

На правах рукописи



Сухановский Андрей Николаевич

**КОНВЕКТИВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБОВ
В НЕПОДВИЖНЫХ И ВРАЩАЮЩИХСЯ ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Пермь – 2021

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Бердников Владимир Степанович**, доктор физико-математических наук, с.н.с., главный научный сотрудник ФГБУН Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.

Демин Виталий Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики ФГАОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь.

Пермяков Михаил Степанович, доктор физико-математических наук, с.н.с., заведующий лабораторией взаимодействия океана и атмосферы ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук** (ИФА им. А.М. Обухова РАН), г. Москва.

Защита состоится **08 июля 2021 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (www.icmm.ru).

Автореферат разослан «___» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01,
доктор физико-математических наук, доцент



А.Л. Зуев

Общая характеристика работы

Актуальность и разработанность темы исследования. Естественная (тепловая, термогравитационная) конвекция, обусловленная неоднородностью нагрева, является самой распространенной причиной движения в жидкостях или газах, в природных и технологических системах. Многообразие конвективных систем и необходимость их детального изучения, привели к появлению целого ряда фундаментальных проблем и большого количества прикладных задач. В качестве основных направлений исследований можно выделить конвективную устойчивость, формирование и устойчивость конвективных течений, конвекцию во вращающихся системах, влияние граничных условий для температуры или потока тепла, роль физических свойств жидкости. Классическим объектом исследований, как для фундаментальных задач, так и прикладных является конвекция Рэлея-Бенара, когда рассматриваются конвективные течения в полости при подогреве снизу и охлаждении сверху. Сильно нелинейная природа конвективных движений обуславливает большое количество возможных решений даже для ламинарных режимов. С ростом числа Рэлея ламинарные течения теряют устойчивость, в результате чего происходит переход к турбулентному режиму, который характеризуется высоким уровнем стохастических пульсаций скорости и температуры. Важным шагом в изучении турбулентной конвекции было обнаружение крупномасштабной циркуляции на фоне мелкомасштабных турбулентных движений, что привело к появлению новых задач, связанных с динамикой крупномасштабной циркуляции (КМЦ) и ее влиянием на теплообмен. Несмотря на большое количество работ, эти задачи далеки от своего окончательного разрешения. Не менее важной проблемой, связанной с турбулентной конвекцией, является выбор бенчмарков, эталонных задач для верификации численных кодов, используемых для расчета турбулентных конвективных потоков. Ее актуальность обусловлена тем, что сейчас происходит постепенный отказ от натурального тестирования технологических систем в пользу математического моделирования. Особенно остро проблема выбора бенчмарков проявляется при верификации кодов, используемых для разработки объектов атомной промышленности.

Большой интерес представляет формирование вторичных течений, которые являются широко распространенным явлением для течений различной природы. Первые исследования горизонтальных валов в адвективном потоке проводились в связи с анализом устойчивости циркуляции в ячейке Гадлея и при росте кристаллов. Было обнаружено, что в результате конвективной неустойчивости могут формироваться две различные

моды в виде поперечных и продольных валов. Учет влияния валов на процессы тепло-массопереноса необходим, как при разработке различных технических систем, так и для понимания и прогнозирования атмосферных явлений. Процесс формирования конвективных валов при наличии сильных градиентов температуры на нижней границе, в отличие от случаев наклонной изотермической пластины и смешанной конвекции, практически не исследован.

Появление конвективных течений приводят к резкому усилению теплообмена. Наиболее подробно конвективный теплообмен изучен для конвекции Рэлея-Бенара, при этом большое количество прикладных задач требует рассмотрения более сложных систем, в которых основную роль играют локализованные источники тепла. Конвекция от дискретного источника тепла, расположенного на дне, и охлаждения на верхней границе обладает своей спецификой, так как в данном случае присутствуют как горизонтальный, так и вертикальный градиенты температуры. Прямое численное моделирование теплообмена от локализованного источника тепла, требует высокого пространственного разрешения и больших вычислительных ресурсов, и в силу этого ограничено относительно небольшими значениями числа Рэлея. Поэтому, при исследовании развитых конвективных режимов, большую роль играет эксперимент.

подавляющее большинство космических объектов (планеты, звезды, галактики) характеризуются собственным вращением, поэтому особое значение имеет изучение конвекции во вращающихся слоях. В газовой или жидкой областях космических объектов, в силу целого ряда факторов, наблюдается неоднородное распределение крупномасштабной циркуляции (во вращающейся системе отсчета), причем и в меридиональном и азимутальном направлениях. Такие отклонения от твердотельного вращения принято называть дифференциальным вращением (ДВ). Актуальность изучения ДВ во вращающихся сферических слоях непроводящей среды, обусловлена тем, что динамика крупномасштабных атмосферных течений в существенной степени определяет вариации погоды. В основном экспериментальное и численное исследование ДВ выполнено для цилиндрического зазора единичного аспектного отношения, с изотермическими стенками. Крупномасштабные атмосферные течения формируются в тонком слое, поэтому возникает много вопросов относительно структуры и динамики ДВ при малых значениях аспектного отношения (тонких слоях).

Важной проблемой современной метеорологии является формирование тропических циклонов (ТЦ), представляющих собой комбинацию целого ряда гидродинамических и термодинамических процессов. Понима-

ние роли каждого из этих процессов само по себе является сложной проблемой. Большое количество параметров (более тридцати), используемых в математических моделях ТЦ, сильно осложняет определение наиболее важных из них, при помощи ресурсоемких трехмерных расчетов. В основном, работы по лабораторному моделированию ТЦ, посвящены изучению отдельных аспектов формирования и эволюции ТЦ. Исследуется появление мезомасштабных вихрей в стене “глаза”, влияние ТЦ на стратификацию в верхнем слое воды, процессы в центральной, нижней части ТЦ. В этой связи чрезвычайно перспективным является лабораторный аналог ТЦ, предложенный и исследованный в работах Богатырева Г.П. и его соавторов. Надо отметить, что целый ряд интересных и важных результатов, описанных в этих работах, не получил своего развития из-за ограниченных возможностей используемых измерительных систем.

Под спиральностью понимается скалярное произведение скорости на завихренность, то есть это мера корреляции скорости и завихренности в потоке жидкости или газа. В случае идеальной жидкости спиральность является интегралом движения. Эти особенности спиральности предполагают возможность ее существенного влияния на гидродинамические процессы. Интерес к спиральности в чисто гидродинамических задачах возник в связи с эволюцией крупномасштабных атмосферных вихрей. Известно, что рост спиральности приводит к уменьшению нелинейного слагаемого в уравнении Навье-Стокса и соответственно должен ослаблять (или даже блокировать) поток энергии от больших масштабов к меньшим. В силу технических сложностей, обычно приходится ограничиваться оценками средних значений отдельных вкладов (произведений соответствующих компонент скорости и завихренности) спиральности или их локальными измерениями. В качестве основных проблем экспериментального исследования спиральности можно выделить реализацию течений с высоким уровнем спиральности и методику измерения спиральности.

Решение описанных проблем, касающихся эволюции структуры течений, процессов тепло-массобмена в конвективных потоках различных масштабов, в том числе и во вращающихся системах, было существенно ограничено возможностями используемых измерительных систем. Настоящий прорыв при исследовании гидродинамических течений в прозрачных средах произошел с развитием метода PIV (Particle Image Velocimetry) и методов на его основе (StereoPIV, dualPIV, TomoPIV), которые позволяют производить бесконтактные полевые измерения двух или трех компонент скорости. В отличие от ранее используемых методов (термоанемометрия, лазерная доплеровская анемометрия) появилась возможность анализировать мгновенные поля скорости, исследовать временную эволюцию струк-

туры течений и их интегральных характеристик. Таким образом применение современных систем PIV с высоким пространственным и временным разрешением дает возможность ответить на ранее поставленные вопросы и развить актуальные направления исследований.

Целью диссертационной работы, является выявление феноменологических закономерностей, определяющих структуру потоков и процесс конвективного теплообмена, в конвективных течениях, состоящих из крупномасштабной циркуляции и мелкомасштабных течений различного типа, в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах, с геофизическими приложениями.

Задачи диссертационной работы состоят в:

- получении локальных и интегральных характеристик турбулентной конвекции Рэлея-Бенара в кубической полости; описании переходных процессов, сопровождающихся перестройкой структуры крупномасштабного течения; изучении использования турбулентной конвекции в кубической полости в качестве тестовой задачи для верификации численных кодов.
- исследовании особенностей эволюции адвективного течения и формирования вторичных конвективных структур в адвективном потоке, в горизонтальном слое жидкости в прямоугольной полости прямоугольного сечения, в случае ступенчатого распределения температуры на дне и в цилиндрическом слое, с локализованным нагревателем в форме диска; описании пространственной и временной динамики продольных и поперечных конвективных валов.
- исследовании влияния вторичных конвективных структур в пограничном слое на перенос тепла в случае неоднородного распределения тепла на нижней границе; получении зависимостей числа Нуссельта от числа Рэлея.
- описании физического механизма формирования дифференциального вращения в цилиндрическом слое с неоднородным распределением нагрева на нижней границе; получении зависимостей суперротации и субротации от управляющих параметров; изучении влияния аспектного отношения и физических свойств жидкости на формирование и интегральные характеристики дифференциального вращения.
- применении панорамных, бесконтактных методов измерения скорости для исследования мгновенных, средних и интегральных характеристик лабораторного аналога тропического циклона; получении зависимостей характеристик лабораторного аналога тропического циклона от размерных и безразмерных параметров; исследовании перестройки структуры течения в процессе потери устойчивости лабораторного аналога тро-

пического циклона, определении границы его устойчивости; исследовании влияния вторичных конвективных структур на процесс быстрой интенсификации лабораторного аналога тропического циклона; апробации распределенной программно-аппаратной системы, разработанной для реализации экспериментов с обратной связью, на лабораторном аналоге тропического циклона.

- проведении экспериментальных измерений спиральности в механически закрученных струях; анализе распределений завихренности и спиральности в неподвижном слое с локализованным источником нагрева; изучении генерации спиральности в конвективных потоках от локализованного нагревателя во вращающемся слое; исследовании генерации и эволюции спиральности в цилиндрическом канале с дивертором.

Научная новизна.

- Впервые, в ходе независимых экспериментов, проведенных на различных установках, при помощи панорамного метода измерения скорости (PIV) и локальных измерений температуры, получены пространственные и временные характеристики турбулентной конвекции Рэлея-Бенара при числах Рэлея до $1.6 \cdot 10^9$. Обоснована возможность использования турбулентной конвекции Рэлея-Бенара в качестве тестовой задачи для верификации численных кодов.

- Впервые предложен и успешно применен интегральный метод анализа динамики крупномасштабной циркуляции в кубической полости, позволяющий разделить поворот плоскости крупномасштабной циркуляции и азимутальное движение жидкости.

- Впервые изучена эволюция адвективного течения и особенности формирования вторичных конвективных структур в адвективном потоке, в горизонтальном слое жидкости, в полостях различной геометрии, в случае ступенчатого распределения температуры на дне. Описана временная и пространственная эволюция вторичных течений.

- Впервые изучено влияние аспектного отношения на структуру и характеристики основного и вторичных течений в цилиндрическом слое с локализованным нагревателем. Показано, что появление вторичных течений, в отличие от трансформации их структуры, заметно усиливает тепловой поток и уменьшает толщину температурного пограничного слоя, для обеих исследуемых конфигураций.

- Впервые описано формирование дифференциального вращения в случае прямой и обратной меридиональных циркуляций для тонкого слоя и высоких значений числа Прандтля. Получены основные характеристики дифференциального вращения, зависимости суперротации и субротации от управляющих параметров для данной конфигурации.

- Впервые структура лабораторного циклонического вихря была исследована при помощи бесконтактных панорамных измерений скорости. На основе мгновенных и средних полей азимутальной и радиальной компонент скорости, проведено сравнение структуры лабораторного аналога тропического циклона, включая вторичные структуры в нижней части слоя, с данными натурных наблюдений и математического моделирования. Показано, что лабораторный аналог тропического циклона может рассматриваться в качестве идеализированной модели “сухого” тропического циклона (без учета фазовых переходов), получены зависимости локальных и интегральных характеристик циклонического вихря от основных размерных и безразмерных параметров. Показана прямая связь между эволюцией циклонического вихря и теплообменом в пограничном слое. Предложен оригинальный механизм быстрой интенсификации тропических циклонов.

- Впервые проведен анализ распределений завихренности и спиральности в неподвижном слое с локализованным источником нагрева. Показана генерация спиральности в конвективных потоках от локализованного нагревателя во вращающемся слое. Показана возможность использования метода StereoPIV для прямых измерений спиральности в длинных каналах.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты, изложенные в диссертации, способствуют более глубокому пониманию механизмов формирования и динамики крупномасштабной циркуляции на фоне турбулентной конвекции, могут быть использованы для решения задач контроля и управления конвективными потоками в замкнутых полостях, процессами теплообмена в различных технологических установках. Описание механизмов формирования дифференциального вращения важно для лучшего понимания природы крупномасштабных зональных течений в атмосфере Земли и других планет. Показано, что лабораторный аналог тропического циклона может рассматриваться в качестве модели “сухого” тропического циклона и может использоваться в качестве эффективного инструмента для изучения различных аспектов тропического циклогенеза. Предложенный в работе механизм быстрой интенсификации тропического циклона может помочь в решении этой важной проблемы. Апробированная распределенная программно-аппаратная система дает широкие возможности для проведения экспериментов в системах с обратной связью. Использование вычислительных ресурсов суперкомпьютера позволяет уйти от необходимости применения эффективных в плане использования ресурсов, но уступающих по точности, методов измерений и обработки результатов. Исследование генерации спиральности при по-

мощи вращающихся или неподвижных лопаток является важным этапом для понимания возможных способов создания течений с высоким уровнем спиральности. Показано, что осесимметризация потока и быстрое затухание радиальной скорости в винтовом потоке за дивертором позволяет использовать метод StereoPIV для прямых измерений спиральности.

Методология и методы исследования. Все основные результаты диссертационного исследования получены при помощи современных подходов. Важным отличием от исследований в близкой постановке, проведенных ранее, является то, что структура и характеристика течений жидкости и газа восстанавливались при помощи панорамных бесконтактных методов PIV и StereoPIV, что позволило восстановить мгновенные и средние поля двух или трех компонент скорости, поля турбулентных пульсаций, временные зависимости интегральных характеристик течения. Измерения температуры в основном проводились при помощи калиброванных термопар, а в некоторых экспериментах, на поверхности жидкости, при помощи тепловизора. Визуализация потоков проводилась при помощи теневого метода и различных светорассеивающих трассеров. Автоматизация измерений проводилась при помощи моторизованных прецизионных подвижек и специализированных измерительных плат. При помощи автоматизированных систем были восстановлены поля температуры, реализованы длительные серии измерений. Для реализации обратной связи разработан оригинальный подход сопрягающий измерительную систему и суперкомпьютер. Обработка и анализ длинных рядов данных проводился при помощи известных, апробированных методов, таких как Фурье и вейвлет-анализ. Для математического моделирования использовались как собственные коды, так и различные CFD пакеты, результаты расчетов верифицировались при помощи экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

- База экспериментальных данных для верификации численных кодов, используемых для расчета турбулентной конвекции Рэлея-Бенара при числах Рэлея до $1.6 \cdot 10^9$. Интегральный метод анализа динамики крупномасштабной циркуляции в кубической полости, позволяющий разделить динамику плоскости крупномасштабной циркуляции и азимутальное движение жидкости.

- Экспериментальные зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея в случае смешанных граничных условий для температуры.

- Механизм формирования дифференциального вращения в случае прямой и обратной меридиональных циркуляций для тонкого слоя и высоких значений числа Прандтля. Зависимости характеристик дифференциального вращения от управляющих параметров и граничных условий.

- Обоснование использования лабораторного аналога тропического циклона в качестве идеализированной модели “сухого” тропического циклона. Зависимости характеристик интенсивного циклонического вихря от основных размерных и безразмерных параметров.

- Наличие прямой связи быстрой интенсификации лабораторного аналога тропического циклона с процессом теплообмена в пограничном слое.

- Моделирование выделения “скрытого” тепла в лабораторном эксперименте, при помощи распределенной программно-аппаратной системы для экспериментов с обратной связью.

- Роль крупномасштабных и вторичных конвективных потоков в процессе генерации спиральности от локализованного нагревателя во вращающемся слое.

- Применение методов PIV и StereoPIV для измерения мгновенных и средних полей отдельных вкладов спиральности в случае механически закрученных потоков. Возможность использования метода StereoPIV для прямых измерений спиральности в длинных каналах.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается тщательной разработкой методик проведения эксперимента, применением современных экспериментальных методов визуализации и измерения физических величин, воспроизводимостью результатов наблюдений и измерений, а также сравнением, где возможно, полученных результатов с результатами имеющихся, численных, теоретических и экспериментальных, исследований.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации докладывались на :

XV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XX, XXI Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь. 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019; 11th, 14th, 16th European Turbulence Conference, Porto, Portugal, 2007, Lyon, France, 2013, Stockholm, Sweden, 2017; Всероссийская конференция молодых ученых (с международным участием) «Неравновесные процессы в сплошных средах», г. Пермь, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2017; Конференция молодых ученых «Актуальные проблемы математики, механики, информатики». Пермь, 2008, 2010; International Conference “Mesoscale Meteorology and Air Pollution” Odessa, Ukraine, 2008; 17 Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках», г.Пермь, 2008, 2010, 2011; 10ая, 13ая международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», г.Москва, 2009, 2015; International Conference «Conversion, coherent structures and turbulence», Москва, 2009; European Geophysical

Union (EGU) General Assembly, Вена (Австрия), 2009, 2011, 2014; Международная конференция «Инженерные системы». Москва, 2009, 2015, 2016; Пятая, Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену. Москва, 2010, 2018; 23-th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics ICTAM 2012, Beijing; Научно-технический семинар «Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике», 2012, 2016, Нижний Новгород; Symposium Bifurcations And Instabilities In Fluid Dynamics, Haifa, Israel, 2013; 9th, 11th European Fluid Mechanics Conference, Rome, 2012, Sevilla, 2016; Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях». 2007, 2009, 2013, 2015; Международная конференция «Advanced Problems in Mechanics », г. Санкт-Петербург, 2016; 8th European Postgraduate Fluid Dynamics Conference, 2016, Warsaw, Poland; II, III, IV, V, VI Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения», г. Пермь, 2014, 2015, 2016, 2018, 2019; Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика», Ялта, 2016, 2017, 2018, 2019; Международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах», г. Пермь, 2017; Международная конференция «Суперкомпьютерные дни в России», Москва, 2018; XXIII Международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность», 2018; Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», 2018; IX, X, XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. 2006, 2011, 2019; International conference on Rayleigh-Benard turbulence, 2018, Enschede, The Netherlands; International the Lorentz Center workshop «Rotating Convection: from the Lab to the Stars», 2018; Пермский городской гидродинамический семинар им. Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкого под руководством проф. Т.П. Любимовой; семинар Института механики сплошных сред УрО РАН под руководством академика РАН В.П. Матвеевко.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 135 печатных работах, из них 28 статей, в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов докторских диссертаций, 10 статей в сборниках и журналах не входящих в список ВАК, 37 статей в сборниках трудов конференций и 61 тезисов докладов.

Личный вклад автора.

В ходе исследований турбулентной конвекции Рэлея-Бенара в кубической полости [1, 2] автор выделил ключевые проблемы, на основе которых, совместно с соавторами была сформулирована постановка задачи. Автор внес значительный вклад в планирование экспериментов, обобщил

полученные результаты и сформулировал основные выводы. В [3] автор определил актуальные вопросы, на основе которых, совместно с соавторами была сформулирована постановка задачи, предложил использовать интегральный метод, при помощи которого удалось обосновать новый механизм переориентаций КМЦ, внес значительный вклад в физическую интерпретацию полученных результатов и формулировку основных выводов работы.

При исследовании особенностей эволюции адвективного течения и формирования вторичных конвективных структур в адвективном потоке, автор определил актуальные вопросы, и совместно с соавторами [4] или лично [5, 6] осуществил постановку задачи. Автор планировал ход экспериментальных измерений, совместно с Баталовым В.Г. производил настройку и тестирование PIV системы, реализовал автоматизацию измерений температуры, провел измерения температуры в вертикальном сечении, провел анализ измерений температуры и полей скорости, сформулировал постановку граничных условий и осуществил выбор значений управляющих параметров для численных расчетов, обобщил результаты, сформулировал основные выводы работы. В [7] автор предложил постановку задач, планировал ход экспериментальных измерений и численных расчетов, совместно с соавторами производил настройку и тестирование PIV системы, автоматизацию измерений температуры, обработку данных измерений полей скорости. Математическая модель была реализована автором совместно с Евграфовой А.В. Автор сформулировал постановку граничных условий, осуществил выбор значений управляющих параметров. Автор обобщил и проанализировал численные и экспериментальные результаты, дал физическую интерпретацию полученных результатов и сформулировал основные выводы.

В цикле работ, посвященных изучению конвективного теплообмена в случае смешанных граничных условий [8, 9, 10, 11, 12] автор осуществил постановку задач, планировал ход экспериментальных измерений, обобщил и проанализировал полученные результаты, дал физическую интерпретацию полученных результатов и сформулировал основные выводы.

При исследований дифференциального вращения во вращающемся слое с локализованным нагревом в [13] автор определил актуальные вопросы и совместно с соавторами сформулировал постановку задачи. Автор планировал ход экспериментальных измерений, совместно с Баталовым В.Г. производил настройку и тестирование PIV системы, провел анализ полей скорости, обобщил и проанализировал результаты. Автором реализована математическая модель и проведены численные исследования. Автор дал физическую интерпретацию полученных результатов и

сформулировал основные выводы. Работа [14] проведена автором лично. В [15] автор поставил задачу, планировал ход экспериментальных измерений и численных расчетов. Математическая модель была реализована совместно с Евграфовой А.В. Автор сформулировал постановку граничных условий, осуществил выбор значений управляющих параметров. Автор обобщил и проанализировал численные и экспериментальные результаты, дал физическую интерпретацию полученных результатов и сформулировал основные выводы.

В работах связанных с изучением лабораторного аналога ТЦ [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23] автор сформулировал постановку задач. Автор планировал ход экспериментальных измерений, совместно с Поповой Е.Н. производил настройку и тестирование PIV системы, обработку данных измерений полей скорости. Автор подготовил численный код для реализации функциональной связи между средней скоростью течения и интенсивностью нагрева. Автор обобщил и проанализировал экспериментальные результаты, дал физическую интерпретацию полученных результатов, предложил оригинальный механизм быстрой интенсификации тропических циклонов, сформулировал основные выводы.

При изучении генерации спиральности, в [24] автор сформулировал постановку задачи, автор планировал ход экспериментальных измерений, производил настройку и тестирование PIV системы, измерения методом StereoPIV. Автор обобщил, проанализировал полученные результаты и сформулировал основные выводы. В [25, 26, 27] сформулировал постановку задач, планировал ход экспериментальных измерений и численных расчетов, совместно с соавторами производил настройку и тестирование PIV системы, автоматизацию измерений температуры, обработку данных измерений полей скорости. Математическая модель была реализована совместно с Евграфовой А.В. Автор сформулировал постановку граничных условий, осуществил выбор значений управляющих параметров. Автор обобщил и проанализировал численные и экспериментальные результаты, дал физическую интерпретацию полученных результатов и сформулировал основные выводы. В [28] автор определил ключевые актуальные вопросы, на основе которых совместно с соавторами была сформулирована постановка задачи. Автор внес значительный вклад в физическую интерпретацию полученных результатов и формулировку основных выводов работы. На основе полученных результатов, автор предложил и обосновал возможность прямого измерения спиральности методом StereoPIV. В [29] автор совместно с соавторами определил ключевые актуальные вопросы и сформулировал постановку задачи, провел верификацию расчетного кода. Автор внес значительный вклад в физическую интерпретацию

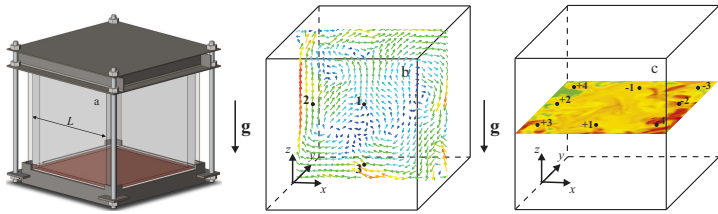


Рис. 1. Экспериментальная установка (а), пример поля скорости в вертикальном сечении (б), схема расположения термопар (с).

полученных результатов и формулировку основных выводов работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 413 страниц, из них 371 страниц текста, включая 204 рисунка. Библиография включает 397 наименований на 42 страницах.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы диссертационного исследования, представлены положения, выносимые на защиту, описана апробация результатов и данные о структуре и объеме работы.

В первой главе представлено исследование динамики крупномасштабной циркуляции (КМЦ) в турбулентной конвекции Рэлея-Бенара в кубической полости. В начале главы представлен обзор основных работ по тематике исследования, показывающий большое количество актуальных проблем. В частности, не ясна роль геометрии полости, чем обусловлены физический механизм переброса КМЦ и природа выделенных частот во временных спектрах низших пространственных мод. Вопрос о связи переориентации и азимутального вращения жидкости, также является открытым. Важной проблемой является выбор бенчмарка для верификации кодов, используемых для расчетов турбулентной конвекции. Получение ответов на поставленные вопросы было основной задачей исследований представленных в первой главе, основные результаты которой опубликованы в работах [1, 2, 3].

В п.1.1 представлена методика исследований. Экспериментальная

установка представляет собой кубическую полость со стороной 250 мм (Рис. 1а). Горизонтальные стенки, толщиной 30 мм, изготовлены из меди и выполняют роль теплообменников, а вертикальные стенки, толщиной 25 мм, изготовлены из плексигласа. Аналогичная установка была изготовлена в ОКБМ Африкантов (модель Б). Управляющими параметрами задачи являются числа Прандтля и Рэлея. Для варьирования значений числа Прандтля измерения проводились для различной средней температуры жидкости. Для измерений скорости использовалась PIV системы "Полис" и LaVision. Погрешность измерений скорости не превышала 5%. Все полевые измерения скорости выполнялись в центральном вертикальном сечении полости (Рис. 1б). Температурные пульсации регистрировались с помощью нескольких дифференциальных медь–константановых термопар. Термопары располагаются в центральном вертикальном сечении на высоте 125 мм от нижнего теплообменника (Рис. 1с). Длительность экспериментов составляла от 2 до 25 часов.

Для математического моделирования термогравитационной конвекции в кубической полости использовались два CFD пакета – коммерческий пакет Ansys CFX и пакет с открытым исходным кодом OpenFOAM. Оба пакета используют для решения уравнений метод конечных объемов. Расчеты турбулентной конвекции выполнялись на основе уравнений конвекции несжимаемой жидкости с использованием подхода LES (метод крупных вихрей, Large Eddy Simulation). В качестве граничных условий использовались изотермические условия для температуры на верхней и нижней грани куба и адиабатические на боковых гранях. На стенках задается закон прилипания для гладкой стенки.

В п.1.2 и п.1.3 описаны результаты экспериментальных и численных исследований структуры и локальных характеристик турбулентной конвекции в кубической полости. Основное внимание было сфокусировано на общей структуре течения, пространственном распределении энергии пульсаций, локальных спектральных характеристиках скорости и временной динамике КМЦ.

Показано, что варьирование управляющих параметров влияет на интенсивность течений, однако общая структура КМЦ сохраняется. При помощи термопарных измерений было обнаружено, что плоскость КМЦ может изменять ориентацию, переходя с одной диагонали на другую. Хорошее согласие экспериментальных данных, полученных независимо двумя научными группами, показало возможность использования турбулентной конвекции Рэлея-Бенара в качестве бенчмарка для верификации численных кодов. Сравнение экспериментальных результатов и результатов расчетов показало, что для описанных режимов, математическое

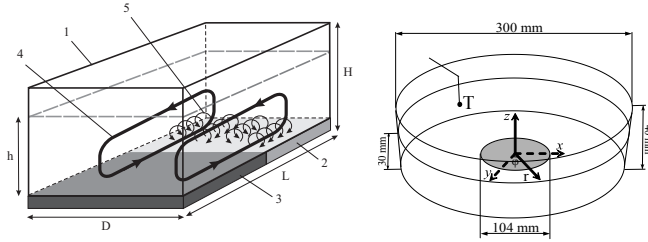


Рис. 2. Схемы экспериментальных установок. Слева: 1 – прямоугольная кювета, 2 – горячий теплообменник, 3 – холодный теплообменник, 4 – основное, адвективное течение, 5 – продольные конвективные валы; справа – цилиндрический слой с локализованным нагревом.

моделирование методом LES воспроизводит мелкомасштабную динамику турбулентного потока и поведение КМЦ (п.1.4).

В п.1.5 при помощи математического моделирования (OpenFOAM) были детально рассмотрены переходные процессы, сопровождающиеся перестройкой структуры крупномасштабного течения в турбулентной конвекции в кубической полости, проанализированы интегральные характеристики течения. Показано, что крупномасштабная циркуляция сопровождается спонтанно формирующимися крупномасштабными азимутальными течениями с отличным от нуля значением вертикальной компоненты интегрального углового момента. При этом, вращение плоскости крупномасштабной циркуляции и среднее вращение жидкости слабо коррелируют на характерных временах переориентаций. Обоснован новый сценарий переориентаций КМЦ независящий от крупномасштабного азимутального течения. Вместо одиночного крупномасштабного вала предлагается рассматривать суперпозицию пары крупномасштабных ортогональных квазидвухмерных валов, а переориентация является результатом приостановки одного из этих валов.

Во второй главе представлено исследование формирования горизонтальных валов в случае естественной (не смешанной) конвекции в случае ступенчатого перепада температур на дне. Ключевыми факторами влияющими на формирование валов в данной постановке является наложенный перепад температур и характеристики основного крупномасштабного течения. Результаты второй главы опубликованы в работах [4, 5, 6, 7].

В п.2.1 описано формирование конвективных валов в случае более

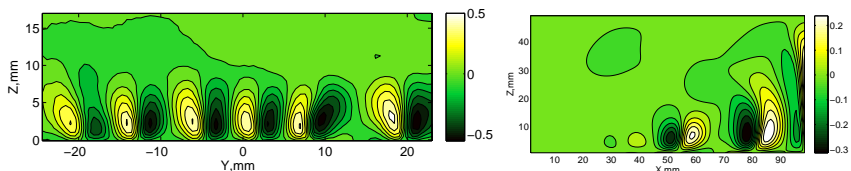


Рис. 3. Средние поля завихренности ω_x в плоскости YZ для $x = 65$ мм и $\theta = 26.8\text{K}$ (слева), $Pr = 263$, $h = 30$ мм, эксперимент; в плоскости XZ для $h = 50$ мм, $Pr = 510$ и $\theta = 10\text{K}$ (справа), расчет. Завихренность представлена в с^{-1} .

простой геометрии, а именно в прямоугольной кювете, в которой одна половина дна является холодным теплообменником, а вторая половина горячим теплообменником (Рис. 2, слева). Установка представляет собой прямоугольную кювету шириной $D = 100$ мм, длиной $L = 205$ мм, и высотой $H = 100$ мм, боковые стенки которой изготовлены из оргстекла толщиной 10 мм. Дно кюветы состоит из двух одинаковых медных теплообменников, теплоизолированных друг от друга. В экспериментах разность температур θ варьировалась в пределах от 1.7 К до 33.7 К. В качестве рабочих жидкостей использовались дистиллированная вода, трансформаторное масло и водный раствор глицерина. Толщина слоя жидкости H в экспериментах изменялась от 8 до 70 мм, поверхность жидкости всегда была свободной. Температура в слое измерялась с помощью медь-константановых термопар. Для измерения полей скорости использовалась измерительная система PIV «Полис». Наряду с экспериментами проводилось прямое численное моделирование в двухмерной и трехмерной постановках.

Показано, что адвективное течение, охватывающее весь слой, возникает при достаточно больших значениях числа Рэлея ($Ra \approx 2.3 \times 10^4$) и всегда характеризуется наличием продольных спиральных валов (Рис. 3, слева) в пограничном слое над горячим теплообменником. Спиральные валы формируются на некотором расстоянии от скачка температуры. Характеристики спиральных валов полностью определяются структурой температурного пограничного слоя. Центр вращения (ось вала) привязан к положению минимума температуры, которое практически не меняется вдоль потока. Общая высота валов связана с толщиной всего пограничного слоя и растет вдоль потока. Размеры валов растут с увеличением толщины слоя, но только при небольших толщинах, а при $h = 30$ мм (для рассмотренной конфигурации) не зависят от нее.

На основе проведенных расчетов и экспериментальных измерений по-

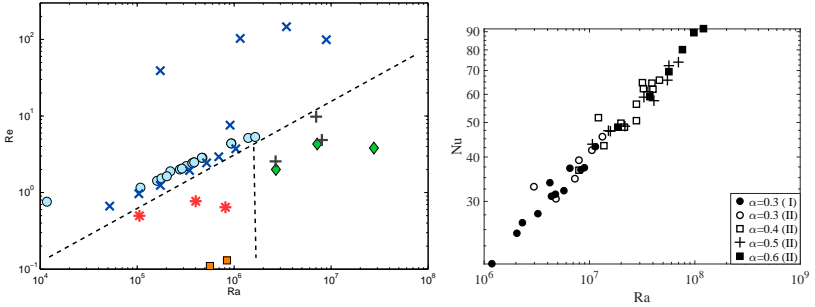


Рис. 4. Карта режимов на плоскости $Ra - Re$: кресты – DNS, продольные валы; плюсы – DNS, смешанный режим (наложение продольных и поперечных валов); звездочки – DNS, поперечные валы; круги – эксперимент, продольные валы; ромбы – эксперимент, смешанный режим; квадраты – эксперимент, поперечные валы (слева); зависимость числа Нуссельта от числа Рэлея для различных аспектных отношений (справа).

строена карта режимов на плоскости $Ra - Re$ (Рис. 4, слева). Показано, что формирование продольных валов в исследуемой системе происходит при параметрах находящихся выше линии $Re \approx 2 \cdot 10^{-4} Ra^{0.7}$. Поперечные валы (Рис. 3, справа) появляются только в случае достаточно большого вертикального перепада температуры в пограничном слое и слабой крупномасштабной циркуляции. Наблюдается также смешанный режим, когда одновременно формируются и продольные и поперечные валы. Области с выраженными поперечными валами и смешанным режимом разделены на карте режимов характерным значением числа Рэлея $Ra \approx 2 \times 10^6$.

В п.2.2 представлено исследование формирования вторичных течений в цилиндрическом слое, с локализованным нагревателем в форме диска (Рис. 2, справа). Эксперименты проводились в цилиндрической кювете диаметром 300 мм и высотой 40 мм. Боковые стенки и дно изготовлены из оргстекла толщиной 3 мм и 20 мм соответственно. Диаметр нагревателя был равен 104 мм, а его ширина составляла 10 мм. Ранее, данная кювета, изготовленная Богатыревым Г.П., использовалась для изучения лабораторного аналога ТЦ.

Аналогично случаю прямоугольной полости, крупномасштабное течение, вызванное наличием горизонтального градиента температуры, приводит к образованию неустойчивой температурной стратификации над нагретой поверхностью и формированию сложной системы горизонтальных конвективных валов. Основное внимание было уделено пространственной

и временной эволюции мелкомасштабных конвективных структур в температурном пограничном слое. Режимы для слабого нагрева (при Gr_f меньше чем $3 \cdot 10^4$) характеризуются появлением поперечных валов в форме деформированных колец, подобных поперечным валам в прямоугольной полости. Поперечные валы как бы “заморожены” в основное течение и движутся вместе с ним к центру модели. Рост числа Грасгофа приводит к неустойчивости поперечных валов (при Gr_f превышающих $3 \cdot 10^4$) и вместо них формируется система радиальных валов – аналога продольных валов в прямоугольной полости, с одним существенным отличием – расстояние между валами зависит от радиуса.

Различные способы визуализации показали возможность одновременного существования и радиальных и поперечных валов при высоких числах Грасгофа. Поперечные валы в случае слабого нагрева, обусловлены потерей устойчивости в пограничном слое. Формирование поперечных валов в развитых режимах описывается другим механизмом. Радиальные валы приводят к появлению тепловых плюмов над пограничным слоем. Тепловые плюмы сносятся к центру основным течением, сближаются, в результате чего формируется поперечный вал, спиральной формы или более сложного вида для развитых режимов. Существенное уменьшение числа Прандтля (от 256 до 54) не приводит к заметным изменениям в структуре горизонтальных валов. Обнаружена степенная зависимость частоты формирования поперечных валов от числа Рэлея, с постоянным показателем степени в широком интервале параметров.

В третьей главе представлено исследование конвективного теплопереноса в замкнутых полостях при неоднородных граничных условиях. Основное внимание уделено влиянию вторичных течений на процесс теплообмена и структуру пограничного слоя. Результаты третьей главы опубликованы в работах [6, 8, 9, 10, 11, 12].

Исследования проводились на установках описанных в п.2.1. и 2.2, и цилиндрической кювете большего размера (диаметром кюветы – 690 мм, диаметр нагревателя – 195 мм), в интервале параметров, который характеризуется существенной вариацией как структуры, так и интенсивности вторичных течений. Полученные результаты показали, что появление валов приводит к сильному росту теплового потока по сравнению с теплопереносом обеспечиваемым ламинарным обтеканием пластины. Этот рост обусловлен изменением толщины теплопроводного слоя, прилегающего к нагретой пластине, вследствие эффективного перемешивания пограничного слоя конвективными валами. Трансформация структуры валов, в отличии от их появления, не приводит к заметному изменению величины теплопотока. Так показатель β в степенном законе $Nu \sim Ra^\beta$ описыва-

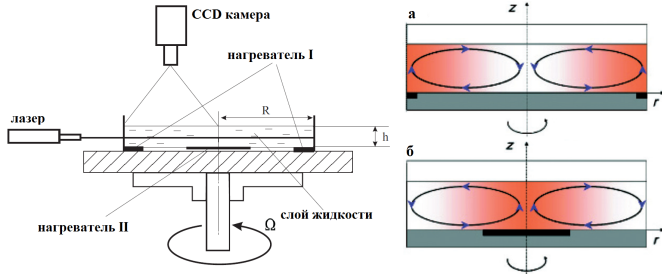


Рис. 5. Слева – схема экспериментальной установки; справа — схемы меридиональной циркуляции.

ющем конвективный теплоперенос (Рис. 4, справа) не изменяется в ходе существенной трансформации структуры вторичных течений и равен $\beta = 0.29 \pm 0.02$ для обеих исследуемых конфигураций.

В четвертой главе представлено исследование дифференциального вращения (ДВ) в цилиндрическом слое с геофизическими приложениями. Результаты четвертой главы опубликованы в работах [14, 13, 15]. Формирование ДВ для различных граничных условий, рассмотрено при помощи одинаковой методики. В отличие от исследований ДВ в слое между двумя коаксиальными цилиндрами, в данной работе рассматривается *тонкий* слой жидкости. Основное внимание было уделено режимам с доминированием осесимметричной циркуляции, избегая тем самым усложняющих факторов, таких как вихри меньшего масштаба, волн и других нелинейных процессов, которые могли бы серьезно повлиять на формирование дифференциального вращения.

В **п.4.1.** описана методика исследований и основные результаты, касающиеся особенностей формирования ДВ. Исследование дифференциального вращения проводилось при помощи цилиндрической кюветы (Рис. 2, справа). Ранее, данная кювета, изготовленная Богатыревым Г.П. использовалась для изучения лабораторного аналога ТЦ. Кювета, изготовленная из оргстекла и прозрачная для лазерного ножа, размещалась на равномерно вращающемся, горизонтальном столе (Рис.5). В качестве рабочей жидкости использовалось трансформаторное масло. Для организации прямой и обратной ячеек использовались два нагревателя, расположенные на дне модели (Рис.5). Электрический нагреватель I расположенный на периферии модели, у боковой стенки обеспечивал прямую конвективную ячейку (Рис.5(а)). Нагреватель II представляющий собой

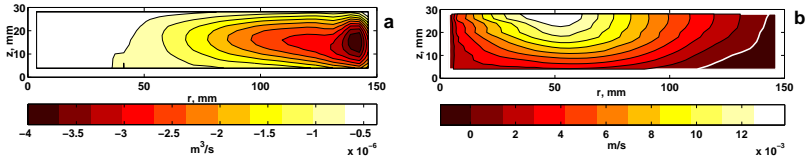


Рис. 6. Распределение функции тока в центральном вертикальном сечении, иллюстрирующее меридиональную циркуляцию (a) и средней азимутальной скорости (b) для прямой ячейки при $Gr_f = 1.4 \cdot 10^7$, $E = 0.032$.

массивный медный диск, радиусом в 52 мм, установленный заподлицо в центре дна, с осью совпадающей с осью вращения модели, обеспечивал циркуляцию в обратном к прямой ячейке направлении (Рис.5(б)). Полевые измерения горизонтальной скорости производились для стационарного режима при помощи системы PIV "Полис". CCD камера была расположена над вращающейся кюветой, в лабораторной системе координат, так как это показано на Рис. 5. Область измерений была ограниченной, однако вращение модели обеспечивало осреднение по азимутальной координате. PIV измерения проводились для различных горизонтальных сечений в интервале $4 \leq z \leq 28$, мм с шагом в 2 мм (при анализе полей скорости использовалась цилиндрическая система координат (r, ϕ, z)).

В случае прямой циркуляции доминирует циклоническое движение, которое занимает большую часть полости, за исключением небольших зон на периферии вблизи дна (Рис.6). Обратная ячейка характеризуется конкуренцией между циклоническим течением в центральной области и антициклоническим течением на периферии (Рис.7). Структура азимутальных течений и их интенсивность определяется различием вязких напряжений на твердых стенках и на свободной границе. Момент сил обусловленный трением на твердых границах служит источником углового момента в области антициклонического течения и стоком в области циклонического течения. В ходе перехода к стационарному режиму интегральный поток углового момента отличен от нуля, что приводит к вариациям интегрального углового момента слоя жидкости. Прямая циркуляция приводит к его росту, а обратная к уменьшению. При одинаковых Gr_f рост углового момента для прямой ячейки значительно превосходит его уменьшение в случае обратной ячейки. Механизм формирования дифференциального вращения определяется меридиональным транспортом и диффузией углового момента.

В п.4.2. и 4.3 рассмотрена зависимость глобальной суперротации S ,

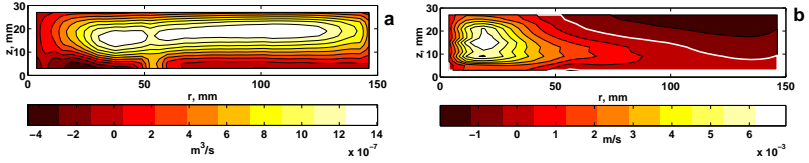


Рис. 7. Распределение функции тока в центральном вертикальном сечении, иллюстрирующее меридиональную циркуляцию (а) и средней азимутальной скорости (б) для обратной ячейки при $Gr_f = 3.02 \cdot 10^7$, $E = 0.032$. Граница между циклоническим и антициклоническим течением обозначена белой линией.

величины характеризующей относительное изменение интегрального углового момента, от различных параметров, а именно величины нагрева, скорости вращения, кинематической вязкости и аспектного отношения. Полученные результаты показали, что и в медленно вращающихся слоях S может достигать заметных величин. Сравнение с результатами, полученными для вращающегося цилиндрического зазора, заполненного водой (Read et al., 1986), показали, что несмотря на качественное подобие механизма формирования ДВ, изменение геометрии и физических свойств жидкости может приводить к существенным количественным отличиям. В п.4.4. сформулированы основные выводы по результатам главы.

В пятой главе проведено исследование лабораторного аналога тропического циклона. Результаты пятой главы опубликованы в работах [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. В вводной части главы представлен обзор существующих моделей тропических циклонов, подчеркнуты преимущества лабораторного моделирования и сформулированы актуальные задачи, особое внимание уделено результатам полученным при помощи лабораторного аналога тропического циклона и подробно изложенным в работах Богатырева Г.П. с соавторами. В п.5.1. описана экспериментальная установка и результаты исследований характеристик и структуры лабораторного аналога ТЦ в стационарном режиме. Отметим, что кювета, использованная при проведении данных исследований, была изготовлена Богатыревым Г.П. для реализации лабораторного аналога ТЦ. Принципиальным отличием от ранее проведенных исследований было использование бесконтактного панорамного метода измерений скорости. Основной целью являлось изучение наиболее важных факторов влияющих на характеристики стационарного конвективного циклонического вихря. Для фиксированной геометрии это – нагрев (заданный тепловой поток или перепад температур), скорость вращения и вязкость. Увеличение теплового пото-

ка усиливает вторичную циркуляцию и перенос углового момента. Вращение слоя с одной стороны является необходимым условием образования интенсивного вихря, а с другой является фактором ограничивающим интенсивность конвективного течения и транспорт углового момента, определяющим толщину экмановского слоя. Вязкость определяет диффузию момента и углового момента, и наряду с угловой скоростью вращения и толщиной слоя, толщину экмановского пограничного слоя. Поэтому роль каждого фактора необходимо рассматривать отдельно. Для возможности сравнения результатов данной работы и исследований других авторов, построены зависимости от безразмерных управляющих параметров, такие как число Грасгофа, вращательное число Рейнольдса (обратное числу Экмана) и число Прандтля.

Кювета помещалась на вращающийся стол, обеспечивающий стабильное вращение. Угловая скорость варьировалась от $\Omega = 0.04$ рад/с до $\Omega = 0.17$ рад/с. В качестве рабочих жидкостей использовались различные силиконовые масла ($Pr = 256$, $Pr = 94$ и $Pr = 56$ при $T = 25^\circ\text{C}$). Глубина слоя для всех экспериментов была фиксирована и составляла 30 мм, а верхняя граница всегда была свободной. Полевые измерения горизонтальной скорости производились при помощи системы PIV "Полис". ССD камера была расположена над центральной частью кюветы, во вращающейся системе координат. Основная часть измерений проводилась в горизонтальных сечениях.

Показано, что увеличение мощности нагрева в выбранном диапазоне параметров всегда приводит к интенсификации циклонического вихря. Структура циклонического вихря изменяется с нагревом и становится более однородной по глубине. Форма вихря коническая при слабом нагреве, в развитом состоянии становится цилиндрической (в центральной части). Рост вязкости уменьшает перенос углового момента радиальным течением, поскольку вязкое трение в толстом пограничном слое эффективно гасит избыточный угловой момент, при движении жидкости к центру. В результате в центральной части нижнего слоя формируется слабый циклонический вихрь, а антициклоническое течение занимает большую часть слоя жидкости. Уменьшение кинематической вязкости приводит к значительному увеличению интенсивности циклонического вихря. Увеличение вращения приводит к росту углового момента слоя, и одновременно к подавлению конвективных движений. Результатом этого является наличие оптимальной скорости вращения, когда формируется наиболее интенсивный циклонический вихрь.

В п.5.2. проведено исследование формирования вторичных течений различного типа в пограничном слое лабораторного аналога ТЦ. Вбли-

зи периферии зоны нагрева формируется система горизонтальных валов, ориентированных по основному потоку. Тепловые плюмы, возникающие между вращающимися в противоположных направлениях горизонтальными валами, переносятся к центру основным потоком и образуют структуры в форме спиралей. В силу того, что значения числа Рейнольдса значительно ниже критического значения для динамической неустойчивости, оба типа наблюдаемых вторичных течений (валы и спиральные полосы) имеют конвективную природу, что соответствует наблюдательным и численным исследованиям дождевых полос в тропических циклонах.

Исследование устойчивости интенсивного циклонического вихря показало, что вихрь становится неустойчивым при низком значении вязкости и быстром вращении модели. Потеря устойчивости тесно связана с трансформацией структуры радиального течения. До умеренных значений вращательного числа Рейнольдса радиальные потоки состоят из нескольких ветвей, переносящих угловой момент к центру, с различных направлений. Когда Re превышает критическое значение, радиальное течение меняет свою структуру и представляет собой один широкий рукав, не достигающий до центра. В результате формируется вихрь, медленно движущийся вокруг центра. Дальнейшее увеличение Re приводит к хаотическому состоянию с несколькими вихрями, которые появляются вблизи периферии области нагрева (Рис. 8).

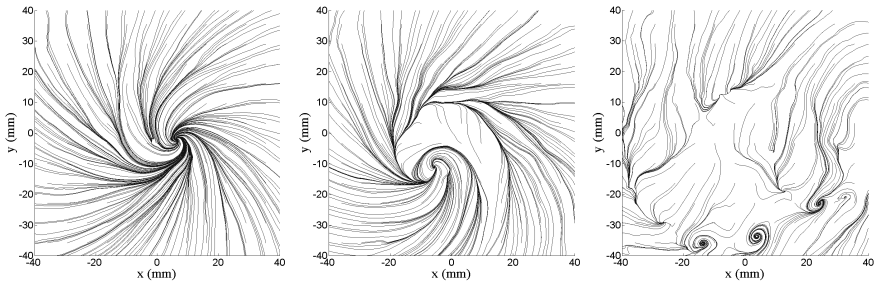


Рис. 8. Изменение структуры вихря с ростом скорости вращения, показаны линии тока в нижней части слоя при $z = 3$.

Отдельное внимание было уделено проблеме быстрой интенсификации ТЦ (**п.5.3.**). Исследование показало, что быстрая интенсификация лабораторного аналога тропического циклона напрямую связана с процессом теплообмена в пограничном слое. Образование вторичных конвективных структур, таких как термики и валы, сильно увеличивает коэффициент теплоотдачи (Рис. 9) и интенсивность конвективной циркуляции.

Скорость радиального течения является решающим аспектом для усиления циклонического вихря, следовательно, быстрое изменение теплопередачи является фактором, который оказывает существенное влияние на динамику лабораторного вихря. Качественное подобие развития вихрей в лабораторном эксперименте и в теории (Emanuel, 2012) дает основание предполагать о существовании характерных свойств конвективных систем, обладающих положительной обратной связью между интенсивностью течения и мощностью тепловых потоков. На основе лабораторного моделирования предложен один из возможных сценариев процесса быстрой интенсификации тропического циклона.

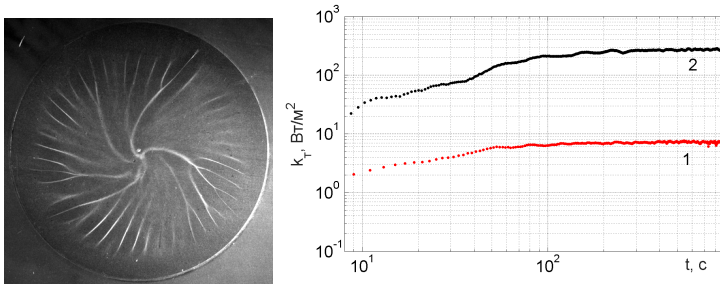


Рис. 9. Конвективные валы над областью нагрева (слева); коэффициенты теплоотдачи (справа), 1 – для ламинарного теплопереноса, 2 – для полного потока тепла, $Gr_f = 8.3 \cdot 10^6$, $Re = 14.7$

Важным этапом моделирования геофизических течений, в частности тропических циклонов, является реализация обратной связи между гидродинамическими и термодинамическими процессами. В п.5.4 представлена программно-аппаратная система для проведения научных экспериментов с обратной связью. Система предоставляет принципиально новый инструмент проведения научных исследований, поскольку перенос сложных вычислений с управляющего компьютера экспериментальной установки на удаленный суперкомпьютер позволяет управлять установкой в режиме реального времени. Апробация нового подхода проводилась на лабораторной модели тропического циклона и позволила реализовать функциональную связь между нагревом и скоростью течения (моделирование выделения “скрытого” тепла) для изучения механизмов образования тропических циклонов.

В п.5.5 и 5.6 обсуждаются полученные результаты и возможность их применения, сформулированы основные результаты. Показано, что ла-

бораторный аналог тропического циклона может рассматриваться в качестве идеализированной модели “сухого” (без фазовых переходов) тропического циклона.

В **шестой главе** проведено исследование спиральности в вынужденных и конвективных потоках. Основные результаты шестой главы опубликованы в работах [25, 26, 28, 29, 27]. В вводной части главы представлен обзор исследований спиральности в различных системах, показывающий современное состояние проблемы и наиболее актуальные вопросы. В **п 6.1** описана методика восстановления некоторых вкладов спиральности (произведений соответствующих компонент скорости и завихренности) методом при помощи методов PIV и StereoPIV, характеристики экспериментальных установок. Результаты измерений спиральности в механически закрученных струях показали, что создание струи с доминирующей спиральностью (одного знака) при помощи вращающихся лопаток является сложной задачей. Подача струи воздуха с выраженной закруткой приводит к генерации положительной спиральности во внутренней части струи и отрицательной спиральности во внешней части. В экспериментах с пропеллерами показано, что пространственная структура поля спиральности в описанной системе определяется расположением и количеством пропеллеров и существенно меняется с высотой. Отметим, что среднее значение спиральности по сечению остается много меньше среднеквадратичного значения. Эволюция поля спиральности по высоте главным образом сводится к распаду регулярных структур, что отражает происходящие каскадные процессы переноса энергии и спиральности.

В **п.6.2 и 6.3** представлены результаты численных исследований генерации спиральности в конвективных потоках от локализованного нагревателя в неподвижном и вращающемся слое с использованием CFD пакетов FlowVision и OpenFOAM. Показано, что спиральность в рассматриваемой системе характеризуется неоднородным пространственным распределением (Рис. 10) и высоким уровнем пульсаций. Анализ источников спиральности с использованием уравнения баланса спиральности показал, что временные вариации вязкого члена и члена плавучести в уравнении спиральности сильно превышают вариации других членов и производной спиральности по времени, при этом конвективный член производит спиральность, а вязкий член, практически без задержки, эффективно поглощает большую ее часть.

В **п.6.4** описаны результаты исследования спирального течения в цилиндрическом канале с дивертором при помощи открытого программного обеспечения OpenFOAM. Показано, что поток за дивертором характеризуется значительной степенью спиральности, сконцентрированной в

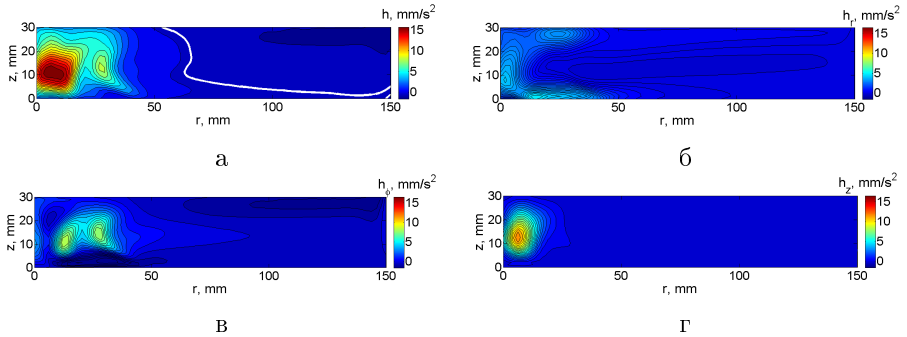


Рис. 10. $Gr_f = 4.6 \cdot 10^6$: а – средняя спиральность, вклады спиральности – радиальный (б), азимутальный (в) и вертикальный (г), в среднем вертикальном сечении, FlowVision.

наибольшем масштабе. По ходу течения структура потока быстро эволюционирует и становится осесимметричной с хорошо сбалансированными азимутальным H_ϕ и аксиальным H_y вкладами спиральности. Осесимметризация потока и быстрое затухание радиальной скорости позволяет использовать только радиальную зависимость азимутальной и аксиальной компонент скорости для оценки спиральности, в следующей форме $H \approx -U_\phi(\partial U_y/\partial r) + U_y(\partial r U_\phi/\partial r)/r$. Важным практическим результатом проведенного исследования, является то, что метод StereoPIV (измерения трех составляющих скорости в плоскости) можно использовать для прямых измерений спиральности в случае вынужденных винтовых потоков в каналах и исследования влияния спиральности на характеристики турбулентных течений. В п.6.5 сформулированы основные результаты и выводы.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. На основе независимых экспериментальных измерений создана база данных для верификации численных кодов, используемых для расчета турбулентной конвекции, и обоснована возможность использования турбулентной конвекции Рэля-Бенара в кубической полости в качестве базовой тестовой задачи. Предложен интегральный метод анализа динамики крупномасштабной циркуляции в кубической полости, позволяющий разделить поворот плоскости крупномасштабной циркуляции и азимутальное движение жидкости. Обоснован механизм переориентаций крупномасштабной циркуляции, не зависящий от среднего вращения жидкости.

2. Исследованы структура и динамика адвективного течения в горизонтальном слое жидкости, в случае ступенчатого распределения температуры на дне. Показано, что наиболее опасной модой вторичных течений являются продольные спиральные валы, а формирование поперечных валов происходит в ограниченной области параметров. На основе проведенных расчетов и экспериментальных измерений построена карта режимов на плоскости $Ra - Re$.

3. Выявлены закономерности формирования вторичных течений в цилиндрическом слое жидкости, с локализованным нагревателем в форме диска. В области больших чисел Грасгофа обнаружена суперпозиция радиальных и бегущих поперечных валов. Предложен физический механизм формирования поперечных валов. Обнаружена степенная зависимость частоты формирования поперечных валов от числа Рэлея, с постоянным показателем степени в широком интервале параметров.

4. Исследовано пространственного распределения локального числа Нуссельта и продемонстрировано сильное влияние вторичных течений на величину теплового потока. Критическим является появление валов, которое приводит к уменьшению толщины пограничного слоя и резкому росту теплового потока по сравнению с теплопоток в ламинарном режиме.

5. Впервые исследовано дифференциальное вращение в тонком цилиндрическом слое жидкости, для случая прямой и обратной меридиональных циркуляций и высоких значений числа Прандтля. Показано, что причиной формирования дифференциального вращения являются меридиональный транспорт и диффузия углового момента. Прямая циркуляция приводит к росту интегрального углового момента (суперротации), а обратная к его уменьшению (субротации). Получены зависимости глобальной суперротации S от основных параметров.

6. Проведено лабораторное моделирование циклонического вихря и анализ данных, полученных при помощи бесконтактных панорамных измерений скорости. Показано, что лабораторный аналог тропического циклона может рассматриваться в качестве идеализированной модели “сухого” (без фазовых переходов) тропического циклона. Получены зависимости локальных и интегральных характеристик циклонического вихря от основных размерных и безразмерных параметров. Показана прямая связь между эволюцией циклонического вихря и теплообменом в пограничном слое. Предложен оригинальный механизм быстрой интенсификации тропических циклонов.

7. Применительно к лабораторной модели тропического циклона апробирована распределенная программно-аппаратная система для экспериментов с обратной связью. Система позволяет переносить ресурсоемкие

вычисления с управляющего компьютера экспериментальной установки на удаленный суперкомпьютер и управлять установкой в режиме реального времени. С помощью нового подхода реализовано моделирование выделения “скрытого” тепла в лабораторном эксперименте.

8. Проведено измерение мгновенных и средних полей отдельных вкладов спиральности методами PIV и StereoPIV в механически закрученных потоках. Обнаружено, что распределение спиральности очень неоднородно, при этом пульсации спиральности значительно превосходят по величине средние значения. Численно исследована генерация спиральности во вращающемся слое жидкости с локализованным нагревателем. Проведен анализ спиральности среднего течения и его пульсационной части. Математическое моделирование винтового течения в цилиндрическом канале с дивертором, показало, что метод StereoPIV может быть использован для прямых измерений спиральности в каналах.

Список публикаций

1. Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов, обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике / МА Большухин, АЮ Васильев, АВ Будников и др. // Вычислительная механика сплошных сред. — 2012. — Т. 5, № 4. — С. 469–480.
2. High Rayleigh number convection in a cubic cell with adiabatic sidewalls / A Vasiliev, A Sukhanovskii, P Frick et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2016. — Vol. 102. — P. 201–212.
3. Transient flows and reorientations of large-scale convection in a cubic cell / A Vasiliev, P Frick, A Kumar et al. // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2019. — Vol. 108. — P. 104319.
4. Баталов В., Сухановский А., Фрик П. Экспериментальное исследование спиральных валов в адвективном потоке, натекающем на горячую горизонтальную поверхность // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2007. — № 4. — С. 39–49.
5. Secondary convective flows in the rectangular tank with non-uniform heating / A Teymurazov, A Sukhanovsky, V Batalov, P Frick // Journal of Physics: Conference Series. — 2011. — Vol. 318, no. 8. — P. 082011.
6. Horizontal rolls in convective flow above a partially heated surface / A Sukhanovsky, V Batalov, A Teymurazov, P Frick // The European Physical Journal B. — 2012. — Vol. 85, no. 1. — P. 1–12.
7. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Horizontal rolls over localized heat source in a cylindrical layer // Physica D: Nonlinear Phenomena. — 2016. — Vol. 316. — P. 23–33.

8. Influence of geometrical parameters on convective flows in non-uniformly heated cylindrical fluid layers / A Evgrafova, A Sukhanovskii, M Kuchinskii, E Popova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Vol. 208. — 2017.
9. Evgrafova A., Sukhanovskii A., Kuchinskii M. Influence of secondary flows on heat transfer from a localized heat source // Journal of Physics: Conference Series. — Vol. 899. — 2017.
10. Evgrafova A., Sukhanovskii A. Specifics of heat flux from localized heater in a cylindrical layer // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2019. — Vol. 135. — P. 761–768.
11. Evgrafova A., Sukhanovskii A. Influence of aspect ratio on heat transfer in non-uniformly heated cylindrical fluid layers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / IOP Publishing. — Vol. 581. — 2019. — P. 012007.
12. Sukhanovskii A., Evgrafova A. Dependence of boundary layer thickness on layer height for extended localised heaters // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2020. — P. 110275.
13. Batalov V., Sukhanovsky A., Frick P. Laboratory study of differential rotation in a convective rotating layer // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. — 2010. — Aug. — Vol. 104. — P. 349–368.
14. Sukhanovsky A. Formation of differential rotation in a cylindrical fluid layer // Fluid Dynamics. — 2011. — Vol. 46, no. 1. — P. 158–168.
15. Евграфова А., Попова Е., Сухановский А. Потoki углового момента во вращающемся слое с локализованным нагревом // Вычислительная механика сплошных сред. — 2016. — Т. 9, № 4. — С. 498–508.
16. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2016.
17. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Non-axisymmetric structure of the boundary layer of intensive cyclonic vortex // Dynamics of Atmospheres and Oceans. — 2017. — Vol. 80. — P. 12–28.
18. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Instability of cyclonic convective vortex // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2017. — jun. — Vol. 208. — P. 012040.
19. Laboratory model of tropical cyclone with controlled forcing / A Sukhanovskii, V Shchapov, A Pavlinov, E Popova // J. Phys.: Conference Series. — Vol. 1128. — 2018. — P. 012133.
20. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Different aspects of laboratory analog of tropical cyclone // IOP conference series: earth and environmental science. — Vol. 231. — 2019. — P. 012052.

21. Sukhanovskii A., Popova E. The importance of horizontal rolls in the rapid intensification of tropical cyclones // *Boundary-Layer Meteorology*. — 2020. — P. 1–18.
22. Применение суперкомпьютерной обработки данных от измерительных систем для проведения экспериментов с обратной связью / ВА Щапов, АВ Евграфова, ГФ Масич и др. // *Программные системы: теория и приложения*. — 2018. — Т. 9, № 1 (36).
23. Supercomputer real-time experimental data processing: technology and applications / Vladislav A Shchapov, Alexander M Pavlinov, Elena N Popova et al. // *Russian Supercomputing Days / Springer*. — 2018. — P. 641–652.
24. Колесниченко И., Сухановский А. Измерение спиральности в вихревых потоках // *Труды Всероссийской конференции молодых ученых (с международным участием) «Неравновесные процессы в сплошных средах»*, г. Пермь. — 2007. — С. 238–241.
25. Евграфова А. В., Левина Г. В., Сухановский А. Н. Исследование распределения завихренности и спиральности в адвективном потоке с вторичными структурами // *Вычислительная механика сплошных сред*. — 2013. — Т. 6, № 4. — С. 451–459.
26. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Non-zero helicity of a cyclonic vortex over localized heat source // *Journal of Physics: Conference Series / Institute of Physics and IOP Publishing Limited*. — Vol. 754. — 2016. — P. 072005–072005.
27. Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E. Helicity of convective flows from localized heat source in a rotating layer // *Archive of Mechanical Engineering*. — 2017. — Vol. 64, no. 2. — P. 177–188.
28. Vasiliev A., Sukhanovskii A., Stepanov R. Numerical simulation of helical flow in a cylindrical channel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / IOP Publishing*. — Vol. 208. — 2017. — P. 012011.
29. Helicity sources in a rotating convection / A Teimurazov, A Sukhanovskii, A Evgrafova, R Stepanov // *J. Phys.: Conf. Ser.* — Vol. 899. — 2017. — P. 022017.

Научное издание

Сухановский Андрей Николаевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук на тему:
Конвективные течения различных масштабов в неподвижных и
вращающихся замкнутых объемах

Подписано в печать . Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Тираж 100 экз. Заказ .