

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 23.09.2026 № 183

О присуждении Сомову Сергею Андреевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Свободная конвекция паровоздушной смеси при испарении жидкости и конденсации пара на границах замкнутой полости» по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 03.07.2026, протокол № 176, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018.

Соискатель Сомов Сергей Андреевич 1994 г. рождения, в 2018 г. с отличием окончил магистратуру ФГБОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет" по направлению подготовки «Радиофизика». В 2022 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в ФБГУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" по научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. В настоящее время работает инженером лаборатории динамики дисперсных систем Института механики сплошных сред УрО РАН. Диссертация выполнена в ФБГУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук".

Научный руководитель – д.ф.-м.н., доцент, заведующий лабораторией динамики дисперсных систем ИМСС УрО РАН Иванов Алексей Сергеевич.

Официальные оппоненты:

1. Соболева Елена Борисовна, доктор физико-математических наук (01.02.05), ведущий научный сотрудник лаборатории механики сложных жидкостей ФБГУН "Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН", г. Москва;
 2. Полежаев Денис Александрович, кандидат физико-математических наук (01.02.05), доцент, заведующий кафедрой физики и технологии ФГБОУ ВО "Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет", г. Пермь;
- дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук" (ИТ СО РАН), г. Новосибирск, в своем положительном заключении, составленном главным научным сотрудником лаборатории интенсификации процессов теплообмена д.ф.-м.н. В.С. Бердниковым; главным научным сотрудником лаборатории термогазодинамики д.т.н. В.И. Тереховым, и утвержденном директором ИТ СО РАН,

д.ф.-м.н., профессором, академиком РАН Д.М. Марковичем, указала, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области термогравитационной конвекции. Актуальность темы объясняется практической значимостью процессов испарения и конденсации в теплообменных аппаратах, ректификационных колоннах и устройствах карбюрации топлива. Выполненные исследования вносят важный вклад в механику жидкости, газа и плазмы, способствуя пониманию связанных процессов тепло- и массопереноса в бинарных газовых средах при наличии термодиффузии и потока Стефана. Представленная диссертационная работа «Свободная конвекция паровоздушной смеси при испарении жидкости и конденсации пара на границах замкнутой полости» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Сомов Сергей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискателем по теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. **Somov S.A.**, Ivanov A.S. Heat flow measurements in gas mixtures of air with undecane or water vapor exhibiting phase transitions // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2025. Vol. 89, № S1. P. S34-S40. (Scopus, BAK)

В работе представлены экспериментальные данные по теплопередаче в смесях воздух–ундекан и воздух–водяной пар при фазовых превращениях. Предложены корректирующие формулы для выделения конвективной составляющей теплового потока и получены параметрические зависимости числа Нуссельта от эффективного числа Рэлея для обеих смесей. Авторский вклад Сомова С.А. в публикацию составляет 50%.

2. **Сомов С.А.**, Иванов А.С. Получение и сравнение расчетных и экспериментальных голографических интерферограмм для описания квази-2D конвективного течения прозрачной газовой смеси // Вычислительная механика сплошных сред. 2025. Т. 18, № 2. С. 214-224. (Scopus, BAK)

В работе выполнено численное моделирование двумерной конвекции сухого воздуха двухполюсным методом. Путём прямого сравнения расчётных интерферограмм с экспериментальными доказано, что в конвективной ячейке реализуется устойчивое одновихревое квази-двумерное течение, что обосновывает корректность интерпретации термодинамических измерений. Авторский вклад Сомова С.А. в публикацию составляет 50%.

3. **Somov S.A.**, Ivanov A.S. Experimental study of thermoconcentration convection in air-water and air-undecane mixtures // Physics of Fluids. 2024. Vol. 36, № 10. Art. id. № 104104. (Scopus, WoS Q1)

Экспериментально получены параметрические зависимости отношения концентрационного и теплового чисел Рэлея от температуры для смесей воздух–водяной пар и воздух–ундекан. Показано, что с ростом средней температуры вклад концентрационного механизма возрастает и при достаточно высоких температурах становится доминирующим. Авторский вклад Сомова С.А. в публикацию составляет 50%.

4. **Somov S.A.**, Ivanov A.S. Experimental study of dehumidified air convection by holographic

and thermocouple methods // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1945. Art. id. № 012055. (Scopus)

В работе приведены результаты поверочных испытаний на осушенном воздухе. Получены критическое число Рэлея и зависимость числа Нуссельта от теплового числа Рэлея, хорошо согласующиеся с классическими данными. Описана оригинальная конструкция верхнего теплообменника с дренажными канавками для рециркуляции конденсата, предназначенная для экспериментов с влажным воздухом. Авторский вклад Сомова С.А. в публикацию составляет 50%.

5. **Somov S.A.**, Ivanov A.S., Goncharov M.M., Kondrashov A.N. Experimental study of thermal convection in dry air by holographic interferometry method // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1809. Art. id. № 012033. (Scopus)

В работе представлены экспериментальные интерферограммы конвективных течений в сухом воздухе при различных средних температурах и перепадах температур. Показано, что интенсивность конвекции уменьшается с ростом средней температуры. Выполнена численная обработка интерферограмм для восстановления поля показателя преломления. Авторский вклад Сомова С.А. в публикацию составляет 50%.

6. **Сомов С.А.**, Иванов А.С. Исследование термоконцентрационной конвекции во влажном воздухе методом голографической интерферометрии // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 2. С. 48-56. (БАК)

В работе выполнены численные оценки числа Рэлея, обоснованы оптимальные параметры экспериментальной установки. Приведены экспериментальные интерферограммы, демонстрирующие возможность визуализации конвекции во влажном воздухе в реальном времени. Авторский вклад Сомова С.А. в публикацию составляет 50%.

7. **Somov S.A.**, Ivanov A.S. Experimental setup for studying thermosolutal convection in moist air // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 581. Art. id. № 012016. (Scopus)

В работе представлено описание разработанной экспериментальной установки: конвективная ячейка, голографический интерферометр реального времени, система термопар и датчик теплового потока. Приведены расчёты теплофизических свойств воздуха с использованием справочных данных и полуэмпирических формул. Авторский вклад Сомова С.А. в публикацию составляет 50%.

Публикации содержат в сумме 59 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Соболевой Е.Б. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечены актуальность темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, высокая степень обоснованности и достоверности результатов. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- по зависимости $Nu(RaT)$ для сухого воздуха: формула (2.6) не обеспечивает переход к пороговому значению $Nu=1$ при Ra^* ; рекомендовано использовать более современные данные, например, из книги Джалурия (1983);

- не указано, какая именно концентрация C используется (массовая, мольная доля и т.п.), и её размерность;
- не приведены оценки изменения плотности воздуха для обоснования применимости приближения Обербека–Буссинеска;
- неточности оформления: в (2.2) не указана размерность; на рис. 4.2, можно предположить, что перепутаны обозначения $T_0=25^\circ\text{C}$ и 35°C ; не указаны единицы температуры в (4.2) и (4.13).

2. Положительный отзыв официального оппонента Полежаева Д.А. В отзыве отмечено, что диссертация представляет собой хорошо структурированный завершённый научный труд, имеющий ценность для научного сообщества и перспективу применения при проектировании технических устройств. Подтверждены обоснованность и достоверность результатов, научная новизна, а также практическая значимость для проектирования теплообменников и ректификационных колонн. Оппонент отмечает следующие замечания:

- для лучшего представления конвективной ячейки можно было добавить её фотографии рядом с рис. 2.2 и 2.3;
- для повышения достоверности вывода о структуре течения (одиночный вал) следовало бы увеличить количество термопар вдоль длинной стенки ячейки;
- вопрос: может ли «капельное» течение конденсата по боковым стенкам возмущать конвективное движение и искажать показания термопар;
- на стр. 84 при оценке критерия Кутателадзе использовано неверное значение удельной теплоёмкости воды;
- ряд утверждений в тексте представляются излишне категоричными (стр. 19, 25, 41);
- замечание к графическому представлению результатов — отсутствие указаний на погрешности измерений.

3. Положительный отзыв ведущей организации ИТ СО РАН. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области термогравитационной конвекции. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- обзор не в полной мере соответствует заявленному тезису о перечислении основных экспериментаторов; содержится ряд отступлений, не имеющих прямого отношения к теме;
- встречаются некорректные выражения (например, о свободной конвекции как следствии восстановления равновесия; о том, что конвекция Рэлея–Бенара была «изучена» более 100 лет назад);
- не обсуждена возможность реализации пространственной формы течения (рис. 2.6в) и не приведено обоснование, почему экспериментально наблюдается вал, ориентированный по продольной оси полости, а критическое число Рэлея близко к значению для неограниченного слоя;
- неясно, не растворяется ли силиконовая смазка на боковых стенках в воде и ундекане и как её следы влияют на поверхностное натяжение и испарение; что происходит с конденсатом на вертикальных стенках с ростом температуры;
- утверждение о том, что численное моделирование не выявило признаков альтернативных мод течения, не имеет смысла, так как по постановке задачи эти моды исключены;
- не оценён термокапиллярный эффект (число Марангони) и не приведены данные о

количестве испаряющейся жидкости и вкладе теплоты фазового перехода;

- оценки числа Нуссельта требуют более глубокого анализа, в частности, оценки критерия Кутателадзе недостаточно для адекватного учёта роли теплот фазовых переходов.

На автореферат поступило 5 отзывов:

1. Положительный отзыв от Елфимовой Е.А., д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой теоретической и математической физики ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет им. Б.Н.Ельцина", г. Екатеринбург (без замечаний);
2. Положительный отзыв от Закиняна Р.Г., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой анализа геофизической информации и метеорологических прогнозов ФГАОУ ВО "Северо-Кавказский федеральный университет", г. Ставрополь (2 замечания);
3. Положительный отзыв от Ингеля Л.Х., д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника Института экспериментальной метеорологии ФГБУ НПО «Тайфун» (Росгидромет), г. Обнинск (без замечаний);
4. Положительный отзыв от Меркулова Д.И., к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника лаборатории физико-химической гидродинамики НИИ механики ФГБОУ ВО "Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова", г. Москва (3 замечания).
5. Положительный отзыв от Петрова Д.А., д.ф.-м.н., доцента, профессора Центра прикладной математики и физики Физико-математического института ФГАОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет", г. Пермь (1 замечание);

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- на рис. 7 представлены графики аппроксимирующих функций (формула (7)), но не указано, для каких значений $T_{\square}$ приведены эти кривые (в диссертации эта информация присутствует);
- на стр. 14 при описании СТКК смеси воздуха с водяным паром указано, что «синхронизация» сигналов, как для сухого воздуха и его смеси с ундеканом, происходит при $T_{\square} \approx 45^{\circ}\text{C}$, но соответствующий график не приведён (представлены графики лишь для «парадоксальных» случаев $T_{\square} = 25^{\circ}\text{C}$ и $T_{\square} = 65^{\circ}\text{C}$);
- в подписях к рис. 1 и рис. 7 было бы правильнее написать соответственно «Зависимость $P(T)...$ » и «Зависимость $Nu(Ra_E)...$ », как это сделано в тексте диссертации;
- из семи публикаций по теме диссертации четыре относятся к журналам, публикующим результаты выступлений на конференциях; выражено пожелание о более широком представлении результатов в ведущих рецензируемых изданиях;
- при формулировке научной новизны было бы полезно указать форму полости, так как без чтения работы целиком неясно, как направлен градиент искомой величины (температуры и концентрации);
- при формулировке положения 1, выносимого на защиту, имело бы смысл указать вид полинома 3-й степени, а именно, наблюдался ли s-образный участок или кривая носила монотонный характер.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной,

результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области теплофизики и гидродинамики, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных работ, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБУН ИТ СО РАН является одним из ведущих научных центров в области исследований теплофизики и физической гидрогазодинамики, в котором активно выполняются фундаментальные и прикладные исследования по широкому спектру проблем теоретической, вычислительной и экспериментальной механики жидкости, газа и плазмы, инженерным приложениям в энергетике и теплообменной аппаратуре. Институт является учредителем и издателем ведущих научных журналов по специальности. ИТ СО РАН ежегодно организует крупные всероссийские и международные конференции и ведёт активную грантовую деятельность при поддержке Российского научного фонда. Объектами исследований сотрудников ИТ СО РАН выступают процессы конвективного тепло- и массопереноса, гидродинамическая устойчивость, фазовые переходы и многофазные системы. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на заседании научного семинара секции 2 “Термогазодинамика и турбулентность” Ученого совета ИТ СО РАН 11.08.2026 г. в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана оригинальная экспериментальная установка для исследования свободной термоконцентрационной конвекции газовоздушных смесей в замкнутой прямоугольной полости с теплоизолированными вертикальными стенками, при испарении жидкости и конденсации пара на горизонтальных стенках;

предложена методика экспериментального определения индивидуального для каждой газовой смеси отношения концентрационного и теплового чисел Рэлея, основанная на использовании критических условий начала конвекции;

доказано, что термодиффузия и поток Стефана оказывает существенное влияние на теплоперенос и конвекцию влажного воздуха при градиентах температуры ≥ 300 К/м;

введено эффективное число Рэлея, равное сумме теплового и концентрационного чисел Рэлея, связанных между собой условием термодинамического равновесия на границе «жидкость — пар», для описания конвективного движения и теплотока через полость.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Установлены функциональные зависимости безразмерных чисел, связывающих тепловой и концентрационный механизмы конвекции с величиной теплопереноса в смесях воздуха с парами воды или ундекана, при условии испарения и конденсации жидкости на горизонтальных стенках полости.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то

есть с получением обладающих новизной результатов):

использован комплекс экспериментальных методов: голографическая интерферометрия реального времени, дифференциальные термопары, датчик теплового потока, а также численное моделирование для верификации структуры течения сухого воздуха;

изложены результаты экспериментальных исследований конвекции в газовых смесях воздух–вода и воздух–ундекан в диапазоне температур 283–363 К и чисел Рэлея до 3.2×10^3 , включая зависимости числа Нуссельта от эффективного числа Рэлея с учетом поправок на термодиффузию и поток Стефана;

раскрыты механизмы генерации конвекции в различных температурных диапазонах: преобладающий термогравитационный при средних температурах близких к комнатным, а при более высоких — термоконцентрационный; выявлена существенная роль термодиффузии и потока Стефана в формировании теплопереноса во влажном воздухе;

изучено влияние фазовых переходов (испарения и конденсации) на интенсивность конвективного теплопереноса в замкнутой полости;

проведена модернизация экспериментальной установки, включающая создание дренажной системы верхнего теплообменника для рециркуляции конденсата и подогрев оптических элементов для предотвращения запотевания, а также модернизация методики обработки данных путём введения поправок на термодиффузию и поток Стефана.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана и внедрена методика экспериментального определения отношения теплового и концентрационного чисел Рэлея в газовых смесях с фазовыми переходами одной из компонент;

определены эмпирические зависимости, связывающие теплоток и эффективное число Рэлея;

создана экспериментальная установка для исследования стационарной конвекции в паровоздушных смесях при испарении и конденсации жидкости на стенках полости;

представлены формулы для расчёта теплопередачи в аппаратах с паровоздушными смесями, которые могут быть использованы при проектировании теплообменников, ректификационных колонн и устройств карбюрации топлива.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ: исследования проведены с применением поверенных средств измерений, обеспечена воспроизводимость результатов и подтверждена работоспособность установки на тестовой задаче с осушенным воздухом;

теория построена на известных уравнениях термоконцентрационной конвекции в приближении Буссинеска–Обербека с использованием эффективного числа Рэлея и уравнений молекулярного массопереноса;

идея базируется на анализе и обобщении имеющегося опыта исследований конвекции в газовых смесях с фазовыми переходами и использовании эффективного числа Рэлея;

использовано сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными интерферограммами и с известными данными для сухого воздуха;

установлено качественное и количественное согласие полученных зависимостей с универсальной кривой для однокомпонентных сред, а также согласие критического числа Рэлея с имеющимися в литературе данными;

использованы проверенные методики определения теплофизических параметров газовых смесей, стандартные методы измерения температуры и теплового потока, а также голографическая интерферометрия;

Личный вклад соискателя состоит в разработке и изготовлении экспериментальной установки, проведении всех измерений, обработке интерферограмм и данных, численном моделировании, анализе результатов; участии в постановке задачи, обсуждении и интерпретации результатов, а также в написании статей.

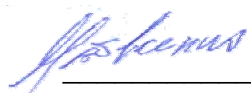
Диссертация соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается: логической структурой, системным характером проведения исследования взаимосвязью выводов с поставленной целью.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержится решение задачи о разработке экспериментальных методов исследования свободной термоконвекционной конвекции газовых смесей с фазовыми превращениями на границах замкнутой полости. Именно возможность определения связи между тепловым и концентрационным механизмами конвекции при непрерывном испарении жидкости и конденсации пара напрямую связана с разработкой новых методов расчёта и оптимизации теплообменных аппаратов, ректификационных колонн, устройств карбюрации топлива, а также с верификацией существующих моделей влажной конвекции в физике атмосферы.

На заседании 23 сентября 2026 г. диссертационный совет принял решение присудить Сомову С.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета Д 004.036.01
д.т.н., профессор, академик РАН
Матвеев Валерий Павлович

 / Матвеев В.П.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., доцент
Зуев Андрей Леонидович



 / Зуев А.Л.

25 сентября 2026 г.