

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

Работа Руденко Ю.К. посвящена исследованию механизмов развития сложных конвективных течений. Основное внимание в работе уделено развитию горизонтальной конвекции при различном граничном условии на разделе фаз, которое определяется физикой процессов, протекающих на деформируемой границе. Кроме того, исследуются методы панорамной визуализации неизотермических течений в контексте использования их результатов для решения обратных задач восстановления полного поля течения.

Задачи, поставленные перед диссертантом, являются актуальными для современной физики конвективных течений. Прикладное значение работы определяется возможностью использования результатов при оценке отвода тепла от линейных объектов, расположенных вблизи поверхности, в задачах зондирования поверхности жидкости на предмет наличия загрязняющих пленок, а также в теплофизике для быстрого анализа течений по ограниченному набору экспериментальных данных.

Работа состоит из вводной части, обзора литературы, трех глав с изложением основных результатов и заключения.

В обзоре литературы проведен анализ существующих методов исследования конвективных течений вблизи свободной поверхности, а

также моделей, используемых для описания таких течений. Большое внимание уделено предмету исследования диссертационной работы - влиянию термокапиллярных эффектов на течение в приповерхностном слое жидкости. Из обзора видно, что автор хорошо знаком с литературой в своей области. Из проведенного анализа ясно следует цель работы: разработка универсального аналитического аппарата для описания горизонтальной приповерхностной конвекции в простых геометрических конфигурациях.

Во второй главе приведены результаты теоретического и численного исследования течений, возникающих у поверхности при действии термогравитационного и термокапиллярного механизмов горизонтальной конвекции при нагреве жидкости линейным источником тепла. Приводятся автомодельные решения для пограничного слоя у поверхности раздела фаз. Решение получено для двух случаев: условия прилипания, которое имеет место при наличии пленки на поверхности жидкости, и условия Пирсона, связывающем нормальную компоненту скорости и поверхностное натяжение поверхностным натяжением. Решения сопоставлены с результатами численного моделирования уравнений Навье-Стокса для слабосжимаемой среды, продемонстрирована хорошая предсказательная сила аналитической модели в области ее применимости (на больших расстояниях от источника). Получены зависимости числа Нуссельта от характерных параметров задачи для обоих случаев: наличия и отсутствия пленки на поверхности жидкости.

В третьей главе описано решение задачи о радиальном распространении возмущений при точечном нагреве поверхности жидкости. Получено автомодельное решение для развития приповерхностного пограничного слоя в радиально-симметричном случае. Выполнено сопоставление характерных масштабов задачи для случая термокапиллярной конвекции и наличия поверхностной пленки. Результаты автомодельной задачи сопоставлены с моделированием и результатами измерения формы поверхности по отражению случайного фона. На малых

расстояниях от источника нагрева получено удовлетворительное согласие результатов моделирования и эксперимента, что говорит о правильности описания процессов на поверхности раздела фаз. Показано, что автомодельное "погранслойное" решение удовлетворительно работает на больших расстояниях от источника нагрева.

Четвертая глава посвящена развитию методов восстановления структуры неизотермического течения по панорамным данным о поле плотности среды. Данные о поле плотности получены с помощью теневого фонового метода, при этом восстановлению для осесимметричного течения подлежат средние по времени распределения продольной и радиальной скорости, давления, турбулентных коэффициентов переноса. В качестве модельного объекта выбрана круглая турбулентная горячая струя, истекающая в затопленное пространство при $Re \sim 1-3 \cdot 10^4$, а также течение, возникающее при взаимодействии струи с препятствием. Реализовано два подхода: решение обратной задачи для уравнений Навье-Стокса в приближении малых чисел Маха и аппроксимация данных с помощью физически-информированной нейросети. Удовлетворительные результаты, качественно совпадающие с результатами численного моделирования, получены для обоих подходов, при этом восстановление параметров с помощью нейросети показывает результаты, более устойчивые к шумам исходных данных.

В работе впервые получены следующие новые результаты

Предложены новые автомодельные решения для нестационарных конвективных течений, возникающих при наличии линейного источника тепла, расположенного вблизи поверхности жидкости, и при точечном нагреве свободной поверхности жидкости. Полученные в работе автомодельные решения, в отличие от ранее предложенных, описывают сопряженную задачу тепломассообмена и учитывают влияние

температурного поля на гидродинамическое течение. При их выводе впервые также учтены различные граничные условия на поверхности. Для жидкостей, в которых на поверхности присутствует пленка, показано, что условие прилипания правильно описывает течение и приводит к совпадению численных расчетов, экспериментальных данных и автомодельных решений. Для жидкостей, демонстрирующих термокапиллярную конвекцию Марангони, в качестве граничного условия подходит условие Пирсона. Полученные автомодельные решения позволяют вывести универсальные количественные зависимости для скорости распространения теплового фронта и для толщины пограничного слоя. Полученные зависимости могут быть использованы для сравнения интенсивности процессов теплопереноса для жидкостей с наличием пленки примесей на поверхности и при ее отсутствии.

В работе показано, что объемная конвекция эффективнее, чем поверхностная, однако вблизи источника тепла остается область, где гидродинамические потоки за счет поверхностных сил намного эффективнее, чем за счет силы Архимеда. Автомодельные решения для любого числа Прандтля позволяют определить длину, на которой преобладает конвекция Марангони по сравнению с горизонтальной конвекцией за счет градиента давления, а также получить зависимость числа Нуссельта от чисел Рэлея и Марангони.

Также предложены новые методики ассимиляции данных для турбулентных течений, позволяющие определить распределения турбулентных коэффициентов переноса, давления и скорости по экспериментально полученным с помощью ТФМ полям температуры и измеренным с помощью термоанемометра значениям скорости в выбранных точках. Предложены два метода предсказания полей искомых величин: численное решение обратной задачи на основе системы уравнений гидродинамики и физически-информированная нейросеть, для обучения которой используются экспериментальные поля температуры, граничные

условия и точечные измерения скорости. Методики оттестированы на простом объекте- цилиндрической осесимметричной струе.

По мнению оппонента, представленные в работе результаты развернуто иллюстрируют основные положения, выносимые на защиту, и в краткой форме сформулированы в выводах по работе. Полученные в работе результаты являются новыми и вносят существенный вклад в понимание конвективных течений у поверхности раздела фаз, а также расширяют существующие методы анализа экспериментальных данных в теплофизике и гидродинамике.

Считаю, что работа Руденко Ю.К. соответствует специальности **1.3.17 Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества**, а именно следующим ее направлениям: **пространственное строение и течение сред в окрестности межфазных границ.**

В целом, диссертационная работа Руденко Ю.К. оставляет впечатление законченной исследовательской работы. Автор владеет широким арсеналом методов исследования потоков в теплофизике, как в области эксперимента, так и в области теоретического описания и численного моделирования исследуемых течений.

Несмотря на очень хорошее, в целом, впечатление от диссертации, к работе есть несколько замечаний:

1) Предлагаемая методика ассимиляции данных термометрии с помощью нейросети требует подбора коэффициентов (обучения сети) каждый раз при изменении параметров исходной задачи, при этом подбор параметров занимает, по утверждению автора, 6 часов для достаточно простой конфигурации течения. В работе не показано, насколько устойчива обученная нейросеть к изменению характеристик течения. Также очень

мало сказано про робастность получаемых решений- их устойчивость к малым отклонениям входных данных. Иными словами, можно ли использовать результаты, полученные на одних струях, для быстрой экстраполяции переменных в других аналогичных течениях?

2) В работе не приведены ошибки и разрешения термоанемометра, использованного для измерения профилей скорости струи в третьей главе. Не вполне ясно, каким образом выполняются одновременные измерения температуры и скорости потока. Обычно, в этом случае используется либо методика измерений с варьированием перегрева нити, либо температура контролируется отдельным датчиком. Расположение и разрешение этого температурного датчика также не приводится в работе.

3) Уравнения пограничного слоя, очевидно, неприменимы непосредственно в зоне растекания замыкающего течения около источника тепла. Какие ограничения на валидность полученной интегральной оценки числа Нуссельта накладывает размер источника по сравнению с масштабом развития конвективного течения, $l = (\eta \chi \lambda / \rho g \beta q)^{0.5}$?

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.

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

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
с.н.с. лаборатории 21.3

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур РАН (ОИВТ РАН)

МОРАЛЕВ Иван Александрович



05.11.2025

Контактные данные:

тел.: 7(916)5971887, e-mail: morler@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.08 – Физика плазмы

Адрес места работы:

127412, г.Москва, ул. Ижорская, д. 13 стр.2,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный
институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН) Тел.: (495) 485-9009 ;

e-mail: alexeykiverin@ihed.ras.ru

Подпись сотрудника

ОИВТ РАН Моралева И.А. удостоверяю:

Ученый секретарь



А.Д. Киверин

05.11.2025