

Вх. № 31/22  
от 23.05.22

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
**ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ**

**им. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ**  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИТ СО РАН)

проспект Академика Лаврентьева, 1  
г. Новосибирск, 630090  
Тел.: (383)330-90-40; 330-84-80; факс 330-84-80  
Эл. почта: director@itp.nsc.ru  
ИНН/КПП 5408100040/540801001  
ОКПО 03534009 ОГРН 1025403648786

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки «Институт  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской  
академии наук

д.ф.м.н., профессор, академик РАН

  
Д.М. Маркович

От 19.05.2022 № 15314 -01/55/22 «19» мая 2022 г.  
На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» на диссертацию Клюева Дениса Сергеевича на тему «Исследование фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции в двухслойных жидких системах», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

В диссертационной работе Клюева Д.С. представлены результаты экспериментальных и численных исследований деформаций поверхности раздела одно- и двухслойных систем жидкостей при наличии локального нагрева лазерным излучением. Исследования проведены с тонкими слоями жидкостей в режимах непрерывного локального нагрева на границе раздела жидкость – дно полости и на границе раздела двух несмешивающихся жидкостей.

**Структура и содержание работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 135 источников. Работа содержит 36 рисунков и 4 таблицы. Общий объём работы составляет 106 страниц.

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы, обозначен личный вклад автора, сформулированы положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

**В Главе 1** проведён анализ опубликованных работ по исследованию термокапиллярной конвекции и деформации свободной границы в тонких слоях жидкости. Рассмотрены основные существующие методы измерения профиля деформированной поверхности жидкого слоя. Проведён обзор существующих

типов адаптивных жидкостных диафрагм, обсуждаются их основные преимущества перед твердотельными аналогами и показаны их недостатки.

**В Главе 2** представлены результаты экспериментального и численного исследований термокапиллярной деформации свободной поверхности прозрачного слоя силиконового масла ПМС-5. Приведено описание экспериментальной установки, методик проведения экспериментов и измерений профилей деформаций свободной поверхности слоев жидкости различной толщины. Численные исследования выполнены с использованием коммерческого пакета программ COMSOL Multiphysics методом конечных элементов в цилиндрической системе координат. Схема расчетной области совпадает с геометрией рабочего участка экспериментальной установки. Система уравнений представлена в произвольной Лагранжево-Эйлеровой формулировке. Описаны начальные и граничные условия, основные допущения, упрощающие постановку задачи относительно некоторых реально присутствующих в эксперименте эффектов. Учитывается взаимодействие с окружающей воздушной средой. На границах раздела фаз поставлены сопряженные граничные условия. На границах масло-воздух и на внешней стороне донной стенки эбонитовой полости учтена радиационная теплоотдача. Показано влияние граничных условий радиационной теплоотдачи с поверхности силиконового масла и межфазной границы масло-твёрдое тело (эбонит) на время формирования термокапиллярного разрыва и на значение критической толщины, при которой он возникает.

**В Главе 3** представлены результаты экспериментальных исследований динамики термокапиллярной деформации границы раздела в системах двух несмешивающихся жидкостей со свободной границей верхнего слоя. Установлено существование трёх режимов протекания термокапиллярной конвекции: 1 - состояние устойчивого термокапиллярного псевдоразрыва верхнего слоя; 2 - состояние устойчивой термокапиллярной деформации; 3 - переходный режим — затухающие колебания диаметра термокапиллярного отклика. В этом случае термокапиллярный псевдоразрыв верхнего слоя и его последующее восстановление повторяются периодически с постепенно затухающей амплитудой до тех пор, пока этот слой не станет плоским, либо обладающим достаточно малым стационарным углублением.

**В Главе 4** описан механизм работы оптофлюидной круглой диафрагмы, который основан на использовании термокапиллярного эффекта, управлении термокапиллярной конвекцией лазерным лучом и вызванной ею деформацией границ раздела в системе двух несмешивающихся жидкостей. Продемонстрирована возможность аттенюации диафрагмы путём изменения



толщины поглощающего оптический сигнал слоя. Показано, что предложенная диафрагма имеет способность самоцентрироваться относительно лазерного пучка накачки, что позволяет перемещать её вдоль плоскости слоя.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**Актуальность работы.** В технических системах и в технологических процессах широко распространены слои жидкости различной толщины со свободной поверхностью и многослойные системы из слоев несмешивающихся жидкостей. В неизотермических системах такого типа практически всегда проявляется наличие термокапиллярного эффекта и развитие термокапиллярного течения. При современной тенденции миниатюризации многих технологических процессов актуальны фундаментальные исследования поведения тонких слоев жидких сред с различными теплофизическими свойствами. Такие процессы характерны для технологических операций в микроэлектронике, в различных системах охлаждения. Отработка способов управления формами термокапиллярной деформации поверхности важна и с точки зрения управления локальными процессами тепло-массообмена. Идея применения лазерно-индуцированного термокапиллярного эффекта в качестве технологии управления свободной поверхностью с целью преобразования оптического сигнала достаточно активно развивается. В связи с этим важной является проблема разработки методов определения профиля поверхности путём её сканирования. Возможность управления кривизной поверхности жидкости необходима при создании адаптивных оптофлюидных элементов. Точное описание формы жидких элементов необходимо для верного определения критически важных параметров оптических устройств (фокусное расстояние и кривизна), а также для корректного расчёта структуры оптических сигналов, проходящих через эти устройства.

**Научная новизна работы** заключается в том, что

1. Впервые в физико-математической модели лазерно-индуцированной термокапиллярной конвекции в тонких слоях жидкости применены условия открытых внешних границ расчётной области, т.е. учтен сопряженный конвективный теплообмен с окружающей газовой средой и учтена радиационная теплоотдача.

2. Обнаружен и исследован новый тип гидродинамической неустойчивости осциллирующего типа в двухслойной системе ПМС/бензиловый спирт со свободной поверхностью верхнего слоя. Установлены границы возникновения и особенности эволюции во времени данного режима в зависимости от толщины верхнего слоя жидкости.

3. Предложена аппроксимирующая функция, позволяющая описывать сложные профили деформации поверхностей одного тонкого слоя жидкости и деформации в двухслойной системе.

4. Предложена и исследована двухслойная система со свободной поверхностью верхнего слоя в качестве жидкостного оптического элемента – подвижной, самоцентрирующейся диафрагмы.

**Научная и практическая значимость.** Разработанная физико-математическая модель лазерно-индуцированной термокапиллярной конвекции в тонких одинарных слоях и в двухслойных системах с условиями открытых внешних границ расчётной области может использоваться при различных сочетаниях теплофизических свойств жидкостей и твердых стенок. Предложена и протестирована аппроксимирующая функция, позволяющая с высокой точностью описывать профиль деформированной поверхности жидкости, в том числе при наличии термокапиллярного разрыва. Данная аппроксимация может быть полезна в качестве вспомогательного инструмента для описания деформаций границ раздела жидкость – газ. Предложенная адаптивная самоцентрирующаяся оптофлюидная диафрагма с возможностью перемещения и аттенюации проходящего излучения может быть использована как основа для создания систем наблюдения за фотофобными микроорганизмами, находящимися в жидкой среде и не терпящих длительного воздействия прямого солнечного излучения; применения в качестве элемента в системах машинного зрения, либо для использования в бионике.

**Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов** обеспечивается высокой точностью используемого современного измерительного оборудования; их высокой воспроизводимостью; совпадением экспериментально полученных результатов с данными численных расчётов на качественном и количественном уровнях.

По диссертационной работе в целом имеются следующие **Замечания**:

1. Начиная с Введения и во всей диссертации много примеров терминологии, неадекватной физической сути описываемых процессов, граничных условий и т.д.. Например, некорректные термины и выражения: “кривые устойчивости для случаев жидкости с теплоизолированной и *проводящей* свободной поверхностью”, “для случая *непроводящей* свободной поверхности”, “рассматривал влияние *теплового и капиллярного* механизмов” (стр. 13) – это физически некорректные выражения – речь должна идти о нейтральных кривых и критических значениях чисел Рэлея и Марангони; о поверхности с теплоотдачей в окружающую среду и об адиабатической границе; о влиянии сил

плавучести и термокапиллярного эффекта. Или “...индуцированные лазером *тепловые силы* Марангони” (стр. 78 ) – нет таких сил в природе.

Выражения: “Рассматривая равновесие сил плавучести и сил поверхностного натяжения” (стр. 13), “Критическая толщина слоя, при которой капиллярные силы уравниваются силами плавучести...” (стр.33-34) физически неверны – суть в том, что при данном соотношении чисел Рэлея и Марангони относительная роль сил плавучести и термокапиллярного эффекта в генерацию конвективного течения сопоставима.

2. Физическая постановка задачи и анализ полученных результатов в главе 2 в части теплообмена отсутствуют. Численная модель описана поверхностно. Не понятно была ли возможность рассчитать поля температуры в слоях жидкости и в стенках, распределения температуры и градиентов температуры вдоль свободных границ слоев жидкости. Без этих данных невозможен полный и наглядный анализ процессов развития конвекции и деформации поверхности слоев жидкости. Использование открытых внешних границ расчетной области и постановка условий сопряжения температуры и потоков тепла на границах раздела фаз подразумевает оценки теплоотдачи за счет конвекции в газовую среду и ее относительной роли в сравнении с радиационной теплоотдачей. В этой главе не указаны уровни абсолютной температуры, что необходимо при оценках радиационной теплоотдачи. Это в работе не обсуждается. Без данных о поле температуры в дне эбонитовой чаши не понятно, откуда взялись расчетные радиальные распределения температуры на рис. 18 (стр. 58). Выводы по главе 2 плохо сформулированы и не отражают суть и содержание реально полученных результатов.

3. Для предложенного типа адаптивной жидкостной диафрагмы не указаны допустимые условия эксплуатации и наиболее подходящие области применения.

### **Заключение.**

Сделанные выше замечания не исключают положительную оценку работы в целом. Диссертация Клюева Д.С. является законченной научно-квалификационной работой в области экспериментальных и численных исследований термокапиллярной конвекции в тонких слоях жидкости, соответствующей специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Основные результаты научно-квалификационной работы опубликованы в 10 печатных работах, в том числе в 5 работах в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов кандидатских диссертаций, в них достаточно полно отражены основные результаты диссертационной работы. Результаты докладывались на 5 авторитетных



конференциях российского и международного уровня. Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертационной работы и отражает ее основные результаты, положения и выводы.

Диссертационная работа Клюева Дениса Сергеевича по актуальности, научной новизне, научной и практической значимости соответствует требованиям пунктов 9 - 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Клюев Денис Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Отзыв на диссертацию подготовлен на основании положительного заключения секции 2 «Термогазодинамика и турбулентность» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» (протокол заседания секции № 02 - 2022 от «10» марта 2022 г., присутствовало 15 членов секции).

Отзыв подготовил:

Главный научный сотрудник лаборатории интенсификации процессов теплообмена ФГБУН ИТ СО РАН,  
д.ф.-м.н. по специальности  
01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Бердников Владимир Степанович

630090, г. Новосибирск,  
проспект Академика Лаврентьева, д.1  
тел.: +7(383) 316-53-32  
e-mail: berdnikov@itp.nsc.ru

19 мая 2022 г.

Подпись В.С. Бердникова удостоверяю:  
Ученый секретарь ИТ СО РАН,  
кандидат физико-математических наук  
по специальности 01.04.14- теплофизика  
и теоретическая теплотехника



М.С. Макаров

*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: +7 (383) 330-70-50. E-mail: director@itp.nsc.ru Web-сайт:  
<http://www.itp.nsc.ru>.