

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
Сухановского Андрея Николаевича на диссертационную работу
Боброва Максима Сергеевича «РАЗВИТИЕ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ
КОНВЕКЦИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ГАЗА ПРИ НАЛИЧИИ ЛИНЕЙНО-
ПРОТЯЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ», представленной на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика
жидкости, газа и плазмы.

В диссертационной работе М.С. Боброва выполнено комплексное исследование влияния линейно-протяженной температурной неоднородности на динамику свободноконвективных течений в широком диапазоне чисел Рэлея. Исследования проводились численным методом с использованием различных подходов для течений различных масштабов. Течения с малыми числами Рэлея (10^5 – 10^6) исследовались путем прямого численного моделирования. Течения с большими числами Рэлея (10^{13} – 10^{15}) моделировались с помощью метода RANS, с использованием оригинальной модификации k - ε модели турбулентности, улучшающей восстановление потока тепла с твердой поверхности.

В расчетах были исследованы эффекты интенсификации и ослабления горизонтальных циркуляций при различных соотношениях между вертикальными и горизонтальными градиентами температуры, и обнаружен эффект низкочастотных колебаний горизонтального положения восходящего потока, возникающий из-за взаимодействия двух соседних областей горизонтальных циркуляций. Данный эффект проявлялся как в расчетах для малых чисел Рэлея, так и для больших, что говорит об универсальном механизме его появления. В работе проведен анализ причин возникновения данных осцилляций, найден диапазон параметров, при которых он проявляется и предложена асимптотическая оценка периода колебаний в зависимости от числа Рэлея и геометрических размеров течения.

Помимо этого, в работе исследовано совместное влияние поверхностной температурной неоднородности и движения подстилающей поверхности (течения реки) на структуру пограничного слоя в условиях устойчивой стратификации.

Достоверность результатов работы обеспечивалась с помощью валидации расчетного кода на экспериментальных данных (течение Рэлея-Бенара для DNS, и данные атмосферных наблюдений для RANS), отработки расчетных методик и проведения анализа сеточной сходимости.

Работа имеет фундаментальное значение, поскольку способствуют более глубокому пониманию механизмов нелинейного взаимодействия тепловых потоков в термогравитационной конвекции и раскрывает особенности динамических колебательных процессов, возникающих при переходах между различными

режимами конвекции. Полученные результаты могут найти применение в задачах управления конвективными потоками и при моделировании климатических условий, что отражает практическую ценность работы.

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.

Во введении показана актуальность работы, научная новизна, практическая значимость проделанной работы, личный вклад соискателя, перечислены цели и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор основных работ по тематике исследования, показывающий основные направления исследований, а также указаны нерешенные проблемы в области исследования термогравитационной конвекции в условиях неоднородного нагрева.

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. Обнаружено, что при определенном соотношении между вертикальным и горизонтальным температурными градиентами наблюдаются заметные горизонтальные колебания положения центрального восходящего потока с фиксированной низкой частотой. Основываясь на полученных результатах, предложена модель, описывающая механизм образования колебаний температурного фронта и дана асимптотическая оценка периода колебаний в зависимости от числа Рэлея.

В третьей главе представлены результаты исследования динамики конвективного пограничного слоя над линейно-симметричной температурной неоднородностью для большего пространственного масштаба методом RANS. Показано, что с ростом высоты расчетной области пространственный период колебаний увеличивается линейно, а зависимость временного периода колебаний от высоты канала определяется степенной функцией с показателем степени равным 0.5. Также представлена разработка и верификация модификации $k-\epsilon$ модели турбулентности с измененной параметризацией компонент тензора напряжений Рейнольдса и турбулентного теплового потока, направленная на улучшение восстановления поверхностного потока тепла и импульса по данным температуры поверхности в условиях суточного цикла.

В 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. Результаты показывают, что течение реки может

оказывать существенное влияние на динамику ночного атмосферного пограничного слоя, когда сильные конвективные движения воздуха ослабляются устойчивой стратификацией.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

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.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Работа изложена на 129 страницах машинописного текста и включает 63 рисунка, а также библиографический список из 113 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследования, раскрыта его научная новизна и практическая значимость, обозначен личный вклад соискателя, сформулированы цели и задачи диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор основных работ по тематике исследования, отражающий ключевые направления и выявляющий нерешённые проблемы в области термогравитационной конвекции при неоднородном нагреве.

Во второй главе методом прямого численного моделирования изучено влияние линейно-симметричной температурной неоднородности на нижней стенке течения Релея–Бенара на формирование крупномасштабных вихревых структур и низкочастотных колебаний потока. Установлено, что при определённом соотношении вертикального и горизонтального температурных градиентов наблюдаются устойчивые горизонтальные колебания положения центрального восходящего потока с фиксированной низкой частотой. На основе полученных данных предложена модель механизма образования температурных колебаний и дана асимптотическая оценка их периода в зависимости от числа Рэлея.

В третьей главе представлены результаты исследования динамики конвективного пограничного слоя над линейно-симметричной температурной неоднородностью в более крупном масштабе методом RANS. Показано, пространственный период колебаний линейно растёт с высотой, а временной — подчиняется степенной зависимости с показателем 0,5. Также разработана и верифицирована модификация $k-\varepsilon$ модели турбулентности с уточнённой параметризацией компонент тензора напряжений Рейнольдса и турбулентного теплового потока, направленная на улучшение восстановления поверхностного потока тепла и импульса по данным температуры поверхности в условиях суточного цикла.

В четвёртой главе приведены результаты численного исследования совместного влияния поверхностного температурного градиента и поверхностного сдвига на структуру атмосферного пограничного слоя в устойчиво-стратифицированных условиях с использованием метода крупных вихрей с

высоким разрешением. Установлено, что течение реки может существенно влиять на динамику ночного атмосферного пограничного слоя, когда интенсивные конвективные движения воздуха ослабляются устойчивой стратификацией.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Автореферат изложен на 25 страницах и полностью соответствует содержанию работы: в нём раскрыты цели, задачи и методы исследования, представлены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Полнота опубликованных результатов и апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены на профильных конференциях всероссийского и международного уровней, опубликованы в 7 научных работах, соответствующих перечню ВАК РФ.

К диссертационной работе имеются следующие замечания и пожелания:

1. Развитые конвективные режимы в замкнутых полостях зависят от набора управляющих параметров. В качестве основных можно выделить числа Рэлея и Прандтля. Помимо этого большую роль играет геометрия задачи, определяемая аспектным отношением. В случае конвекции от вытянутого в одном направлении источника тепла, существенную роль играют два аспектных отношения, а именно отношение высоты слоя к его горизонтальному размеру и отношение высоты слоя и ширины источника тепла. К сожалению, в представленной работе влияние данных аспектных отношений не рассматривается, хотя на рис.2.4 хорошо видно, что изменение горизонтального размера в два раза, при фиксированном числе Рэлея, заметно влияет на амплитуду горизонтальных отклонений восходящего потока над источником тепла.

2. Исходя из представленных граничных условий, не совсем понятно сбалансированы ли тепловые потоки через границы. Отсутствие баланса теплоток на границах обязательно приведет к нестационарности процесса. К сожалению, в работе не представлены временные зависимости потоков тепла через границы и интегральных характеристик.

3. Структура конвективного течения для рассмотренных режимов носит сложный характер и представляет собой суперпозицию конвективных мод различного масштаба. Выделение отдельных ячеек, так как это показано на рис.2.7 очень субъективно и не убедительно.

4. Механизм осцилляций восходящего потока связывается с периодическим сбросом потенциальной энергии при всплытии перегретой жидкости. Однако не совсем понятно, чем же обусловлен периодический характер такого сброса. Это может быть связано с неустойчивостью основной циркуляции («гадлеевской» ячейки) или неустойчивостью в пограничном слое над областью нагрева. Анализ пульсаций температуры в пограничном слое (пространственных и временных) мог бы быть полезен для ответа на данный вопрос.

5. SPOD анализ показывает наличие крупных, энергонесущих мод, причем расположенных слева и справа от источника тепла очень не симметрично. При этом на мгновенных распределениях различных характеристик такого явного

различия между областями, по разные стороны от источника, не видно. Возможно это связано с неудачной визуализацией.

6. К сожалению, ряд выводов по ходу работы неряшливы и вызывают сомнения. Так отмечается, что на рис. 3.12 распределения вертикальной компоненты скорости для двух высот слоя воздуха аналогичны и периодические, хотя очевидно, что при уменьшении толщины слоя распределение изменяется и становится непериодическим.

7. При сравнении результатов глав 2 и 3, полученных различными методами для существенно различных значений числа Рэлея, подразумевается подобие процессов. При этом в качестве подтверждения рассматривается только период осцилляций. Не приведено сравнение структуры среднего течения и распределения пульсаций. Также было бы полезно сравнить значения чисел Рэлея и Рейнольдса для DNS и соответствующих в случае RANS, рассчитанных с использованием турбулентных коэффициентов (эффективных параметров).

8. Результаты главы 4, несмотря на близость постановки, плохо связаны с другими частями диссертации. Особенно удивляет отсутствие сравнения с результатами полученными методом RANS, ведь понимание достоинств и ограничений метода RANS в задачах городской климатологии является одной из ключевых задач. Не приводится никакого обоснования, почему используется именно метод LES, а не модифицированный метод RANS. Нет также количественного сравнения результатов с натурными измерениями. Непонятно есть ли в расчетах методом LES низкочастотные температурные пульсации, отмеченные в главах 2 и 3.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Полученные результаты считаю достоверными, а научные положения, вынесенные на защиту, и выводы по работе – обоснованными. С формулировками пунктов научной новизны согласен.

Заключение о соответствии диссертации критериям.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертационной работы можно сделать заключение, что диссертация Боброва Максима Сергеевича «Развитие термогравитационной конвекции в горизонтальном слое газа при наличии линейно-протяженной температурной неоднородности на подстилающей поверхности» соответствует критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а также требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Бобров Максим Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

Я, Сухановский Андрей Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета,

их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.

Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией турбулентности «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН).

614013, Пермский край, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, тел. +7-342-2378-381, san@icmm.ru.

Дата 05.12.2025



Сухановский Андрей Николаевич

Подпись Сухановского Андрея Николаевича заверяю.

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН, з.ф.-м.н.



Юрлова Н. А.