

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации 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

Диссертация Руденко Ю.К. посвящена фундаментальным и прикладным вопросам, тесно связанным с задачами конвекции и других процессов переноса в многофазных средах, имеющих множество приложений. Тема диссертации затрагивает широкий круг явлений и поэтому актуальна для ряда разделов механики, инженерных наук, химической физики, теплофизики, экологии и других областей современной науки и техники. В частности, разработанные в диссертации методические подходы могут быть использованы в современных технологиях аддитивного производства, где свойства выращиваемых путем послойной лазерной наплавки материалов и изделий во многом определяются гидродинамическими процессами конвекции в ванне расплава в поле лазерного излучения. Стоит также отметить, что наряду с несомненным прикладным значением научные положения, сформулированные в диссертации, вносят свой вклад в теоретическое понимание процессов, происходящих на границе раздела жидкости и газа, в частности, в таких достаточно полно изученных явлениях, как конвекция в слое жидкости с температурными градиентами.

Простота постановки задач в диссертации не мешает Руденко Ю.К. развивать новые теоретические и экспериментальные методы и получать с их помощью новые важные результаты. Автор в своих исследованиях активно применяет метод сравнения экспериментальных результатов с разработанными ею аналитическими моделями и результатами численного моделирования. Большая часть сформулированных в диссертации научных положений получена в результате такого сравнения.

Среди наиболее интересных результатов можно выделить полученные автором аналитические автомодельные решения уравнений гидродинамики

для различных нестационарных случаев конвекции, валидация которых проведена путем сравнения с достаточно полными экспериментальными данными и результатами численного моделирования. Кроме того, в диссертации разработан оригинальный метод восстановления распределений параметров трехмерного турбулентного потока по измеренным усредненным полям температуры и скорости путем ассимиляции данных с применением физически-информированных нейросетей.

Совокупность разработанных автором диссертации теоретических и экспериментальных методов можно квалифицировать как значительное методическое достижение, имеющее существенное значение в области физико-химической гидродинамики.

Диссертация Руденко Ю.К. содержит четыре главы, каждая из которых посвящена решению отдельной, связанной с остальными научной задачи.

Первая глава содержит литературный обзор экспериментальных и теоретических работ по приповерхностным конвективным течениям, включая численные результаты и аналитические рассуждения на основе автомодельных решений. Особое внимание уделено методам ассимиляции данных для восстановления параметров гидродинамических течений, в которых в качестве исходных данных используется поле температуры.

Во второй главе решается задача горизонтальной конвекции, возникающей в жидкостях с различными свойствами в сосуде с открытой поверхностью при расположении линейного источника тепла вблизи поверхности. Рассматриваются два механизма возникновения конвекции. При наличии эффекта «блокировки» поверхностных явлений конвекция возникает за счет перераспределения давления. В отсутствие «блокировки» действует термокапиллярный механизм конвекции Марангони. Оба случая были реализованы экспериментально, для определения поля течения использовались теневые фоновые методы, термометрия высокого разрешения, а также цифровая трассерная анемометрия.

Руденко Ю.К. был разработан аналитический подход к решению задачи конвекции путем нахождения нестационарных автомодельных решений. Точность полученных аналитических решений проверялась путем сравнения

с полученными экспериментальными данными и результатами численного моделирования.

В третьей главе исследуется, какое влияние свойства свободной поверхности жидкости могут оказать на течения в условиях радиальной конвекции, возникающей вследствие осесимметричного нагрева поверхности в центре сосуда пятном инфракрасного лазерного излучения. В данной экспериментальной реализации одновременно проводились измерения с помощью ИК-термографии высокого разрешения и теневого фонового метода для определения рельефа поверхности. В данной геометрии также было достигнуто хорошее согласие полученных аналитических решений с экспериментальными данными и результатами численного моделирования.

В четвертой главе описано восстановление характеристик турбулентного течения путем ассимиляции данных измерения температурного поля и скорости. Усредненное поле плотности турбулентного осесимметричного течения нагретого газа (в двух реализациях – свободная струя и струя, растекающаяся по плоской поверхности, расположенной поперек потока) измерялось с помощью теневого фонового метода. Трехмерное поле температур восстанавливалось из полученных данных с помощью обратного преобразования Абеля. Поле скоростей измерялось методом термоанемометрии с пространственным разрешением.

Рассматривались две методики восстановления параметров потока: с прямой подстановкой экспериментальных данных в уравнения гидродинамики и путем ассимиляции данных посредством физически-информированной нейросети (PINN).

Подстановка сглаженных различными способами полей температуры в уравнения позволила правильно восстановить структуру течения. Разница между результатами ассимиляции данных и численного моделирования была сравнима с разницей между результатами численного моделирования с использованием различных моделей турбулентности.

Во втором способе для ассимиляции данных используется физически-информированная нейросеть, которая обучается восстанавливать характеристики течения по исходным экспериментальным данным температуры и скорости без предварительной фильтрации. Нейросеть решала

задачу аппроксимации с большим числом неизвестных параметров. Использовалась многослойная полносвязная нейросеть. Восстановление течения производилось в предположении постоянного или переменного турбулентного числа Прандтля, с использованием различных экспериментальных данных по скорости течения. Подход с переменным турбулентным числом Прандтля с дополнительным профилем скорости позволил получить распределение турбулентного числа Прандтля напрямую из экспериментально измеренного поля средней температуры.

Все перечисленные в этом кратком обзоре основные результаты диссертации, полученные при непосредственном участии и определяющем вкладе Руденко Ю.К., обоснованно претендуют на новизну.

Справедливость научных положений диссертации не вызывает сомнений. Результаты опубликованы в ведущих научных изданиях в нашей стране и за рубежом, известны широкому кругу специалистов, получили достаточную апробацию на представительных всероссийских и международных научных конференциях.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание.

Принципиальных замечаний по содержанию диссертации нет.

Следует отметить некоторые частные недостатки.

1. При измерении мощности лазерного излучения, применявшегося для осесимметричного нагрева поверхности жидкости, не были использованы стандартные приборы. Измерение проводилось методом калориметрии с поглощением лазерного излучения на зачерненной поверхности; коэффициент излучения (поглощения) которой считался равным 0,95. Для длины волны лазера 10,6 мкм это значение выглядит завышенным, то есть измеряемая мощность лазерного излучения при измерении систематически занижалась на несколько процентов. С другой стороны, формулы на стр. 79-80, например, (3.25), показывают, что при определении коэффициента поглощения лазерного излучения в жидкости не было учтено френелевское отражение от поверхности, тем самым коэффициент поглощения лазерного излучения был завышен в среднем также на несколько процентов. В результате измеряемое значение плотности мощности энерговыделения получалось более точным там, где одна из указанных систематических

ошибок в большей степени компенсировала другую, и менее правильным в противоположном случае.

2. В диссертации употребляются термины «деионизированная» вода и «дистиллированная» вода без надлежащего объяснения. В списке литературы отсутствуют ссылки на ГОСТы, определяющие характеристики упомянутых степеней очистки воды. Поскольку примеси играют большую роль в рассматриваемых явлениях, правильно было бы не только сослаться на ГОСТы, а привести результат химического анализа примесей в исследуемых жидкостях. Также без должного разъяснения используется термин «блокировка» поверхности жидкости, суть которого заключается в полной или частичной компенсации термокапиллярного механизма конвекции за счет обратного действия термоконцентрационного механизма. Этот термин понятен только весьма узкому кругу специалистов, хотя имеет определенный и важный для понимания результатов диссертации физический смысл.

3. В четвертой главе для сглаживания данных при обратном преобразовании Абеля используется, в частности, усреднение по азимутальному углу. Корректная процедура преобразования без указанной операции возможна при гарантии осевой симметрии исследуемого потока, которая не обеспечивалась использованным оборудованием. Следовало дать обоснованную оценку ошибок, возникающих из-за отклонений потока от условий осевой симметрии.

Тем не менее, указанные замечания не могут повлиять на общую высокую оценку диссертации и справедливость сформулированных научных положений.

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 им. М.В. Ломоносова, а также оформлена 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 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:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН»

Якимов Михаил Юрьевич

20 октября 2025 г.

Контактные данные: тел.: 7(495)4338218, e-mail: yakimov@lantanlaser.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.02.05(1.1.9) Механика жидкости, газа и плазмы.

Адрес места работы:

119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1.

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН),
лаборатория лазерных разрядов

Тел.: +7 (495) 434-00-17; e-mail: ipm@ipmnet.ru; <http://www.ipmnet.ru>

Подпись сотрудника

веряю:

Ученый секретарь ИИ

М.А. Котов

20 октября 2025 г.