



УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН ИТ СО РАН

д.ф.-м.н., профессор, академик РАН

Маркович

Д.М. Маркович

«15»

02

2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» на диссертацию Сомова Сергея Андреевича «Свободная конвекция паровоздушной смеси при испарении жидкости и конденсации пара на границах замкнутой полости», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы»

В работе представлены результаты экспериментальных исследований термогравитационной конвекции воздуха и термоконцентрационной конвекции парогазовых смесей воздух-вода и воздух-ундекан в прямоугольной полости. Акцент в данной работе сделан не на исследованиях тепло- и массопереноса, а на исследованиях особенностей гидродинамики насыщенных парами газовых смесей при наличии испарения и конденсации в замкнутом объеме в установившихся условиях.

Актуальность темы диссертационной работы.

В технических системах, в технологических устройствах и в природных условиях разномасштабные конвективные течения в бинарных газовых смесях могут развиваться из-за сил плавучести, обусловленных неоднородными распределениями температуры и концентраций. В отличие от термогравитационной конвекции в чистых однокомпонентных текучих средах процессы конвективного тепло-массообмена в бинарных смесях могут существенно осложняться термодиффузией и диффузионной теплопроводностью. Относительная роль этих перекрестных кинетических эффектов зависит от свойств газовых смесей на молекулярном уровне. В данной работе экспериментально исследована свободная термоконцентрационная конвекция газовой смеси, одна из компонент которой непрерывно испаряется и конденсируется на горизонтальных стенках замкнутой полости с рециркуляцией конденсата. Практический интерес представляют смеси воздуха с парами воды, часто используемой в качестве теплоносителя, и ундекан — это углеводород со свойствами близкими к свойствам керосина (как жидкость — имитатор топлива для двигателей).

Научная новизна работы заключается в том, что экспериментальных исследований термоконвекционной конвекции в предельно насыщенных парогазовых бинарных смесях, аналогичных представленным в данной диссертации, практически не было.

Наиболее существенные результаты работы соискателя можно сформулировать следующим образом. Создана материальная база для проведения экспериментальных исследований: конструирована и изготовлена экспериментальная установка для исследования гравитационной конвекции паровоздушной смеси в длинной прямоугольной полости квадратного сечения с испарением и конденсацией паров на горизонтальных границах полости; изготовлен голографический интерферометр реального времени для определения пространственной формы конвективного течения.

Экспериментально подтверждено, что при подогреве полости снизу, в ней возникает циркуляционное течение воздуха в виде одиночного вала, ось которого совпадает с осью полости. Результаты получены в достаточно широком диапазоне перепадов температуры между горизонтальными границами полости и средних температур от 283 К до 363 К. Установлено, что в этом диапазоне средней температуры свободная конвекция при условиях испарения жидкости и конденсации пара на границах замкнутой полости в смеси воздуха с парами воды характеризуется параметрическим отношением концентрационного и теплового чисел Рэлея Ra_c/Ra_T , имеющим вид полинома 3-й степени безразмерной средней температуры, а для ундекана вид полинома 2-й степени. Интегральный коэффициент теплопередачи – число Нуссельта зависит от эффективного числа Рэлея Ra_E , равного сумме теплового и концентрационного чисел Рэлея. Обнаружено существенное влияние термодиффузии и потока Стефана на свободно конвективную теплопередачу в паровоздушной смеси при градиентах температуры порядка 300 К/м. Функциональная связь $Nu(Ra_E)$, с поправками на термодиффузию и поток Стефана, в надкритической области до $Ra_E < 3.5 \times 10^3$ аппроксимируется степенным законом с показателем степени и коэффициентом, зависящим от средней температуры и от природы смеси газов.

Достоверность полученных экспериментальных данных и обоснованность выводов обеспечена использованием современного оборудования для задания и поддержки температуры на границах полости, для измерений температуры и тепловых потоков; воспроизводимостью результатов измерений; применением голографического интерферометра реального времени, чувствительного к возмущениям температуры и концентрации, но нетребовательного к качеству оптических элементов.

Научная значимость выполненных исследований состоит в том, что получены новые данные о свободной конвекции в условиях предельно насыщенных бинарных газовых смесях и в том, что полученные экспериментальные данные могут использоваться в качестве теста для проверки адекватности результатов численных исследований сопряженного конвективного тепло-массообмена при испарении и конденсации в замкнутых объемах. **Практическая значимость** результатов работы в частности состоит в том, что условия близкие к предельному случаю ТКК газовых смесей, когда жидкость испаряется, а пар конденсируется на стенках замкнутой полости, выполняются, например, в теплообменниках и ректификационных колоннах.

Личный вклад автора подробно обозначен и обоснован в полной мере.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объём диссертации составляет 120 страниц, включая 36 рисунков. Список литературы включает в себя 158 источников.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, обозначены цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы, указан личный вклад автора, сформулированы положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

В первой главе представлен обзор и проведён анализ опубликованных работ по теме проведенных исследований. Обоснована постановка задач экспериментальных исследований ТКК газоздушных смесей с непрерывным испарением и конденсацией жидкостей на теплообменниках с рециркуляцией конденсата при сохранении функциональности оптических методов измерения. Обоснован выбор сред, отличающихся молекулярными и термодинамическими свойствами: воздух с парами воды и ундекан, отличающийся от воды по молекулярной массе (у воды существенно меньше, а ундекана – значительно больше, чем у воздуха); давление насыщенных паров воды на два порядка больше, чем у ундекана; вода – полярная среда, а ундекан неполярный.

Во второй главе приведено описание рабочего участка экспериментальной установки, методы и средства контроля граничных условий и измерений тепловых потоков. Приведены результаты экспериментального и численного исследований квази-2D конвективного течения сухого воздуха визуализированного методом голографической интерферометрии. Самое интересное то, что подтверждена классическая зависимость числа Нуссельта от теплового числа Рэлея $Nu(Ra_T)$ и подтверждено значение критического числа Рэлея Ra^* , характерное для неограниченного горизонтального слоя.

В третьей главе представлены результаты доработки рабочего участка для экспериментов в режимах испарения и конденсации воды и ундекана. В этих режимах на нижней поверхности поддерживается постоянная толщина слоя жидкости 1 мм. Модернизация позволила создать управляемые источники и стоки газовой примеси, управлять градиентом концентрации и концентрационным числом Рэлея Ra_c . Введено понятие эффективного числа Рэлея и приведена аргументация о его физической корректности. Подробно описаны методы оценок теплофизических свойств газовых смесей. В результате это позволяет, используя экспериментальные данные, вычислять значения чисел Прандтля и чисел Рэлея теплового и концентрационного для влажного воздуха. Выполнен анализ погрешностей измерений и расчётов. Дана оценка погрешностей определения чисел Рэлея теплового и концентрационного в 8 %. Аналогичные расчеты и оценки выполнены для смеси ундекан-воздух. В этом случае погрешность не превышает 4 %. Для обобщения результатов экспериментов с целью выяснения относительной роли сил плавучести, обусловленных зависимостью плотности газовых смесей от температуры и концентрации, в возбуждении конвективного течения введено понятие “термоконцентрационная функция” $\xi(t_0)$ для газовых смесей воздух – водяной пар и воздух – пары ундекана. Доказано, что эта функция показывает зависимость отношения концентрационного числа Рэлея к его тепловому аналогу от средней температуры в системе и перепада температуры и что она является универсальной для каждой конкретной жидкости. Монотонный рост термоконцентрационной функции при повышении средней температуры для смеси водяного пара с воздухом подчёркивает существенную роль фазовых переходов влаги в конвекции воздуха даже в диапазоне атмосферных температур. Показано, что несмотря на то, что малая доля пара в воздухе слабо меняет его теплофизические свойства, фазовые превращения этой малой фракции могут сильно нарушить механическое равновесие газовой смеси и вызвать конвективные течения.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований теплопередачи при свободной ТКК в смесях воздуха с парами воды или ундекана. В этой главе подробно разобраны дополнительные молекулярно-диффузионные механизмы тепло- массопереноса. Показано, что на многопараметрический теплообмен в бинарных газовых средах на существенно влияют сложные механизмы массопереноса, включая многокомпонентную молекулярную диффузию, макроскопические конвективные течения и поток Стефана. При больших градиентах температуры (до 1.3×10^3 К/м), становится значительным влияние термодиффузии на теплопередачу во влажном воздухе. Анализ всех слагаемых теплопередачи позволил унифицировать и обобщить данные с

использованием универсальных параметрических зависимостей $Nu(Ra_E)$, теплопередача описана через естественный критерий подобия – Ra_E .

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Содержание автореферата соответствует цели, задачам, основным выводам и рекомендациям диссертационной работы и адекватно передает содержание диссертации.

Замечания по содержанию диссертации.

1. В обзоре не выполнен заявленный тезис: “Ниже перечислены основные экспериментаторы и их коллективы, выполнявшие исследования, *релевантные* теме диссертации.” Но реально в обзоре много лишнего информационного шума, не имеющего отношения к теме и содержанию работы: наклонные слои, смерчи в атмосфере, и... прочие “лирические” отступления.
2. В тексте встречается много некорректных выражений, например: на стр. 4 “ Свободная конвекция имеет своим следствием восстановление механического и термодинамического равновесия в системе.” В действительности свободная конвекция Рэлея-Бенара возникает в после нарушения механического равновесия. На стр. 5 “...хотя конвекция Рэлея-Бенара (простейшая модель атмосферы) изучена более 100 лет назад...” Она не была тогда изучена, а была только обнаружена... и изучается активно до настоящего времени.
3. Автор диссертации досконально ознакомился с Главой 7 в монографии Гершуни Г.З. и Жуховицкого Е.М. 1972г [6], но не обратил внимания на §18 Главы 4, с.122 - Рис. 44, на котором представлена зависимость критических значений числа Рэлея от относительных размеров параллелепипеда и числа валов, параллельных короткому ребру основания параллелепипеда. Почему на стр.52-53 не обсуждается возможность реализации пространственной формы течения, схема которой представлена на рис. 2.6в? Поэтому требуются обоснования и пояснения, почему же экспериментально наблюдается вал, ориентированный по продольной оси полости, и почему критическое значение числа Рэлея близко к значению, определенному для неограниченного слоя.
4. Боковые теплоизолированные стенки ячейки изготавливались из текстолита или пенополистирола XPS, покрытого тонкой плёнкой гидрофобной консистентной силиконовой смазки. Естественно, возникает вопрос: эта смазка не растворяется и не смешивается с водой и ундеканом? Вопрос возникает еще и потому что не понятно, если есть слой воды или ундекана на нижней горизонтальной стенке со свободной поверхностью, то как следы этой смазки повлияют на ее состояние (поверхностное натяжение, испарение)? Что делается с конденсатом на вертикальных стенках с ростом температуры?

5. Утверждение на стр.64: “Результаты численного моделирования не выявили признаков существования альтернативных мод течения, изображённых на Рис. 2.6” не имеет смысла, так как по самой постановке задачи другой вариант в принципе исключен.

6. В главе 3 указано, что на нижней нагреваемой поверхности поддерживается постоянная толщина слоя жидкости 1мм. Сделаны оценки перепадов температуры по толщине слоев жидкостей и чисел Рэлея. Но в режимах подогрева снизу необходимо учитывать термокапиллярный эффект (и оценить число Марангони). Поскольку данные, представленные в главах 3 и 4 получены в режимах с поддержкой заданной толщины слоя жидкости, то есть с компенсирующей добавкой по мере повышения температуры и интенсификацией испарения, то можно было привести данные о количестве испаряющейся жидкости и дать оценки вклада теплоты фазового перехода.

7. Оценки чисел Нуссельта в главе 4 требуют более глубокого анализа. Да при инверсном включении теплообменников осуществляется исключительно теплопроводный режим, верхняя граница сухая. А в обратном случае, начиная с некоторого критического значения перепада температуры, – конвективный, и на обеих смоченных границах фазовые переходы. Приведенной на стр. 84 оценки критерия Кутателадзе, по-видимому, недостаточно для адекватной оценки роли теплот фазовых переходов.

Заключение. Сделанные выше замечания не исключают общую положительную оценку работы. Диссертационная работа Сомова С.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлены результаты, расширяющие знания о механизмах появления и развития конвекции в парогазовых смесях с фазовыми превращениями. Экспериментально изучена относительная роль полей температуры и концентрации на формирование конвективных течений и теплообмен в замкнутых областях. Полученные автором диссертации результаты имеют существенное значение для отрасли знаний – механика жидкости, газа и плазмы в области термогравитационной конвекции. Основные результаты научно-квалификационной работы опубликованы в 14 печатных изданиях, 3 из которых – журналы, рекомендованные ВАК, 6 – журналы, индексируемые Web of Science и Scopus, 7 – сборники трудов конференций и тезисы докладов. Материалы диссертации прошли апробацию на авторитетных конференциях.

Таким образом, диссертационная работа Сомова С.А. по актуальности, научной новизне, основным положениям, научной, практической значимости и достоверности, по содержанию и оформлению полученных результатов соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Сомов Сергей Андреевич заслуживает

присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв на диссертацию подготовлен на основании заключения Научного семинара секции 2 “Термогазодинамика и турбулентность” Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» (протокол заседания секции от «11» августа 2026 г.).

Отзыв подготовил:

Главный научный сотрудник
лаборатории интенсификации процессов
теплообмена ФГБУН ИТ СО РАН, д.ф.-м.н.
по специальности 01.02.05 – механика
жидкости, газа и плазмы
630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, д.1
тел.: +7(383) 316-53-32
e-mail: berdnikov@itp.nsc.ru

Бердников
Владимир
Степанович



Председатель Научного семинара
секции 2 “Термогазодинамика и
турбулентность” Ученого совета
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Институт
теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской
академии наук»: доктор технических наук,
главный научный сотрудник
лаборатории термогазодинамики,
д.т.н. по специальности 01.04.14 –
теплофизика и молекулярная физика
630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, д.1
тел.: +7(383) 330-67-36
e-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Терехов
Виктор
Иванович



...

Сведения об организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Адрес: 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1.
Телефон: +7(383)330-90-40. E-mail: direktor@itp.nsc.ru. Web-сайт: <http://www.itp.nsc.ru>

Подписи В.С. Бердникова и В.И. Терехова удостоверяю:

25 августа 2026 г.

Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.



/А.А. Ягоднищина /

