

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
Сухановского Андрея Николаевича  
Конвективные течения различных масштабов в неподвижных  
и вращающихся замкнутых объемах  
по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

В диссертационной работе автором представлены результаты исследований конвективных течений в неподвижных и вращающихся объемах с использованием лабораторных физических моделей и численного моделирования. В экспериментах широко использовались методы бесконтактного измерения полей скорости в объемах движущейся жидкости и современные программы вычислительной гидродинамики. В экспериментах во вращающихся объемах с горизонтально неоднородным нагреванием изучены структура и динамика аналогов крупномасштабной циркуляции атмосферы и тропических циклонов.

**Актуальность** темы диссертационной работы определяется тем, что конвективные течения, вызванные пространственной неоднородностью источников и стоков тепла, встречаются в широкой области научных и прикладных исследований - от задач технической гидродинамики и тепломассопереноса до проблем геофизической гидродинамики, связанных с динамикой атмосферы, океана и климата. Основные объекты исследования в работе - конвекция, конвективные движения, пограничные слои и турбулентность, изучаются уже более века. Здесь получены результаты, составляющие основу современных математических моделей тепломассобмена, динамики жидкостей и газа, динамики атмосферы и океана.

Рост производительности компьютеров в последние десятилетия, широкий круг новых задач в технике и области прогноза погоды и климата стимулировали развитие вычислительной гидродинамики. К настоящему времени широко используются специальные пакеты программ вычислительной гидродинамики, в области динамики атмосферы для исследования и прогноза погоды стали доступны региональные мезомасштабные модели высокого разрешения. Здесь возникают проблемы оценки качества воспроизведения такими моделями отдельных погодных систем типа циклонов (тропических, полярных, субтропических), корректности и точности описания отдельных явлений в блоках параметризаций физических процессов, выбора конкретной модели процесса из нескольких или выбора плохо определенных констант в конкретной модели. И, прежде всего, это касается моделирования и параметризации конвекции и конвективных облаков, конвективного и турбулентного энерго-массообмена в планетарном и приземном пограничных слоях. Здесь могут быть использованы результаты физического моделирования в лабораторных экспериментах, численные данные которых можно было бы сравнить с результатами численного моделирования. Современные техноло-

гии лабораторного физического эксперимента позволяют исследовать довольно тонкие детали динамики конвективных течений изучить и понять основные механизмы и связи различных процессов. Здесь стоит отметить актуальность результатов диссертации, касающихся технологий измерения характеристик турбулентности, и, прежде всего, измерения спиральности, которая в последние два десятилетия является объектом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований турбулентности.

Разнообразие условий и большой диапазон изменчивости физических переменных в реальных гидродинамических системах делает необходимым использование соображений подобия, позволяющие сопоставлять результаты, полученные при измерениях в реальных системах, в лабораторных моделях и в численных моделях. Но и в этом случае для перекрытия диапазонов изменчивости безразмерных параметров задач (а их число может быть более двух) необходимы многочисленные эксперименты. Здесь возникает известная проблема «проклятия размерности», только она касается пространства управляющих безразмерных параметров. Разделение пространства параметров на области с различными решениями (или наблюдаемыми в эксперименте структурами) требует проведения десятков, если не сотен лабораторных или численных экспериментов. Здесь важной задачей остается постановка четких тестовых гидродинамических задач (бенчмарков) для лабораторных экспериментов, данные которых могут быть использованы для верификации численных моделей таких задач.

Сказанное выше показывает актуальность темы диссертации и решаемых в ней задач. Это отражает и обширная библиография, включающая большое число современных публикаций по тематике работы.

### **Содержание работы**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 413 страниц, из них 371 страниц текста, включая 204 рисунка. Библиография включает 397 наименований на 42 страницах. В каждой главе дается обзор литературы по задачам, рассматриваемым в главе.

**Во введении** отмечается актуальность темы диссертационной работы; кратко освещено современное состояние исследований по этой теме; сформулированы решаемые задачи; обсуждаются используемые методы исследования и научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов; представлены положения, выносимые на защиту; описаны апробация работы, публикации по материалам работы и личный вклад автора, приведены данные о структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** изучаются конвекция в кубической полости с изотермическими горизонтальными границами, при подогреве снизу и охлаждению сверху (конвекция Рэлея Бенара). В этом случае при изменениях внешних параметров реализуется ряд крупномасштабных течений, различающихся числом и ориентацией конвективных циркуляций, интенсивностью и энергетическим спектром турбулентности. Представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования структуры и локальных

характеристик турбулентной конвекции. Проведено сравнение результатов экспериментов, проведенных двумя научными группами. Это показало, что данные таких экспериментов могут быть использованы для верификации программных комплексов вычислительной гидродинамики. Показано, что численное моделирование методом крупных вихрей позволяет воспроизводить крупномасштабные конвективные структуры, процессы их перестройки и дает характеристики турбулентности, наблюдаемые в экспериментах.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментального исследования формирования валов с горизонтальной осью в прямоугольной кювете и цилиндрическом сосуде с заданным ступенчатым перепадом температуры на дне. Для прямоугольной геометрии показано, что крупномасштабное течение возникает при достаточно больших значениях числа Рэлея и при этом в пограничном слое над горячим теплообменником всегда появляются продольные и поперечные валы, характеристики которых определяются структурой температурного пограничного слоя. Приведены результаты прямого численного моделирования динамики жидкости в кюветах. На основе проведенных расчетов и экспериментов построена карта режимов на плоскости безразмерных чисел Рэлея и Рейнольдса, на которой выделяются области значений параметров для различных типов конвективных валов.

**В третьей главе** изучаются вторичные конвективные структуры в прямоугольной и цилиндрической кюветах со ступенчатым перепадом температур и их влияние на перенос тепла. Показано, что структура и интенсивность основного течения, вызванного наличием горизонтального градиента температуры, определяется числом Рэлея, а характеристики вторичных течений в пограничном слое определяется локальным числом Рэлея, рассчитанным через толщину пограничного слоя. Приводятся оценки показателя степени в степенной зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея. Для экспериментов в цилиндрической геометрии с локализованным нагревом, показано, что толщина пограничного слоя слабо зависит от полной высоты жидкости и в основном определяется перепадом температур и физическими свойствами жидкости.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования дифференциального вращения в цилиндрическом слое с геофизическими приложениями в двух вариантах: нагреватель в виде кольца у внешней стенки и в виде диска в центральной области. В первом варианте моделируется планетарная циркуляция, а во втором циркуляция в синоптических системах типа тропических циклонов. В численных экспериментах изучалась зависимость характеристик дифференциального вращения от различных параметров, а именно величины нагрева, скорости вращения, кинематической вязкости и аспектного отношения. Показано, что результаты расчетов и лабораторных экспериментов качественно хорошо согласуются.

**В пятой главе** проведено исследование лабораторного аналога тропического циклона (ТЦ). Основной целью являлось изучение факторов влияющих на устойчивость и характеристики циклонического вихря, образующегося при нагреве жидкости в центральной области цилиндрической кюветы.

Показано, что быстрая интенсификация лабораторного аналога ТЦ связана с образованием вторичных конвективных структур, таких как термики и конвективные валы, которые значительно увеличивают потоки тепла от нагревателя. Для имитации этого механизма разработана программно-аппаратная система для проведения экспериментов с обратной связью в режиме реального времени. Система позволяет реализовать функциональную связь между нагревом и средней скоростью течения в лабораторном вихре.

**В шестой главе** проведено исследование спиральности в вынужденных и конвективных потоках в лабораторных экспериментах и в численных экспериментах. Описана методика оценки вкладов спиральности при помощи стереоскопического панорамного метода измерения скорости жидкости. Приведены результаты экспериментов со струей воздуха с закруткой и с пропеллерами. Представлены результаты численных исследований генерации спиральности в конвективных потоках от локализованного нагревателя в неподвижном и вращающемся слое.

**В Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

### **Научная новизна исследований и полученных результатов.**

Впервые, в ходе лабораторных экспериментов при помощи дистанционного панорамного метода измерения скорости и локальных измерений температуры, получены пространственные и временные характеристики турбулентной конвекции Рэлея-Бенара в кубической полости при числах Рэлея до  $1.6 \cdot 10^9$ . Обоснована возможность использования задачи о конвекции в кубической полости в качестве тестовой для верификации программ вычислительной гидродинамики.

Впервые изучена эволюция адвективного течения и особенности формирования вторичных конвективных структур в горизонтальном слое жидкости со ступенчатым распределением температуры на дне в прямоугольной и цилиндрической полостях. 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 заметно усиливает тепловой поток и уменьшает толщину температурного пограничного слоя.

Впервые описаны формирование и характеристики дифференциального вращения для конвекции во вращающейся кюветах с кольцевым нагревателем на периферии (прямая меридиональная циркуляция) и с нагревателем в форме диска в центре (обратная циркуляция).

Впервые структура лабораторного циклонического вихря была исследована при помощи бесконтактных панорамных измерений скорости. Проведено сравнение структуры такого аналога тропического циклона (ТЦ), включая вторичные структуры, с данными натурных наблюдений и математического моделирования. Получены зависимости характеристик циклонического

вихря от основных размерных и безразмерных параметров. Предложен механизм быстрой интенсификации ТЦ.

Впервые проведен анализ распределений завихренности и спиральности в слое с локализованным источником нагрева в неподвижном и вращающемся цилиндрическом слое. Показана возможность использования стереоскопического панорамного метода измерения скорости жидкости метода (StereoPIV) для прямых измерений спиральности в длинных каналах.

**Обоснованность** положений и выводов диссертационной работы обусловлена использованием известных теоретических положений гидродинамики, использованием современных методов измерений и анализа данных в области физического моделирования и эффективных программ вычислительной гидродинамики. **Достоверность** результатов работы – в непротиворечивости их существующим представлениям об объектах исследования (тепловой конвекции и турбулентности, конвективных потоках и пограничных слоях), а также согласием с опубликованными результатами других авторов.

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

Результаты диссертационной работы расширяют известные теоретические представления о тепловой конвекции в неподвижных и вращающихся объемах, они дают понимание основных механизмов формирования и эволюции крупномасштабных конвективных структур, взаимодействия их с пограничным слоем и турбулентностью. Эксперименты с конвекцией во вращающихся кюветах показывают динамические режимы, которые могут реализовываться в крупномасштабной циркуляции атмосферы или на синоптических и мезомасштабах в тропических циклонах. Результаты работы могут быть использованы для разработки экспериментальных эталонных тестов для верификации результатов численного моделирования в области вычислительной гидродинамики и геофизической гидродинамики.

Большое значение для развития техники экспериментальной гидродинамики представляет описанный в диссертации программно-аппаратный комплекс с дистанционным измерением полей скорости течений и характеристик турбулентности в объемах разной геометрии. Этот комплекс позволяет проводить эксперименты с управлением интенсивностью нагревателей, имитируя обратные связи между источниками тепла и течениями, действующие в лабораторных и природных конвективных потоках. Подобные комплексы могут быть использованы для решения задач контроля и управления конвективными потоками в замкнутых полостях, процессами тепломассообмена в различных технологических установках.

Важным практическим результатом является методика использования комплексов для измерения полей трех составляющих скорости в плоскости (StereoPIV) для прямых измерений характеристик турбулентности и в том числе для измерений спиральности.

#### **Публикации по теме диссертации**

Материалы и результаты диссертационной работы 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.

В приведенном списке публикаций соискателя отражены основные результаты и защищаемые положения, сформулированные в диссертации. Личный вклад автора в большинстве публикаций значительный или определяющий.

### Замечания по диссертации

Как всякая большая научная работа, рецензируемая диссертация не лишена недостатков. Здесь мы отметим лишь некоторые.

1. Довольно часто по тексту диссертации даются качественные оценки подобия, согласия или различия полей и других результатов: *«небольшие отличия в деталях (с. 47)»*, *«в очень хорошем количественном согласии (с.59)»*, *«... с хорошей точностью..»*, *«различия ... не приводят к заметным отклонениям в результатах, они хорошо согласуются (с.50)»*, *«... согласие достаточно удовлетворительное (с. 171)»* и т.п. При том, что во многих случаях вполне можно дать конкретные численные оценки мер сходства или различия (корреляция полей, отношение дисперсии разности к дисперсии поля и др.). В тексте есть примеры некоторых таких количественных оценок, но как они получены – неясно. Так на с. 39 (к рис. 1.6. на с. 40) *«... с хорошей точностью изображает максимальные значения скорости»* или *«Структура полей пульсаций в расчете и эксперименте также подобны (основные пульсации локализованы в двух ограниченных областях), причем численные значения совпадают с точностью до нескольких процентов.»*. Это порождает много вопросов. Что значит *«хорошая точность»*? Что значит *«подобны»*? Как-то сомнительно, что поля на Рис.1.6 в и г *«совпадают с точностью до нескольких процентов»*. Как получают эти проценты?

На с. 45 пишется *«Поля скорости представлены на Рис. 1.9 показывают, что структура средних течений в моделях А и Б подобна, хотя есть небольшие отличия в деталях»*, но при этом на рисунке четко видны различия в векторных полях. То же на с. 47 в комментариях к Рис 1.11 *«Оба поля подобны ...»* и *«Количественные отличия между значениями различных характеристик течений в моделях А и Б достигают величины в десять процентов для экспериментов I-III и даже больших значений в случае эксперимента IV. А это критично или нет для данных в тестовой задаче (для выбора бенчмарка)?»*

На с.171 *«Как видим, согласие достаточно удовлетворительное, так как расхождение не превышает 20%, возможным объяснением которого может быть различное отношение диаметров моделей к диаметру нагре-*

вателей.». Что значит «достаточно удовлетворительное», что такое «расхождение» и много ли «20%»?

2) При исследовании конвекции в кубической полости говорится о возможности использования такой задачи в качестве тестовой «для верификации численных кодов» программ вычислительной гидродинамики. Но в диссертации практически не приводятся требования к таким задачам со стороны экспериментальных постановок и численного моделирования. Почему о других задачах, решение которых изучается с помощью физического моделирования в диссертации, не говорится как о возможных «бенчмарках»?

3) Практически не обсуждается насколько могут быть критичны для результатов лабораторных экспериментов предположение об условиях на верхней свободной границе (с.129 «... задание однородного по пространству и постоянного во времени потока тепла на верхней границе.»). В лабораторных условиях при конвекции тепловой (или термокапиллярной) у поверхности может образоваться конвективный пограничный слой со значительной пространственной и временной изменчивостью.

4) Для задач «с геофизическими приложениями» в главе 4 и исследовании лабораторного тропического циклона в главе 5 с точки зрения демонстрации степени подобия объектов лабораторных исследований их природным аналогам следовало бы привести значения безразмерных параметров, используемых в диссертации и обсудить какие природные факторы можно имитировать в лабораторных условиях, а какие невозможно. При этом выбор в диссертации масштабов физических величин и безразмерных комплексов в основном следует традициям исследованиям конвекции. Но в динамике атмосферы (или в геофизической гидродинамике) есть свои масштабы: скорости – скорость длинных волн, длины – радиус Земли или масштабы Россби для однородной жидкости или бароклинный – для стратифицированной, высота однородной атмосферы и др. В изучении сложных систем с конвекцией удачный выбор масштабов и безразмерных комплексов может дать устойчивые полуэмпирические связи, приемлемые для практического применения.

Не всегда выбор масштабов в тексте достаточно обоснован. Так, на с. 171 «В качестве характеристической скорости было выбрано отношение кинематической вязкости к характерному размеру (толщине слоя)». Возможно, это не лучший выбор для среды с нагревающими элементами. Можно было бы взять широко используемый масштаб скорости в конвективном ПС высотой  $h$ , определяемый потоком тепла  $H$  на нижней поверхности

$$w_* = (ghH / \rho c T_0)^{1/3}.$$

В безразмерные комплексы должны войти все геометрические характеристики установок. Для цилиндрических установок в них должны войти и радиус кюветы, и радиус нагревателя. Но в определениях (5.1)- (5.4) на С.231 не входит ни радиус кюветы, ни радиус нагревателя. С т.з. теории подобия бессмысленно использовать два безразмерных параметра, обратных друг

другу. В этом отношении трудно согласиться с утверждением: «Значение безразмерной скорости вращения  $Re$  равно обратной величине числа Экмана  $E$ , но из-за разного физического смысла этих параметров, удобно использовать их оба». Здесь, возможно, лучше число Экмана использовать как характеристику пограничного слоя, а число Рейнольдса взять в обычном его значении  $Re = VR/\nu$ . При этом масштаб скорости  $V$  можно взять из условия сохранения момента частицей сместившейся от периферии  $R$  до радиуса нагревателя  $r$ :  $V = \Omega(R^2 - r^2)/r$ . Этот масштаб скорости (и соответствующее  $Re$ ) можно было бы применить для нормировки скоростей на рис. 5.11 – 5.14. Возможно, что и карта режимов на рис. 5.28 стала бы более выразительной. (Пример удачного выбора и таких карт в статье Р. Хайда в [Интенсивные атмосферные вихри. 1985. с. 364-366]) Нормировка для рис. 5.14 в тексте с. 247 представляется неудачной, и дает очевидные разбросы, которые невозможно как-то разумно интерпретировать.

5) Небесполезно было бы перечислить факторы, действующие в реальной атмосфере на вращающейся сферической Земле и влияющие на формирование и развитие ТЦ. Это сферичность Земли, стратификация атмосферы, структура пассатов и пассатная инверсия, перемещение ТЦ, источники и стоки тепла в толще атмосферы, тепло явное и скрытое, радиационные притоки (и стоки) тепла, адиабатическое охлаждение воздуха при вертикальных движениях и др. Существенно и очевидное различие в радиальном распределении нагревания - диск в лаборатории, а в зрелом реальном ТЦ тепло выделяется скорее в кольцевой области с максимумом на радиусах близких к радиусу максимальных ветров. Поля скорости ветра и притоки (и стоки) тепла приспособляются друг к другу в процессе формирования и развития ТЦ. В лаборатории структура циклона приспособляется к размерам нагревателя и кюветы.

По тексту главы 5 довольно трудно уловить, в чем же состоит «оригинальный механизм быстрой интенсификации тропических циклонов». Автор описывает «механизм» только качественно, без явных формул. Он состоит в усилении потоков явного и скрытого тепла от океана при возникновении в пограничном слое конвективных структур, которые в свою очередь усиливаются с интенсификацией циклона. Это демонстрирует «Рис. 5.34. Коэффициенты теплопередачи, 1 – для ламинарного теплопереноса, 2 – для полного потока тепла». Но в какую формулу входят эти «Коэффициенты теплопередачи» и почему они имеют размерность потока тепла ( $Вт/м^2$ )?

Стоит прокомментировать и вывод о «Наличии прямой связи быстрой интенсификации лабораторного аналога тропического циклона с процессом теплообмена в пограничном слое». Что здесь значит «прямая»? Линейная или положительная? Положительная обратная связь присутствует (без термина «обратная связь») уже в самых простых интегральных моделях [261-263] и она лежит в т.н. балк-формулах для потоков явного и скрытого тепла от океана, которые оказываются пропорциональны локальной скорости вет-



ра. Для учета роли турбулентных и конвективных возмущений оценки пульсаций скорости для них просто прибавляют к скорости ветра или параметризуют их влияние через коэффициенты тепло-массообмена. Подобные связи по существу составляет основу гипотез развития ТЦ WISHE (wind-induced surface heat exchange) [Emanuel, Rotunno, Tellus, 1989] и ASII (air-sea interaction instability) [Rotunno, Emanuel, JAS, 1987]. Однако, нужно заметить, что связь тепловых потоков с максимальной (или средней) скоростью ветра даже в упомянутых простых моделях ТЦ нелинейная и, например в [262], определяется в стратифицированной атмосфере пространственной корреляцией притоков (стоков) с отклонением температуры воздуха от ее равновесного распределения, которая определяет генерацию доступной потенциальной энергии (доступной для перехода в кинетическую энергию циклонической и радиальной циркуляции).

Суть системы лабораторного эксперимента с аналогом ТЦ с обратной связью кратко сформулирована на с.293: *«Для каждого эксперимента устанавливается функциональная связь между средней скоростью течения над нагревателем и температурой (или мощностью) нагревателя. Таким образом, характеристики течения, полученные в результате обработки изображений методом PIV служат входными параметрами для системы нагрева.»* А как можно найти эту функциональную связь между средней скоростью над нагревателем и температурой (или мощностью) нагревателя?»

б) Спиральность по определению должна содержать три слагаемых («вкладов») в интеграле по объему. Отдельно величина «вкладов» вряд ли имеют смысл.

Как практически можно использовать результаты ее измерений в изучении конвективных явлений? Ведь прямо она не входит ни в какие уравнения гидродинамики. В некоторых ранних исследованиях турбулентности спиральность появляется (без введения термина) при теоретическом анализе условий стационарности вторых моментов турбулентных пульсаций и необходимости исключения при этом давления (Гольдштик М.А., Штерн В.Н., 1977). Это уже указывает, как можно использовать данные о спиральности в параметризации турбулентности пограничного слоя в моделях с уравнениями для замыкания вторых моментов. А можно ли использовать полученные оценки спиральности (и как) в исследованиях конвективных движений масштаба валов (или роллов) в пограничном слое и более крупных масштаба кучевых облаков?

### **Оценка работы**

Диссертация Сухановского А.Н. является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-методическом уровне с применением современных методов экспериментальной и вычислительной гидродинамики. В ней представлен большой объем новых результатов лабораторного и численного моделирования конвективных процессов, имеющие важные научное, методическое и практическое значение.

Текст работы хорошо структурирован. Можно отметить четкость постановок задач физического и численного моделирования, качественное представление результатов, их предметное обсуждение и корректная интерпретация. Этому способствует большое число рисунков хорошего качества. Совокупность изложенных в ней результатов можно квалифицировать как значительный вклад в решение ряда крупных актуальных задач в области экспериментальной и вычислительной гидродинамики.

Материалы, результаты и защищаемые положения диссертации опубликованы в профильных изданиях, индексируемых в библиографических базах WoS, SCOPUS, РИНЦ.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

### Заключение

Содержание диссертации Сухановского А.Н. «Конвективные течения различных масштабов в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах» полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», а также удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Автор диссертации Сухановский Андрей Николаевич безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Пермяков Михаил Степанович,  
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
заведующий лабораторией,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук.  
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43.  
Телефон: +7(423)231-1400 .  
[permyakov@poi.dvo.ru](mailto:permyakov@poi.dvo.ru)

Я, Пермяков Михаил Степанович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

18 июня 2021 г.

 /Пермяков М.С./

Подпись Пермякова М.С. заверяю

Ученый секретарь ФГБУН ТОИ ДВО РАН

Кандидат географических наук



 /Савельева Н.И./