмерных преобразованных переменных «векторный

потенциал – вектор завихренности». Корректность численного алгоритма обоснована проведенными сравнениями с результатами других авторов.

Далее представлены результаты расчетов трехмерных задач, в которых исследовано влияние магнитного поля на режимы естественной конвекции расплава металла внутри каверны с нагреваемыми стенками. Представлен анализ влияния чисел Рэлея и Гартмана на гидродинамические структуры, возникающие внутри расплава, которые, в свою очередь, воздействуют на процесс плавления материала. Проведена оценка влияния трехмерных эффектов в исследуемых задачах тепло- и массообмена, а также возможности использования двумерной модели для описания процессов в пространственных объектах. Показано, что, как и в случае двумерной модели, с ростом числа Рэлея происходит перестройка картины течения с формированием несимметричных вихревых структур, что приводит к образованию сложной пространственной зоны расплава. Приведены результаты о влиянии числа Гартмана на структуру конвективного течения, распределение температуры и теплообмен.

К **достоинствам** диссертационной работы следует отнести то, что автором разработана оригинальная вычислительная модель, описывающая нестационарные режимы плавления материалов в замкнутых областях под воздействием локального тепловыделения, развитие естественной конвекции расплава, сопряженный теплообмен с твердой фазой с учетом конвективной составляющей, воздействия внешнего однородного магнитного поля, пространственного характера течения и др.

Анализ данных численного исследования нестационарных режимов плавления внутри замкнутых квадратных и кубических областей, полученных на основе разработанной вычислительной модели, позволил установить следующие **новые результаты**:

- Установлено, что при числах Рэлея  $Ra \sim 10^5$  над источником тепловыделения формируются две симметричные вихревые зоны и единый тепловой факел, определяющий процессы теплообмена и плавления. При увеличении числа Рэлея происходит перестройка режима естественной конвекции в зоне расплава, заключающаяся в образовании нескольких вихревых ячеек и температурных факелов, развитие которых с течением времени приводят к формированию аналога вихревой дорожки.
- Показано, что максимальное стабилизирующее влияние магнитного поля на картину течения естественной конвекции в зоне расплава металла достигается при горизонтальной ориентации вектора магнитной индукции. С ростом числа Гартмана интегральный коэффициент теплоотдачи источника снижается.
- На основе сопоставления результатов расчетов по двумерной и трехмерной моделям показано, что при низких числах Рэлея ( $Ra \leq 4 \cdot 10^5$ ) картина трехмерного течения в плоскости симметрии аналогична той, что получена в двумерных расчетах. Это может служить обоснованием возможности использования двумерной постановки для описания гидродинамических и тепловых процессов центральной части полости и на поверхности тепловыделяющего элемента.

- При более высоких числах Рэлея усиливается влияние боковых стенок, что приводит к формированию сложной пространственной картины течения и, соответственно, формы области расплава. При низких числах Прандтля наличие боковых стенок обуславливает развитие течения в поперечном направлении, что оказывает существенное влияние на характер движения межфазной границы.
- Воздействие сильного магнитного поля ослабляет конвекцию, и по результатам расчетов трехмерная модель течения становится более схожей с двумерной моделью.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Предложенная автором вычислительная модель нестационарных режимов конвективного тепло и массопереноса с учетом плавления вещества внутри замкнутых областей при наличии локального источника энергии под воздействием однородного магнитного поля качественно отражает исследуемые явления и позволяет проследить основные закономерности процесса плавления под влиянием силы Лоренца в рамках конвективного тепло- и массообмена.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.** Полученные результаты могут быть использованы в исследовательских целях в Национальном исследовательском Томском государственном университете, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Томском государственном архитектурно-строительном университете, Новосибирском государственном архитектурно-строительном университете, Новосибирском государственном техническом университете, Институте теплофизики СО РАН, Институте теоретической и прикладной механики СО РАН, Институте проблем механики РАН, Институте теплофизики УрО РАН и других научных центрах.

**Замечания по диссертационной работе:**

1. Диссертационная работа неправильно структурирована, что затрудняет ее восприятие. Значительный объем второй и третьей глав занимает описание математических моделей и методов приближенного решения в 2D и 3D постановках, которые различаются только размерностью. Параграфы третьей главы очень длинные и включают много однотипных графиков. При этом подписи рисунков не содержат достаточной информации, позволяющей оценить, влияние какого именно параметра и для каких условий представлено на рисунке. Было бы целесообразно всю «математическую» часть текста собрать в одну главу, а результаты расчетов и их обсуждение – в другие главы. При этом анализ физических процессов различной природы (естественная конвекция, плавление, воздействие магнитного поля) было бы лучше разнести в разные главы или хотя бы параграфы.

2. Использованная автором математическая модель, учитывающая фазовый переход, может быть применена к более широкой расчетной области, включающей сам источник тепловыделения. При этом его воздействие лучше учитывать не через температурное условие на границе, а через дополнительные источниковые члены в уравнении энергии с заданной мощностью теплоподвода. Таким образом, можно было описать реальный процесс сопряженного теплообмена с зоной источника тепловыделения, при котором учтено обратное

влияние процесса плавления и конвективного теплопереноса на тепловые процессы в самом источнике.

3. Многие интересные результаты расчетов не получили должного толкования. Так, например, график на рис. 32, стр. 90 (Рисунок 5 автореферата) показывает поведение среднего числа Нуссельта в зависимости от числа Рэлея. При отсутствии магнитного поля можно видеть смену градиента функции при  $Ra=10^5$  и для двумерной, и для трехмерной задачи. Однако этот эффект никак не прокомментирован и не объяснен в тексте.

4. На с. 43 в начале п. 2.8.3 указано, что «рассматривается плавление парафина...», однако чуть ниже на той же странице говорится об анизотропии свойств «чистого галлия».

5. При описании результатов тестовых расчетов (с. 41, с. 43, с.80 и др.) не приведены постановка задачи, значения определяющих параметров, при которых выполнены расчеты, параметры расчетной сетки.

6. Для исследуемых задач отсутствуют сведения об используемой расчетной сетке, не приведены данные, подтверждающую сеточную независимость полученных численных решений.

7. Описывая эффект подавления конвективного течения при воздействии магнитного поля, автор использует термин «ламинаризация течения» (с. 61), который обычно используется для обозначения обратного перехода в турбулентных течениях. На стр. 104 при описании трехмерного течения расплава при высоких числах Рэлея нарушение симметричной картины объясняется ламинарно-турбулентным переходом, хотя ранее (с. 67) указано, что «режим течения расплава является ламинарным».

8. Диссертантка использует очень своеобразную систему нумерации разделов. Так, в третьей главе после параграфа 3.8. следует параграф 2.10 с подразделами 2.10.1, 2.9.2, 2.9.3 и т.д. При этом нумерация этих разделов в оглавлении не соответствует тому, что приведено в тексте диссертации.

9. Следует отметить пунктуационные ошибки, а также стилистические неточности, например:

«... достигнув определенного момента переохлаждения, картина течения становится более симметричной...»; «Граница фазового перехода движется равномерно ... пока достаточно не отдалится от охлаждающей стенки и не возрастет влияние конвективных потоков» (с. 14);

«Рисунок 8 иллюстрирует хорошее сравнение профилей ...» (с. 44);

«Рост времени проявляется в формировании теплового факела ...» (с. 46);

«Дальнейший рост времени иллюстрирует слабое плавление материала...» (с. 59).

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, выполненную на высоком научном уровне. Представленная Надеждой Сергеевной Бондаревой диссертация является законченным научным исследованием, обладает научной новизной и актуальностью. Диссертант продемонстрировал высокую квалификацию и понимание предмета исследований. Результаты работы опубликованы в ведущих научных изданиях. Автореферат диссертации верно и достаточно полно отражает ее содержание.

Зав. отделом Н.И. Яковых