

О Т З Ы В

официального оппонента д.ф.-м.н. Демина Виталия Анатольевича на диссертацию Бондаревой Надежды Сергеевны **«Численное исследование сопряженного конвективного теплопереноса в системах, содержащих материалы с фазовым переходом»** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы**

Диссертационная работа Бондаревой Надежды Сергеевны посвящена прямому численному моделированию нестационарных процессов плавления и сопутствующего ему конвективного массопереноса в замкнутых полостях вблизи локализованных источников тепла. Изучение подобных систем представляется актуальным и перспективным в связи с внедрением новых эффективных методов охлаждения элементов и отдельных блоков радиоэлектронной аппаратуры, требующей обеспечения строго регламентированных тепловых режимов работы. Предлагаемая методика контроля температуры в рабочем объеме основывается на использовании материалов, обладающих скрытой теплотой плавления в ходе фазовых превращений. В частности, имеет смысл применять среды с изменяемым фазовым состоянием в системах охлаждения радиоэлектронных приборов, работающих в кратковременном или периодическом режимах, а также в энергосберегающих устройствах.

Однако с точки зрения оппонента при анализе данной тематики и оценке степени ее актуальности нельзя ограничиваться только приложениями в области развития систем охлаждения радиоэлектронных приборов. Необходимо отметить, что с проблемами устойчивости движения фронтов кристаллизации-плавления, а также управления сопутствующими конвективными течениями приходится сталкиваться в металлургии, в ходе производства полупроводниковых кристаллов и геофизических приложениях.

Все это делает диссертационное исследование весьма актуальным, говорит о его перспективности и новизне.

Диссертация начинается с **введения**, в котором дается краткая характеристика работы, описывается ее структура, формулируются цели исследования, отмечается теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Указывается, что диссертационная работа состоит из трех глав, в том числе обзора литературы, и заключения. Объем диссертации составляет 132 страницы. Работа включает 5 таблиц и 53 рисунка. Список литературы содержит 107 наименований.

В первой главе проведен обзор современного состояния исследований в области сопряженного конвективного тепло- и массопереноса в системах, содержащих материалы с фазовыми переходами. Проанализированы работы, посвященные фазовым превращениям сред, заключенных в неоднородно нагретых замкнутых полостях при переходе из жидкого состояния в твердое и обратно. Особое внимание в обзоре уделено описанию конвекции в жидкой фазе, сопряженному теплопереносу и движению границы раздела фаз.

По литературному обзору имеется следующее замечание:

Процессы плавления-затвердевания уже давно активно теоретически и экспериментально изучаются применительно к проблемам выращивания полупроводниковых кристаллов. Движение фронта кристаллизации, разные геометрии, морфологическая неустойчивость, конвекция в жидкой фазе, теплообмен с окружающей средой, МГД-управление течениями – все эти вопросы прорабатываются на самом серьезном уровне в рамках наук, связанных с металлургией и выращиванием полупроводниковых кристаллов. Поэтому сожаление вызывает факт отсутствия ссылок на работы, публикуемые в таком известном научном издании как *Journal of Crystal Growth*, которое напрямую специализируется как на сугубо научных, так и технологических вопросах создания кристаллических материалов.

Представляется, что последовательный обзор работ за многие годы активного существования этого весьма уважаемого журнала, несомненно, обогатил бы диссертационное исследование и позволил бы провести множество параллелей в плане физики изучаемых процессов.

Вторая глава является логическим развитием тематики, обрисованной в литературном обзоре. В ней формулируется задача теоретического описания процесса плавления материала в замкнутой двумерной области конечных размеров при наличии локального нагревателя. Для малых значений числа Прандтля производится постановка задачи о влиянии однородного магнитного поля на форму и интенсивность режимов конвекции в расплаве, а также о возможности управления скоростью движения границы плавления. Проведено подробное описание численных методов, продемонстрированы весьма убедительные результаты верификации вычислительного алгоритма. Детальное тестирование программного комплекса показало хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными и теоретическими данными других авторов.

На основе двумерной модели выполнено прямое численное моделирование, отражающее закономерности сопряженного теплопереноса, описывающее движение фронта плавления и конвекцию в расплаве, а также иллюстрирующее влияние однородного статического магнитного поля на перечисленные процессы. Получены интересные количественные результаты,

касающиеся конвективных течений вблизи локализованных источников тепла под движущейся границей плавления.

По материалу второй главы у оппонента возникло замечание, касающееся постановки задачи о влиянии магнитного поля на расплав:

Остается ощущение, что не вполне обоснованным является упрощение модели, описывающей влияние магнитного поля на расплав. Не понятно, почему не решается эволюционная задача о распределении поля в среде. Зафиксировав поле, тем самым отсекаются дополнительные моды неустойчивости, связанные с нарастанием возмущений поля. Представляется, что эти моды при такой сложной постановке (сильно искривленная, движущаяся граница плавления, локальные источники тепла, сопряженный теплоперенос и т.д.) сильно обогатили бы спектр возмущений и картину нелинейных режимов.

В третьей главе представлены результаты трехмерных расчетов процесса плавления материала с изменяемым фазовым состоянием в замкнутых объемах при наличии локального источника тепла и исследовано влияние однородного магнитного поля на эти процессы при малых числах Прандтля. Полностью аккуратно выписаны громоздкие трехмерные разностные схемы для системы дифференциальных уравнений в терминах «векторный потенциал – вектор завихренности». Продемонстрированы результаты моделирования процессов плавления и конвективного тепло- и массопереноса в расплаве в широком диапазоне управляющих параметров. Проведено количественное сравнение результатов численного решения плоской и трехмерной задач.

По этой главе у оппонента сформировалось следующее замечание:

Самые важные с точки зрения оппонента трехмерные картины течений, представленные на рис. 29, 37, 41 и 45 можно было бы выполнить более крупно на отдельных страницах. С точки зрения оппонента эти рисунки главным образом могли бы продемонстрировать богатые возможности разработанной расчетной схемы и подчеркнуть высочайшую квалификацию соискателя. Эти красивые численные результаты с точки зрения графического представления оказались неоправданно «спрессованными» и трудно интерпретируемыми.

Тем не менее, достоверность материала, представленного в диссертации, подтверждается надежностью использованных численных методов, корректностью физической модели рассматриваемых процессов, согласием результатов исследования в предельных случаях со всеми имеющимися на сегодняшний день данными.

Диссертация легко читается, что свидетельствует о тщательной работе автора над текстом. При чтении диссертации оппоненту встретилось лишь несколько опечаток:

На стр. 24 в предложении

«Термогидродинамические параметры в области расплава определяются из уравнений Обербака-Буссинеска...»

сделана досадная опечатка. Принято писать «уравнения Обербека-Буссинеска»

В списке литературы при ссылке на работу [66] в словосочетании «Экономинная схема», по-видимому, допущена ошибка.

В совокупности сделанные замечания не влияют на общее положительное заключение по диссертационной работе. Полагаю, что работа является оригинальным законченным научным исследованием, в котором наиболее важным результатом с точки зрения оппонента является разработка и реализация численной методики серьезных трехмерных расчетов тепло- и массопереноса в замкнутых полостях с локальными источниками тепла при наличии движущейся границы раздела фаз. Иными словами получен полностью от начала до конца авторский вычислительный код, легко поддающийся модернизации и модификации в зависимости от поставленной задачи, протестированный и позволяющий получать новые физические результаты.

Результаты этого исследования могут представлять интерес для инженеров-радиофизиков, занимающихся производством радиоэлектронной аппаратуры, в частности, разработкой систем охлаждения радиотехнических устройств, а также физиков-материаловедов, работающих в области выращивания полупроводниковых кристаллов.

Материал диссертационной работы подробно изложен в 8 статьях, опубликованных в ведущих рецензируемых журналах из списка ВАК, что является очень высоким показателем для соискателя ученой степени кандидата наук. В указанных работах достаточно полно отражены все основные результаты диссертации. Помимо этого соискателем получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа **Бондаревой Надежды Сергеевны** по своей актуальности и новизне результатов, объему выполненного теоретического исследования, научной и практической значимости полученных результатов вносит значительный вклад в развитие представлений о сопряженном конвективном тепло- и массопереносе в текучих средах в окрестности точки фазового перехода.

Считаю, что диссертационная работа Бондаревой Надежды Сергеевны **«Численное исследование сопряженного конвективного теплопереноса в системах, содержащих материалы с фазовым переходом»** отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям (в том числе соответствует второй части пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней»), а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы**.

Официальный оппонент

заведующий кафедрой теоретической физики Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»
<http://www.psu.ru>, info@psu.ru

Адрес: 614990, РФ, г. Пермь, ул. Букирева, 15;

Телефон: 8 (342) 239-64-35

доктор физико-математических наук,

(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)

доцент



Демин Виталий Анатольевич

06.12.2016

Рабочий тел.: 8 (342) 239-62-27, e-mail: demin@psu.ru

Я, Демин Виталий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Бондаревой Надежды Сергеевны **«Численное исследование сопряженного конвективного теплопереноса в системах, содержащих материалы с фазовым переходом»**, и их дальнейшую обработку.



В.Н. Демин заверяю
секретарь совета
Е.П. Анфимова