

Вх. № 32/22
от 23.05.22

ОТЗЫВ

**официального оппонента о диссертации
Клюева Дениса Сергеевича
«Исследование фотоиндуцированной термокапиллярной
конвекции в двухслойных жидких системах»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности
1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

Актуальность исследований. Диссертационная работа Д.С. Клюева посвящена рассмотрению модификаций и обобщению классической междисциплинарной и комплексной проблемы теплофизики и гидродинамики – исследованию конвекции Марангони (термокапиллярной конвекции) в тонком слое жидкости и в двухслойной системе.

Напомним, что конвекция является самым распространенным движением жидкой и газовой среды во Вселенной. Классические опыты Бенара по исследованию конвекции изначально были интерпретированы Рэлеем, что действие силы Архимеда из-за неоднородности плотности от температуры является доминирующим. Однако Пирсоном и другими исследователями было позднее установлено, что в опытах Бенара из-за малой толщины слоя спермацета доминировал не бенаровский механизм, а термокапиллярный эффект Марангони.

После установления этого факта исследованию термокапиллярной конвекции посвящено огромное количество теоретических и экспериментальных работ. Напомним, что одним из первых точных решений уравнений конвекции, являлось семейство Бириха (Остроумова-Бириха). Если говорить о теплофизических приложениях использования конвекции Марангони, то она используется при применении лазерно-индуцированного термокапиллярного эффекта в методах неразрушающего контроля материалов, изучении микрофлюидных гидродинамических потоков и для технологии управления свободной поверхностью тонкого слоя с целью преобразования оптического сигнала.

Деформация свободной поверхности, индуцированная действием термокапиллярных сил, зависит от свойств жидкости (диссипативных коэффициентов) и характеристик материала подложки и от закона нагрева жидкости. Методы бесконтактной диагностики материалов, применяемые в настоящее время, базируются на фототермокапиллярном отклике. Этот

способ неразрушающего контроля позволяют измерять только диаметр отклика, но его структура остается неизвестной. Решение обратной задачи по его расшифровке позволило бы, отталкиваясь от известных уравнений естественной конвекции, определять требуемые параметры системы.

Можно констатировать, важной и злободневной является проблема разработки метода определения профиля поверхности посредством сканирования свободной границы. Восстановление структуры отклика на основе измеренного профиля и сравнение его с экспериментальными данными позволяет установить достоверность и оценить точность результата сканирования. Основная проблема заключается в том, что для восстановления структуры отклика необходима гладкая, хорошо аппроксимирующая данные сканирования зависимость. Эта задача является актуальной как для методов диагностики материалов, так и для жидкостных оптических преобразователей. Таким образом, можно утверждать, что диссертация подготовлена по актуальной теме теплофизики.

Структура и содержание диссертации. Диссертация объемом 106 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, состоящего из 135 наименований. В диссертационной работе содержится 36 рисунков и 4 таблиц.

Во **введении** автором диссертационной работы обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследований, указана научная новизна и практическая значимость научных результатов, выносимых на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В **первой** главе диссертации представлен обзор литературы по теме диссертации. Автором проанализированы экспериментальные и теоретические работы, в которых проведены исследования термокапиллярной конвекции и деформации свободной границы в тонких слоях жидкости. Уделено внимание научным публикациям, в которых рассматриваются различные методы измерения профиля деформированной поверхности жидкого слоя. Осуществлен обзор и сравнение различных типов адаптивных жидкостных диафрагм, с указанием основных преимуществ и недостатков перед твердотельными аналогами.

Во **второй** главе приведен описание и результаты эмпирического исследования термокапиллярной деформации свободной поверхности прозрачного слоя силиконового масла ((ПМС-5), производитель Пента Юниор, ГОСТ 13032-77) при локальном лазерном нагреве в зависимости от толщины слоя. Разработаны и приведены теоретические исследования посредством применения численных методов изучения деформирования

свободной границы тонкого слоя (однослойной системы) за счет термических напряжений капиллярной природы для вязкой несжимаемой жидкости (силиконового масла). Была детально изучена форма ТК деформации свободной поверхности тонких слоёв жидкости. Показано, что профиль деформации поверхности слоя жидкости удовлетворительно описывается функцией Аньези. Численное моделирование конвекции Марангони осуществлялось при помощи программного пакета COMSOL Multiphysics. В качестве уравнений движения использовались уравнения Обербека-Буссинеска для осесимметричной термокапиллярной конвекции в тонком слое силиконового масла. Использовались два типа граничных (краевых) условий, описывающих предельные тепловые диссипативные процессы, возникающие при излучении. Установлена качественное и количественное совпадение между экспериментальными и численными данными с оценкой погрешности измерений для всех толщин слоя, используемых при исследовании конвективных течений Марангони.

В **третьей** главе представлены результаты экспериментального исследования динамики термокапиллярной деформации свободной поверхности двухслойной системе несмешивающихся жидкостей. Схема экспериментальной установки и метод проведения опытов с двухслойной жидкостью полностью аналогичны приведенным во второй главе. В результате проведенных исследований было показано, что существует существование три вида конвективных течений Марангони двухслойной жидкости: устойчивый термокапиллярный псевдоразрыв верхнего слоя; состояние устойчивой термокапиллярной деформации; переходный режим между этими течениями, который происходит благодаря затухающим колебаниям. Переход двухслойной системы в промежуточный режим затухающих колебаний обусловлен возникновением в застойной области (области покоя) мелкодисперсной фазы посредством газовых микропузырьков. Для описания деформации свободной границы при термокапиллярной конвекции предложено использовать комбинацию функции Аньези и рациональной сигмоиды.

В **четвертой** главе рассматриваются механизм работы оптофлюидной круглой диафрагмы. Функциональная способность диафрагмы основана на тепловых (термических) силах Марангони, управляемых лазерным лучом в двухслойной системе несмешивающихся жидкостей. с термокапиллярным разрывом верхнего слоя. Использование жидкого нижнего слоя позволяет существенно расширить диапазон изменения апертуры диафрагмы и обеспечить круглую форму. Установлено, что при заданной мощности

лазерного пучка накачки апертура диафрагмы может изменяться в широком диапазоне, который существенно зависит от толщины верхнего слоя.

В заключении рукописи приведены выводы по результатам диссертационного исследования.

Научная новизна. В представленной к защите диссертации на соискание ученой степени кандидата наук в качестве основных научных результатов можно выделить:

1. Впервые учтены граничные условия открытых (свободных) внешних границ, удалённых от эбонитовой чашки Петри, и тепловые (диссипативные) потери из-за излучения в математической модели лазерно-индуцированной термокапиллярной конвекции в тонком слое жидкости;
2. Обнаружен и исследован новый тип гидродинамической неустойчивости колебательного типа в двухслойной системе (полиметилсилоксан/бензиловый спирт) со свободной поверхностью верхнего слоя;
3. Впервые предложена аппроксимирующая функция Анъези и рациональной сигмоиды, позволяющая описывать сложный профиль деформации поверхности двухслойной системы;
4. Впервые предложена двухслойная система со свободной поверхностью верхнего слоя в качестве жидкостного оптического элемента и проведено исследование ее гидродинамических и теплофизических характеристик.

Научная и практическая значимость работы. В диссертационной работе приведены новые аппроксимирующие функции для определения профиля деформации свободной поверхности жидкости. Данная функция будет востребована для аналогичных исследований при описания деформации границ раздела двухслойных систем жидкость–газ и для повышения точности сканирующих методов диагностики жидкостей. Предложенная в диссертации адаптивная самоцентрирующаяся оптофлюидная диафрагма с возможностью перемещения и аттенюации проходящего излучения найдет свое применение для создания систем наблюдения за фотофобными микроорганизмами, для применения в системах машинного зрения и для других задач бионики.

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертации результатов обеспечивается высокой точностью используемого современного измерительного оборудования; воспроизводимостью полученных экспериментальных данных, высокой степенью согласованности между экспериментальными измерениями и использованными в численной

реализации математической модели параметрами жидкостей и сходимостью результатов численных расчётов с данными, полученными из натурального эксперимента (качественными и количественными).

Результаты, представленные в диссертационной работе Д.С. Ключева, прошли апробацию на пяти всероссийских и международных конференциях и опубликованы в 10 печатных работах, 5 из которых в научных статьях, входящих в Перечень ВАК (4 являются статьями в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, а 1 входит в журнал перечня ВАК.).

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат достаточно ясно, полно и правильно отражает структуру, основные результаты и выводы диссертации.

Замечания по диссертации и автореферату. При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации не возникает существенных замечаний по представлению материала. В работе имеется небольшое число неточностей и опечаток, не влияющих на восприятие научных результатов. Тем не менее отмечу некоторые дискуссионные и технические моменты, возникшие при ознакомлении с диссертацией и авторефератом:

1. В автореферате содержится досадная неточность. В тексте диссертации содержится 4 таблицы. Материал, анонсированный в этих таблицах достаточно интересно структурирован и важен для дальнейших исследований. К сожалению, в автореферате в разделе «Структура и содержание диссертации» не приведена информация об этом. Кроме того, в автореферате формально не приведен пункт «Заключения», но сформулированы основные результаты и выводы.
2. При ознакомлении с текстом диссертации было замечено чрезмерное использование англицизмов и англоязычных терминов, которые не всегда расшифровываются. Некоторые термины в середине предложения пишутся с прописной буквы, например «Неньютоновская жидкость» или «Рисунок».
3. Хотелось бы пояснения выбора аппроксимирующих кривых при описании деформации свободной границы для конвекции Марангони. Предложенные функции не являются типичными при обработке экспериментальных данных теплофизических и гидродинамических экспериментов.
4. Требуется пояснения выбор толщины слоя (слоев) жидкости и их вариация при проведении экспериментальных исследований.

Заключение. Диссертационная работа Клюева Дениса Сергеевича «Исследование фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции в двухслойных жидких системах» соответствует требованиям пунктам 9-14 Постановления Правительства РФ 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями и дополнениями №335 от 30 июля 2014 г., 21 апреля, 2 августа 2016. Автор диссертации достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Доктор физико-математических наук
специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы,
Главный научный сотрудник сектора
нелинейной вихревой гидродинамики
ФГБУН Институт машиноведения
имени Э.С. Горкунова УрО РАН

Е.Ю. Просвирыков
20.05.2022 года

Почтовый адрес: 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34,
ФГБУН Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН.
Номер телефона: +7(343)374-20-38, +79826545223.
E-mail: evgen_pros@mail.ru

Подпись Евгения Юрьевича Просвирыкова заверяю:
ученый секретарь
ФГБУН Институт машиноведения
имени Э.С. Горкунова УрО РАН



А.М. Поволоцкая