

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук Руденко Юлии Константиновны

на тему: «Распространение тепла в поверхностном слое жидкости и

диагностика неизотермических течений на основе измерений полей
температуры»

по специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика
экстремальных состояний вещества

Актуальность темы исследования

Диссертация Руденко Юлии Константиновны посвящена экспериментальному, аналитическому и численному изучению неизотермических конвективных течений, генерируемых как приповерхностными линейными источниками, так и в результате локального ИК-нагрева поверхности жидкости при наличии/отсутствии поверхностных пленок. Отдельно соискателем проанализирована возможность восстановления параметров осесимметричной турбулентной струи как на основе численного решения уравнений гидродинамики с подставленным сглаженным экспериментальным полем температуры, так и с использованием физически-информированных нейросетей без предварительной фильтрации экспериментальных полей. Актуальность темы исследований не вызывает сомнений и обусловлена важным практическим значением рассматриваемых задач, например, для исследования теплоотвода от линейных источников нагрева, прогнозирования результатов термозондирования и лазерной очистки поверхностей.

Конвективные течения, инициированные воздействием линейных источников энергии или лазерного излучения на поверхность жидкости, требуют детального экспериментального и теоретического изучения. С точки зрения математического моделирования таких течений существенно возрастает ценность экспериментальных данных для валидации разработанных вычислительных кодов, а также возможных аналитических

решений при наличии определенных допущений с целью верификации используемой математической модели и алгоритмов решения. Поэтому наиболее эффективным способом изучения особенностей конвективного теплопереноса является совместное использование экспериментальных методов, аналитических подходов и вычислительных технологий гидродинамики и теплообмена.

Следует также отметить, что проведенные исследования полностью соответствуют нескольким направлениям Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, среди которых – переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении интеллектуальных производственных решений, роботизированных и высокопроизводительных вычислительных систем, новых материалов и химических соединений, результатов обработки больших объемов данных, технологий машинного обучения и искусственного интеллекта; а также переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников энергии, способов ее передачи и хранения.

С учетом всего вышесказанного, тема диссертационной работы Руденко Юлии Константиновны является важной и актуальной.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка использованной литературы. Работа изложена на 141 странице и содержит 60 рисунков. Список литературы включает 131 наименование.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описаны методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности результатов, представлены личный вклад автора и структура диссертации.

Первая глава содержит краткий обзор опубликованных работ, посвященных анализу конвективных течений и теплообмена в системах при наличии тепловыделяющих элементов. Отдельно соискатель подчеркнул, что измеренные температурные поля служат основой для описания свойств межфазной границы и восстановления параметров течения, что в работе используется, например, при изучении свободной и импактной осесимметричных турбулентных струй.

Во второй главе представлены теоретические, экспериментальные и численные результаты изучения конвективного течения и теплообмена вблизи поверхности жидкости при воздействии линейного источника энергии при наличии или отсутствии поверхностной пленки. В приближении пограничного слоя получены автомодельные решения как при наличии поверхностной пленки (термогравитационная конвекция), так и при отсутствии поверхностной пленки (термокапиллярная конвекция) в стационарных и нестационарных условиях. Численное моделирование проведено для случая переменной вязкости, теплопроводности и плотности как известной функции температуры методом конечных разностей. Экспериментальные измерения полей скорости проведены с использованием PIV метода, температурных полей – с помощью ИК-термографии, а рельефа поверхности – с применением метода moon-glade BOS. Сравнение экспериментальных, численных и теоретических результатов показало наличие областей хорошего согласования и зон существенного расхождения. Также показано, что конвекция Марангони является более эффективным механизмом переноса тепла вблизи источника нагрева по сравнению с конвекцией в жидкостях при наличии поверхностной пленки, блокирующей термокапиллярный механизм.

Третья глава посвящена численному, теоретическому и экспериментальному исследованию конвективного теплообмена в результате лазерного нагрева приповерхностной области при наличии или отсутствии поверхностной пленки. При математическом моделировании рассматриваемого процесса используются дифференциальные уравнения

Обербека–Буссинеска в цилиндрических координатах. Численное решение получено в пакете Comsol Multiphysics. Также как и во второй главе установлены автомодельные решения для термогравитационной конвекции и термокапиллярной конвекции. Экспериментальные измерения полей температуры проведены с использованием ИК-термографии, а мгновенные поля рельефа поверхности получены на основе moon-glade BOS метода. Показано, что от свойств межфазных поверхностей зависит скорость расплывания теплового пятна на поверхности жидкости, а также установлена возможность интенсификации теплообмена вблизи поверхности за счет выбора жидкости без пленки.

В четвертой главе предложены две методики восстановления параметров турбулентной осесимметричной вертикальной струи, основанные как на численном решении уравнений гидродинамики с подставленным сглаженным экспериментальным температурным полем, так и на использовании физически-информированных нейросетей без предварительной фильтрации экспериментальных полей. Для подбора оптимальных параметров нейросети были проведены эксперименты на синтетических данных, рассчитанных из RANS-моделирования с включенной k - ϵ моделью турбулентности в пакете Comsol Multiphysics. В результате продемонстрированы преимущества использования физически-информированных нейросетей для подробного анализа неизотермических течений.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы по проведенным исследованиям.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается использованием апробированных экспериментальных методик и вычислительных алгоритмов, корректностью математических постановок задач, а также сравнением результатов численного анализа с теоретическими и экспериментальными данными.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- получены новые автомодельные решения для стационарных и нестационарных конвективных течений, возникающих при воздействии линейного источника тепла, расположенного вблизи поверхности жидкости, и при ИК-нагреве поверхности жидкости при наличии или отсутствии поверхностных пленок;
- предложены и апробированы новые методики ассимиляции данных для восстановления параметров турбулентной осесимметричной вертикальной струи, основанные на численном решении уравнений гидродинамики с подставленным сглаженным экспериментальным температурным полем и на использовании физически-информированных нейросетей без предварительной фильтрации экспериментальных полей.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в

- получении автомодельных решений, которые можно использовать на практике при исследовании конвективных течений вблизи линейных источников энергии или в результате ИК-нагрева свободной поверхности жидкости без дополнительных длительных расчетов;
- разработке и апробации методики изучения неизотермических течений с применением физически-информированных нейронных сетей.

Содержание **автореферата** полностью отражает содержание диссертации, а сам автореферат отвечает всем предъявляемым требованиям.

Основные положения диссертации апробированы на всероссийских и международных конференциях. По результатам исследований опубликованы 32 работы, в том числе 6 научных статей – в изданиях, индексируемых в международной базе Web of Science (International Journal of Heat and Mass Transfer, Journal of Fluid Mechanics, International Journal of Thermofluids, Experiments in Fluids), 1 статья – в издании, индексируемом в базе данных RSCI (Процессы в геосредах), 25 публикаций в сборниках международных и всероссийских научных конференций.

Замечания к диссертационной работе

1. В главах 2–4 представлены разделы, посвященные математическому моделированию рассматриваемых неізотермических конвективных течений. К сожалению, соискатель не уделит должного внимания полной постановке краевых задач (геометрическая модель, определяющие дифференциальные уравнения с начальными и граничными условиями, используемые функциональные зависимости для физических параметров среды), а также верификации используемых численных алгоритмов на множестве сеток (нет анализа влияния шагов по времени и по пространству).

2. В главах 2–4 представлены разделы, посвященные экспериментальным исследованиям рассматриваемых неізотермических конвективных течений. Следовало более подробно (математически) описать анализ погрешности измерений.

3. При рассмотрении конвекции Марангони в работе предполагается линейная зависимость поверхностного натяжения от температуры. Для некоторых жидкостей поверхностное натяжение является нелинейной функцией температуры. Можно ли полученные результаты распространить и на этот случай?

4. Следовало уделить больше внимания причинам расхождения экспериментальных и численных результатов (рисунки 2.18–2.22, 2.31, 3.6–3.8, 4.8).

5. Не совсем понятна причина выбора RANS подхода с моделями турбулентности Спаларта-Аллараса и k - ϵ . В настоящее время в коммерческих пакетах можно выбирать более современных методики для моделирования турбулентных течений (LES, DES, гибридные подходы).

6. В тексте диссертации и автореферата встречаются опечатки и неточности. Например, в уравнениях (2.4) и (3.3); в подписях к рисункам 2.12–2.15, 2.23–2.27.

Заключение

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным

Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Таким образом, соискатель Руденко Юлия Константиновна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Официальный оппонент:

заведующий научно-исследовательской лабораторией
моделирования процессов конвективного теплопереноса
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет»
(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36,
(3822) 529-852, rector@tsu.ru, <http://www.tsu.ru>),
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
профессор

Шеремет Михаил Алек

01 ноября 2025 года

Е.В. Луков