

На правах рукописи



Сомов Сергей Андреевич

**Свободная конвекция паровоздушной смеси при испарении
жидкости и конденсации пара на границах замкнутой полости**

Специальность 1.1.9 —
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Пермь — 2026

Работа выполнена в «Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»).

Научный руководитель: **Иванов Алексей Сергеевич**
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Соболева Елена Борисовна**
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва.

Полежаев Денис Александрович
кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики и технологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета», г. Пермь.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится 23 сентября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан ____ _____ 2026 года.
Телефон для справок: +7 (342) 237-84-61.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.201.01 (Д 004.036.01),
д-р физ.-мат. наук

Зуев Андрей Леонидович

Общая характеристика работы

Актуальность и разработанность темы исследования. Диссертация посвящена экспериментальному исследованию свободной термоконцентрационной конвекции газовой смеси, одна из компонент которой непрерывно испаряется и конденсируется на стенках замкнутой полости с рециркулирующей конденсата.

Термоконцентрационная конвекция (ТКК) возникает в газовых смесях при наличии неоднородных полей концентрации C и температуры T . В гравитационном поле ТКК характеризуется двумя причинами появления сил плавучести (∇T и ∇C), связанных с двумя диссипативными механизмами (теплопроводность и диффузия). В уравнении Навье-Стокса долевые вклады обоих механизмов характеризуются тепловым Ra_T и концентрационным Ra_C числами Рэлея. В общем случае поля T и C (следовательно, Ra_T и Ra_C) считаются независимыми, несмотря на единую молекулярную природу механизмов тепло- и массопереноса, выражающуюся в существовании парных эффектов Соре и Дюфо. Однако в одном частном, но важном случае поля T и C зависимы, – это предельный случай ТКК газовых смесей, когда жидкость испаряется, а пар конденсируется на стенках замкнутой полости, что наблюдается в теплообменниках, ректификационных колоннах, устройствах для карбюрации топлива и др. Одновременное действие источника и стока одной газовой компоненты позволяет создать максимально возможный контролируемый стационарный ∇C , а так как давление насыщенных паров – это функция только температуры $P(T)$, то граничные условия для T и C являются зависимыми. При этом конкретная газовая смесь характеризуется индивидуальной параметрической функцией безразмерной температуры $Ra_C Ra_T^{-1}$, выявление которой представляет собой актуальную тему диссертационного исследования.

В условиях Земли наибольший интерес представляют смеси воздуха с парами жидкостей. Наш выбор последних объясняется их практической значимостью: вода распространена в атмосфере, обладает аномально большой теплоёмкостью и потому часто используется в качестве теплоносителя, а ундекан – это углеводород, чьи физические свойства близки к средним значениям таковых у керосина («модельное» топливо для двигателей). Свободная ТКК (СТКК) в диссертации предпочитается вынужденной, несмотря на инженерные преимущества последней. СТКК – это фундаментальный и наименее затратный способ тепло- массопереноса, либо побочное явление, которое влияет на работу техники. Также СТКК определяет природные явления, которые затруднительно изучать в лаборатории из-за их масштабов, энергетических характеристик и стратификации атмосферы.

Ниже перечислены основные экспериментаторы и их коллективы, выполнявшие исследования, релевантные теме диссертации. Термогравитационную конвекцию (ТГК) комнатного воздуха в замкнутых полостях изучали Arnold J.N., Dropkin D.J., Yuikan L., группа Hollands K.G.T., Полудницин А.Н., группы Путина Г.Ф., Paroncini M., Kogawa T. СТКК тройных газовых смесей исследовали Пинягин А.Ю., Пшеничников А.Ф., Шайдуров Г.Ф., Федюшкин А.И., Полежаев В.И. Изотермическую концентрационную конвекцию (ИКК) газов

изучали Косов Н.Д., Косов В.Н., Селезнёв В.Д., Жаврин Ю.И., а жидкостей – группа Чашечкина Ю.Д. Конвекцию воздуха, инициированную испарением воды, изучали Sparrow E.M., Nunez G.A., McBain G.D. Группа Laguerre O. решала прикладные задачи конвекции влажного воздуха в рефрижераторе. Конденсацией микрокапель в воздухе занимались группы Woods J.D., Warner J., Desai N. Теплофизические свойства пара и тепло- массоперенос в паровоздушных смесях изучали Берман Л.Д., Mills A.F., Дудник Н.М., коллективы Вукаловича М.П., Ривкина С.Л. и др. Работы по теплопередаче при конденсации пара многочисленны из-за разнообразия конструкций теплообменников: кожухотрубные аппараты, решётки, рифлёные трубы и др., – причём влажный воздух всегда оценивается как плохой теплоноситель (конденсируется не целиком). В диссертации акцент смещён с массопереноса на вопрос о том, как испарение жидкости и конденсация пара на границах полости меняют движение парогазовой смеси в ней.

Цель работы – установление универсальных экспериментальных закономерностей конвективного движения и теплопередачи при СТКК в замкнутой полости, заполненной газовой смесью воздуха с парами воды или ундекана, при условиях испарения жидкости и конденсации пара на границах полости.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Спроектировать и изготовить экспериментальную установку, позволяющую определять момент возникновения квази-2D конвективного течения газовой смеси, измерять тепловой поток и визуализировать прозрачную среду (при ТГК – поле T) посредством голографической интерферометрии.
2. Обеспечить работу конвективной ячейки при испарении жидкости на нижнем и конденсации пара на верхнем теплообменниках с рециркуляцией конденсата и предотвращением запотевания оптических элементов установки.
3. Выполнить серию контрольных (benchmark) опытов по ТГК осушенного воздуха для апробации и оценки чувствительности установки, проверки точности термодинамического и голографического методов; подтверждения известной зависимости числа Нуссельта от теплового числа Рэлея $Nu(Ra_T)$.
4. Определить вид течения в конвективной ячейке, посредством сравнения экспериментальных интерферограмм с численным решением задачи ТГК двухполюсным методом в приближении Буссинеска.
5. Выполнить опыты по СТКК газовоздушных смесей с парами воды или ундекана, при испарении жидкости и конденсации пара на стенках полости.
6. Для обеих газовых смесей определить параметрическую температурную зависимость теплового Ra_T и концентрационного Ra_C чисел Рэлея, характеризующих соотношение двух конвективных механизмов.
7. Описать теплопередачу при СТКК газов зависимость Nu от естественного параметра подобия – эффективного числа Рэлея $Ra_E = Ra_T + Ra_C$.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые

1. Выполнено экспериментальное сравнение ТГК осушенного воздуха и ТГК его смесей с парами воды или ундекана, претерпевающими фазовые превращения

первого рода на стенках полости с рециркуляцией конденсата при атмосферном давлении, средней температуре $T_0 \in (283; 363)$ К и $\nabla T \in [0; 1.3 \times 10^3]$ К·м⁻¹.

2. Измерены параметрические зависимости $Ra_C Ra_T^{-1}$ для газоздушных смесей паров воды или ундекана, претерпевающих фазовые превращения на стенках полости, – полиномы 3-й и 2-й степени безразмерной температуры, соответственно.

3. Экспериментально измерена и описана теплопередача при СТКК газоздушных смесей паров воды или ундекана, претерпевающих фазовые превращения на границах замкнутой полости, в виде степенной зависимости числа Nu от естественного параметра подобия – эффективного числа Рэлея $Ra_E = Ra_T + Ra_C$.

4. Экспериментально продемонстрировано, что при $\nabla T \gtrsim 300$ К·м⁻¹ вклад молекулярных механизмов (термодиффузия и поток Стефана) в теплопередачу смеси воздуха с парами воды, претерпевающими фазовые превращения на границах замкнутой полости, сопоставим с вкладом конвективного подъёмно-опускного течения.

Практическая значимость работы заключается в новой информации о конвективном движении и теплопередаче, необходимой для проектирования устройств, в которых присутствуют газоздушные смеси паров воды или ундекана, претерпевающих фазовые превращения первого рода: теплообменники, ректификационные колонны, устройства для карбюрации топлива и т.п. Результаты пригодны для верификации моделей конвекции влажного воздуха.

Методология и методы исследования выбирались исходя из задач эксперимента, необходимости обработки исходных данных и численного моделирования. Лабораторная установка обеспечивает теплофизические измерения термомпарным методом и датчиком плотности теплового потока; позволяет визуализировать прозрачную среду (при ТГК – поле T) методом голографической интерферометрии. Численное моделирование ТГК сухого воздуха выполнено двухполюсным методом. Рабочие среды: осушенный воздух с остаточной влажностью ≈ 5 %, дистиллированная вода и химически чистый ундекан. Результаты измерений представлены в безразмерном виде с привлечением справочных данных теплофизических свойств газовых смесей, либо их расчётных значений по инженерным методикам.

Положения, выносимые на защиту:

1. В диапазоне температур (283;363) К свободная термоконцентрационная конвекция смесей воздуха с парами воды или ундекана, при условии испарения жидкости и конденсации пара на границах замкнутой полости, характеризуется параметрическим отношением концентрационного и теплового чисел Рэлея, имеющим вид полинома 3-й или 2-й степени безразмерной температуры, соответственно.

2. Конвективный теплообмен при свободной термоконцентрационной конвекции смесей воздуха с парами воды или ундекана, при условии испарения жидкости и конденсации пара на стенках замкнутой полости, описывается естественным параметром подобия – эффективным числом Рэлея Ra_E , равным сумме теплового Ra_T и концентрационного Ra_C чисел Рэлея, которые связаны между собой условиями термодинамического равновесия на границе жидкость – пар.

3. Функциональная связь $Nu(Ra_E)$ в надкритической области ($Ra_E \leq 3.2 \times 10^3$), описывающая вклад конвективного подъёмно-опускного течения в интегральный

теплопоток (с поправками на термодиффузию и поток Стефана), хорошо аппроксимируется степенным законом с показателем степени и коэффициентом, зависящим от параметра (безразмерной средней температуры) и природы газовой смеси.

4. При градиенте температуры более $300 \text{ K}\cdot\text{м}^{-1}$ во влажном воздухе с фазовыми превращениями влаги на стенках замкнутой полости, вклад молекулярных механизмов (термодиффузия и поток Стефана) в теплопередачу при свободной конвекции сопоставим со вкладом макроскопического подъёмно-опускного течения.

Достоверность результатов обеспечена расчётами установки, предшествовавшими её изготовлению и подтверждёнными в ходе успешного прохождения тестов на эталонной задаче о ТГК осушенного воздуха; численным моделированием, доказавшим, что наблюдаемое конвективное течение является одновальным; применением стандартных методик измерения T и теплового потока; использованием голографического интерферометра реального времени, чувствительного к возмущениям T и C , но нетребовательного к качеству оптических элементов; проверкой самодельных термопар; комплектованием установки стабильными контрольными и точными измерительными приборами: PID-регулируемыми крио-термостатами, 24-х битным многоканальным АЦП, микровольтметрами, поверенными пирометрами и ртутными термометрами. Представление результатов осуществлялось с привлечением инженерных методов расчёта и справочных данных по теплофизическим свойствам газов, включая таблицы ГСССД 187-99 и международные скелетные таблицы. Надёжность выводов подтверждается воспроизводимостью и повторяемостью экспериментальных измерений; согласованностью измеренных данных, полученных независимыми методами; успешным выполнением benchmark-тестов; совпадением расчётных и справочных данных.

Апробация результатов осуществлялась на следующих конференциях и семинарах: XXI Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 18–22 марта 2019 г.), «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 22–24 октября 2020 г.), XXII Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 22–26 марта 2021 г.), международная конференция «Волны и вихри» (Москва, 1–3 декабря 2021 г.), Всероссийская конференция молодых ученых-механиков (Сочи, 4–14 сентября 2022 г.), «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 5–7 октября 2022 г.), международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, 1–4 октября 2024 г.), XXIV Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 24–28 февраля 2025 г.), «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 1-3 октября 2025 г.), научный семинар Института механики сплошных сред (Пермь, 05 мая 2026 г.). Результаты работы были получены в рамках госбюджетных тем № АААА-А17-117021310078-8 и АААА-А20-120020690030-5.

Личный вклад автора включает единоличное выполнение всех экспериментальных работ: проектирование и изготовление лабораторной установки; теплофизические измерения, съёмка и обработка интерферограмм; вспомогательное численное моделирование (язык Python). Все представленные в диссертации результаты и выносимые на защиту положения получены автором лично.

Публикации по теме диссертации представлены 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.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 2 приложений. Полный объём диссертации составляет 124 страницы, включая 36 рисунков. Список литературы содержит 158 наименований.

Содержание работы

Во введении диссертации формулируются её актуальность, цель, задачи, новизна, значимость, достоверность, выносимые на защиту положения.

Первая глава содержит обзор экспериментальных работ, посвящённых ТГК воздуха и ТКК газовых смесей на его основе в замкнутых полостях. Обсуждается экспериментальное и теоретическое обоснование эффективного

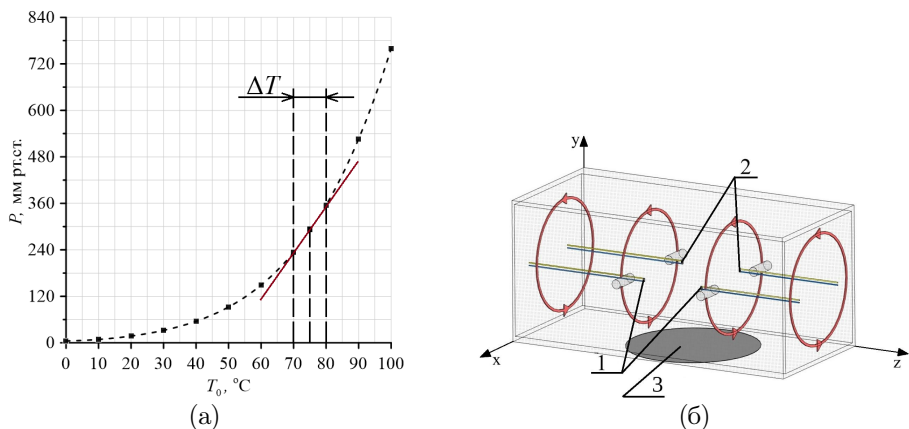


Рисунок 1 – (а) $P(T)$ водяного пара; (б) расположение холодных 1 и горячих 2 спаев боковых термопар; 3 – датчика. Красные стрелки обозначают течение.

числа Рэлея $Ra_E = (Ra_T + Ra_C)$ для газовых смесей

$$Ra_T = \frac{g\beta_T\Delta T d^3}{\nu\chi}, \quad \beta_T = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{C_0}, \quad Ra_C = \frac{g\beta_C\Delta C d^3}{\nu D}, \quad \beta_C = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial C} \right)_{T_0} \quad (1)$$

где g – модуль ускорения свободного падения; β_T и β_C – коэффициенты теплового и концентрационного расширения; $\Delta T = (T_h - T_c)$ – разность температур горячей T_h и холодной T_c стенок полости высоты d ; ν – кинематическая вязкость; χ – температуропроводность; D – коэффициент диффузии; $\rho_0 = \rho(T_0, C_0)$ – плотность смеси при средней температуре T_0 и концентрации C_0 ; ΔC – разность концентраций источника и стока примеси. Возмущения \tilde{T} и \tilde{C} аддитивно учитываются в выражении для плотности смеси $\rho = \rho_0(1 - \beta_T\tilde{T} - \beta_C\tilde{C})$, и

уравнение Навье–Стокса в приближении Буссинеска принимает вид

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{\text{Pr}} (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \Delta \mathbf{v} + (\text{Ra}_T \tilde{T} + \text{Ra}_C \tilde{C}) \mathbf{n}, \quad (2)$$

где \mathbf{v} – среднemasовая скорость; t – время; $\text{Pr} = \nu \chi^{-1}$ – число Прандтля; p – возмущение давления; \mathbf{n} – единичный вектор, направленный вертикально вверх. В (2) учтено, что в газах $\nu \approx D \approx \chi \sim 10^{-5} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, поэтому $\text{Pr} \approx \text{Le} \approx \text{Sc} \approx 1$, где $\text{Le} = D \chi^{-1}$, $\text{Sc} = \nu D^{-1}$ – числа Льюиса и Шмидта. При $\tilde{C} = 0$ (2) редуцируется до уравнения ТГК, а в изотермическом случае $\tilde{T} = 0$ описывает ИКК, причём системы уравнений получаются идентичными (отличие в граничных условиях). Отмечается, что аддитивность чисел Рэлея в газах демонстрировалась экспериментально: в [A1] конвекция возникала беспороговым образом (при потоках примеси с боковых стенок) и полностью подавлялась если $\text{Ra}_T \approx -\text{Ra}_C$ даже при больших $\text{Ra}_T \sim 10^5$. В [A2] изотермическая диффузия бинарной смеси в третий (балластный) газ описывалась (2) с двумя концентрационными слагаемыми ($\text{Ra}_{C1} \tau \tilde{C}_1 + \text{Ra}_{C2} \tilde{C}_2$), где τ – отношение D компонент бинарной смеси, а кривая монотонной устойчивости на плоскости парциальных чисел Рэлея имела аналогичный вид $\text{Ra}_{C2} \approx -\text{Ra}_{C1} \tau$.

Если источник и сток примеси определяются испарением жидкости и конденсацией её пара, то ΔC определяется давлением насыщенных паров $P(T)$, поэтому $\Delta C \propto \Delta T$ с точностью до малых поправок в широком диапазоне $\Delta T \sim 10 \text{ К}$ (см. Рис. 1 (а)). Следовательно, Ra_C при таких граничных условиях тоже $\propto \Delta T$, а отношение $\text{Ra}_C \text{Ra}_T^{-1}$ не зависит от произведения $d^3 \Delta T$, выражающего собой условия эксперимента, и является универсальной (для конкретной смеси) параметрической функцией T_0 , для которой определены все величины в (1).

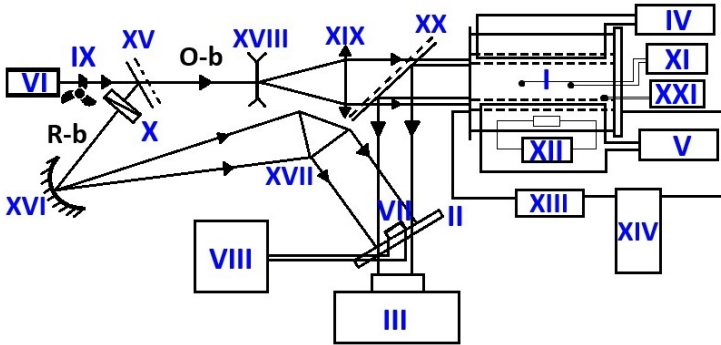


Рисунок 2 – Оптическая схема установки: O-b, R-b – предметный и опорный лучи; I – конвективная ячейка; II – фотопластинка; III – камера; IV и V – теплообменники с термостатами; VI – лазер; VII – фотодиод; VIII – вольтметр; IX – обтюратор; X – поляризатор; XI – АЦП с термопарами; XII – датчик теплопотока; XIII – насос; XIV – контейнер с силикагелем; XV и XX – п/п пластинки; XVI – зеркало; XVII – призма; XVIII, XIX – линзы; XXI – датчик влажности.

Во второй главе описывается конструкция экспериментальной установки, обосновывается выбор голографической интерферометрии для визуализации прозрачной среды, применение дифференциальных термопар (далее – «боковые термопары») для детектирования подъёмно-опускного течения и датчика плотности теплового потока «Стройприбор ИПП-МГ4» (далее – «датчик») для измерения теплопередачи. Размеры ячейки: высота и ширина 15 мм, длина 320 мм, – выбраны исходя из тех соображений, что для сухого воздуха (i) критическое число Рэлея Ra^* должно достигаться при небольших $(\Delta T)^* \approx 5$ К; (ii) при умеренных $\Delta T \approx 10$ К интерферограмма должна содержать около 10 полос; (iii) вид конвективного течения (квази-2D одиночный вал на Рис. 1 (б)) должен допускать простую и однозначную интерпретацию сигналов термоЭДС с боковых термопар и датчика. Датчик вклеен по центру теплообменника в паз, фрезерованный по его размеру (посадка 0.1 мм). Две дублирующие боковые термопары фиксировались на пластиковых штифтах боковых стенок (Рис. 1 (б)), в горизонтальной плоскости (вдоль изотерм квази-2D течения). Холодные и горячие спаи находились на противоположных стенках. Одноименные спаи отстояли друг от друга на расстоянии 10 см.

Боковые теплоизолированные стенки ячейки изготавливались из текстолита или пенополистирола XPS (теплопроводность $\lambda = 0.035$ Вт·м⁻¹К⁻¹), покрытого тонкой плёнкой гидрофобной консистентной силиконовой смазки. Верхняя и нижняя стенки ячейки – медные теплообменники толщиной 10 мм, шириной 100 мм. Температуры T_h , T_c теплообменников поддерживались жидкостными термостатами CRYO-VT-12 и измерялись термопарами. Ячейка в сборе помещалась во внешний корпус, изолировавший её от окружающего воздуха. Для просвечивания ячейки переднее окно корпуса закрывалось стеклом, а заднее – зеркалом.

Схема голографического интерферометра, собранного на плите УИГ-22-К, представлена на Рис. 2: луч лазера (коэффициент поляризации 500:1) делится на опорный R-b и предметный O-b. Последний преобразуется линзами XVII и XIX в пучок ≈ 5 см², дважды проходящий сквозь ячейку $\parallel z$ (отражается от зеркала задней стенки) для увеличения оптической разности хода. Предметный луч, содержащий информацию о текущем состоянии газовой смеси в ячейке, направляется полупрозрачной пластинкой XX на голографическую фотопластинку II (ПФГ-01), где интерферирует с опорным лучом R-b, интенсивность которого регулируется поляризатором X для получения максимально контрастной интерферограммы, регистрируемой видеокамерой III. Модулятор IX, фотодиод VII и вольтметр VIII позволяют количественно сравнивать интенсивности лучей R-b и O-b.

Конвективные опыты проводились в следующей последовательности. Вначале ячейка заполнялась исследуемым газом. Например, для осушения воздуха он прокачивался насосом XIII по замкнутому контуру через контейнер с силикагелем XIV, что снижало его влажность до 5 %. Затем T теплообменников и газа приводилась к выбранному значению средней температуры $T_h = T_c = T_0$ и производилась фотосъёмка голограммы. Затем дискретно, с шагом 0.5 К увеличивался перепад ΔT , то есть T_h и T_c принимали значения $T_0 \pm 0.25$ К, $T_0 \pm 0.5$ К, ..., $T_0 \pm 10$ К, причём такое сканирование по ΔT выполнялось как для прямого $\nabla T \downarrow \uparrow \mathbf{n}$, так

и для инверсного $\nabla T \uparrow \uparrow \mathbf{n}$ распределения T . Инверсный случай соответствовал устойчивой стратификации газа в теплопроводном режиме: сигнал термоЭДС U боковых термопар при любом ΔT равнялся нулю, а сигнал датчика возрастал линейно (кривая 1 на Рис. 3 (а)). При прямом включении теплообменников, начиная с критического перепада $(\Delta T)^*$, возникает конвективное подъёмно-опускное течение и боковые термопары (Рис. 1 (б)) регистрируют отличный от нуля сигнал (кривая 3 на Рис. 3 (а)). При этом U датчика также возрастает относительно своей величины в теплопроводном инверсном режиме (кривая 2 на Рис. 3 (а)). Число Нуссельта Nu равно отношению сигналов 2 и 1 на Рис. 3 (а).

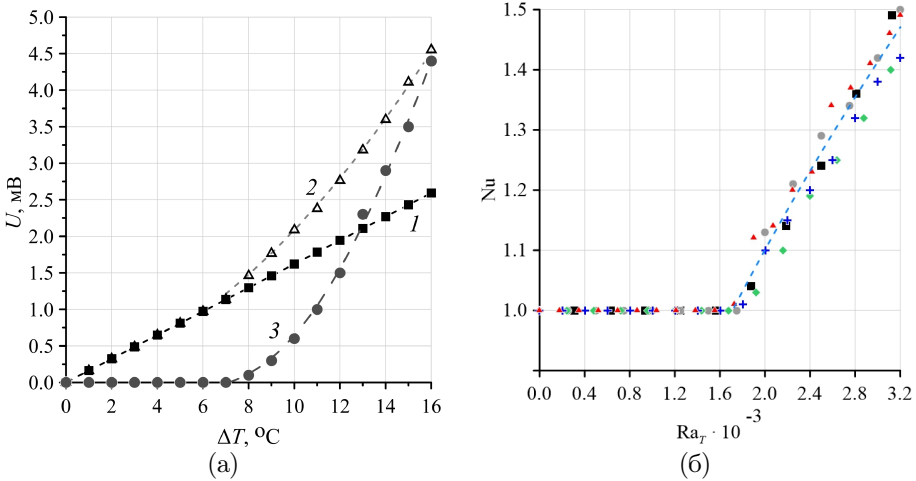


Рисунок 3 — (а) Пример сигналов термоЭДС датчика в теплопроводном 1 и конвективном 2 режимах; боковых термопар 3 ($\times 10$ для масштаба); (б) $Nu(Ra_T)$ для сухого воздуха. Линия – уравнение (3), точки – эксперимент при $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ (\square), $35\text{ }^\circ\text{C}$ (\circ), $45\text{ }^\circ\text{C}$ (\diamond), $55\text{ }^\circ\text{C}$ ($+$), $65\text{ }^\circ\text{C}$ (\triangle).

Для апробации установки, подтверждения её работоспособности, оценки чувствительности и точности измерений, выполнена серия контрольных опытов по ТК осушенного воздуха. В результате подтверждена известная [A3] зависимость $Nu(Ra_T)$ (Рис. 3 (б))

$$Nu = 1.1 \times 10^{-3} Ra_T^{0.9} \quad \text{при} \quad Ra^* \leq Ra_T < 3.5 \times 10^3, \quad (3)$$

и подтверждено значение критического числа Рэлея $Ra^* = 1680 \pm 55$, которое хорошо согласуется с известными теоретическим $Ra^* = 1708$ и экспериментальными результатами $Ra^* = 1700 \pm 50$ [A3] для задачи Рэлея с твёрдыми границами.

Так как интерпретация сигналов зависит от конфигурации течения, существовала потребность доказать, что в эксперименте действительно реализуется модельное квази-2D течение в виде одиночного вала. Проверка осуществлялась прямым сравнением экспериментальных (Рис. 4 (а)) и теоретических (Рис. 4 (б))

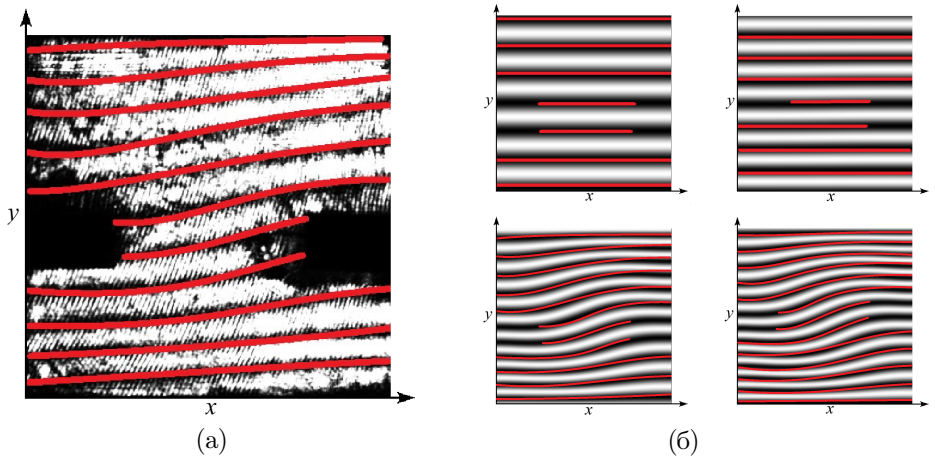


Рисунок 4 — (а) Пример экспериментальной маски интерференционных полос (красные) и (б) их сравнение с расчётными интерферограммами (чёрные полосы) при $T_0 = 50^\circ \text{C}$ и ΔT (по увеличению числа полос): 8 К, 10 К, 14 К, 16 К.

интерферограмм, полученных в результате численного решения 2D-задачи ТПК сухого воздуха двухполюсовым (в терминах вихрь – функция тока) методом посредством самописной программы (язык Python).

В третьей главе экспериментально исследуется СТКК в задаче Рэлея-Бенара газовых смесей воздуха с парами воды или ундекана, претерпевающими фазовые превращения на стенках замкнутой полости. Описываются конструктивные элементы и вспомогательные системы, обеспечившие: (i) наличие источника пара; (ii) стока пара; (iii) предотвращение запотевания оптических элементов установки. Эти конструктивные решения позволили изучать СТКК с рециркуляцией конденсата при фиксированном ΔC и сохранением возможности оптических измерений.

Источник пара – свободная поверхность жидкости, заполняющей прямоугольную канавку, фрезерованную в нижнем теплообменнике на толщину слоя ($l = 1 \text{ мм}$) по всей длине и ширине ячейки (датчик покрыт жидкостью). Перепад температуры в жидкости ΔT_w много меньше, чем в газе $\Delta T_w \sim 0.01 \Delta T_a$, ($\Delta T_w + \Delta T_a = \Delta T$), что позволяет считать жидкость изотермической и исключить конвекцию в ней ($\text{Ra}_T < 10$). Сток пара осуществлялся на верхнем теплообменнике: пар конденсируется не в объёме газа, а на охлаждаемой поверхности. Капельный характер конденсации и дренажная система теплообменника представлены на Рис. 5 (а), (б). Конденсат посредством капиллярных сил эффективно отводился канавками (ширина 1 мм, шаг 2 мм) $\perp z$ на боковые стенки. Запотевание переднего стекла и заднего зеркала ячейки предотвращалось электрическим нагревателем в полиимидной плёнке (Рис. 5 (в)).

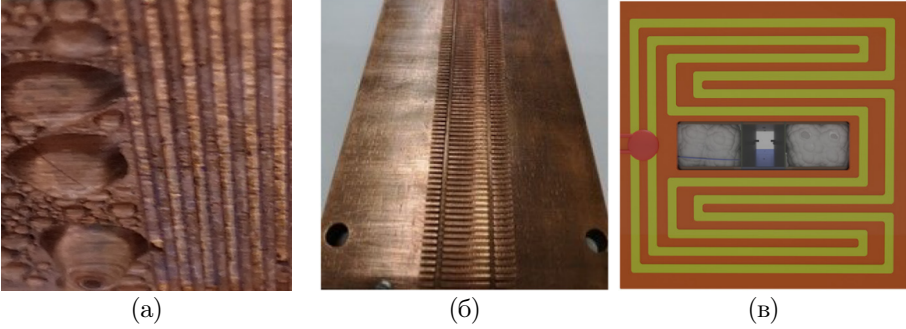


Рисунок 5 — Фото (а) капельной конденсации пара; (б) верхнего теплообменника; (в) полиимидная нагревательная плёнка на передней стенке ячейки.

Сравнение ТГК сухого воздуха и ТКК в его смесях с парами жидкостей при одинаковой T_0 показало, что ТКК начинается при меньшем ΔT , то есть $Ra_E(T_0, \Delta T) > Ra_T(T_0, \Delta T)$. Это неравенство позволяет оценить количественный вклад концентрационного механизма в ТКК с помощью параметрической зависимости $\xi(\tilde{T}_0) = Ra_C Ra_T^{-1}$ от безразмерной абсолютной температуры $\tilde{T}_0 = T_0/273.15$. По определению, $Ra_E = Ra_T + Ra_C = Ra_T(1 + \xi(\tilde{T}_0))$, где Ra_T вычисляется для смеси газов по справочным данным или инженерным методикам [A4]. Функция $\xi(\tilde{T}_0)$ определяется экспериментально из условия возникновения конвекции при $(\Delta T)^*$ и $Ra_E = Ra^*$. При этом $Ra_C(T_0, (\Delta T)^*) = Ra^* - Ra_T(T_0, (\Delta T)^*)$, а отношение $Ra_C Ra_T^{-1}$ не зависит от $(\Delta T)^*$ и является универсальной характеристикой газовой смеси. Экспериментальная зависимость $\xi(\tilde{T}_0)$ для смеси воздуха с водяным паром представлена на Рис. 6 (а), и аппроксимируется выражением

$$\xi(\tilde{T}_0) = 434.09\tilde{T}_0^3 - 1384.35\tilde{T}_0^2 + 1478.84\tilde{T}_0 - 527.76. \quad (4)$$

Аналогичное выражение для смеси воздух – ундекан (Рис. 6 (б)) имеет вид

$$\xi(\tilde{T}_0) = 7.192\tilde{T}_0^2 - 15.699\tilde{T}_0 + 8.584. \quad (5)$$

Аппроксимации (4) и (5) найдены методом наименьших квадратов (МНК) в программе MagicPlot (коэффициент детерминации $R^2 = 0.99$).

Рис. 6 (а) показывает, что малая доля пара может инициировать конвекцию, несмотря на незначительное отличие теплофизических свойств влажного и сухого воздуха при $T_0 \leq 50$ °С. Например, если пренебречь $\xi(\tilde{T}_0)$ при 25 °С и использовать Ra_T вместо фактического Ra_E , то ошибка составит ≈ 50 %. Давление насыщенных паров воды $P(25$ °С) ≈ 3 % атмосферного (Рис. 1 (а)) и отличие Ra_T влажного и сухого воздуха ~ 1 %, однако если на одном теплообменнике непрерывно конденсируется, а на другом – испаряется пар, занимающий ≈ 3 % объёма ячейки, то конвекция возникнет даже при $Ra_T \approx 1100 \ll Ra^*$. Рис. 6 (б) для смеси воздух – ундекан существенно отличается от Рис. 6 (а), что объясняется на 2 порядка меньшими значениями P , например, при 100 °С оно составляет лишь 5 % нормального атмосферного давления.

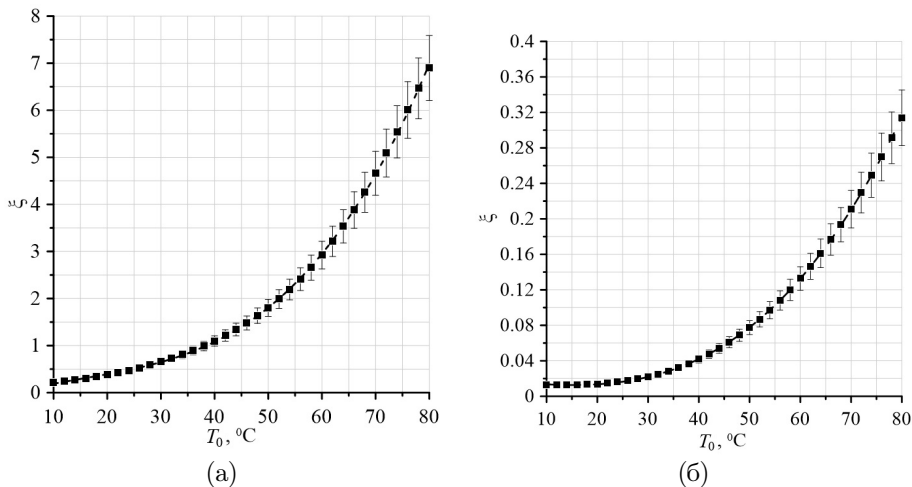


Рисунок 6 — Термоконцентрационная функция $\xi(\tilde{T}_0)$ для смеси воздуха с парами (а) воды, (б) ундекана. Точки – эксперимент, линии – выражения (4) и (5).

Практическая польза выражений (4) и (5) состоит в том, что они позволяют (i) установить наличие/отсутствие конвекции, пользуясь лишь оценкой Ra_T (при $T_0 < 50$ °C можно пользоваться Ra_T для сухого воздуха); (ii) если $Ra_E > Ra^*$, по известному значению Ra_T определять Ra_C для уравнения Навье-Стокса (2).

В четвёртой главе исследуется теплопередача в той же задаче Рэлея-Бенара, что изучалась в контексте механики газа в главе 3. Оригинальность главы заключается не только в новых результатах, но и в способе их представления зависимостью $Nu(Ra_E)$ подобно тому как при свободной ТГК теплопередача описывается $Nu(Ra_T)$. Как правило, тепло- Nu и массоперенос Nu_D при конденсации пара описываются эмпирическими выражениями вида [A6]

$Nu = C_{kT} Re^{k_1} Pr^{k_2}$, $Nu_D = C_{kD} \pi_D^{k_3} \varepsilon_D^{k_4} Re^{k_5}$, $\pi_D = (P_1 - P_2) P_0^{-1}$, $\varepsilon_D = P_1 P_0^{-1}$, (6) где коэффициенты C_{kT} , C_{kD} и показатели степеней $k_1 - k_5$ зависят от конкретной конструкции теплообменника и определяются эмпирически, Re – число Рейнольдса, P_1 , P_2 – давление насыщенных паров у поверхности испарения и вдали от неё, P_0 – полное давление паровоздушной смеси. Смысл (6) в следующем: тепло- и массоперенос зависят от интенсивности механического движения (число Re) и разности концентрации пара (множители π_D , ε_D), однако в СТКК оба этих фактора естественным образом учтены в Ra_E , что было использовано в диссертации.

Особенность последней главы состоит в том, что исходные данные по теплопередаче (сигналы датчиков) во влажном воздухе потребовали гораздо более сложной интерпретации и постобработки, чем в главах 2 и 3, хотя алгоритм измерений остался прежним.

Смесь воздух – ундекан продемонстрировала качественное сходство с сухим воздухом, выражающееся в том, что при каждом фиксированном значении

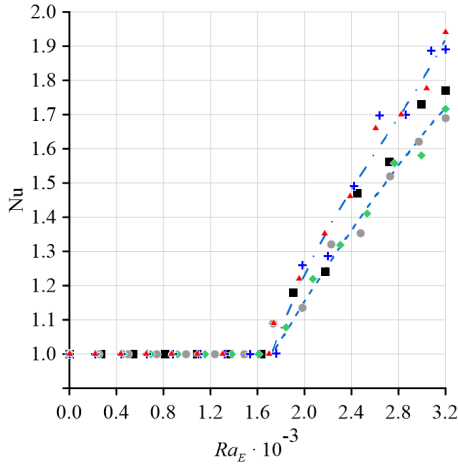


Рисунок 7 — $Nu(Ra_E)$ для смеси воздух – ундекан. Точки – эксперимент при $T_0 = 25$ °C (○), 35 °C (□), 45 °C (◇), 55 °C (+), 65 °C (△). Линии – выражение (7).

T_0 , боковые термопары регистрировали ненулевой сигнал при той же $(\Delta T)^*$, при которой датчик теплового потока фиксировал переход от теплопроводного режима теплопередачи к конвективному (см. Рис. 1 (б), 3 (а)). Результат – совокупность кривых $Nu(Ra_E)$, выходящих из одной точки $(1680 \pm 55; 1.0)$ при различных значениях параметра T_0 , представлена на Рис. 7. Полученные кривые располагаются близко к универсальной зависимости (3). Дополнительный тепловой поток, обусловленный фазовыми превращениями ундекана, был учтён заменой постоянного коэффициента на параметрическую зависимость при сохранении неизменной степени числа Рэлея

$$Nu = \left(1.9 \times 10^{-3} \tilde{T}_0 + 8 \times 10^{-4}\right) Ra_E^{0.90}. \quad (7)$$

Смесь воздух – водяной пар существенно отличается от предыдущей. При обработке сигналов термоЭДС был обнаружен следующий парадокс: боковые термопары и датчик регистрировали «начало» конвекции при различных значениях $(\Delta T)^*$. При «низких» $T_0 = 15, 25, 35$ °C (Рис. 8 (а)) боковые термопары регистрировали подъёмно-опускное течение при одном значении $(\Delta T)^*$ (красная линия), а сигналы датчика в прямой и обратной конфигурациях ∇T оставались неразличимы вплоть до больших $(\Delta T)^*$ (синяя линия). И, наоборот, при «высоких» $T_0 = 55, 65, 75$ °C усиление теплового потока регистрировалось датчиком при меньших $(\Delta T)^*$, т.е. до появления подъёмно-опускного течения, детектировавшегося термопарами (Рис. 8 (б)). И только при одной $T_0 \approx 45$ °C сигналы «синхронизировались» так, как это всегда было для сухого воздуха (Рис. 3 (а)) и его смеси с ундеканом. Такое поведение системы получило объяснение после декомпозиции теплового потока на отдельные составляющие и их анализа, позволившего выяснить, какие компоненты должны учитываться

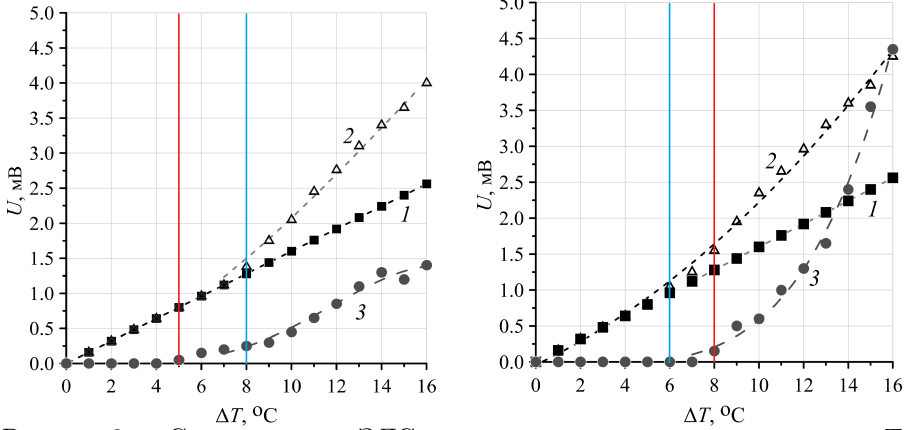


Рисунок 8 – Сигналы термо-ЭДС для смеси воздух – водяной пар при T_0 (а) 25 °С и (б) 65 °С. Обозначения те же, что на Рис. 3 (а).

(а какие – исключаться) при численной постобработке сигналов и расчёте числа Nu , чтобы удовлетворить его исходному определению для ТГК.

Вначале рассматривается инверсная стратификация $\nabla T \uparrow \uparrow \mathbf{n}$. Вектор плотности потока массы пара обусловлен градиентной диффузией и термодиффузией

$$\mathbf{j}_{wv} = -\rho_{gm} D \left[\nabla m_{wv} + k_T \frac{\nabla T}{T} \right], \quad (8)$$

где ρ_{gm} – плотность газовой смеси; массовая доля водяного пара $m_{wv} = \rho_{wv} \cdot \rho_{gm}^{-1}$, а ρ_{wv} – его парциальная плотность, k_T – термодиффузионное отношение. Термодиффузия вызывает увеличение C пара вблизи горячей верхней стенки, а градиентная диффузия вызывает молекулярный поток в противоположном направлении. В стационарном состоянии граничные условия для воздуха и пара на стенках ячейки выглядят одинаково $\mathbf{j}_{wv} = 0$, $\mathbf{j}_{air} = 0$, но принципиально отличаются: поверхность жидкости непроницаема для воздуха, но проницаема для пара. Возникают встречные молекулярные потоки: «холодные» молекулы испаряются с поверхности жидкости и диффундируют вверх за счёт эффекта Соре, где «нагреваются» и накапливаются в избытке, что усиливает поток градиентной диффузии, направленный вниз. В результате конкуренции молекулярно-диффузионных механизмов устанавливается термодинамическое равновесие, при котором испарение «холодных» и конденсация «горячих» молекул пара происходит на поверхности жидкости. В термодинамическом равновесии $\mathbf{j}_{wv} = 0$, но вектор плотности потока тепла $\neq 0$

$$\mathbf{q}_{inverse} = -\lambda \nabla T \left[1 - \rho_{gm} D k_T (\lambda T_0)^{-1} (h_{wv}(T_h) - h_{wv}(T_c)) \right], \quad (9)$$

где $h_{wv}(T)$ – энтальпия пара. Знак «-» в квадратных скобках (9) записывается в общем случае, – при этом у водяного пара $k_T < 0$, поэтому по модулю $\mathbf{q}_{inverse}$ становится больше, чем в чисто теплопроводном случае (без испарения и конденсации пара на нижнем теплообменнике). Сигнал датчика в инверсном режиме (кривая 1 на Рис. 8 (а),(б)) $U_{inverse} \propto |\mathbf{q}_{inverse}|$. Но согласно определению числа Nu , его знаменатель *должен* представлять собой чисто теплопроводный тепловой поток.

Следуя этому определению, термоЭДС U_{inverse} должна быть пропорциональна только $\lambda|\nabla T|$. Это означает, что исходный сигнал датчика необходимо скорректировать, исключив дополнительный вклад термодиффузионного слагаемого в (9)

$$U_{\text{inverse}}^c = U_{\text{inverse}} [1 - \rho_{gm} D k_T (\lambda T_0)^{-1} (h_{wv}(T_h) - h_{wv}(T_c))]^{-1}. \quad (10)$$

Для вычисления поправки (10) требуется знать k_T . Насколько нам известно из справочной и научной литературы, экспериментальные измерения k_T для смеси «воздух – водяной пар» не проводились, возможно, из-за малости $\nabla T \approx 5 \times 10^{-3} \text{ К}\cdot\text{м}^{-1}$ в атмосфере Земли. Однако в лаборатории ∇T на 6 порядков больше, и термодиффузия существенно проявляется уже при $\approx 300 \text{ К}\cdot\text{м}^{-1}$ (Рис. 8 (б)). Для k_T использовалась аппроксимация, предложенная в [A5]

$$k_T(T_0, \text{ }^\circ\text{C}) = -6 \times 10^{-4} T_0 - 0.112. \quad (11)$$

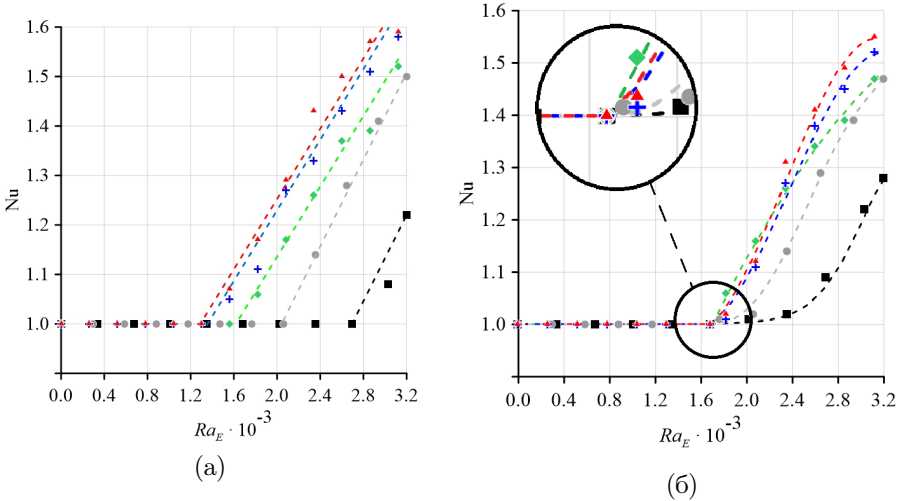


Рисунок 9 — Зависимость $\text{Nu}(\text{Ra}_E)$ (а) без коррекции; (б) с коррекцией. Точки – эксперимент при $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (\square), $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (\circ), $45 \text{ }^\circ\text{C}$ (\diamond), $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ($+$), $65 \text{ }^\circ\text{C}$ (\triangle). Пунктирные линии тренда – полиномиальная интерполяция.

Далее анализируется прямая стратификация $\nabla T \downarrow \uparrow \mathbf{n}$, когда вода испаряется на нижнем теплообменнике и конденсируется на верхнем, поэтому граничные условия на этих стенках имеют вид $\mathbf{j}_{wv} \neq 0$, $\mathbf{j}_{\text{air}} = 0$. При этом даже в отсутствие конвективного подъёмно-опускного течения возникает диффузионно-индуцированный поток Стефана, который учитывается модификацией первого слагаемого в (8), принимающего вид $-\rho_{gm} D \nabla m_{wv} (m_{\text{air}})_h^{-1}$, где $(m_{\text{air}})_h$ – массовая доля воздуха при T_h . В общем случае полный тепловой поток [A6]

$$\mathbf{q}_{\text{straight}} = -\lambda \nabla T - \rho_{gm} D h_{wv} [1 + K^{-1}] \left(\frac{\nabla m_{wv}}{(m_{\text{air}})_h} + k_T \frac{\nabla T}{T} \right) + \rho_{gm} h_{gm} \mathbf{v}, \quad (12)$$

где \mathbf{v} – скорость конвективного течения, $K = r(c_p \Delta T)^{-1} \sim 10^2$ – критерий Кутателадзе, r и c_p – теплота парообразования и теплоёмкость воды. В (12) учитывается повторное использование конденсированного пара, которое увеличивает (незначительно) сигнал датчика теплопотока в $(1+K^{-1})$ раз по сравнению с задачей без рециркуляции конденсата. Далее рассматривается бесконвективный режим $\mathbf{v} = 0$ и корректируется сигнал датчика U_{straight} в соответствии с выражением (12), чтобы исключить из (числителя) числа Nu конвективный поток Стефана, обусловленный граничным условием проницаемости поверхности жидкости для пара и непроницаемости для воздуха. Без этой поправки невозможно выделить вклад конвективного течения в теплопередачу – последнего слагаемого (12), представляющего основной интерес для исследования. Скорректированное выражение для определения числа Nu (при $\mathbf{v} = 0$) принимает вид

$$Nu = \frac{U_{\text{straight}}}{U_{\text{inverse}}^c} - m_{wv} \psi, \quad (13)$$

$$\psi = \frac{U_{\text{straight}}}{U_{\text{inverse}}^c} - 1 - (\lambda^{-1} \rho_{gm} D h_{wv} (1+K^{-1}) k_T T^{-1}).$$

Далее поправки, вычисленные для каждого значения $\Delta T < (\Delta T)^*$ при фиксированном параметре T_0 , линейно экстраполируются на оставшуюся часть кривых 1 и 2 ($\Delta T > (\Delta T)^*$) на Рис. 8. Графики до введения поправок $Nu(Ra_E) = U_{\text{straight}} U_{\text{inverse}}^{-1}$ при разных значениях параметра T_0 показаны на Рис. 9 (а), а после коррекции – на Рис. 9 (б). Обобщение экспериментальных зависимостей на Рис. 9 (б), аппроксимированных МНК при разных абсолютных T_0 (К), позволило записать универсальное выражение для $Nu(Ra_E)$ (см. Рис. 10)

$$Nu = (-3 \times 10^{-6} T_0^2 - 1 \times 10^{-6} T_0 + 0.0163) Ra_E^{(8 \times 10^{-5} T_0^2 - 2.8 \times 10^{-3} T_0 + 0.58)}. \quad (14)$$

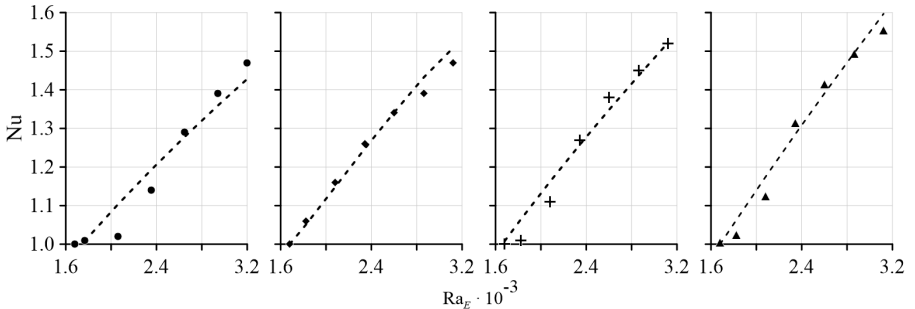


Рисунок 10 – Аппроксимация экспериментальных данных $Nu(Ra_E)$ (точки) выражением (14) (линии) при значениях параметра T_0 и (R^2) (слева направо): 35 °C (0.93); 45 °C (0.99); 55 °C (0.97); 65 °C (0.97).

В конце главы поясняется, почему корректировки (10), (13) не потребовались для результатов по смеси воздуха с парами ундекана на Рис. 7.

Термодиффузия оказывает противоположное воздействие на крупные, тяжелые (по сравнению с воздухом) молекулы углеводорода. Для ундекана первая поправка (10) неприменима: термодиффузия, наоборот, противодействует дрейфу молекул ундекана к горячему верхнему теплообменнику и удерживает их вблизи холодной поверхности жидкости. Вторая поправка (13) мала из-за низкого давления насыщенных паров ундекана.

В заключении отмечается, что задачи диссертации решены, цель – достигнута, а основные результаты имеют следующие формулировки:

1. Сконструирована, изготовлена и отъюстирована экспериментальная установка для исследования гравитационной конвекции паровоздушной смеси в длинной прямоугольной полости квадратного сечения с испарением и конденсацией паров на горизонтальных границах полости.
2. Изготовлен голографический интерферометр реального времени для определения структуры и визуализации конвективного течения.
3. Экспериментально и численно подтверждено, что при подогреве полости снизу, в ней возникает циркуляционное течение воздуха в виде одиночного вала, ось которого совпадает с осью полости.
4. Экспериментально установлено, что в диапазоне (283; 363) К свободная конвекция смесей воздуха с парами воды или ундекана, при условиях испарения жидкости и конденсации пара на границах замкнутой полости, характеризуется параметрическим отношением концентрационного и теплового чисел Рэлея $Ra_C Ra_T^{-1}$, имеющим вид полинома 3-й и 2-й степени безразмерной средней температуры, соответственно.
5. Экспериментально обнаружено существенное влияние термодиффузии и потока Стефана на свободную конвективную теплопередачу в паровоздушной смеси при $\nabla T \gtrsim 300 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$.
6. Показано, что при свободной термоконцентрационной конвекции, конвективный теплопоток через полость (число Нуссельта Nu) при условии испарения жидкости и конденсации пара на её стенках, описывается естественной переменной – эффективным числом Рэлея Ra_E , равным сумме теплового Ra_T и концентрационного Ra_C чисел, которые связаны между собой условиями термодинамического равновесия на границе жидкость – пар.
7. Обнаружено, что функциональная связь $Nu(Ra_E)$, с поправками на термодиффузию и поток Стефана, в надкритической области (по крайней мере для $Ra_E < 3.5 \times 10^3$) хорошо аппроксимируется степенным законом с показателем степени и коэффициентом, зависящим от параметра (средней температуры) и природы смеси газов.

Список цитируемых работ:

- A1. Пинягин А.Ю. Исследование концентрационных полей в газовых смесях при совместном действии диффузионных и конвективных потоков: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.14. Пермь, 1982. 155 с.
- A2. Косов В.Н. Диффузионная устойчивость и концентрационная конвекция в изотермических трехкомпонентных газовых смесях: дис. ... д-ра. физ.-мат. наук: 01.04.14. Алматы, 1998. 333 с.
- A3. Silveston P.L. Wärmedurchgang in waagerechten Flüssigkeitsschichten // Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A. 1958. Vol. 24. p. 59-69.
- A4. Бретшнайдер Ст. Свойства газов и жидкостей. Л.: Химия. 1966. 536 с.
- A5. Vidal O., Murphy W.M. Calculation of the effect of gaseous thermodiffusion and thermogravitation processes on the relative humidity surrounding a high level nuclear waste canister // Waste Management. 1999. Vol. 19, No 3. p. 189-198.
- A6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. М.: Энергоиздат. 1981. 416 с.

Основные публикации по теме диссертации

1. **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. P. 012016. (Scopus)
2. **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)
3. **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. P. 012033. (Scopus)
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. P. 012055. (Scopus)
5. **Somov S.A.**, Ivanov A.S. Experimental study of thermoconcentration convection in air-water and air-undecane mixtures // Physics of Fluids. 2024. Vol. 36, Iss. 10. P. 104104. (Scopus, WoS Q1)
6. **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, Iss. S1. P. S34-S40. (Scopus, БАК)
7. **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, Вып. 2. С. 214-224. (Scopus, БАК)

Сомов Сергей Андреевич

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

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета

в типографии издательства Пермского национального исследовательского
политехнического университета 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.

Тел.: (342) 219-80-33