

Отзыв официального оппонента

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 Сомова С. А. посвящена экспериментальному исследованию конвекции смеси воздуха и пара воды или ундекана в условиях испарения жидкости и конденсации ее пара. Конвекция в газовых смесях возникает вследствие неоднородности распределения концентрации или температуры. Каждый механизм возбуждения конвекции учитывается в уравнениях гидродинамики с помощью соответствующих чисел Рэлея. В диссертационной работе рассматривается особый случай, когда в замкнутой полости пар одновременно образуется и исчезает вследствие испарения и конденсации около горячего и холодного теплообменников. В такой постановке пар является насыщенным и, следовательно, его концентрация является функцией только температуры, а числа Рэлея, характеризующие два механизма возбуждения конвекции, оказываются связанными друг с другом. Тогда возникновение конвекции можно описать единственным параметром – отношением чисел Рэлея. Автор диссертации решает задачу нахождения температурной зависимости этого управляющего параметра для двух газовых смесей – воздуха и водяного пара или пара ундекана. Задача решена экспериментально с использованием оригинальной экспериментальной установки, позволяющей изучать тепловые процессы внутри конвективной ячейки различными способами, в том числе посредством голографической интерферометрии и с помощью термопар и датчика теплового потока. Помимо решения указанной задачи также определена структура конвективного течения в ячейке – газовая смесь вращается внутри однородного по длине ячейки вала. Наконец, для заданной геометрии конвективной ячейки определен закон теплопередачи в газовых смесях в виде зависимости числа Нуссельта от эффективного числа Рэлея (суммы теплового и концентрационного чисел Рэлея). Для решения этой задачи подробно рассмотрен механизм передачи тепла в двухкомпонентной газовой смеси с учетом возможности возникновения термодиффузии и потока Стефана.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (158 наименований) и двух приложений. Объем диссертации составляет 124 страницы, включая 36 рисунков.

Во *введении* дается обоснование актуальности и практической значимости исследования, а также формулируются цель и задачи работы. Изложены защищаемые научные положения.

В *первой главе* приводится обзор экспериментальных работ, посвящённых тепловой конвекции воздуха и концентрационной конвекции газовых смесей на его основе в замкнутых полостях. Обсуждается использование эффективного числа Рэлея (суммы теплового и концентрационного чисел Рэлея) в качестве управляющего параметра задачи о возникновении термоконцентрационной конвекции в газовой смеси.

Вторая глава содержит подробное описание конструкции экспериментальной установки, обзор экспериментальных методов для изучения динамики воздуха и паров воды

и ундекана в конвективной ячейке и протокол проведения экспериментов с сухим воздухом. Для визуализации течения воздуха используется голографическая интерферометрия, для определения порога возникновения конвекции – комплекс дифференциальных термодпар, для измерения теплопередачи – датчик плотности теплового потока. Эксперименты, проведенные с сухим воздухом, позволяют провести апробацию экспериментальной установки и техники измерений. В частности, получено критическое число Рэлея возникновения гравитационной конвекции, которое хорошо согласуется со справочными данными.

Третья глава содержит описание экспериментальных результатов с воздухом и парами жидкостей, претерпевающими фазовые превращения. Сравнение результатов по изучению конвекции сухого воздуха и конвекции в его смесях с парами жидкостей показывает, что при одинаковой средней температуре воздуха в ячейке конвекция в смесях возникает при меньшем перепаде температур между теплообменниками. Показано, что добавление даже небольшого количества водяного пара в воздух при комнатной температуре может привести к значительной (десятки процентов) погрешности в определении порога возникновения конвективного движения. В экспериментах с воздухом и добавленным паром ундекана вклад последнего в развитие конвективного движения намного меньше.

В *четвёртой главе* обсуждаются результаты экспериментов со смесями воздуха и водяного пара или пара ундекана по изучению зависимости числа Нуссельта от эффективного числа Рэлея. Большое внимание уделяется интерпретации данных, полученных от дифференциальных термодпар и датчика теплового потока. Выяснено, что в экспериментах по изучению теплопроводного режима теплопередачи при расчете числа Нуссельта должна быть учтена поправка, связанная с возникновением термодиффузии в смеси воздуха и пара. В экспериментах, когда теплопередача в ячейке происходит конвективным путем, требуется внести дополнительную поправку, связанную с возникновением потока Стефана вблизи поверхности жидкости около горячего теплообменника. Окончательно, поправки в расчет числа Нуссельта имеют значимую величину только в экспериментах с водяным паром, но незначительны в экспериментах с ундеканом.

Заключение включает в себя итоги диссертационного исследования, в том числе подчеркивается, что все проведенные эксперименты и полученные результаты новые, а поставленные задачи решены.

В *Приложении А* приведен код программы, предназначенной для нахождения формы двумерного конвективного течения сухого воздуха в ячейке. *Приложение Б* содержит интерферограммы, полученные в экспериментах со смесью воздуха и водяного пара или пара ундекана.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации. Изложенные автором научные положения и выводы ясно сформулированы и полностью обоснованы. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена совместным использованием разнообразных методов измерений, воспроизводимостью и повторяемостью экспериментальных данных, а также согласием полученных результатов с данными собственных численных расчетов и данными, полученными из независимых источников.

Новизна исследований и полученных результатов. Впервые выполнено экспериментальное сравнение гравитационной конвекции воздуха и концентрационной конвекции смесей воздуха с паром воды или ундекана, претерпевающими фазовые превращения. Получены зависимости поправки на вычисление критического числа Рэлея от температуры для смесей воздуха с паром воды или ундекана, претерпевающих фазовые превращения. Получены зависимости числа Нуссельта от эффективного числа Рэлея в смесях воздуха с паром воды или ундекана, претерпевающих фазовые превращения, с учетом поправок, вносимых в расчет числа Нуссельта в связи с возникновением в смесях термодиффузии и потока Стефана.

Практическая значимость работы заключается в получении новых данных о конвективном движении и теплопередаче, которые могут быть использованы при проектировании устройств, в которых присутствуют смеси воздуха и пара воды или пара ундекана, претерпевающих фазовые превращения первого рода, например, в теплообменниках и ректификационных колоннах. Новые результаты могут быть полезны для верификации моделей конвекции влажного воздуха.

Автореферат в достаточной степени отражает содержание диссертации.

Апробация результатов. Результаты исследований докладывались на многочисленных всероссийских и международных научных конференциях.

Публикации. Материалы диссертации изложены в 14 работах, 3 из которых – журналы из списка ВАК, 6 – журналы, индексируемые Scopus и Web of Science.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации. Диссертация Сомова С. А. представляет собой хорошо структурированный заверченный научный труд, имеющий ценность для научного сообщества и перспективу применения при проектировании технических устройств.

В тексте диссертации имеется незначительное количество описок и опечаток, которые не влияют на восприятие текста и здесь не приводятся. В то же время к тексту работы имеются вопросы и замечания:

1. В диссертации приведено очень подробное описание технических характеристик экспериментальной установки, в том числе присутствуют схематические изображения ее компонентов. Однако, для лучшего представления конвективной ячейки читателю можно было добавить ее фотографии рядом с рисунками 2.2 и 2.3.

2. В диссертации изучается конвективное течение влажного воздуха внутри длинной ячейки. На основании показаний (всего) двух дифференциальных термопар сделан вывод о том, что в установившемся режиме внутри ячейки существует один однородный по всей длине ячейки конвективный вал. Представляется, что для повышения достоверности сделанного заключения о структуре конвективного течения следовало бы увеличить количество термопар, расположенных в разных точках около длинной стенки ячейки. Использование дополнительных термопар могло бы помочь исключить возможность существования многовальных течений.

3. В экспериментах с влажным воздухом верхний теплообменник охлаждается до температуры, при которой начинается пристеночная конденсация пара. Автор диссертации использует остроумную конструкцию теплообменника для воспрепятствования падения капель на дно ячейки, так что конденсат течет вниз по боковым стенкам. Может ли такое «капельное» течение возмущать конвективное движение в воздухе и искажать показания термопар?

4. На стр. 84 при оценке величины критерия Кутателадзе используется неверное значение удельной теплоемкости воды. Эта ошибка (или описка) не влияет на оценку указанного критерия, но побуждает высказать пожелание автору диссертации внимательнее относиться к справочным данным и вычислениям.

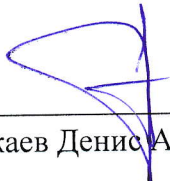
5. В тексте диссертации присутствуют утверждения, субъективно кажущиеся излишне категоричными. Например, на странице 25 указано, что «лабораторный эксперимент – это единственный достоверный источник количественной информации о конвекции, особенно если одним из компонентов исследуемой смеси является водяной пар». Утверждения подобной степени категоричности можно встретить также на стр. 19 (вывод по разделу 1.1.) и 41 (первое предложение).

6. Замечание к графическому представлению результатов экспериментов – отсутствие указаний на погрешности измерений.

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Общее заключение. Диссертация «Свободная конвекция паровоздушной смеси при испарении жидкости и конденсации пара на границах замкнутой полости», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является завершённой научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата наук, а ее автор, Сомов Сергей Андреевич, заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук, заведующий
кафедрой физики и технологии ФГБОУ ВО
«Пермский государственный гуманитарно-
педагогический университет»


Полежаев Денис Александрович
03.09.2026

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский государственный гуманитарно-
педагогический университет», 614990, г. Пермь, ул.
Сибирская, 24
e-mail: polezhaev@pspu.ru, +7 919 7 100 101

Подпись Полежаева Д. А. заверяю

Проректор по научно-методической работе и
академическому взаимодействию ФГБОУ ВО «ПГПИУ»
Сарапулов А. Н.

