



УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий

д.ф.м.н.

С. Б. Медведев

«3» _____ декабря _____ 2025 г.

Отзыв

ведущей организации Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий» о диссертации М. С. Боброва «Развитие термогравитационной конвекции в горизонтальном слое газа при наличии линейно-протяжённой температурной неоднородности на подстилающей поверхности», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9- Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы исследования. Тепловая конвекция играет ключевую роль как в целом ряде природных процессов (атмосферные и океанические течения, 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 широкой распространённостью и большим прикладным значением конвекция активно изучается на протяжении многих десятилетий. Исследование взаимодействия вертикального и горизонтального потоков тепла и импульса в термогравитационных конвективных течениях при наличии неоднородного распределения температуры на подстилающей поверхности представляет собой важную научную задачу, так как в ряде реальных геофизических явлений таких, как атмосферная конвекция, морская конвекция под плавучими льдами, а также мантийная конвекция, охватывающая континентальную и океаническую литосферу, присутствует неоднородное распределение температуры на границах, а также во многих прикладных задачах основную роль играют локализованные источники тепла.

Несмотря на большой интерес, глубокую проработанность и широту охвата исследований по данной тематике, до сих пор существует ряд задач, не получивших достаточного освещения в литературе. В частности, не был в достаточной мере исследован эффект взаимодействия вертикального и горизонтального потоков тепла и импульса, образующихся под воздействием линейно-протяженной поверхностной температурной неоднородности. В

данных условиях можно ожидать появления интенсивных когерентных вихревых структур и осцилляций в потоке, воздействие которых может существенно влиять на перенос тепла и примесей. Изучение присущих таким течениям закономерностей является важной научной и прикладной задачей, а тема данного исследования – актуальной для изучения в настоящее время.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Работа изложена на 129 листах машинописного текста, включая 63 рисунка, библиографического списка из 113 цитированных работ.

Содержание работы

Во введении показана актуальность работы, сформулирована цель работы и поставлены задачи исследований.

В первой главе представлен обзор основных работ по тематике исследования. Критически рассмотрены работы, направленные как на детальное изучение структуры вертикальной и горизонтальной конвекции в классических постановках, так и на анализ динамики конвективных течений в областях со сложной геометрией, наклонных областях, и областях с наличием нескольких дискретных источников нагрева. Дан обзор работ, в которых большое внимание уделяется исследованию динамических процессов и вторичных течений в конвекции над локализованным источником тепла и исследованию динамических колебательных процессов в конвективных течениях, формирующихся при переходах между различными модами конвекции. Критически анализируются три основных подхода к численному моделированию турбулентных течений (DNS, LES, RANS).

Во второй главе методом прямого численного моделирования изучено влияние линейно-симметричной температурной неоднородности на нижней стенке в течении Релея–Бенара на формирование крупномасштабных циркуляций и низкочастотных колебаний потока. Установлено, что при определённом соотношении вертикального и горизонтального температурных градиентов возникают устойчивые квази-периодические горизонтальные смещения центрального восходящего потока. На основе полученных данных предложена модель механизма образования колебаний и дана асимптотическая оценка их периода в зависимости от числа Рэлея.

В третьей главе методом RANS исследована динамика конвективного пограничного слоя над линейно-симметричной температурной неоднородностью для высоких чисел Рэлея. Подтвержден эффект осцилляций потока, описанный во второй главе. Показано, что пространственный период колебаний растёт линейно с высотой области, а временной период подчиняется степенной зависимости с показателем 0.5. Построена и верифицирована модификация $k-\varepsilon$ модели турбулентности с уточнённой параметризацией компонент тензора напряжений Рейнольдса и теплового потока, позволяющая существенно точнее в сравнении с

классической двухпараметрической моделью турбулентности восстанавливать поверхностные потоки тепла и импульса по данным температуры на поверхности в условиях суточного цикла.

В четвертой главе представлены полученные на основе метода моделирования крупных вихрей с высоким разрешением результаты численного исследования совместного влияния поверхностного температурного градиента и поверхностного сдвига на структуру атмосферного пограничного слоя в условиях устойчивой стратификации. Моделировалось воздействие поверхности реки на конвективное течение в окружающей воздушной среде. Исследовалось взаимодействие теплового эффекта реки, обусловленного разницей между температурой воды и окружающей почвы, и эффекта сдвига, вызванного течением реки. В качестве реки был выбран линейный протяженный участок с повышенной относительно окружающей поверхности температурой и заданным профилем скорости. Установлено, что течение реки способно существенно изменять динамику ночного пограничного слоя, увеличивая скорость прорастания слоя инверсии.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Автореферат диссертации изложен на 25 страницах и в полной мере соответствует основному содержанию диссертации. В нем раскрыты цели, задачи и методы исследования, представлены основные результаты работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Научная новизна и новые результаты.

Результаты диссертации раскрывают механизмы нелинейного взаимодействия вертикальных и горизонтальных потоков тепла и массы в термогравитационной конвекции с неоднородными граничными условиями. Выявлены ранее не изученные низкочастотные колебания границ горизонтальных циркуляций, обусловленные эффектами взаимодействия конвективных ячеек и валов над неравномерно нагретой поверхностью. Данный эффект был воспроизведен как в прямом численном моделировании (ДНС) для малых чисел Рейнольдса, так и на масштабах атмосферного пограничного слоя с помощью моделирования методом RANS.

Научная и практическая значимость работы. 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 линейризованным 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 - ε модели турбулентности 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 использована для восстановления поверхностного потока тепла по данным распределения температуры на подстилающей поверхности, полученным с помощью спутникового мониторинга. Результаты исследований могут быть применимы для разработки механизмов управления конвективными потоками и оценки воздействия протяженных поверхностных тепловых неоднородностей (например, рек) на локальный микроклимат.

Достоверность результатов исследования 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 - ε модели турбулентности 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 - ε модели. Для каждой рассматриваемой задачи проводилось детальное исследование зависимости решения от пространственного разрешения расчетной сетки.

Содержание автореферата диссертации и опубликованные статьи в полной мере отражают содержание диссертации. Работа в достаточной мере апробирована на профильных конференциях всероссийского и международного уровней. Результаты диссертации могут быть использованы при исследовании гидродинамики широкого класса конвективных течений в ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН, ИВМ им. Г.И. Марчука РАН, ИФА им. А.М. Обухова РАН, ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, ИГиЛ СО РАН, ИОИО им. П.П. Ширшова РАН, ИВМ и МГ СО РАН, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, ФИЦ ИВТ, ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН,

