

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН
академик РАН Маркович Д.М.

«26» сентября 2025 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения
Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Развитие термогравитационной конвекции в горизонтальном слое газа при наличии линейно-протяженной температурной неоднородности на подстилающей поверхности» выполнена в лаборатории физических основ энергетических технологий (7.4).

В период подготовки диссертации с 2016 года и по 2022 год, соискатель, Бобров Максим Сергеевич, работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук в лаборатории физических основ энергетических технологий (7.4) в должности младшего научного сотрудника.

В 2024 году Бобров Максим Сергеевич окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы, нормативный период обучения с 09.07.2020 г. по 08.07.2024 г.

В 2020 году Бобров Максим Сергеевич окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению 03.04.02 – «Физика», присуждена квалификация магистр.

Кандидатские экзамены сданы во время обучения в аспирантуре в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Хребтов Михаил Юрьевич, Федеральное государственное бюджетное

учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии, старший научный сотрудник лаборатории 7.2.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность исследования.

Тепловая (термогравитационная) конвекция является одной из наиболее распространенных причин движения в жидкостях или газах. Тепловая конвекция представляет собой процесс переноса тепла и массы, при котором движение вещества возникает за счёт силы плавучести и разницы плотностей, обусловленной локальными изменениями температуры. Тепловая конвекция играет ключевую роль как во множестве природных ситуаций (атмосферное и океаническое движение, мантийная конвекция), так и в различных технологических системах (системы пассивного отопления и вентиляции, системы охлаждения в энергетике, охлаждение электронной аппаратуры), обеспечивая эффективное распределение тепла без внешнего механического воздействия. В связи с высокой распространенностью и высоким прикладным значением, конвекция активно изучается на протяжении многих десятилетий.

Одним из наиболее простых и наиболее изученных примеров тепловой конвекции является конвекция Рэлея – Бенара, которая представляет собой течение, которое образуется в вязкой среде при нагреве снизу и охлаждении сверху при наличии сил плавучести. В конвекции Рэлея – Бенара распределение температуры на стенках предполагается однородным, однако в ряде реальных примеров, таких как атмосферная конвекция, морская конвекция под плавучими льдами, а также мантийная конвекция, охватывающая континентальную и океаническую литосферу, присутствует неоднородное распределение температуры на границах. Также в большинстве прикладных задач основную роль играют локализованные источники тепла. В таких системах помимо вертикального градиента температуры, характерного для классической конвекции Рэлея – Бенара, присутствует и горизонтальный градиент, что существенно меняет структуру течения. Горизонтальный градиент температуры приводит к неоднородному распределению плотности жидкости в горизонтальном направлении, что создает градиент давления, который заставляет жидкость или газ двигаться в горизонтальном направлении. Таким образом, присутствие градиента температуры, при наличии силы плавучести, приводит к формированию теплового и массового потоков в жидкости, стремящихся уменьшить данный градиент. Одновременное присутствие вертикального и горизонтального температурных градиентов в течении приводит к формированию сложных течений, характер которых будет определяться свойствами среды, геометрией системы, формой неоднородностей, соотношением между вертикальной и горизонтальной составляющими температурного градиента и другими факторами. Несмотря на глубокую проработанность и широту охвата исследований по данной тематике, до сих пор существует ряд задач,

получивших недостаточное освещение в специализированной литературе. В частности, в достаточной мере не исследован эффект взаимодействия вертикального и горизонтального тепловых потоков, образующихся под воздействием линейно-симметричной поверхностно температурной неоднородности. Ярким примером такого взаимодействия является конвекция в атмосферном пограничном слое в окрестности незамерзающих рек в зимнее время года. В RANS исследовании для г. Красноярска в зимний период был отмечен эффект осцилляций положения восходящего потока над незамерзающей рекой [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Данные осцилляции сопровождались переходами больших объемов воздуха и переносимой им примеси с одного берега реки на другой и обратно. Распределение примесей из-за этого становилось неоднородным, возникали локальные пятна повышенной и пониженной концентрации вблизи поверхности. Природа данных осцилляций не была исследована ранее, что делает актуальным задачу по изучению динамики, структуры и механизмов формирования данного процесса.

Дополнительный интерес представляет исследование взаимодействия вертикального и горизонтального градиентов температуры с поверхностным сдвигом (вызываемым течением реки) с целью обнаружения эффектов интенсификации конвективных течений в атмосферном пограничном слое и исследования формирующихся в таком течении крупномасштабных вихревых структур.

Целью диссертационной работы является численное (DNS, LES, RANS) исследование взаимодействия вертикального и горизонтального тепловых потоков в термогравитационной конвекции, образующейся под воздействием линейно-симметричной поверхностной тепловой неоднородности. Основное внимание уделено поиску эффектов интенсификации и ослабления циркуляционных течений из-за наличия поверхностных особенностей; анализу механизма формирования когерентных вихревых структур и колебательных процессов над неравномерно нагретой поверхностью; исследованию взаимодействия сил плавучести с поверхностным сдвигом (река, течение), а также разработке и верификации новой модификации $k - \varepsilon$ модели, подходящей для моделирования течений со свободной конвекцией при больших числах Рэлея по известному распределению температуры на подстилающей поверхности.

Для выполнения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Прямое численное моделирование течения, образующейся под воздействием линейно-симметричной поверхностной тепловой неоднородности в ограниченной по вертикали области, при умеренных числах Рэлея ($10^5 - 10^8$), для различных значений кинематической вязкости и температуропроводности, а также интенсивности поверхностной тепловой неоднородности.

2. Исследование эффектов интенсификации и ослабления циркуляционных течений в зависимости от интенсивности линейно-симметричной поверхностной температурной неоднородности.
3. Анализ механизма формирования когерентных вихревых структур и колебательных процессов, образующейся под воздействием линейно-симметричной поверхностной тепловой неоднородности.
4. Исследование изменения параметров течения и осцилляций положения восходящего потока над линейно-симметричной поверхностной температурной неоднородностью, в зависимости от числа Рэлея.
5. Разработка и верификация уточненной RANS-модели для расчетов течений со смешанной конвекцией при высоких числах Рэлея.
6. RANS-моделирование течения, образующейся под воздействием линейно-симметричной поверхностной тепловой неоднородности, при высоких числах Рэлея ($10^{13} - 10^{15}$), путем изменения вертикального размера расчетной области.
7. Расчет методом крупных вихрей совместного влияния поверхностной температурной неоднородности и поверхностного сдвига на структуру АПС в условиях устойчивой стратификации. Исследование влияния сдвига на формирующиеся приповерхностные циркуляционные течения.
8. Исследование влияния геометрической формы поверхностного температурной неоднородности и поверхностного сдвига на формирование крупномасштабных структур.

Научная новизна представленных результатов в работе заключается в следующем:

1. Впервые детально численно исследованы низкочастотные колебания потока, возникающие в течении Рэлея-Бенара при внесении на горизонтальные поверхности линейно-симметричной температурной неоднородности. Исследовано влияние тепловой неоднородности на средние характеристики течения и образующиеся в нем циркуляции. Найден диапазон соотношений между горизонтальным и вертикальным перепадами температур, при которых наблюдается эффект низкочастотных колебаний. Предложен механизм, объясняющий появление колебаний в потоке при данных условиях. Предложена асимптотическая оценка периода колебаний с ростом числа Рэлея.
2. Впервые численно исследована зависимость характеристик низкочастотных колебаний положения восходящего потока, образующейся под воздействием линейно-симметричной поверхностной тепловой неоднородности, при изменении расстояний между горизонтальными стенками в большом диапазоне чисел Рэлея ($10^5 - 10^{15}$). Проведено сравнение колебаний, возникающих при наличии верхней стенки с колебаниями, когда роль вертикального ограничения потока выполняет слой приподнятой инверсии.
3. Предложена и протестирована модификация классической $k - \epsilon$ модели турбулентности, улучшающая точность восстановления теплового потока на

стенке за счет учета эффектов плотностной стратификации в потоке, выраженных через локальное число Ричардсона. Модель протестирована на данных атмосферных наблюдений и показала улучшение восстановления потоков тепла и импульса на стенке по сравнению со стандартной $k-\varepsilon$ -моделью.

4. Численно исследован эффект от течения реки на конвекцию в ночном пограничном слое при условии положительной разницы температур между поверхностью и реки и окружающей почвой. Было обнаружено значительное ускорение прорастания слоя инверсии над рекой при учете ее течения, а также образование при этом крупномасштабных вихревых структур, концентрирующих в себе как вертикальную компоненту завихренности, так и повышенную температуру. Предложен механизм формирования таких структур за счет подъема завихренности с поверхности восходящим потоком от нагретой реки.

5. Исследовано формирование устойчивого течения воздуха через реку при наличии на реке изгиба. Возникновение такого струеобразного течения приводит к интенсификации переноса тепла, влаги и примеси с одного берега на другой. При наличии нескольких последовательных изгибов реки, между ними возникают устойчивые вертикальные вихри, влияющие на циркуляционные течения.

Теоретическая и практическая значимость.

Результаты, изложенные в диссертации, способствуют более глубокому пониманию механизмов нелинейного взаимодействия вертикального и горизонтального тепловых потоков в термогравитационной конвекции. Обнаруженные низкочастотные колебательные процессы, возникающие при определенных соотношениях между горизонтальным и вертикальным температурными градиентами, ранее подробно не исследовались. Данные колебания возникают за счет сил плавучести, но их частоты на порядок меньше частот внутренних волн, образующихся за счет присутствующей плотностной стратификации потока. Обнаруженные эффекты интенсификации циркуляционных течений и формирования когерентных вихревых структур над неравномерно нагретой поверхностью могут быть использованы для решения задач контроля и управления конвективными потоками в различных технологических установках. Полученные результаты исследований интенсификации циркуляционных течений над линеаризованным участком реки, влияния эффекта от течения реки на ночной пограничный слой и влияния изгибов реки на конвективные потоки над ней могут быть использованы при создании моделей микроклимата отдельных регионов. Разработанная модификация $k - \varepsilon$ модели с измененной параметризацией компонент тензора напряжений Рейнольдса и турбулентного теплового потока улучшает восстановление теплового потока от стенки по известному распределению температуры на ней за счет учета влияния плотностной стратификации потока. Данная модификация может быть реализована во многих существующих вычислительных пакетах

программ путем и может быть использована для моделирования динамики сухого атмосферного пограничного слоя с использованием данных об эволюции распределения температуры на подстилающей поверхности, полученных с помощью спутникового мониторинга.

Достоверность результатов обеспечивается тщательной отработкой методик проведения численного моделирования. Достоверность результатов прямого численного моделирования и моделирования методом крупных вихрей подтверждается сравнением полученных полей средних характеристик базового течения Рэлея-Бенара с литературными данными, а также использованием ранее хорошо протестированного (как в расчетах на различных канонических конфигурациях, так и на результатах классических атмосферных экспериментов) открытого программного кода MicroHH 1.0 (www.microhh.org), созданного для расчетов атмосферных и идеализированных течений методами DNS и LES. Представленная модификация $k - \epsilon$ модели с измененной параметризацией компонент тензора напряжений Рейнольдса и турбулентного теплового потока и соответствующим набором пристеночных функций была протестирована на данных экспериментальных наблюдений GABLS2 для сухого атмосферного пограничного слоя вместе с другими модификациями $k - \epsilon$ модели. Для каждой рассматриваемой задачи проводилось исследование зависимости решения от пространственного разрешения расчетной сетки.

Личный вклад автора.

Соискателем было проведено численное моделирование конвективных течений, образующейся под воздействием линейно-симметричной поверхностной тепловой неоднородности, при изменении физических параметров среды, интенсивности поверхностной тепловой неоднородности и вертикального размера расчетной области. Соискатель принимал участие в обработке результатов моделирования, построении спектральных характеристик и разработке асимптотической оценки периода низкочастотных колебаний конвективных ячеек с ростом числа Рэлея. Также соискатель принимал участие в разработке, реализации и тестировании модификации $k - \epsilon$ модели с измененной параметризацией компонент тензора напряжений Рейнольдса и турбулентного теплового потока в одноячеечной и одномерной постановке на основе собственного программного кода. Соискателем была проведена модификация расчетного модуля OpenFOAM для реализации предложенной модели турбулентности в трехмерной постановке; были проведены расчеты, обработка и анализ результатов в задаче по исследованию течений с неоднородной конвекцией при высоких числах Рэлея. Соискатель проводил LES моделирование эволюции атмосферного пограничного слоя вблизи линеаризованной реки в ночных условиях и над участком реки Енисей вблизи города Красноярск. Также соискатель принимал участие в статистической обработке и анализе всех

полученных результатов, а также в представлении научных докладов и написании публикаций.

Научная специальность, которой соответствует диссертация.

Диссертационная работа Боброва Максима Сергеевича «Развитие термогравитационной конвекции в горизонтальном слое газа при наличии линейно-протяженной температурной неоднородности на подстилающей поверхности» соответствует паспорту научной специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» по п. 16 «Тепломассоперенос в газах и жидкостях».

Апробация работы.

Материалы диссертации были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях: 4-th International Conference on Multi-scale Computational Methods for Solids and Fluids ECCOMAS MSF, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2019; XX Международная конференции по методам аэрофизических исследований, г. Новосибирск, 2020; XXXIV, XXXVI, XXXVIII Сибирский теплофизический семинар, г. Новосибирск, Россия, 2018, 2020, 2022; XXV Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям», г. Санкт-Петербург, 2018г.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 13 научных работах, из них опубликованных согласно перечню, российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК) – 7.

Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены:

в работах, опубликованных *в рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК)*:

1. Бобров М.С., Хребтов М.Ю. Исследование низкочастотных колебаний в условиях неоднородной тепловой конвекции. // Теплофизика и аэромеханика. – 2025. – Т. 32. – №. 4. – С. 617-634.

2. Hrebtov M., Bobrov M. Modification of k-ε Model for Sensible Heat and Momentum Flux Reconstruction from Surface Temperature Data // Atmosphere. – 2022. – Т. 13. – №. 7. – С. 1146.

3. Bobrov M., Hrebtov M. Simulation of atmospheric convection over the River Yenisei: Study of large-scale vortices formation // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2021. – Т. 2351. – №. 1.

4. Bobrov M. S., Hrebtov M. Y. Numerical investigation of the effect of river meander on the dynamics of the atmospheric boundary layer // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1677. – №. 1. – С. 012005.

5. Hrebtov M. Y., Bobrov M. S., Kozyulin N. N., Bazhenov A. Y. Numerical investigation of the influence of river flow on the atmospheric boundary layer under stably stratified conditions // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1105. – №. 1. – С. 012028.

6. Hrebtov M. Y., Bobrov M. S., Zhakebaev D. B., Karzhaubaev K. K. Numerical study of the interaction of vortex ring and background turbulence // Thermophysics and Aeromechanics. – 2019. – Т. 26. – №. 6. – С. 821-836.

7. Bobrov M., Hrebtov M., Ivashchenko V., Mullyadzhanyan R., Seredkin A., Tokarev M., Markovich D. Pressure evaluation from Lagrangian particle tracking data using a grid-free least-squares method // Measurement Science and Technology. – 2021. – Т. 32. – №. 8. – С. 084014.

Публикации в прочих научных изданиях

8. Hrebtov M., Bobrov M., Hanjalić K. Numerical investigation of the river flow effect on heat and mass transfer in atmosphere under stably stratified conditions, Proc of 4-th International Conference on Multi-scale Computational Methods for Solids and Fluids ECCOMAS MSF 2019, Sept. 18-20 2019, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. P. 240-244. ISBN:978-9958-638-57-2.

9. Бобров М. С., Хребтов М. Ю. Исследование совместного влияния локальной температурной неоднородности на подстилающей поверхности и теплового острова на тепломассоперенос в атмосфере //ВОЕНМЕХ. Вестник Балтийского государственного технического университета. – 2019. – №. 1-2. – С. 74-78.

Общее заключение.

Диссертация «Развитие термогравитационной конвекции в горизонтальном слое газа при наличии линейно-протяженной температурной неоднородности на подстилающей поверхности» Боброва Максима Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на проведенном расширенном заседании Секции 2 Учёного совета ИТ СО РАН. Заседание состоялось под руководством заместителя председателя Секции №2, заместителя директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук к.ф.-м.н. Сиковского Д.М. Всего присутствовали на заседании 14 человек, из них: 6 докторов наук, 6 кандидатов наук.

Решение «за» принято единогласно, протокол №04-2025 от 26.09.2025.

Заместитель председателя
Секции 2 Учёного совета:
кандидат физико-математических наук,
заместитель директора по
научной работе ИТ СО РАН

Дмитрий Филиппович Сиковский

Секретарь Секции 2
Учёного совета ИТ СО РАН:
кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь ИТ СО РАН



Максим Сергеевич Макаров

Подписи Д.Ф. Сиковского и М.С. Макарова заверяю.

Начальник отдела кадров
ИТ СО РАН



Светлана Юрьевна Грехнева