

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.418.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 08.06.2022 № 10

О присуждении Клюеву Денису Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции в двухслойных жидких системах» по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 23 марта 2022 года, протокол заседания № 7 диссертационным советом 24.2.418.02, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. Приказ Минобрнауки России от 02.11.2012 № 714/нк.

Соискатель Клюев Денис Сергеевич, 08.06.1993 года рождения, в 2017 году окончил магистратуру по направлению подготовки 03.04.02 «Физика» ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет». В период подготовки диссертации соискатель Клюев Денис Сергеевич обучался в очной аспирантуре в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский государственный университет» по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (профиль: Теплофизика и теоретическая теплотехника) с 01.09.2017 по 31.08.2021. Диплом об окончании аспирантуры (серия 107224, № 4674405) выдан 14.07.2021 федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Тюменский государственный университет».

В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника в научно-исследовательской лаборатории фотоники и микрофлюидики Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Диссертация выполнена на кафедре прикладной и технической физики ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией фотоники и микрофлюидики Иванова Наталья Анатольевна, Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет».

Официальные оппоненты: 1) **Просвиряков Евгений Юрьевич** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник сектора нелинейной вихревой гидродинамики, ФГБУН «Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук»; 2) **Волков Роман Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником лаборатории интенсификации процессов теплообмена ФГБУН ИТ СО РАН Бердниковым Владимиром Степановичем и утвержденным директором ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук», академиком РАН, профессором, доктором физико-математических наук **Марковичем Дмитрием Марковичем**, указала, что диссертационная работа **Клюева Дениса Сергеевича** «Исследование фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции в двухслойных жидких системах» по актуальности, научной новизне, основным положениям, научной,

практической значимости и достоверности полученных результатов соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Клюев Денис Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Соискатель имеет 10 работ по теме диссертации, из которых 4 входят в издания из международных баз данных и 1 публикация в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ. Общий объем научных изданий 5,75 п.л., из них вклад автора – 4 п.л. Недостоверные сведения об опубликованных Д.С. Клюевым работах в диссертации отсутствуют.

Наиболее значимые публикации:

1. Klyuev, D. S. Thermocapillary deformation induced by laser heating of thin liquid layers: physical and numerical experiments / D. S. Klyuev, V. M. Fliagin, S. V. Semenov, N. A. Ivanova // International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 172, June 2021, 121020 (*WoS, Scopus*)
2. Bekezhanova V. B. Thermocapillary Deformations of a Two-Layer System of Liquids under Laser Beam Heating / V. B. Bekezhanova, V. M. Fliagin, O. N. Goncharova, N. A. Ivanova, D. S. Klyuev // International Journal of Multiphase Flow. Vol. 132, November 2020, 103429 (*WoS, Scopus*)
3. Klyuev D. S. Laser-actuated optofluidic diaphragm capable of optical signal tracking / D. S. Klyuev, V. M. Fliagin, M. Al-Muzaiqer, N. A. Ivanova // Applied Physics Letters. 114, 011602 (2019) (*WoS, Scopus*)
4. Bekezhanova V. B. Instability of a Two-layer System with Deformable Interfaces under Laser Beam Heating / V. B. Bekezhanova, O N. Goncharova, N. A. Ivanova, D. S. Klyuev // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics (2019) 12(5), 1–8 (*WoS, Scopus*)
5. Клюев Д. С., Иванова Н. А. О колебательной неустойчивости в системе двух несмешивающихся жидкостей при локальном нагреве межфазной границы / Д. С. Клюев, Н. А. Иванова // Вестник Тюменского государственного

университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 4 (28) С. 111-123 (ВАК).

На автореферат поступили положительные отзывы от:

- 1) Доктора физико-математических наук, профессора, профессора Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, заведующего лабораторией теплопереноса ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» Стрижака П.А., с замечаниями:
 1. Формулировки защищаемых положений, результатов и выводов не позволяют строго закрепить за соискателем конкретные достижения и нишу. Целесообразно формулировать защищаемые положения с демонстрацией индивидуальности, новизны и значимости решенных задач. При таком подходе из формулировки защищаемых положений можно определить конкретизацию, масштаб и уникальность полученных результатов. Аналогичная рекомендация касается заключений и выводов по работе в целом;
 2. Известно, что на конвекцию в жидких системах оказывают определяющее влияние тепловые, геометрические, аэродинамические и другие эффекты. Целесообразно было классифицировать данные эффекты по мере ослабления влияния на регистрируемые характеристики;
 3. Из текста автореферата не понятны границы применимости полученных результатов исследований по объектам, условиям и приложениям. Это особенно важно для предлагаемых функций и выражений. Не удалось найти соответствующие пояснения в автореферате;
 4. Полученные результаты исследований целесообразно обобщить с применением безразмерных комплексов и выражений. В выбранной области исследований их достаточно много. Можно по ним сравнить результаты с данными коллег.
- 2) Доктора физико-математических наук, заведующего кафедрой Теоретической физики ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» Демина В.А., с замечаниями:

1. Противоречиво с точки зрения русского языка выглядит формулировка одного из положений, выносимых на защиту. Речь идет о «Результатах исследования обнаруженного нового типа гидродинамической *затухающей неустойчивости* колебательного типа в двухслойной жидкостной системе». Представляется, что затухающий переходный режим все же не следует называть «неустойчивостью». Когда говорят о неустойчивости, то все же подразумевается, что в результате этой неустойчивости должен рождаться какой-то другой менее тривиальный режим, нежели ранее;
 2. Трудно поверить, что функция Анъези является точным решением задачи во всей области определения параметров, поэтому встает вопрос о границах применимости использования данного решения для описания стационарных профилей. Хотелось бы, чтобы эти рамки применимости были очерчены в автореферате.
- 3) Кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории Механики сложных жидкостей ФГБУН «Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» Федюшкина А.И., с замечаниями:
1. В автореферате не чётко говорится о влиянии свойств материалов, в частности вязкости, а также добавок в виде красящих веществ на гидродинамику жидкости и полученные результаты. Не говорится о влиянии на результаты исследований граничных условий на верхней свободной и нижней твердой поверхностях. В частности, в двухслойных системах сверху присутствует ещё третий - это слой воздуха, о свойствах и влиянии которого ничего не говорится;
 2. В автореферате не описана математическая модель;
 3. Работа посвящена исследованию устойчивости раздела межфазных границ при разных режимах термокапиллярной конвекции, но в автореферате не приводятся значений определяющих безразмерных параметров, в частности, даже диапазона чисел Марангони, указывающего на тип и

характер конвективных течений. Считаю это недостатком работы, поскольку присутствие безразмерных параметров облегчило бы обобщить полученные результаты и повысило бы их значимость;

4. В автореферате не сказано о возможном изменении капиллярных свойств жидкости в течение эксперимента и влиянии этого факта на результаты;
 5. В автореферате на стр.7 дважды написано: «лазерный лист», возможно автор имел ввиду «лазерный луч»?
- 4) Кандидата физико-математических наук, доцента кафедры общей физики ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» **Файзрахмановой И.С.**, без замечаний.
 - 5) Доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой Физики и теоретической механики ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» **Иванова В.И.**, без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются специалистами высокого уровня в области теплофизики и механики жидкостей, а ведущая организация известна своими достижениями в области теплофизики и математического моделирования, что позволяет им оценить научную и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложена усовершенствованная осесимметричная численная модель лазерно-индуцированной термокапиллярной конвекции в тонком слое жидкости, включающая условия открытой воздушной границы системы и тепловых потерь за счёт излучения, а также применение в модели геометрии экспериментальной установки;

проведено расчетно-теоретическое и экспериментальное исследование термокапиллярной деформации однослойной системы для различных толщин слоя жидкости при постоянном локальном нагреве системы лазерным пучком;

предложены:

- усовершенствованная численная модель лазерно-индуцированной термокапиллярной конвекции в тонком слое жидкости.

- новый тип гидродинамической неустойчивости колебательного типа в двухслойной системе полиметилсилоксан/бензиловый спирт с открытой воздушной границей;

- аппроксимирующая функция, позволяющая описывать сложный профиль деформации поверхности двухслойной системы;

- двухслойная система с открытой воздушной границей в качестве жидкостного оптического элемента — подвижной, самоцентрирующейся диафрагмы.

доказана применимость предложенных аппроксимирующих функций для описания локально деформированного профиля поверхности жидкости вне зависимости от источника и механизма деформации;

показана практическая значимость исследования в моделировании процессов теплопереноса в тонких слоях жидкости при использовании методов бесконтактной диагностики жидкостей;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

предложена усовершенствованная физико-математическая модель лазерно-индуцированной термокапиллярной конвекции в тонком слое жидкости, позволяющая предсказать форму деформации поверхности и время возникновения термокапиллярного разрыва в тонких слоях жидкости, вызванную локальным лазерным нагревом;

предложена аппроксимирующая функция, позволяющая описывать сложный профиль деформированной поверхности жидкости, позволяющая с высокой точностью определять центр симметрии деформации;

разработана оптическая жидкостная диафрагма, способная к саморегулированию своего положения относительно положения проходящего сквозь неё информационного сигнала;

доказана корректность предложенной физико-математической модели путём сравнения экспериментальных данных с результатами численного исследования;

использован комплекс численных и экспериментальных методик для расчёта профиля свободной поверхности жидкости в задаче о термокапиллярной деформации слоя;

изложены результаты расчётно-теоретического исследования, показывающие возможность прогнозирования формы термокапиллярной деформации в однослойной системе и времени возникновения термокапиллярного разрыва;

раскрыто влияние граничных условий лучистого теплообмена на межфазных границах жидкость-твёрдое тело и жидкость-жидкость на критическую толщину слоя, при которой происходит термокапиллярный разрыв/псевдоразрыв, а также время его формирования;

изучены основные режимы термокапиллярной конвекции, вызванной локальным нагревом межфазной границы жидкостей в двухслойных системах со свободной поверхностью;

показано, что за формирование третьего режима (затухающих колебаний) ответственно возникновение в системе жидкостей мелкодисперсной фазы — воздушных микропузырьков.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана и исследована лабораторная модель термокапиллярной оптофлюидной самоцентрирующейся диафрагмы;

создан эффективный способ описания профиля локально деформированной поверхности с помощью аппроксимирующей функции с целью точного определения центра термокапиллярной деформации, критически необходимого в задачах измерения физических параметров жидкостей;

представлены основные режимы протекания термокапиллярной конвекции в двухслойной системе со свободной поверхностью, что необходимо для отработки методов управления жидкостными оптическими элементами свободной формы;

обоснована возможность использования физико-математической модели термокапиллярной конвекции в тонком слое жидкости для прогнозирования времени разрыва слоя и определения формы его профиля, что вкуче с предложенной

аппроксимирующей функцией, необходимой для определения физических параметров жидкости в эксперименте.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты измерения свойств жидкости получены на сертифицированном тензометрическом оборудовании, показана воспроизводимость этих результатов;

теория построена на основе фундаментальных законов теплофизики и механики многофазных систем;

идея исследования заключается в повышении точности методов бесконтактного измерения физических параметров жидкостей с помощью экспериментальных и численных методов;

использованы апробированные подходы и данные экспериментальных работ отечественных и зарубежных авторов, осуществлено сравнение результатов моделирования с данными из эксперимента;

установлено качественное и количественное согласие результатов численного исследования с данными экспериментальных измерений профилей термокапиллярной деформации;

использованы современные методики обработки исходных данных, полученных с помощью высокоточного измерительного оборудования.

Личный вклад автора состоит в усовершенствовании физико-математической модели термокапиллярной конвекции в тонком слое жидкости с деформируемой поверхностью, учитывающей тепловые потери за счёт излучения и конвективного теплообмена в воздушной среде в условиях открытых границ расчётной области. Проведена верификация модели на экспериментально измеренных профилях деформации, показавшая высокую сходимость. Автором предложена и протестирована аппроксимирующая функция, позволяющая с высокой точностью описывать профиль деформированной поверхности жидкости, в том числе при наличии термокапиллярного разрыва. Обнаружен и описан новый режим термокапиллярной конвекции в двухслойной системе несмешивающихся жидкостей со свободной поверхностью — режим затухающих колебаний. Разработан

лабораторный образец термокапиллярной саморегулируемой оптической диафрагмы.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1) Физическая постановка задачи и анализ полученных результатов в главе 2 и части теплообмена отсутствуют. Не понятно была ли возможность рассчитать поля температуры в слоях жидкости и в стенках, распределения температуры и градиентов температуры вдоль свободных границ слоёв жидкости. Без этих данных невозможен полный и наглядный анализ процессов развития конвекции и деформации поверхности слоёв жидкости. Использование открытых внешних границ расчётной области и постановка условий сопряжения температуры и потоков тепла на границах раздела фаз подразумевает оценки теплоотдачи за счёт конвекции в газовую среду и её 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).

2) 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;

3) По всему тексту диссертационной работы на части кривых на рисунках присутствуют неопределенности. Какой тип погрешности они иллюстрируют (систематические, случайные)? Также следует объяснить, по какой причине на многих рисунках неопределенности не изображены.

Соискатель Ключев Д.С. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1) Физическая постановка задачи присутствует в главе 2.1 и является общей постановкой задачи для эксперимента и численного расчёта. Расчёт тепловых полей производился полностью внутри всей геометрии задачи, включающей и межфазные

границы системы, и внутренние области каждого её элемента. Расчётные радиальные распределения температуры на обратной стороне дна эбонитовой чашки были получены из расчёта;

2) Выбор этих функций обусловлен тем, что, во-первых, для описания профиля требуется кривая с точно известным центром симметрии. Во-вторых, при решении задачи о восстановлении профиля требовалась симметричная функция, наиболее точно повторяющая его форму;

3) При расчёте погрешностей для термокапиллярных деформаций учитывали все типы ошибок: случайные, систематические, приборные. В некоторых случаях неопределенности не изображены, так как погрешности для длительности переходных процессов открытия-закрытия диафрагмы достаточно малы и соизмеримы с размерами маркеров, что, конечно, не отменяет необходимости их указания, так что замечание вполне справедливо.

На заседании 08.06.2022 диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей значение для развития методов неразрушающего контроля, а также методов управления оптикой свободной формы, принял решение присудить Ключеву Д. С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 7 докторов наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника (физико-математические науки), участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 12, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

08.06.2022



Шабаров Александр Борисович

Удовиченко Сергей Юрьевич