

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Бердникова В.С. на диссертацию Сухановского Андрея Николаевича “Конвективные течения различных масштабов в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

В диссертационной работе Сухановского Андрея Николаевича систематизированы результаты экспериментальных и численных исследований условий возникновения, структуры и физических механизмов гидродинамической неустойчивости термогравитационной конвекции в жидких системах плоской и цилиндрической геометрий при различных способах создания неоднородности полей температуры. Найдены феноменологические закономерности, определяющие 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. Получены локальные и интегральные характеристики турбулентной конвекции в кубической полости, подогреваемой снизу. Изучена эволюция адвективного течения в горизонтальном слое жидкости в прямоугольной полости при ступенчатом распределении температуры на дне и в цилиндрическом слое, с локализованным нагревателем в форме диска. На лабораторном аналоге тропического циклона исследованы перестройки структуры течения в процессе потери устойчивости, определении границы его устойчивости; исследовано влияние вторичных конвективных структур на процесс его быстрой интенсификации. В равномерно вращающемся цилиндрическом слое с неоднородным нагревом нижней границы изучено влияние относительных размеров и физических свойств жидкости на формирование и интегральные характеристики дифференциального вращения.

Актуальность темы работы определяется в первую очередь тем, что в природных и технологических системах термогравитационная конвекция, обусловленная наличием силы тяжести и неоднородным полем температуры, является самой распространенной формой движения жидкостей или газов. Несмотря на большое количество исследований термогравитационной конвекции, говорить о какой либо завершенности невозможно, так как только нарастает количество систем, которые практически требуется тщательно изучить. Эти системы отличаются большим разнообразием геометрий и размеров, различными граничными условиями, различными теплофизическими свойствами текучих сред. Даже классические задачи физической гидродинамики и теплофизики, такие как, например, Рэлей-Бенаровская конвекция невозможно считать окончательно изученными. Во всех реальных системах выполняется последовательность развития течений с ростом управляющих параметров: возникновение и рост скорости течений, устойчивости течений, ламинарно-турбулентные переходы и турбулентные режимы течений. Соответственно кардинально меняются режимы теплообмена в

системах. С развитием экспериментальной техники быстро происходит переход от точечных методов измерений характеристик неизотермических течений к полевым. Это позволяет получать принципиально новые результаты. В данной работе осуществлен именно этот поход. Общей тенденцией является также переход к численному моделированию процессов тепло-массообмена в сложных технических системах в режимах ламинарно-турбулентные переходы и в турбулентных режимах течений. При этом актуальной проблемой является верификация численных кодов по результатам экспериментальных работ, выполненных на высоком методическом и метрологическом уровне. Поэтому обоснованное в данной работе предложение нового бенчмарка безусловно актуально. Актуальны новые экспериментальные результаты, полученные на моделях природных процессов: ячейка Гадлея и тропические циклоны. Эти результаты необходимы для детального понимания роли гидродинамических и теплофизических процессов при формировании крупномасштабных течений в атмосфере, что важно для развития методов предсказания погоды. Таким образом, актуальность работы в целом не вызывает сомнений.

Новизна результатов работы обусловлена в первую очередь тем, что выполнены систематические экспериментальные исследования с использованием, современных панорамного метода измерения скорости (PIV) и метода StereoPIV. Впервые, экспериментально, используя панорамный метод измерения скорости (PIV) и локальных измерений температуры, получены пространственные и временные характеристики турбулентной конвекции в подогреваемой снизу кубической полости при числе Рэлея равно 4.4×10^9 . Обоснована возможность использования этих результатов экспериментальных исследований турбулентной конвекции в качестве тестовой задачи для верификации численных кодов. Предложен и применен интегральный метод анализа динамики крупномасштабной циркуляции в кубической полости, позволивший разделить поворот плоскости крупномасштабной циркуляции и азимутальное движение жидкости.

Впервые изучена эволюция адвективного течения и особенности формирования вторичных течений в горизонтальных слоях жидкости, в полостях прямоугольной и цилиндрической геометрии при ступенчатых распределениях температуры на дне. Описана временная и пространственная эволюция вторичных течений. Изучено влияние относительных размеров на структуру и характеристики основного и вторичных течений в цилиндрическом слое с локализованным нагревателем и влияние вторичных течений на закономерности теплообмена.

Впервые описан процесс формирования дифференциального вращения в случае прямой и обратной меридиональных циркуляций в равномерно вращающемся тонком слое жидкости с относительно высоким значением 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 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 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.

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.

Научная значимость результатов работы заключается в том, что результаты диссертации важны с общетеоретической точки зрения для развития знаний в области гидродинамики и тепло-массообмена в системах с неоднородными пространственно-временными распределениями температуры. Эти результаты могут быть полезны при моделировании природных процессов. Результаты, изложенные в диссертации, способствуют более глубокому пониманию механизмов формирования и динамики крупномасштабной циркуляции в режимах развитой 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.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что изученные в ней процессы играют определяющую роль в природных процессах. Разработанные новые экспериментальные методики исследований гидродинамики найдут широкое применение в институтах РАН. 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. Результаты исследований генерации спиральности при по-

мощи вращающихся или неподвижных лопаток важны 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.

Достоверность результатов и обоснованность научных положений и выводов представленных в диссертации обеспечивается разработкой адекватных 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.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 413 страниц, из них 371 страница текста, включая 204 рисунка и 12 таблиц. Библиография включает 397 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, кратко описаны методологии и методы исследований, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов и информация о структуре работы.

В первой главе представлены результаты экспериментальных и численных исследований структуры турбулентных течений термогравитационной природы в подогреваемой снизу, кубической полости со стороной 250 мм. Представлено исследование динамики крупномасштабной циркуляции (КМЦ). Управляющими параметрами задачи являются числа Прандтля и Рэлея. Для варьирования значений числа Прандтля измерения проводились для различной средней температуры воды. 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. Температурные пульсации регистрировались с помощью нескольких дифференциальных медь-константановых термопар. Термопары располагаются в центральном горизонтальном сечении на высоте 125 мм от дна полости. Длительность экспериментов составляла от 2 до 25 часов. При численном моделировании термогравитационной конвекции 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 за-

кон прилипания для гладкой стенки. 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. Сравнение экспериментальных результатов и результатов расчетов показало, что для описанных режимов, численное моделирование методом LES воспроизводит мелкомасштабную динамику турбулентного потока и поведение КМЦ. При помощи численного 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. Показана возможность использования турбулентной конвекции Рэлея-Бенара в качестве бенчмарка для верификации численных кодов.

Замечания по главе 1.

1. В разделе 1.2.1 не анализируется и не обсуждается вопрос о доверительных интервалах результатов измерений амплитудно-частотных параметров пульсаций температуры и скорости. Диаметр термопар 0.2 мм – возникает вопрос о постоянной времени. О разрешающей способности системы сбора данных ничего не сказано. Поэтому возникает вопрос о точности измерений амплитуды пульсаций температуры и в каком диапазоне частот достоверны представленные в работе спектры. Аналогичные вопросы возникают по спектрам пульсаций скорости. Эти вопросы остаются в силе ко всем результатам, представленным в других главах диссертации.

2. В разделе 1.2.2 при постановке задачи численного моделирования на внутренних поверхностях вертикальных стенок заданы условия адиабатичности. Но в эксперименте вертикальные массивные стенки зажаты между горизонтальными теплообменниками и на них неизбежно возникает продольный градиент температуры. В результате слой жидкости в придонной области подогревается сбоку, что влияет на интенсивность течения. Остается открытым вопрос о сопряженном теплообмене на вертикальных стенках и о степени его влияния на параметры пограничных слоев и на их взаимодействие с ядром слоя жидкости. При сопоставлении результатов расчетов и эксперимента этот факт необходимо учитывать (например, при анализе данных на рис.1.8 б – стр. 42). Этого не сделано. Времена выхода рабочего участка в

установившийся режим не сообщаются, поэтому возникает вопрос, в каком режиме получены данные при длительности эксперимента 2 часа (стр. 31).

Во второй главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований формирования горизонтальных валов в случае естественной конвекции в случае ступенчатого перепада температуры на дне. Ключевыми факторами, влияющими на формирование валов в данной постановке, является наложенный перепад температур и характеристики основного крупномасштабного течения. Описано формирование конвективных валов в прямоугольной кювете, в которой одна половина дна является холодным теплообменником, а вторая половина горячим теплообменником. Рабочий участок 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 33.7К. 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. Проведено 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 в пограничном слое над горячим теплообменником. Спиральные валы формируются на некотором расстоянии от скачка температуры. Характеристики спиральных валов полностью определяются структурой температурного пограничного слоя. 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. Результаты расчетов и экспериментальных измерений обобщены в виде карты режимов на плоскости $Ra - Re$. 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 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 $Ra \approx 2 \times 10^6$.

Проведены исследования формирования вторичных течений в цилиндрическом слое, с локализованным нагревателем в форме диска. Эксперименты проводились в цилиндрической кю-

вете 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. 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 при слабом нагреве (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 “вморожены” в основное течение и движутся вместе с ним к центру модели. Рост числа Грасгофа приводит к неустойчивости поперечных валов (при Gr_f превышающих 3×10^4) 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.

Замечания по главе 2.

1. В разделе 2.2.1 методики контроля температуры на рабочем участке и измерений распределений температуры в слое описаны слишком поверхностно.

2. В разделе 2.2.2 на стр. 90 граничные условия должны быть заданы с учетом наличия свободной верхней поверхности слоя жидкости, но “Условия непроницаемости и отсутствия проскальзывания выполняются на всех границах ($v = 0$)”. Возможное влияние термокапиллярного эффекта (особенно в случае воды) не обсуждается. Если задачи поставлены не в условиях сопряженного теплообмена со слоем газа над свободной поверхностью, то, как трактовать поставленное условие неразрывности теплового потока на границе раздела жидкость-газ? Профили горизонтальной компоненты скорости на рис. 26-28 явно получены для условий жесткой верхней границы. Поэтому рассуждения о влиянии загрязнения свободной поверхности жидкости в эксперименте (стр. 94 - 97), при анализе данных на рис. 26-28 не кор-

ректны, как и утверждение о полном совпадении результатов расчетов и эксперимента. Эти данные полезно сравнить с результатами, представленными на рис. 2.33 (стр. 131).

3. В разделе 2.3.1 так же методики контроля температуры на рабочем участке и измерений распределений температуры в слое описаны поверхностно.

4. Методика получения теневых картин (стр.120-121) описана слишком коротко – как фиксировались эти картины? Физическая суть понятна.

5. В разделе 2.3.3 не указаны граничные условия на свободной поверхности, но судя по данным на рис. 2.33 (стр. 131), поставлены условия отсутствия трения. Здесь кстати четко видно влияние термокапиллярной конвекции на экспериментальных профилях радиальной компоненты скорости (возможные загрязнения не помешали!).

В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментального исследования конвективного теплопереноса в замкнутых полостях при неоднородных граничных условиях. Основное внимание уделено влиянию вторичных течений на процесс теплообмена и структуру пограничного слоя. Исследования проводились на установках описанных во 2-й главе и в 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. Появление валов приводит к сильному росту теплового потока по сравнению с теплопереносом обеспечиваемым ламинарным обтеканием пластины. Этот рост обусловлен эффективным перемешиванием жидкости в пограничном слое. Трансформация структуры валов, в отличие от их появления, не приводит к заметному изменению величины теплопотока.

Замечания к главе 3:

1. Данные, представленные на рис.3.4, при каких граничных условиях получены? Если со свободной верхней границей, то см. Замечание 2 к главе 2.

2. Данные, представленные на рис. 3.7 и 3.9, 3.10-3.13, 3.17, 3.20 - 3.22 при каких числах Прандтля получены? Тем более, что в комментариях ко многим рисункам написано, что результаты существенно зависят от чисел Прандтля. На рис. 3.9 профили температуры построены по показаниям одной термопары или это пространственно-временное среднее. При каких значениях числа Рэлея возникали плюмы и как они наблюдались? Теневая картина на рис. 3.10а как получена?

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных и численных исследований конвективных течений в равномерно вращающемся слое жидкости с числом Прандтля равным примерно 100. Толщина слоя жидкости 30 мм и угловая скорость вращения $\Omega = 0.069$ 1/с были фиксированы. Переменными параметрами были мощности нагрева теплообменников, расположенных или на периферии слоя жидкости или в центре слоя. Отвод тепла осуществлялся со свободной поверхности жидкости в окружающую воздушную среду.

Исследования на физической модели направлены на понимание природы эффекта дифференциального вращения, с целью объяснения особенностей глобальных процессов в атмосфере. Проведены полевые измерения горизонтальной и азимутальной компонент скорости в стационарных режимах при помощи системы PIV "Полис". Даны оценки кинетической энергии меридиональной циркуляции в зависимости от числа Грасгофа для обоих типов циркуляции, определяемым положением источников тепла.

Численное моделирование выполнено с использованием пакета Ansys CFX. Показано, что результаты расчетов и экспериментов качественно хорошо согласуются. Варьирование основных параметров в рамках используемой численной модели не привели к существенным изменениям в структуре радиальных и азимутальных течений. От управляющих параметров зависят только количественные характеристики, изменяются скорость движения, размер занимаемой меридиональной ячейкой области, интенсивности циклонического и антициклонического течений. Детально рассмотрено влияние граничных условий на стенках, и распределения источников тепла на структуру течения и величину суперротации. Показано, что прилипание на твердой границе, различные распределения охлаждения и нагрева, то есть те условия, которые могут являться причиной серьезного качественного расхождения результатов лабораторных моделей геофизических течений от их природных аналогов, в данной конфигурации не являются критическими и не приводят к существенным изменениям в структуре течений.

Замечания к главе 4:

1. При формулировании основных результатов, представленных в главе 4, выпал объект - конкретная физическая модель, на которой проведены "исследования формирования ДВ в случае прямой и обратной циркуляций".
2. В разделе 4.2.1 нет объяснения, как нагревался центральный массивный диск, как подводился электрический ток к нагревателям и как контролировался, какая точность измерений и стабильность? Нет оценок времен выхода на установившиеся режимы теплообмена, поэтому возникает вопрос, в каких режимах выполнены измерения полей скорости? С какой точностью поддерживалась температура в окружающей среде – от этого зависели условия теплоотдачи со свободной поверхности. Температура вблизи свободной поверхности в принципе контролировалась?
3. При анализе зависимости пространственных форм течения во всех режимах нагрева и вращения нет оценок относительной роли сил плавучести и сил Кориолиса. На основании полученных данных о полях скорости эти оценки можно было провести и дать четкое объяснение физических причин появления ДВ.
4. Раздел 4.4 оформлен откровенно неряшливо. Нет конкретности в постановке решаемых задач. Какие уравнения решались, какие граничные условия ставились – конкретно из текста

не понятно задавались равномерные радиальные распределения плотности локальных тепловых потоков или что? Оформление рисунков и подписей к рисункам 4.16 – 4.20 ниже всякой критики.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований конвективных течений в неподвижных и равномерно вращающихся слоях четырех жидкостей с числами Прандтля равными для силоксановых масел 56, 94 и 256 и с числом Прандтля примерно 100 для трансформаторного масла. Угловая скорость варьировалась от $\Omega = 0.04$ рад/с до $\Omega = 0.17$ рад/с. Толщина слоев жидкостей во всех экспериментах 30 мм. Эксперименты проведены при дискретном наборе угловых скоростей вращения и при дискретном наборе мощности нагрева теплообменника, расположенного в центре слоя. Отвод тепла осуществлялся со свободной поверхности жидкости в окружающую воздушную среду. Проведены полевые измерения горизонтальной и азимутальной компонент скорости в стационарных режимах при помощи системы PIV "Полис". Исследования на физической модели, в данном случае рассматриваемой в качестве лабораторного аналога тропического циклона направлены на понимание механизмов его формирования. Основной целью являлось изучение наиболее важных факторов влияющих на характеристики стационарного конвективного циклонического вихря. Для фиксированной геометрии это – заданный тепловой поток, скорость вращения и вязкость. Увеличение теплового потока 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. Обнаружено наличие оптимальной скорости вращения, когда формируется наиболее интенсивный циклонический вихрь. 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. Полученные результаты показали, что структура лабораторного циклонического вихря аналогична типичной структуре тропических циклонов по данным наблюдений и численного моделирования, включая вторичные течения в пограничном слое. Лабораторное моделирование воспроизводит существенные особенности тропического циклона и может служить эффективным инструментом для анализа влияния различных параметров на формирование тропических циклонов. Важным достоинством результатов данной главы является то, что в ней представлены достаточно подробные сведения о нестационарных процессах установления теплообмена после включения нагрева. Частично даны ответы на вопросы, возникшие к главе 4.

В шестой главе представлены результаты исследований спиральности в вынужденных и конвективных потоках. Описана методика восстановления некоторых вкладов спиральности (произведений соответствующих компонент скорости и завихренности) при помощи методов PIV и StereoPIV. Результаты измерений показали, что подача из цилиндрического канала струи воздуха с выраженной закруткой приводит к генерации положительной спиральности во внутренней части струи и отрицательной спиральности во внешней части. В экспериментах со струями, создаваемыми системой пропеллеров в слое трансформаторного масла показано, что пространственная структура поля спиральности определяется расположением и количеством пропеллеров и существенно меняется с высотой. 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. 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 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. 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 наибольшем масштабе. Вниз по течению структура потока быстро эволюционирует и становится осесимметричной с хорошо сбалансированными азимутальным и аксиальным вкладами спиральности. 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 заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы

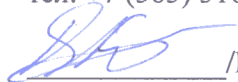
Сделанные выше замечания по главам не исключают общую положительную оценку работы в целом. В целом диссертация Сухановского Андрея Николаевича - завершённый этап научных исследований, выполненных на высоком методическом уровне. Работа оформлена с использованием современных средств, написана на достаточно высоком профессиональном уровне. Список публикаций по теме диссертации состоит из 135 печатных работ, из них 28

статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов докторских диссертаций, 37 статей в сборниках статей и трудах конференций 10 статей в сборниках и журналах не входящих в список ВАК, и 61 публикации в тезисах конференций. В них достаточно полно отражены основные результаты диссертации. Результаты диссертационного исследования докладывались на многочисленных научных конференциях и семинарах

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация Сухановского Андрея Николаевича является оригинальной, завершённой научно-квалификационной работой, в которой наиболее важными являются новые научные результаты исследований влияния равномерного вращения на характеристики течений неизотермических жидкостей в слоях со свободными границами и при ступенчатых распределениях температуры на дне, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области геофизической гидродинамики. Считаю, что диссертация Сухановского Андрея Николаевича по своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и их научно-практической значимости удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации, а сам Сухановский Андрей Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник федерального
государственного бюджетного учреждения
науки «Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН»
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева д.1
тел. +7 (383) 316-53-32, e-mail: berdnikov@itp.ncs.ru



/Бердников Владимир Степанович/

21 июня 2021 г.

Подпись В.С. Бердникова удостоверяю:
Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.



/М.С. Макаров/

