

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

**Мизева Алексея Ивановича**

**«ТЕПЛОВАЯ И КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ МАРАНГОНИ  
В ЗАДАЧАХ С ПЛОСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ»,**

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Мизева А.И. посвящена экспериментальному исследованию условий возникновения структуры и физических механизмов гидродинамической неустойчивости тепловой и концентрационной конвекции Марангони в различных геометриях для различных жидких систем. Эффект Марангони был впервые обнаружен в 1855 году Джеймсом Томсоном при исследовании причин возникновения так называемых «слёз вина». В 1865 году Карло Марангони провёл подробное исследование эффекта для своей докторской диссертации. Позже его полное теоретическое объяснение дано Джозайей Гиббсом. Полное теоретическое описание эффекта Марангони на основе уравнений Навье — Стокса и уравнений термодинамики опубликовано Субраманьяном Чандрасекаром в 1961 году. Развитие материаловедения, в частности, космического материаловедения послужило мощным толчком изучения конвекции Марангони в настоящее время. Несмотря на большое число публикаций, описывающие основные физические механизмы данного процесса, определения характера неустойчивости и структуру вторичных течений, осталось много нерешенных проблем, связанных, прежде всего, с идеализацией реальных термокапиллярных явлений и явлений, связанных с концентрацией примеси. Появилось новое направление – межфазная гидродинамика. Сравнительно немного сделано экспериментов по изучению тонких механизмов концентрационной конвекции Марангони. В силу всего перечисленного **актуальность** работы не вызывает сомнения.

**Целью работы** Мизева А. И. является изучение условий возникновения, характера и физических механизмов гидродинамической

неустойчивости концентрационной и тепловой конвекции Марангони в плоской и цилиндрической геометрии для однородной жидкости, бинарных смесей, разбавленной суспензии.

Все основные результаты, представленные в диссертации, получены с помощью современных экспериментальных традиционных, а также оригинальных методик. **Степень достоверности** представленных результатов обеспечивается тщательностью разработок методик исследований и там, где это возможно, сравнением с имеющимися теоретическими и экспериментальными исследованиями.

**Теоретическая значимость** диссертации состоит в получении серии экспериментальных данных, имеющих фундаментальное значение для глубокого понимания тонких процессов тепло- и массообмена в жидкостях, имеющих межфазовые границы и являющимися богатым материалом для теоретических исследований.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в разработке новых экспериментальных методик в области межфазной гидродинамики, в получении важных результатах для разработчиков технологий выращивания монокристаллов и очистки полупроводниковых материалов.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 277 страниц. Библиографический список состоит из 239 наименований. В работе содержится 84 рисунка и 6 таблиц.

Во **введении** дается обоснование темы диссертационного исследования, приведена общая характеристика диссертации, в том числе, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описана методология и методы диссертационного исследования, приведена информация о структуре диссертации.

В **первой главе** изучается термокапиллярная конвекция от затопленного локализованного источника тепла в установке с

цилиндрической геометрией. Интерес к такого рода экспериментам связан с изучением конвективных течений в расплавах полупроводниковых и металлических материалов, возникающих в технологических процессах. Представлены результаты экспериментального исследования структуры и устойчивости возникающего конвективного течения в рамках модели полубесконечного слоя, когда горизонтальный вертикальный размер слоя жидкости велики по сравнению с характерными размерами задачи. Эксперименты были проведены в кювете квадратного сечения со стороной 10см. Создавался слой жидкости (n-декан), в центре которого на определенной глубине помещался источник тепла. Был непроницаемый источник с твердыми границами или проницаемый источник, индуцированный излучением. Представлена методика проведения эксперимента. В результате эксперимента установлена структура конвективного течения, которая для обоих типов источников остается осесимметричной при любых значениях мощности нагревателя и глубине его погружения. Увеличение линейных размеров полости, моделирующее ситуацию полубесконечного слоя жидкости, приводит к стабилизации основного течения. Наблюдения показали, что при любых значениях мощности и погружения источника тепла граница жидкости вблизи источника всегда деформируема. Было проверено, как искривляется поверхность жидкости, принимая форму в зависимости от характера и интенсивности возникающего конвективного течения. При малых глубинах погружения твердотельного источника вогнутая форма свободной поверхности становится нестационарной. Исследовано как образуются поверхностные волны: цилиндрические и спиральные, количество рукавов которых зависит от мощности и глубины источника.

Во **второй главе** представлены результаты экспериментального исследования структуры и устойчивости концентрационного течения Марангони, генерируемого затопленным локализованным источником ПАВ. Основное различие теплового и концентрационного случая заключается в

разной скорости переноса тепла и массы по отношению к скорости переноса импульса в жидкости. В тепловых задачах время жизни теплового и гидродинамического возмущения примерно одинаковы. Течения же концентрационной природы часто демонстрируют нестационарную динамику, граничные условия на свободной поверхности более сложные. Описана экспериментальная установка и методика измерений. Эксперименты показали, что концентрационные капиллярные течения имеют более сложную структуру, чем термокапиллярные. Имеется два типа движения: колебательный и стационарный.

В **третьей главе** рассматривается более сложная задача, чем в предыдущих двух главах: концентрационно-капиллярная конвекция от локализованного источника массы при наличии адсорбированного слоя сурфактанта. Речь идет о двухкомпонентной жидкости, одна из которых может быть поверхностно активной по отношению к другой. Описана экспериментальная установка, представляющая собой стеклянную цилиндрическую кювету диаметром 18 см и высотой 6 см, в которую помещается слой жидкости высотой 4 см, очень подробно представлена методика измерений. Приведены результаты наблюдений структуры конвективного течения для случая нерастворимого и растворимого сурфактанта. Нанесение адсорбированного слоя молекул нерастворимого сурфактанта в любой концентрации приводит к потере течением осевой симметрии. В центральной части наблюдается осесимметричное радиальное течение, характеризующееся большими, от нескольких миллиметров, до нескольких сантиметров в секунду скоростями конвективного движения на границе раздела. На периферийной части поверхности формируется многовихревая структура течения, периодичная в азимутальном направлении и характеризующаяся медленным порядком долей миллиметра в секунду движением жидкости на поверхности. Размер внутренней радиальной зоны, количество и расположение вихрей во внешней зоне зависит от интенсивности концентрационно-капиллярного течения и поверхностной

плотности сурфактанта. Что касается нерастворимого сурфактанта, то эксперименты показали, что от замены нерастворимого сурфактанта на растворимый качественно ничего не меняется. Так же, как и в первом случае, наличие молекул ПАВ на границе раздела приводит к формированию двух зон с различной структурой течения: зона радиального течения вокруг источника и зона вихревого течения, расположенная на периферии поверхности. Время установления радиальной зоны и вихрей во втором случае дольше, чем в первом. Предложен физический механизм формирования наблюдаемой структуры течения.

**В четвертой главе** диссертации изучается взаимодействие термокапиллярного течения с адсорбированным слоем нерастворимого сурфактанта в ячейке Хеле-Шоу. Такая постановка позволяет снизить размерность задачи и приблизиться к теоретическим исследованиям. Описана экспериментальная установка и методики измерений. Наблюдения показали, что структура конвективного течения зависит от приложенного градиента температуры и поверхностной плотности сурфактанта. Управляющим параметром является параметр упругости – отношение приращений поверхностного натяжения за счет концентрационного и термокапиллярного механизма. Исследуется характер движения в зависимости от этого параметра. Очень интересным на наш взгляд является рис. 4.4, где изображено распределение горизонтальной скорости поперек слоя жидкости при превалировании концентрационного механизма. Впервые экспериментально получен профиль скорости течения Остроумова-Бириха для концентрационной конвекции Марангони.

**Пятая глава** посвящена экспериментальному исследованию устойчивости плоского горизонтального слоя со свободной верхней границей при наличии наклонного градиента температуры. Описана экспериментальная установка и методики измерений. Специальная конструкция экспериментальной установки и набор экспериментальных методик позволили избежать пристеночных эффектов. Изменение толщины

слоя жидкости сделало возможным варьировать в широких пределах величины динамического числа Бонда. Наблюдения показали, что структура течения зависит от горизонтального, вертикального числа Марангони и числа Бонда. Получены карты режимов при варьировании параметров. Можно отметить, что при больших значениях динамического числа Бонда обнаружен новый тип неустойчивости, ответственный за возникновение структур в расплавах, наблюдаемых при выращивании кристаллов методом Чохральского.

**Шестая глава** посвящена изучению аккумуляции твердых включений тепловой конвекцией Марангони в жидком мостике. Описана экспериментальная установка и методики измерений. Представлены результаты исследования формы, области существования и условия формирования аккумуляционных структур, структуры течения и распределения температуры в гидротермической волне. Представлены результаты экспериментов, проведенных в условиях микрогравитации на борту беспилотной исследовательской ракеты, совершающей суборбитальный полет по баллистической траектории. Предложен возможный физический механизм формирования аккумуляционных структур.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы.

При ознакомлении с диссертационной работой возникли следующие замечания

1. Было бы желательно, чтобы как можно больше экспериментальных кривых описывались аналитически с целью дальнейшего теоретического анализа.

2. На стр. 142 рис. 4.4 представлены профили горизонтальной скорости течения жидкости поперек слоя в ячейке Хеле-Шоу,

экспериментально. Насколько они близки к профилю адвективного течения Остроумова-Бирих, полученного теоретически?

3. С какой точностью сделаны измерения в представленных экспериментах?

Сделанные выше замечания не снижают общего положительного впечатления о работе. Результаты диссертационной работы опубликованы в известных изданиях, представлено 13 публикаций из перечня ВАК, 13 в сборниках статей и трудах конференций, 42 публикации в тезисах конференций. Они апробированы на большом количестве конференций, съездах и семинарах.

Хотелось бы отметить тщательность, скрупулезность и продуманность, с какой была проделана подготовка и проведение каждой серии экспериментов, что свидетельствует о высокой квалификации диссертанта.

Работа является оригинальным, завершенным исследованием, направленным на решение важных и актуальных проблем гидродинамики, и выполнена на высоком научном уровне. Тематика и содержание диссертации соответствует специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Работа Мизева Алексея Ивановича удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а диссертант Мизев А. И. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Профессор кафедры прикладной математики и информатики  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Пермский государственный национальный  
исследовательский университет,  
доктор физико–математических наук, доцент  
Адрес: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.  
тел. +7 (242) 239-64-09, e-mail: [kosch@psu.ru](mailto:kosch@psu.ru)



Ишвари Константин Григорьевич/ «29 января» 2019 г.

Подпись К. В. Извара заверяю  
Ученый секретарь совета  
Е. П. Е. П. Антонова