

На правах рукописи



БОБРОВ Максим Сергеевич

**РАЗВИТИЕ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В
ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ГАЗА ПРИ НАЛИЧИИ ЛИНЕЙНО-
ПРОТЯЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Научный руководитель: Хребтов Михаил Юрьевич – кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты: Пененко Алексей Владимирович – доктор физико-математических наук, ФГБУН «Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук», ведущий научный сотрудник, заместитель директора по науке

Сухановский Андрей Николаевич – доктор физико-математических наук, ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (филиал – «Институт механики сплошных сред УрО РАН»), заведующий лабораторией турбулентности

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий» (ФИЦ ИВТ)

Защита состоится 24 декабря 2025 года в 09 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе ИТ СО РАН, по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН: www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН



Терехов
Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы 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 в 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 хорошо 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 классической 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. Кроме того, во многих прикладных задачах 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 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 поверхностной температурной неоднородности. Ярким примером такого взаимодействия является конвекция в атмосферном пограничном слое в окрестности незамерзающих рек в зимнее время года. В RANS исследовании динамики атмосферного пограничного слоя (АПС) для г. Красноярска [Hrebtov, 2017] в зимний период был отмечен эффект осцилляций положения восходящего потока над незамерзающей рекой. 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 исследование взаимодействия вертикального и горизонтального потоков тепла и импульса в термогравитационных конвективных течениях при наличии линейно-протяженной температурной неоднородности на подстилающей поверхности.

Задачи, поставленные в соответствии с целью работы:

1. Прямое численное моделирование течения, образующегося 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, образующихся 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 течений, образующихся 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 поверхностной температурной неоднородности и поверхностного сдвига на формирование крупномасштабных вихревых структур.

Научная новизна.

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, образующихся 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 $k-\varepsilon$ 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 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.

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 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 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.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты численного исследования структуры низкочастотных колебаний положения восходящего потока, возникающих в течении Рэлея-Бенара при внесении на горизонтальные поверхности линейно-симметричной температурной неоднородности при низких числах Рэлея ($\sim 4 \cdot 10^5$). Найденная оценка диапазона соотношений между горизонтальным перепадом температур на стенке и вертикальным перепадам температур между стенками, при которых наблюдается эффект низкочастотных колебаний. Вычисленная зависимость средних характеристик течения (средних скоростей, распределений силы плавучести, масштабов зон рециркуляции) от соотношения между горизонтальным и вертикальным градиентами температур на границах.

2. Асимптотическая оценка зависимости пространственного и временного периода низкочастотных колебаний восходящего потока над линейной температурной неоднородностью на подстилающей поверхности от числа Рэлея. Проверка на данных прямого численного моделирования в диапазоне $Ra = 3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^7$. Исследование пространственной и спектральной структуры основных энергонесущих мод потока в зависимости от числа Рэлея.

3. Модификация $k-\varepsilon$ модели турбулентности с измененной параметризацией компонент тензора напряжений Рейнольдса и турбулентного теплового потока с использованием локального числа Ричардсона в качестве параметра усиления/ослабления вертикальных потоков импульса и тепла.

4. Оценка влияния вертикального масштаба течения на частоту, амплитуду и пространственный период колебаний положения восходящего потока над линейно-симметричной температурной неоднородностью при высоких числах Рэлея на основе RANS-моделирования.

5. Результаты численного LES-исследования взаимодействия сил плавучести с поверхностным сдвигом на примере эволюции атмосферного пограничного слоя вблизи линеаризованной реки в ночных условиях при наличии положительной разницы температур между рекой и окружающей почвой. Найденный эффект интенсификации приповерхностных циркуляций при включении течения реки в расчет. Найденные эффекты образования струйных течений над рекой, перпендикулярно ее направлению, при наличии изгибов реки.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается тщательной обработкой 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 $k-\varepsilon$ 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 $k-\varepsilon$ модели. Для каждой рассматриваемой задачи проводилось исследование зависимости решения от пространственного разрешения расчетной сетки.

Апробация результатов исследования. 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.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, включая 7 статей в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора.

Соискателем было проведено численное моделирование конвективных течений, образующейся под воздействием линейно-протяженной 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 построении асимптотической оценки периода низкочастотных колебаний конвективных ячеек с ростом числа Рэлея. Также соискатель принимал участие в разработке, реализации и тестировании модификации $k-\varepsilon$ модели турбулентности 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 Красноярска. Также соискатель принимал участие в обработке и анализе всех полученных результатов, а также в представлении научных докладов и написании публикаций.

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 наименований 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, показывающий основные направления исследований. Приведены 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. Также приведены работы, где 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.

Во второй главе методом прямого численного моделирования исследовалось влияние линейно-симметричной температурной неоднородности на нижней стенке, добавленной в течение Релея–Бенара, на образование крупномасштабных вихревых структур и формирование низкочастотных колебаний потока. Расчеты позволили проанализировать влияние возникающих эффектов турбулентности на структуру потока.

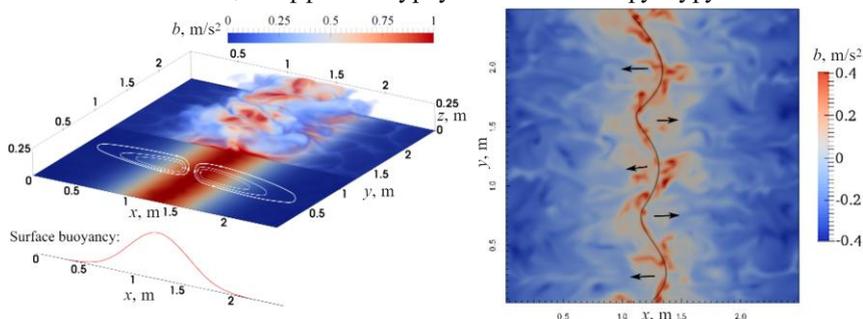


Рисунок 2.1 – Схема расчетной области и распределение плавучести b на нижней границе и в объеме течения для расчетов 1.1–1.3 (Таблица 2.1) (слева). Распределение плавучести в горизонтальном сечении расчета ($z =$

$0.3 \times L_z$, $Ra_{\max} = 5.86 \times 10^5$) и схема колебаний положения центрального восходящего потока (справа)

Было проведено две серии расчетов для исследования структуры потока в зависимости от изменения параметров течения. В первой части исследования расчеты проводились для различных чисел Рэлея, что достигалось через изменение кинематической вязкости среды при фиксированном числе Прандтля. На Рисунке 2.1 представлена схема расчетной области, используемой в данной серии расчетов. Параметры расчетов приведены в Таблице 2.1. Исследовалась конфигурация с постоянным распределением поля плавучести $b = -0.5 \text{ м/с}^2$ на верхней стенке, а на нижней стенке заданным в виде функции Гаусса в направлении оси Ox :

$$b_s(x)/b_{\max} = \exp\left(-\frac{(x - 0.5L_x)^2}{(0.16L_x)^2}\right) \quad (2.1)$$

Таблица 2.1 - Параметры 3D DNS-расчетов при изменении вязкости среды

№	$L_x \times L_y \times L_z$, м	$N_x \times N_y \times N_z$	ν , $\text{м}^2/\text{с}$	Ra_{\max}	Ra_{mean}
1.1	$2.5 \times 2.5 \times 0.25$	$360 \times 360 \times 128$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5.86 \cdot 10^5$	$3.06 \cdot 10^5$
1.2	$2.5 \times 2.5 \times 0.25$	$600 \times 600 \times 192$	$6.3 \cdot 10^{-5}$	$5.86 \cdot 10^6$	$3.06 \cdot 10^6$
1.3	$2.5 \times 2.5 \times 0.25$	$1024 \times 1024 \times 256$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5.86 \cdot 10^7$	$3.06 \cdot 10^7$

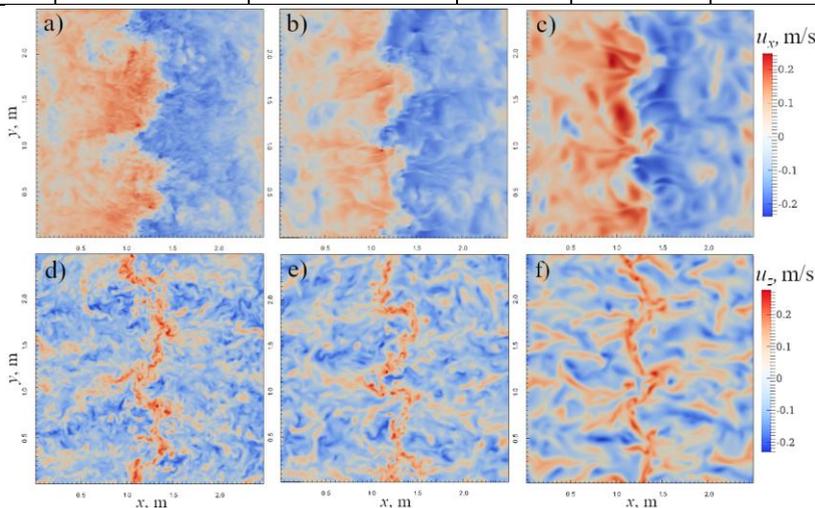


Рисунок 2.2 – Мгновенные поля поперечной (горизонтальной) (u_x) (a,b,c) и вертикальной (u_z) (d,e,f) компонент скорости для горизонтального сечения на высоте $z = 0.3 \times L_z$ для чисел Рэлея 5.8×10^7 (a,d), $Ra = 5.8 \times 10^6$ (b,e) и $Ra = 5.8 \times 10^5$ (c,f)

На горизонтальных сечениях мгновенных полей скорости (Рисунок 2.2) видно, что центральный восходящий поток, находящийся над областью

максимума поверхностной плавучести, имеет искривленную «пилообразную» форму в горизонтальном сечении. При этом, зубья пилы во время эволюции потока периодически меняются на впадины, как показано на Рисунке 2.1 (справа), таким образом, в потоке наблюдаются низкочастотные колебания с пространственным масштабом порядка $L_x/3$ и временным масштабом порядка $30 \times t_b$ ($t_b = \sqrt{L_z / ((b_{bot}) - b_{top})}$). Этот процесс наблюдается для всех рассмотренных конфигураций.

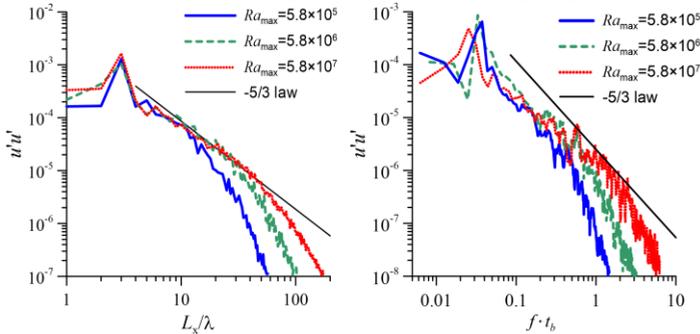


Рисунок 2.3 – Пространственные (слева) и временные (справа) спектры пульсаций x -компоненты скорости для различных чисел Рэля в центре расчетной области

Рассмотрение пространственных спектров пульсаций скорости в центре расчетной области (Рисунок 2.3 слева) показывает наличие в них пика на длинах волн порядка трех расстояний между стенками $3 \cdot L_z$ для всех рассмотренных случаев. Пики соответствуют основной моде горизонтальных колебаний положения восходящего потока. Временные спектры (Рисунок 2.3 справа) имеют пики на частоте колебаний, которая слегка уменьшается с увеличением числа Рэля. Вычисление спектров проводилось вдоль однородного направления (параллельно оси Oy), с усреднением полученных спектров по времени.

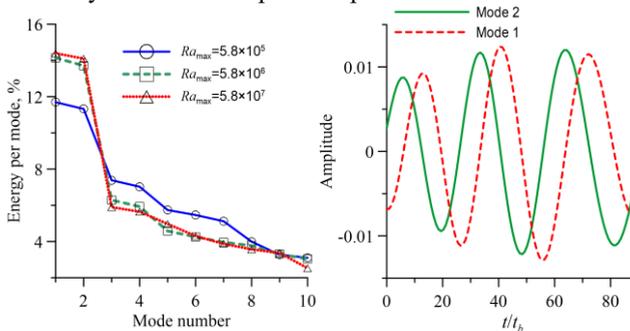


Рисунок 2.4 – SPOD спектр (слева) и временная эволюция первых двух мод для $Ra = 5.8 \times 10^6$ (справа)

Для анализа когерентных мод в потоке использовался метод Spectral Proper Orthogonal Decomposition (SPOD) [Sieber, 2016]. SPOD-спектр и временная эволюция первых двух мод (Рисунок 2.4) показывают присутствие в потоке колебательного процесса на фиксированной частоте, близкой к определенной по пикам временного спектра турбулентных пульсаций. Из спектра SPOD видно, что первые две моды, отвечающие за рассматриваемый процесс колебаний, содержат в себе до 30% турбулентной энергии потока, и эта доля не уменьшается с ростом числа Рэлея.

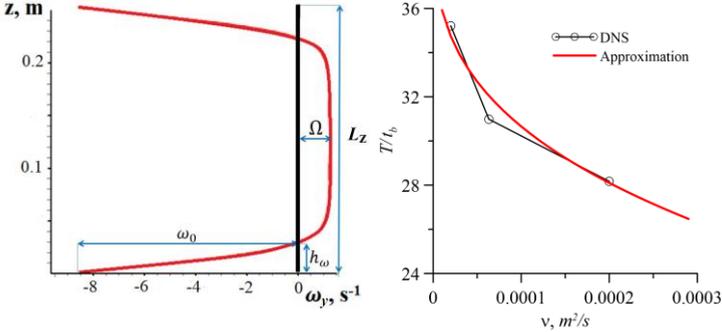


Рисунок 2.5 – Вертикальный профиль y -компоненты средней завихренности в точке $x = 0.6 L_x$ для $Ra = 5.8 \times 10^6$ (слева). Сравнение периода колебаний, полученного в расчетах, с аппроксимацией по формуле (2.2) для различных значений кинематической вязкости (справа)

Считая, что структура пограничного слоя рассматриваемого течения аналогична структуре свободно-конвективного течения и пользуясь известной из наблюдений за свободно-конвективными течениями зависимостью сдвигового напряжения на стенке от числа Рэлея [Xin, 1996] $\tau_w \sim Ra^{0.66}$, а также используя упрощенную структуру поля y -компоненты средней завихренности (Рисунок 2.5 слева), выводится асимптотическая оценка зависимости периода колебаний от кинематической вязкости ν при фиксированных остальных параметрах течения:

$$T \approx 22 \left(\frac{L_z}{2U_{max}} - \frac{2}{\omega_0} \right) = 22 \left(\frac{L_z}{2U_{max}} - \sqrt[3]{\frac{10 \nu}{\Delta b_{max}^2}} \right) \quad (2.2)$$

Сравнение периода колебаний, полученного по формуле (2.2) с DNS-расчетами приведено на Рисунке 2.5 справа. Видно, что аппроксимация достаточно неплохо предсказывает тренд в изменении периода колебаний в зависимости от кинематической вязкости. При увеличении числа Рэлея отношение h_ω/L_z будет стремиться к 0, что дает асимптотическую формулу для периода колебаний в этом случае:

$$T_{max} \approx 22 \frac{L_z}{2U_{max}}. \quad (2.3)$$

Во второй части данной главы расчеты проводились при постоянной кинематической вязкости и постоянном вертикальном градиенте температуры, варьируя значение амплитуды Δb_x Гауссова распределения на стенках от 0 до 3 м/с² согласно формулам (2.4) и (2.5). На Рисунке 2.6 представлена схема расчетной области, используемой в данной серии расчетов.

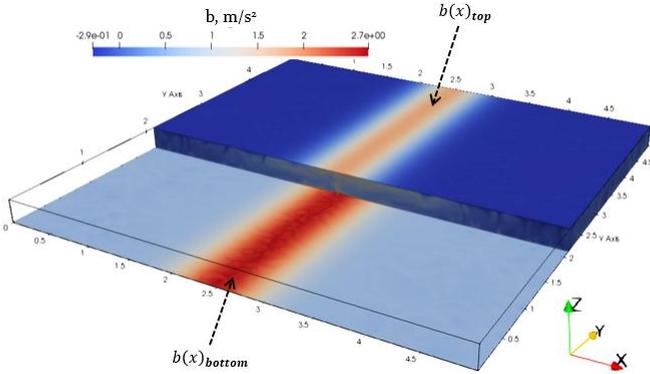


Рисунок 2.6 – Схема расчетной области и распределения плавучести b на нижней и верхней границах расчетной области для расчетов 2.1–2.6 (Таблица 2.2)

Исследовалась конфигурация с симметричными распределениями поля плавучести на горизонтальных границах области в виде функции Гаусса в направлении оси Ox , на нижней и верхней границах:

$$b(x)_{bot} = \Delta b_z + \Delta b_x \cdot \exp\left(-\frac{(x - 0.5L_x)^2}{(0.08L_x)^2}\right) \quad (2.4)$$

$$b(x)_{top} = \Delta b_x \cdot \exp\left(-\frac{(x - 0.5L_x)^2}{(0.08L_x)^2}\right). \quad (2.5)$$

Таблица 2.2 - Параметры 3D DNS-расчетов при изменении амплитуды горизонтального градиента

№	$L_x \times L_y \times L_z$, м	$N_x \times N_y \times N_z$	ν , м ² /с	Ra	Δb_z , м/с ²	Δb_x , м/с ²
2.1	5×5×0.25	1024×1024×256	2·10 ⁻⁴	4·10 ⁵	1	0
2.2	5×5×0.25	1024×1024×256	2·10 ⁻⁴	4·10 ⁵	1	0.25
2.3	5×5×0.25	1024×1024×256	2·10 ⁻⁴	4·10 ⁵	1	0.5
2.4	5×5×0.25	1024×1024×256	2·10 ⁻⁴	4·10 ⁵	1	1
2.5	5×5×0.25	1024×1024×256	2·10 ⁻⁴	4·10 ⁵	1	2
2.6	5×5×0.25	1024×1024×256	2·10 ⁻⁴	4·10 ⁵	1	3

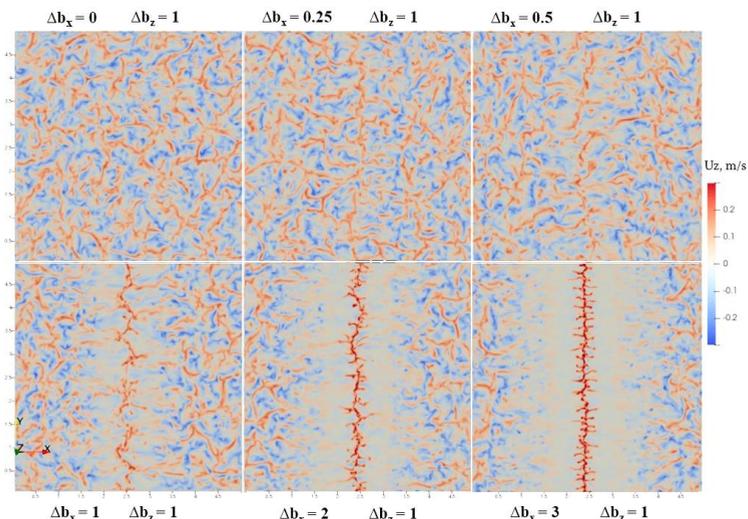


Рисунок 2.7 – Мгновенные распределения z -компоненты скорости в горизонтальном сечении $z = 1.25$ м для различных отношений $\Delta b_x / \Delta b_z$

По мгновенным распределениям z -компоненты скорости (Рисунок 2.7) в горизонтальном сечении для различных значений Δb_x видно, что при увеличении амплитуды горизонтального градиента Δb_x начинает проявляться выделенная структура в центре области. Под действием горизонтального градиента плавучести конвективные ячейки с обеих сторон от центра области оказываются под воздействием потоков, направленных к центру области, и, стягиваясь к центру, формируют горизонтальные конвективные валы, которые начинают взаимодействовать между собой при достижении центрального восходящего потока. При значении $\Delta b_x = 1 \text{ м/с}^2$ становится видна пространственная периодичность в структуре конвективных валов вблизи центрального восходящего потока. При увеличении Δb_x до значений $\Delta b_x = 3 \text{ м/с}^2$ пространственный масштаб конвективных структур вблизи восходящего потока уменьшается, при этом, их движение становится более хаотическим.

По профилю плавучести (Рисунок 2.8 слева) видно, что циркуляционные течения при Δb_x , начиная с 1 м/с^2 , приводят к формированию температурной инверсии. По форме профиля плавучести можно найти частоту Брента–Вяйсяля, с которой элемент жидкости, перемещённый вертикально в стратифицированной среде, будет осциллировать. Для текущих значений инверсии значения частоты Брента–Вяйсяля $N = \sqrt{db/dz}$ равнялись $1.5\text{--}2.2$ Гц. Наблюдаемые в потоке колебания имеют частоту $f_{osc} \sim 0.1$ Гц, следовательно можно сделать вывод, что напрямую колебательные эффекты за счет присутствия слоя

инверсии (внутренние волны) не являются причиной возникновения тех колебательных процессов, которые мы наблюдаем в горизонтальной плоскости.

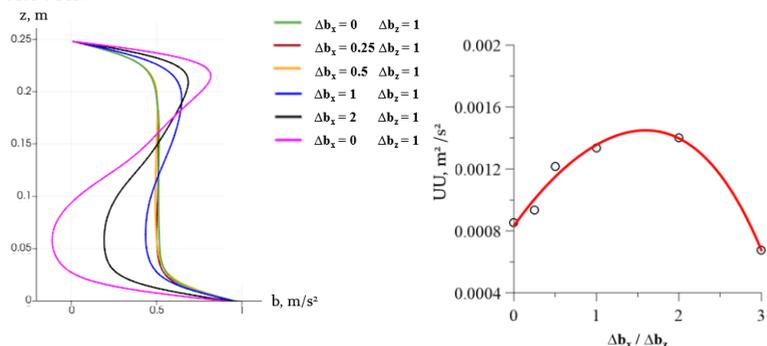
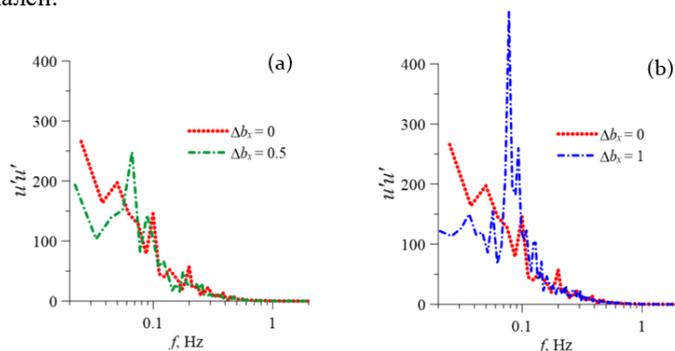


Рисунок 2.8 – Осредненные вертикальные профили плавучести при $x = 2.3$ м $y = 2.5$ м для различных отношений $\Delta b_x / \Delta b_z$ (слева). График зависимости осредненных по объему вторых моментов пульсаций x -компоненты скорости от отношения $\Delta b_x / \Delta b_z$ (справа)

На графике зависимости осредненных по объему вторых моментов пульсаций x -компоненты скорости от отношения $\Delta b_x / \Delta b_z$ (Рисунок 2.8 справа) присутствует максимум, что говорит о возможных резонансных эффектах, проявляющихся при определенном соотношении между интенсивностями вертикальных и горизонтальных тепловых потоков.

По временным спектрам продольных пульсаций скорости в центре зоны рециркуляции для различных величин горизонтального градиента плавучести (Рисунок 2.9) видно, что с его увеличением в спектрах растет пик на частоте ~ 0.08 Гц. При сильном увеличении горизонтального градиента плавучести ($\Delta b_z = 3$ m/s^2) пульсации начинают подавляться. Таким образом, существует диапазон соотношений вертикального и горизонтального потоков тепла, при которых эффект колебаний максимален.



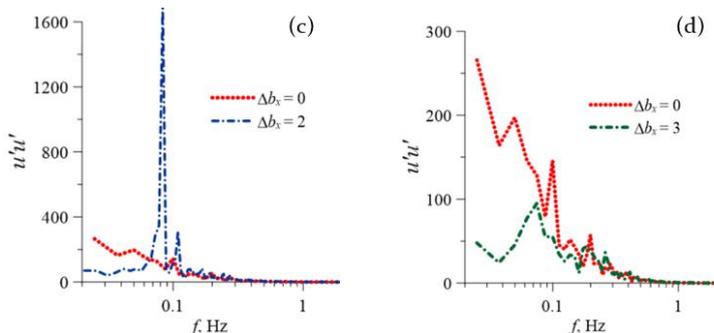


Рисунок 2.9 – Временные спектры продольных пульсаций скорости в центре зоны рециркуляции для различных величин горизонтального градиента плавучести Δb_x от 0 до 3 м/с² (при фиксированном вертикальном перепаде $\Delta b_z = 1$ м/с²)

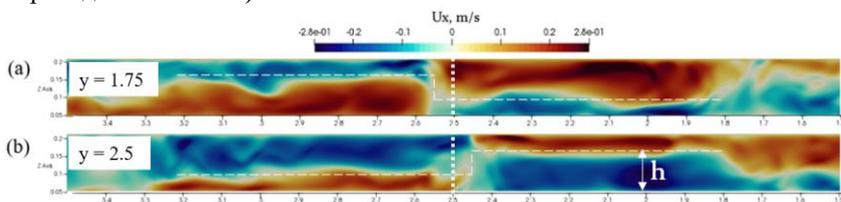


Рисунок 2.10 – Мгновенные распределения x-компоненты скорости в вертикальных сечениях $y = 1.75$ м (a) и $y = 2.5$ м (b).

Как было показано на Рисунке 2.8, при достаточной величине горизонтального температурного градиента образуется инверсия температуры по всей ширине зоны рециркуляции. При этом, часть циркуляции выше нулевой точки зоны горизонтальной циркуляции (высоты h на Рисунке 2.10) имеет повышенную температуру, а часть ниже нулевой точки – пониженную. Изменение относительной высоты верхней и нижней частей зоны рециркуляции приводит к изменению потенциальной энергии потока внутри горизонтальной циркуляции. Таким образом, периодическое изменение высоты нулевой точки можно интерпретировать как обмен потенциальной энергией между левой и правой циркуляциями через перезамыкание течения над восходящим потоком, что напоминает колебание уровней жидкости в сообщающихся сосудах.

По распределению проинтегрированной по высоте потенциальной энергии плавучести $E = \int_0^h -b \cdot z \cdot dz$ (Рисунок 2.11) видно, что такой тип циркуляций приводит к формированию потенциальной ямы в горизонтальном направлении, внутри которой и реализуются колебания положения восходящего потока.

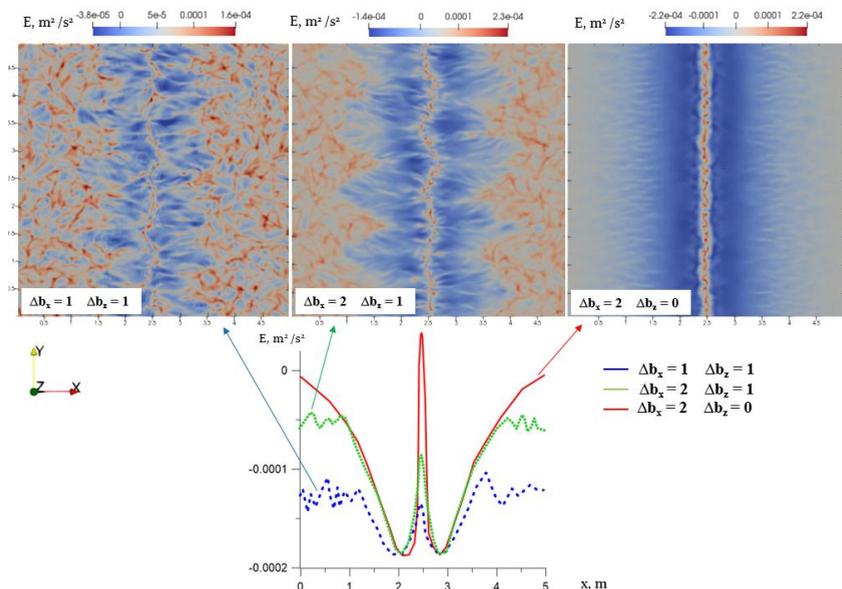


Рисунок 2.11 – Мгновенные распределения проинтегрированной по высоте потенциальной энергии плавучести для различных отношений $\Delta b_x/\Delta b_z$ (сверху). Осредненный по направлению y профиль проинтегрированной по высоте потенциальной энергии плавучести при различных отношениях $\Delta b_x/\Delta b_z$ (снизу)

Также на Рисунке 2.11 заметно, что сама форма потенциальной ямы при одновременном присутствии вертикального и горизонтальных градиентов $\Delta b_z = 1 \text{ м/с}^2$, $\Delta b_x = 2 \text{ м/с}^2$ аналогична форме потенциальной ямы, образующейся в течении под воздействием только горизонтального градиента $\Delta b_z = 0$, $\Delta b_x = 2$. А при уменьшении амплитуды горизонтального градиента $\Delta b_z = 1 \text{ м/с}^2$, $\Delta b_x = 1 \text{ м/с}^2$ яма становится шире. Сами по себе такие колебания должны быть затухающими за счет вязкости среды. Можно предположить, что накачка здесь осуществляется за счет воздействия периферийных ячеек Бенара, когда их частота генерации близка к собственной частоте колебаний.

В третьей главе представлены результаты исследования динамики конвективного пограничного слоя над линейно-симметричной температурной неоднородностью для большего пространственного масштаба: для области с фиксированным горизонтальным размером $1 \times 1 \text{ км}$ и изменяемым вертикальным размером в интервале от 55 до 220 м . Среда обладала физическими характеристиками воздуха и числа Рэлея были в диапазоне $10^{13} - 10^{15}$. Расчеты проводились методом RANS.

В первой части данной главы представлена разработка и верификация модификации $k-\varepsilon$ модели турбулентности с измененной параметризацией компонент тензора напряжений Рейнольдса и турбулентного теплового потока. Модификация модели направлена на улучшение восстановления поверхностного потока тепла и импульса по данным температуры поверхности в условиях суточного цикла. Предлагаемая модификация имеет ряд преимуществ. Она не вводит новые константы модели и не меняет значения существующих. Она основана на локальных характеристиках течения и имеет более высокую чувствительность к изменению параметров устойчивости, чем стандартная $k-\varepsilon$ модель. Новизна предлагаемого подхода заключается во введении в модель параметров устойчивости таким образом, чтобы избежать взаимной компенсации его влияния на уравнения эволюции для k и ε , существующего в других моделях [Apsley, 1997]. Представлены одноячеечный и одномерный варианты модели. Модель протестирована на данных GABLS-2 [Svensson, 2011] для сухого АПС вместе со стандартной $k-\varepsilon$ моделью и ее модификацией с ограниченным масштабом длины смещения [Sumner, 2012].

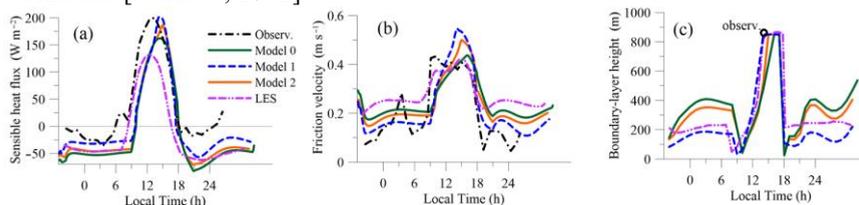


Рисунок 3.1 – Сравнение результатов одномерного расчета с данными наблюдений из GABLS-2 [Svensson, 2011]. (a) Эволюция потока тепла. (b) Эволюция скорости трения. (c) Эволюция высоты пограничного слоя

Было показано, что по сравнению со стандартной $k-\varepsilon$ моделью и ее модификацией с ограниченным масштабом длины смещения предложенная модель показывает более высокую чувствительность к условиям локальной устойчивости из-за отсутствия компенсационных эффектов на турбулентную вязкость (Рисунок 3.1), что делает данную модель перспективной для использования в расчетах, где имеет значение распределения поверхностной температуры, как в нашем случае, при наличии поверхностной температурной неоднородности.

Для исследования эффекта возникновения осцилляций течения над линейно-симметричным источником тепла при высоких числах Рэлея было предложено провести серию U-RANS расчетов с использованием предложенной в данной главе модификацией $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Представленная модель была реализована в OpenFOAM.

В первой части было проведено сравнение смоделированной динамики конвективных структур, формирующихся в двух подобных течениях: в первом расчете моделировалось течение в условиях с температурной инверсией на высоте 110 м, а во втором при фиксированной температуре на верхней границе, расположенной на этой же высоте. Температура верхней стенки во втором расчете совпадает со значением средней температуры на соответствующем уровне из первого расчета $T_{top} = 300\text{K}$. Исследовалась конфигурация с распределением поля температуры на нижней границе области в виде функции Гаусса в направлении оси Ox :

$$T(x, t)_{y=0} = 296.8\text{K} + 7.5\text{K} \cdot \min\left(1, \left(\frac{t}{t_0}\right)\right) \cdot \exp\left(-\frac{(x - 0.5L_x)^2}{(0.16L_x)^2}\right). \quad (3.1)$$

По результатам взаимного сравнения течений, образующихся над неоднородно нагретой поверхностью при наличии температурной инверсии и при наличии стенки, было показано, что образующиеся циркуляции и колебания положения восходящего потока имеют схожую структуру. Следовательно, можно сделать вывод, что обнаруженные эффекты осцилляций положения восходящего потока в течении, ограниченном сверху стенкой, могут возникать и в течениях, ограниченных сверху слоем температурной инверсии.

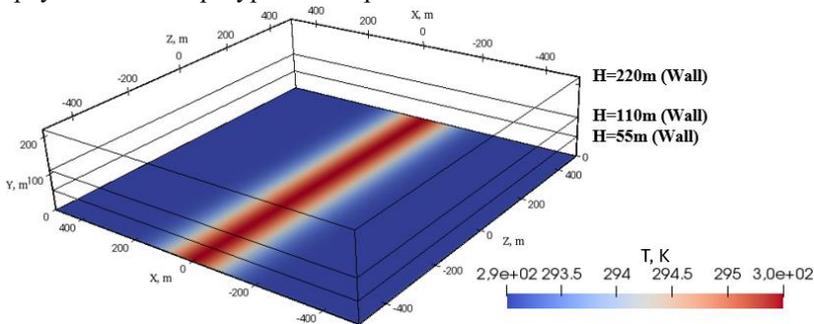


Рисунок 3.2 – Схема расчетной области и распределение температуры на нижней границе для трех различных высот расчетной области

Таблица 3.1 - Параметры 3D DNS-расчетов при изменении высоты расчетной области

№	$L_x \times L_y \times L_z$, м	$N_x \times N_y \times N_z$	Ra_{max}	Ra_{mean}
3.1	$1000 \times 55 \times 1000$	$160 \times 40 \times 160$	6.3×10^{13}	3.4×10^{13}
3.2	$1000 \times 110 \times 1000$	$160 \times 80 \times 160$	5.03×10^{14}	2.7×10^{14}
3.3	$1000 \times 220 \times 1000$	$160 \times 160 \times 160$	4.3×10^{15}	2.2×10^{15}

Далее было проведено исследование динамики конвективных течений над неоднородно нагретой поверхностью при изменении вертикального размера области. Исследовались 3 конфигурации с высотой области 55, 110

и 220 метров (Таблица 3.1). Схема расчетной области и распределение температуры на нижней границе для трех различных высот расчетной области приведено на Рисунке 3.2.

Как и в предыдущей части исследования, рассматривалась конфигурация с распределением поля температуры на нижней границе области в виде функции Гаусса в направлении оси Ox :

$$T(x, t)_{bottom} = 293.15K + 3.75K \cdot \min\left(1, \left(\frac{t}{t_0}\right)\right) \cdot \exp\left(-\frac{(x - 0.5L_x)^2}{(0.16L_x)^2}\right) \quad (3.2)$$

$$T_{top} = 293K \quad (3.3)$$

В данных расчетах разница температур верхней и нижней стенки была отрицательной на всей ширине области.

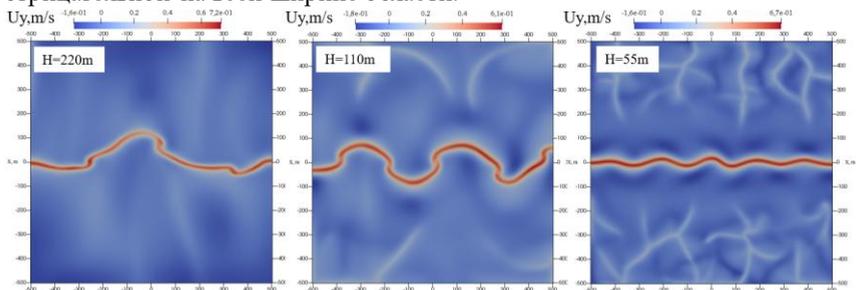


Рисунок 3.3 – Мгновенные поля вертикальной компоненты скорости в горизонтальном сечении на высоте $0.2 L_y$ для трех различных высот расчетной области

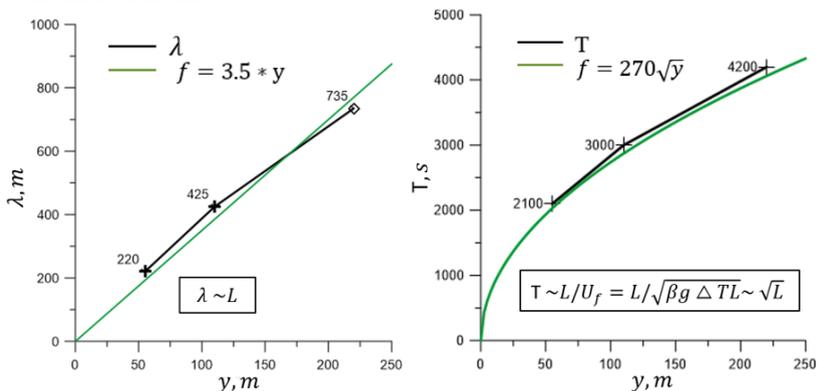


Рисунок 3.4 - Графики зависимости длины волны (слева) и периода колебаний (справа) от высоты канала

Было показано, что пространственный масштаб линейно зависит от высоты канала (Рисунок 3.4, слева). Также было показано, что зависимость временного периода колебаний от высоты канала определяется степенной

функцией с показателем степени равным 0.5 (Рисунок 3.4, слева) . Также было проведено сравнение результатов DNS расчетов из Главы 2 и RANS расчетов из текущей главы.

$$T_{obs_RANS} \approx 3000 \text{ c} = 2.5 \cdot T_{est_RANS} \quad (3.4)$$

Было показано, что величина периода колебаний в RANS расчетах, полученная с использованием выведенной для DNS расчетов асимптотической оценки, отличается от реального значения в 2.5 раза, что является довольно хорошим согласием, при условии, что числа Рэлея отличаются в 10^9 раз. Такое расхождение может быть вызвано как различием в подходах в моделированию и влиянием граничных условий, так и в небольшими различиями между отношениями вертикального и горизонтального температурных градиентов на границах.

Во четвертой главе представлены результаты численного исследования совместного влияния поверхностного температурного градиента и поверхностного сдвига на структуру атмосферного пограничного слоя в устойчиво-стратифицированных условиях с помощью моделирования методом крупных вихрей с высоким разрешением. Моделировалось воздействие поверхности реки на конвективное течение в окружающем воздухе. 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 Рисунок 4.1.

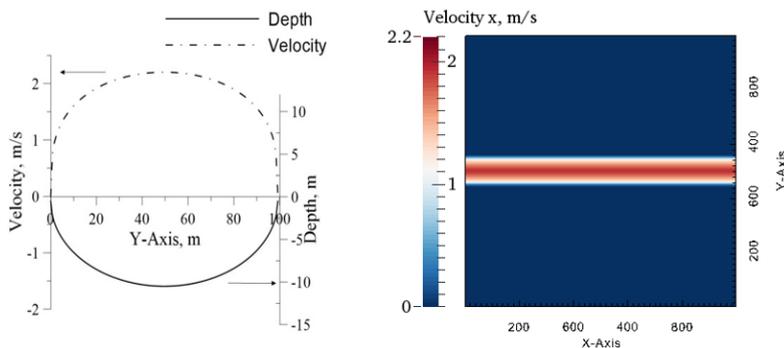


Рисунок 4.1 – Профили дна реки и рассчитанной для него продольной компоненты скорости на поверхности (слева), распределение продольной компоненты скорости на нижней границе расчетной области (справа).

Результаты расчетов (Рисунок 4.2) показывают, что движение реки может оказывать существенное влияние на динамику прорастания слоя смешения, когда сильные конвективные движения воздуха ослабляются устойчивой стратификацией. В таких условиях течение реки может

значительно интенсифицировать вертикальный теплоперенос, ускорить размывание слоя инверсии, а также усилить перенос влаги и примесей окружающим воздухом. Из-за течения реки наблюдается ускорение вертикального подъема слоя инверсии за счет плавучести и образование колоннообразных вихревых структур (Рисунок 4.3), концентрирующих в себе как вертикальную компоненту завихренности, так и повышенную температуру. Такие структуры наблюдаются над реками в природе.

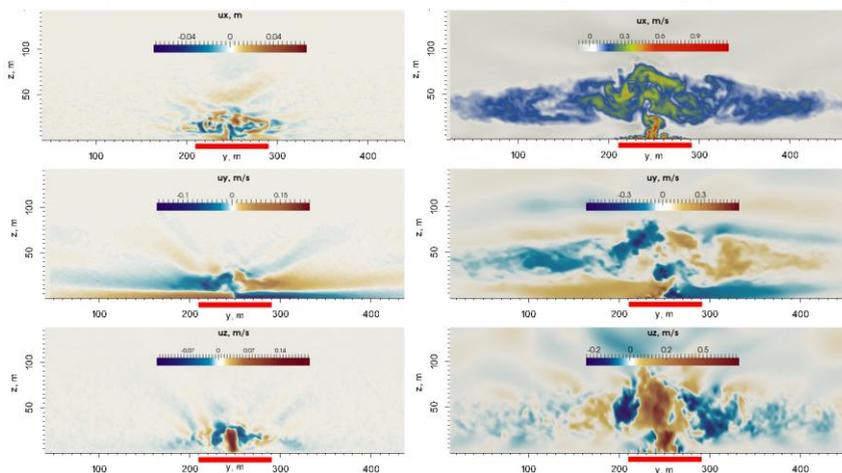


Рисунок 4.2 – Мгновенные поля скорости в центральном сечении для случаев без течения реки (слева) и с течением (справа) для времени $t = 30$ мин; Поверхность реки обозначена красной линией.

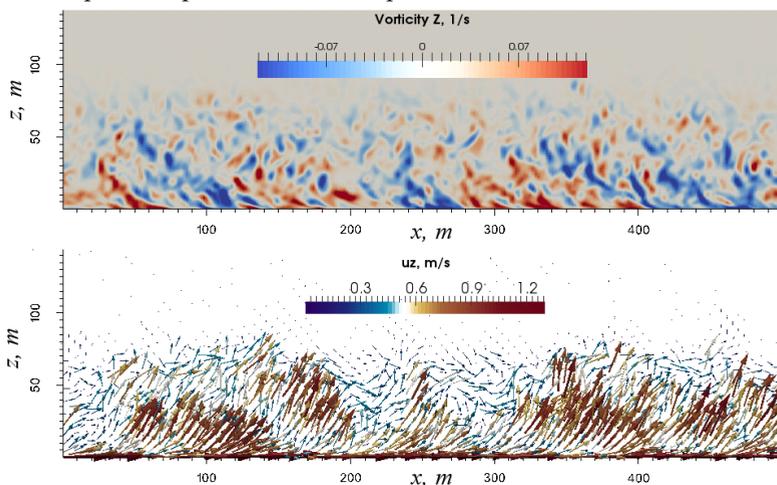


Рисунок 4.3 – Мгновенные распределения вертикальной компоненты завихренности (сверху) и вектора скорости (снизу)

Для изучения эффекта формы реки на атмосферный пограничный слой, был проведен расчет суточной эволюции пограничного слоя для участка реки Енисей вблизи города Красноярка. Для данного расчета был выбран участок размером 10x10 км в окрестностях города, содержащий в себе два изгиба различной выпуклости в русле реки (Рисунок 4.4 сверху).

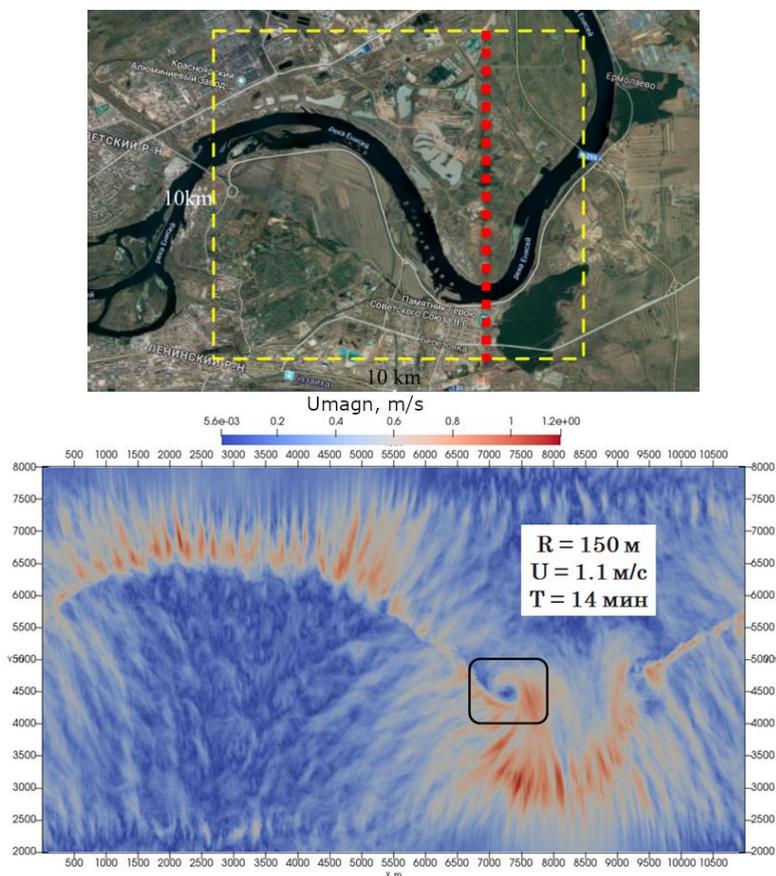


Рисунок 4.4 – Расчетная область, в окрестностях города Красноярка (сверху). Распределение амплитуды скорости в горизонтальном сечении на высоте 100м, осредненное по интервалу времени 10:30 – 11:30. Обозначена область формирования устойчивого вихря в месте соединения двух изгибов реки различной выпуклости (снизу).

В результате расчетов эволюции атмосферного пограничного слоя вблизи реки Енисей в условиях утреннего перехода было показано, что

изгиб реки в комбинации с ее тепловым эффектом способен оказывать существенное влияние на циркуляцию воздуха. Было обнаружено, что в области максимального изгиба восходящий поток сильно наклонен в сторону центра кривизны, и в этом направлении возникает устойчивое течение воздуха через реку с одного берега на другой, с образованием струи на высоте ~100м (Рисунок 4.4 снизу). Эта струя существенно влияет на перенос примеси. Возникновение такого струеобразного потока приводит к интенсификации переноса тепла влаги и примеси с одного берега на другой.

Также было обнаружено, что в случае, когда имеется несколько последовательных изгибов со знаками чередующейся кривизны, устойчивые вихри, концентрирующие вертикальную завихренность, образуются в точках нулевой кривизны (Рисунок 4.4 снизу). Эти большие вихри могут иметь горизонтальный размер порядка нескольких сотен метров и вращаться с периодом до нескольких десятков минут.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Исследованы низкочастотные колебания потока, возникающие в течении Рэля-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 Рэля.
2. Исследована зависимость характеристик низкочастотных колебаний положения восходящего потока, образующихся под воздействием линейно-симметричной поверхностной тепловой неоднородности, при изменении расстояний между горизонтальными стенками в большом диапазоне чисел Рэля (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 - ε 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 - ε моделью.
4. Численно исследован эффект от течения реки на конвекцию в ночном пограничном слое при условии положительной разности температур между поверхностью реки и окружающей почвы. 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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.**, 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.

6. **Bobrov M.**, Hrebtov M., Ivashchenko V., Mullyadzhанov R., Sereдкиn 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.

7. 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.

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 теплоперенос в атмосфере // ВОЕНМЕХ. Вестник Балтийского государственного технического университета. – 2019. – №. 1-2. – С. 74-78.