

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук

Соболевой Елены Борисовны

на диссертационную работу Сомова Сергея Андреевича

«Свободная конвекция паровоздушной смеси при испарении жидкости
и конденсации пара на границах замкнутой полости»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа С.А. Сомова посвящена экспериментальному исследованию свободной термоконцентрационной конвекции в газовых смесях, одна из компонент которых претерпевает фазовые превращения первого рода на границах замкнутой полости. Работа направлена на установление универсальных закономерностей конвективного движения и теплопередачи в таких системах, что имеет как фундаментальное, так и прикладное значение для понимания процессов в атмосфере, теплообменных аппаратах, ректификационных колоннах и других устройствах.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью расширения фундаментальных знаний о связанных процессах тепло- и массопереноса в газовых смесях с фазовыми превращениями. Наличие испарения и конденсации компонента смеси принципиально меняет картину течения и теплопередачи по сравнению с естественной конвекцией, обусловленной только температурным градиентом. При этом экспериментальные исследования в данной области крайне немногочисленны, а имеющиеся теоретические модели часто дают лишь качественное описание явлений. Практическая значимость работы определяется необходимостью проектирования эффективных теплообменных устройств, систем климатического контроля и утилизации тепла, где конвекция влажного воздуха играет ключевую роль.

В диссертации представлены постановка задачи, описание экспериментальных методов и их теоретическое обоснование, конструктивные особенности экспериментальной установки и методика экспериментов, сформулированы основные результаты. Текст диссертации написан в научном стиле, работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы (158 наименований) и два приложения. Общий объем диссертации составляет 124 страницы, включая 36 рисунков.

Во **введении** представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту. Особого внимания заслуживает аргументированный выбор рабочих сред – осушенного воздуха, а также его смесей с парами воды и ундекана, что позволяет сравнить влияние легкой (вода) и тяжелой (ундекан) примеси на характеристики конвекции.

Первая глава содержит обширный обзор литературы по термогравитационной и термоконцентрационной конвекции, с акцентом на экспериментальные работы. Систематизированы методы исследования конвекции прозрачных сред: термодиффузионный, PIV, интерферометрический и теневые методы. Обоснован выбор голографической интерферометрии в сочетании с термодиффузионными измерениями для решения поставленных задач. Отдельное внимание уделено сравнению свойств сухого и влажного воздуха, показано, что при температурах до 50°C их теплофизические характеристики практически не отличаются, однако, как показано в последующих главах, наличие фазовых превращений даже малой фракции пара может существенно влиять на конвективный теплоперенос.

Во **второй главе** подробно описана экспериментальная установка и методика измерений. Автором самостоятельно спроектирован и изготовлен конвектор в форме вытянутого параллелепипеда квадратного сечения 15×15×320 мм с теплоизолированными стенками и

горизонтальными медными теплообменниками. Создан голографический интерферометр реального времени для визуализации конвективных течений. Реализована вспомогательная система осушения воздуха с использованием силикагелевого фильтра, что позволило контролировать влажность на уровне 4-7%. Приведено подробное описание алгоритма измерений, включая регистрацию интерферограмм и термодинамических сигналов. Важным результатом главы является успешное прохождение тестовых испытаний на эталонной задаче о конвекции Рэлея-Бенара для сухого воздуха. Экспериментально получено критическое число Рэлея $Ra^* = 1680 \pm 55$, что хорошо согласуется с теоретическим значением 1708 и классическими данными. Измерена зависимость числа Нуссельта от теплового числа Рэлея $Nu(Ra_T)$ непосредственно за порогом устойчивости и показано, что она с высокой точностью соответствует известной универсальной кривой. Выполнено численное моделирование двумерной конвекции сухого воздуха двухполевым методом (функция тока – вихрь) в приближении Обербека-Буссинеска. Сравнение расчетных и экспериментальных интерферограмм показало хорошее количественное совпадение, что подтверждает реализацию в ячейке именно одиночного квазидвухмерного конвективного вала и высокое качество изготовления установки.

Третья глава посвящена исследованию термоконцентрационной конвекции газовых смесей воздуха с парами воды и ундекана. Для обеспечения экспериментов с фазовыми превращениями автором разработаны оригинальные конструктивные решения: поддерживается тонкий слой жидкости на нижнем теплообменнике (источник пара) и специальный дренажный теплообменник с капиллярными канавками на верхней стенке (сток пара), что позволяет осуществлять замкнутую циркуляцию конденсата. Предотвращение конденсации на оптических элементах реализовано с помощью полиимидных нагревателей. Предложена и экспериментально обоснована методика определения отношения концентрационного и теплового чисел Рэлея $\xi = Ra_C / Ra_T$ для каждой смеси. Ключевой идеей является то, что в условиях фазовых превращений давление насыщенных паров зависит только от температуры, поэтому Ra_C и Ra_T оказываются функционально связанными. Экспериментально получены зависимости отношения чисел Рэлея от средней температуры $\xi(T_0)$: для смеси воздух-водяной пар это полином 3-й степени, для смеси воздух-ундекан – полином 2-й степени. Показано, что при $T_0 = 25^\circ\text{C}$ пренебрежение концентрационным механизмом приводит к ошибке в оценке эффективного числа Рэлея для влажного воздуха примерно в 50%, а при $T_0 \geq 80^\circ\text{C}$ конвекция становится практически полностью концентрационно-обусловленной ($Ra_C \sim 10Ra_T$).

Четвертая глава содержит результаты исследования теплопередачи при свободной конвекции газовых смесей с фазовыми превращениями. Автором обнаружен и разрешен важный парадокс: в смеси воздух-водяной пар показания боковых дифференциальных термодатчиков и датчика теплового потока регистрируют начало конвекции при различных значениях ΔT . В работе предложена физическая интерпретация этого эффекта, связанная с существенным вкладом молекулярных механизмов переноса – термодиффузии и потока Стефана – в общий тепловой поток. Разработана методика коррекции сигналов с датчика теплового потока, позволяющая выделить конвективную составляющую теплопереноса. Показано, что при градиентах температуры больше 300 К/м вклад термодиффузии в теплопередачу влажного воздуха становится сопоставимым с вкладом макроскопического конвективного течения. Для смеси воздух-ундекан такие поправки оказались пренебрежимо малыми из-за низкого давления насыщенных паров. В итоге все экспериментальные данные о теплопередаче для обеих смесей удалось представить в виде универсальных параметрических зависимостей $Nu(Ra_E)$, где $Ra_E = Ra_T + Ra_C$ – эффективное число Рэлея. Показано, что в надкритической области при $Ra_E \leq 3.5 \times 10^3$ зависимости $Nu(Ra_E)$ с высокой точностью аппроксимируются степенными функциями с коэффициентами, зависящими от средней температуры и природы смеси.

В **заключении** подведены итоги проведённого исследования, сформулированы основные результаты и выводы, намечены пути дальнейшего развития исследований по выбранной теме.

В **приложение** вынесены вспомогательные материалы: код программы численного моделирования тепловой гравитационной конвекции сухого воздуха двухполевым методом (функция тока – вихрь) в приближении Обербека-Буссинеска на языке Python (Приложение А) и голографические интерферограммы, полученные для различных температурных режимов (Приложение Б).

Научная новизна работы не вызывает сомнений и заключается в следующем:

1. Впервые выполнено экспериментальное сравнение термогравитационной конвекции осушенного воздуха и термоконцентрационной конвекции его смесей с парами воды и ундекана, претерпевающими фазовые превращения на границах замкнутой полости с рециркуляцией конденсата.
2. Впервые измерены параметрические зависимости отношения R_{ac}/R_{at} для смесей воздуха с парами воды и ундекана в условиях фазовых превращений на стенках полости; они представлены, соответственно, как полиномы температуры 3-й и 2-й степени.
3. Впервые экспериментально измерена и описана теплопередача при термоконцентрационной конвекции указанных смесей с фазовыми превращениями в виде степенной зависимости $Nu(Ra_E)$, где $Ra_E = Ra_T + Ra_C$.
4. Экспериментально продемонстрировано, что при градиенте температуры не меньше 300 К/м вклад термодиффузии и потока Стефана в теплопередачу смеси «воздух-водяной пар» сопоставим с вкладом конвективного подъемно-опускного течения, что требует коррекции измерений для корректного выделения конвективной составляющей.

Научная и практическая значимость диссертации заключается в получении новых экспериментальных данных о конвективном движении и теплопередаче в газовых смесях с фазовыми превращениями, необходимых для проектирования теплообменников, ректификационных колонн, систем карбюрации топлива и других устройств. Полученные результаты могут быть использованы для верификации теоретических моделей конвекции влажного воздуха, в том числе применительно к задачам физики атмосферы. Разработанная экспериментальная методика, сочетающая голографическую интерферометрию, термопарные измерения и численное моделирование, может быть применена для исследования других газовых смесей.

Высокая степень **обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**, а также **достоверности результатов** обеспечена тщательной подготовкой экспериментов, использованием апробированных методик измерения температуры и теплового потока, применением голографического интерферометра реального времени, успешным прохождением тестовых испытаний на эталонной задаче о конвекции сухого воздуха, а также совпадением измеренных критических чисел Рэлея и зависимостей $Nu(Ra_T)$ с известными литературными данными. Дополнительную верификацию обеспечило численное моделирование двумерной конвекции, показавшее хорошее согласие расчетных и экспериментальных интерферограмм. Проверка измерительной аппаратуры, калибровка термопар и использование стандартных методик расчета теплофизических свойств газовых смесей подтверждают корректность полученных количественных результатов.

Результаты исследования прошли широкую **апробацию** на всероссийских и международных конференциях, включая Зимние школы по механике сплошных сред (Пермь, 2019, 2021, 2025), Пермские гидродинамические научные чтения (2020, 2022, 2025), международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, 2024) и другие. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из которых 3 статьи в журналах,

По тексту и содержанию диссертации имеются **замечания**.

1. В диссертационной работе на основе проведенных исследований получено выражение (2.6), которое описывает зависимость числа Нуссельта от теплого числа Рэлея $Nu(Ra_T)$ для сухого воздуха за порогом устойчивости. Можно заметить, что (2.6) (вторая строка) не выходит на порог устойчивости. При критическом числе Рэлея Ra^* должно быть число Нуссельта $Nu=1$. В диссертации определено, что $Ra^* = 1680 \pm 55$; при предельных значениях Ra^* получается $Nu < 1$. В то же время кривая и экспериментальные точки на рисунке 2.10 показывают начало роста числа Нуссельта от значения $Nu=1$.

Кроме того, для сравнения приводится зависимость $Nu(Ra_T)$ из литературного источника [10] (Silveston P.L., 1958) – это выражение (1.7). Сразу за порогом устойчивости используется вторая строка (1.7), которая также не обеспечивает переход к пороговым значениям и при критическом числе Ra^* дает $Nu < 1$. Можно посоветовать в дальнейшем рассмотреть и другие литературные данные, более современные и точные. Например, зависимость $Nu(Ra_T)$ для воздуха приведена в книге: Джалурия Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен. М.: Мир, 1983 (см. стр. 285).

2. В формулах и выражениях присутствует концентрация C . Известно, что не существует единого понятия концентрации. Это может быть суммарная масса молекул какого-либо компонента в единице объема смеси, т.е., величина с размерностью плотности. Может быть безразмерная величина, например, массовая или мольная доля. Численные значения C , по которым можно было бы судить о размерности данной величины, не приводятся. В тексте следовало бы пояснить, что понимается под концентрацией в диссертационной работе.

3. Соискатель создал вычислительный код для моделирования тепловой гравитационной конвекции сухого воздуха на основе приближения Обербека-Буссинеска и провел сравнение численных результатов с экспериментальными. Приближение Обербека-Буссинеска применяется в случае малых изменений плотности среды, однако непонятно, насколько варьируется плотность воздуха в конвективной ячейке в условиях экспериментов. Для обоснования применимости приближения Обербека-Буссинеска соответствующие оценки были бы желательны.

4. Обнаружено несколько неточностей в оформлении текста:

- а). в (2.2) на стр. 46 оценивается размерная величина, но размерность не указана;
- б). на рис. 4.2 на стр. 90 можно предположить, что штриховая линия соответствует температуре $T_0 = 25^\circ\text{C}$, а не $T_0 = 35^\circ\text{C}$;
- в). не указано, в каких единицах следует брать температуру T_0 в (4.2) на стр. 90 и в (4.13) на стр. 98.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы и не влияют на справедливость основных выводов. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, содержит значительный объем оригинальных экспериментальных данных, полученных с использованием современной и тщательно откалиброванной аппаратуры.

Заключение. Диссертационная работа С.А. Сомова является законченным научно-квалификационным исследованием в области экспериментальной гидродинамики и теплофизики газовых смесей с фазовыми превращениями. Автором самостоятельно разработана экспериментальная методика, создана уникальная лабораторная установка, получены новые результаты, имеющие важное значение для понимания конвективных процессов в парогазовых системах. Разработанный подход к коррекции тепловых потоков с учетом термодиффузии и

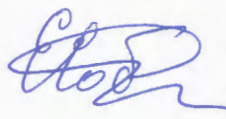
потока Стефана представляет собой существенный вклад в методику экспериментальных исследований конвекции многокомпонентных сред.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные положения.

Таким образом, представленная диссертационная работа «Свободная конвекция паровоздушной смеси при испарении жидкости и конденсации пара на границах замкнутой полости» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Сомов Сергей Андреевич – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент

Соболева Елена Борисовна, ведущий научный сотрудник лаборатории механики сложных жидкостей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук;
адрес: 119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1, ИПМех РАН,
www.ipmnet.ru
Тел.: +7(495)434-00-17
E-mail: ipm@ipmnet.ru

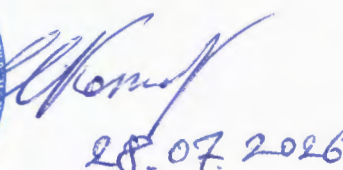


Е.Б. Соболева

28 июля 2026 г.

Подпись Е.Б. Соболевой заверяю

Ученый секретарь ИПМех РАН
к.ф.-м.н.



28.07.2026

М.А. Котов