

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИФА им. А.М. Обухова РАН

д.ф.-м.н.



С.Н. Куличков

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук
на диссертацию А.Н. Сухановского «Конвективные течения различных масштабов
в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах»,
представленную на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа А.Н. Сухановского посвящена комплексному – экспериментальному и численному – исследованию термической конвекции как в неподвижных, так и вращающихся полостях, заполненных жидкостью. Как известно, конвективные движения различных масштабов играют огромную роль в природе и технике, причем несмотря на фундаментальность и важность этого явления и огромное число работ ему посвященное, многое в физике и механике конвекции остается еще не до конца понятым. Автор предпринял целенаправленные усилия на исследование и прояснение некоторых таких остающихся непонятыми вопросов, о которых речь более детально пойдет ниже. Это вместе со сказанным ранее обуславливает актуальность темы исследования и своевременность и нужность диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 397 наименований. Общий объем диссертации составляет 413 страниц, из них 371 страниц текста, включая 204 рисунка.

Во **введении** обоснована актуальность диссертации и охарактеризована разработанность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна работы, приведена теоретическая и практическая значимость полученных результатов, описаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, охарактеризована степень достоверности результатов, описаны апробация результатов и публикации автора по теме диссертации. Подробно описан личный вклад автора в проведенное исследование.

В **первой** главе диссертации экспериментально и на основе численной LES-модели исследуется конвекция Рэлея–Бенара в кубической полости. Собственные экспериментальные результаты автора подтверждаются экспериментами на независимо созданной экспериментальной установке в Нижнем Новгороде. Заслуживают внимания результаты автора по наблюдаемой переориентации циркуляционных ячеек с одной вертикальной диагональной плоскости куба на другую диагональную плоскость и их теоретическая интерпретация, сводящаяся к тому, что такие диагональные ячейки являются суперпозицией двух главных вертикальных циркуляций вдоль сторон куба и переориентация происходит тогда, когда одна из этих главных циркуляций обращает знак. Такие переориентации происходят в эксперименте крайне редко, раз в несколько часов, и здесь хотелось бы вступить в некоторую полемику с автором, отрицающим возможное воздействия вращения Земли на такого рода переориентации, хотя временной промежуток в несколько часов как раз отвечает обратной величине параметра Кориолиса, т.е. сила Кориолиса за этот промежуток времени может оказать накопленное действие. На основе проведенных в главе исследований автор предлагает использовать конвекцию Рэлея–Бенара в кубической полости как стандартную (референсную, benchmark) модель в исследованиях конвекции Рэлея–Бенара.

Во **второй** главе представлено исследование формирования горизонтальных валов (роллов) при конвекции в случае ступенчатого перепада температур на дне кюветы. Исследовались две конфигурации. Во-первых, прямоугольная кювета с длиной примерно в два раза превосходящей ширину, так что на дне одной из половин (квадратной формы) кюветы температура дна была выше, чем у другой. Во-вторых, цилиндрическая полость, в центре которой на дне был помещен круговой нагреватель. В обоих случаях при достаточно сильном термическом воздействии происходило формирование как продольных (радиальных), так и поперечных валов (роллов), которые детально анализировались в данной главе, привлекая в качестве основного определяющего параметра в первом случае число Рэлея, а во втором случае потоковое число Грасгофа, и делалось это для широкого диапазона изменений числа Прандтля.

В **третьей** главе, продолжающей исследования предыдущей главы, представлено исследование конвективного теплопереноса для обеих установок, а также в цилиндрической кювете большего размера. Показано, что формирование конвективных валов (роллов) приводит к сильному росту теплового потока. Получен интересный результат, заключающийся в том, что для обеих исследованных конфигураций степенная зависимость числа Нуссельта от числа

Рэля имеет универсальный характер и показатель степени (примерно 0.29) не изменяется в ходе существенной трансформации структуры роллов.

В **четвертой** главе представлено исследование дифференциального вращения в тонком слое жидкости во вращающейся цилиндрической полости в двух постановках задачи. Во-первых, когда жидкость греется снизу на периферии. Возникающие вертикальные (меридиональные) циркуляции называются в работе прямыми. Во-вторых, когда жидкость греется снизу в центре. Возникающие вертикальные циркуляции называются в работе обратными. Под их действием во вращающейся установке возникают азимутальные циркуляции, характеризующиеся дифференциальным вращением, которые детально исследуются в работе. Большое внимание в главе уделено проблеме глобальной суперротации (которая, например, так ярко выражена в венерианской атмосфере), т.е. зависимости величины, характеризующей относительное приращение интегрального углового момента по сравнению с угловым моментом твердотельного вращения, совпадающего с общим (планетарным) вращением, от величины нагрева, скорости вращения, вязкости и аспектного отношения.

В **пятой** главе, по тематике близко прилегающей к динамике атмосферы, проведено исследование лабораторного аналога тропического циклона. Данное исследование отличается от предшествующих пионерских работ Г.И. Богатырева с соавторами тем, что используется бесконтактный панорамный метод измерений скорости. Исследовалась зависимость генерации циклонического вихря от интенсивности нагрева, вязкости рабочей жидкости и скорости вращения установки. Показано, что существует оптимальная скорость вращения, когда формируется наиболее интенсивный циклонический вихрь. Было исследовано формирование вторичных течений в пограничном слое вихря. Очень интересным представляется открытый автором феномен неустойчивости вихря, когда при увеличении скорости вращения и уменьшении вязкости вместо вихря в центре появляется смещенный вихрь, медленно прецессирующий вокруг центра. Дальнейшее увеличение скорости вращения и уменьшение вязкости ведут к хаотическому состоянию с несколькими вихрями вблизи периферии области нагрева. Это отдаленно напоминает ситуацию в вихревых камерах, в которых моделируются торнадообразные вихри, когда с увеличением так называемого вращательного отношения ($swirlratio$) моделируемый вихрь испытывает несколько схожие метаморфозы. Важной частью данного исследования является аппаратная реализация положительной обратной связи между нагревом и скоростью течения в вихре. Авторы пишут, что тем самым моделируется выделение «скрытого» тепла при конвекции. На наш взгляд, это скорее лабораторная реализация концепции WISHE (wind-induced surface heat exchange), принадлежащей Керри Эмануэлю (К.

Emanuel), причем речь может идти об обмене как скрытым, так и явным теплом. Последнее, как раз и отвечает парадигме автора «сухого» тропического циклона.

Шестая глава, хотя и очень интересная, и важная сама по себе, стоит несколько особняком в диссертации, поскольку в ней рассматриваются не только термические (конвективные), но и механические способы инициирования спирального движения жидкости. Обсуждаются способы измерения спиральности гидродинамических системах, но не упоминается оригинальный метод определения компонент циркуляции Б.М. Копрова с соавторами, основанный на применении 4-х акустических анемометров, расположенных в вершинах тетраэдра. Детально проанализированы относительные вклады всех составляющих баланса спиральности. Отмечается заметная амплитудная изменчивость величины спиральности при незначительных средних ее значениях, наблюдаемая также и в природных условиях. Важным результатом является также демонстрация возможностей метода StereoPIV для прямых измерений средней и пульсационной спиральности в лабораторных и промышленных условиях. Последнее важно в контексте развития моделей рейнольдсовых напряжений для закрученных потоков. Отметим, что понятие спиральности востребовано в современной гидродинамике, и результаты автора по генерации спиральности вносят полезный вклад в это научное направление.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Научная новизна и теоретическая значимость работы заключаются в том, что проведено систематическое и комплексное исследование термической конвекции, как вертикальной, так и горизонтальной, в неподвижных и вращающихся замкнутых полостях, заполненных жидкостями с разными физическими свойствами. Это исследование использует самые современные экспериментальные методы и технологии, а также современные вычислительные гидродинамические пакеты. Работу отличает ясная и физически обоснованная постановка задач и четкая, физически и механически корректная интерпретация полученных результатов, во многом проливающих новый свет на механизмы генерации/трансформации вторичных движений при конвекции и на их роль в обеспечении общего термического и динамического режимов конвективных потоков.

Практическая значимость полученных результатов связана с возможностью их применения в технике, включая атомную энергетику, для расчета динамических характеристик конвективных течений, в особенности определяющих теплоперенос в системе, а также в геофизике при изучении тропических циклонов и интенсивных полярных (мезо-) циклонов.

Полученные результаты с успехом могут найти применение в практике проектных организаций, в научно-исследовательской деятельности таких учреждений, как Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Институт прикладной физики РАН, в учебной работе при создании новых спецкурсов в таких вузах как МГУ им. М.В.Ломоносова, МГТУ им. Н.Э.Баумана, и других.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации не вызывают сомнений, поскольку они получены с помощью современных апробированных экспериментальных методов, корректных математических моделей и надежных, хорошо зарекомендовавших себя вычислительных гидродинамических пакетов. В частных случаях они согласованы с признанными результатами исследований других авторов. Экспериментальные результаты Главы 1 прекрасно согласуются с независимо проведенными экспериментами в "ОКБМ Африкантов".

Основные **результаты диссертации** отражены в 28 публикациях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов докторских диссертаций, и журналах, индексируемых в системах цитирования WoS и Scopus. Они были доложены на многочисленных всероссийских и международных конференциях и на научных семинарах. Автореферат соответствует содержанию диссертации и позволяет составить достаточно полное представление о ней.

По тексту диссертации имеются следующие **вопросы, замечания и комментарии**.

1) Автор в целом хорошо и ясно передает мысль, в тексте много интересных подробностей эксперимента и измерений, дан хороший экскурс в исследуемые проблемы и автор хорошо осведомлен о деятельности прочих исследователей. Из текста диссертации также видно, что автор ориентируется и в теории, и в эксперименте, и в численных расчетах. Однако, к сожалению, в самом тексте диссертации достаточно много досадных опечаток, а некоторые предложения требуют редактирования, как, например, фраза в Заключение (разделе «Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы»): *«Обоснование турбулентной конвекции в кубической полости в качестве тестовой задачи, является начальная стадия принятия этой конфигурации в качестве сертифицированного бенчмарка»*. Собственно и использование подобного англицизма представляется не вполне уместным.

2) В диссертации рассматривается широкий круг задач, но иногда складывается впечатление, что она состоит из как бы самостоятельных глав (в

диссертации они зачастую называются разделами), в каждой из которых, например, заново дается определение числа Прандтля и при этом для коэффициента температуропроводности используются три разных обозначения: через греческие буквы, χ , κ , и через латинское k . Кроме того, автор местами грешит многословием и в диссертации имеются повторы текста, иногда почти дословные (напр. на стр. 33 и 39).

3) Некоторые сомнения вызывает запись последнего слагаемого в правой части второго из уравнений (1.4). На наш взгляд, в числителе должна фигурировать не полная плотность жидкостей, а ее отклонение от равновесного значения ρ_0 .

4) Поскольку в Главе 1 на стенках кубической полости выполняются условия прилипания, в том числе равенства нулю вертикальной скорости, в разложении последней в ряд Фурье на стр. 48 возможно должны фигурировать два синуса, а не косинус и синус.

5) На стр. 67 используется момент инерции вписанного в куб цилиндра, хотя можно было бы использовать и полный момент инерции куба.

6) В уравнении (2.3) на стр. 89 должен равняться нулю не сам вектор скорости, а его дивергенция. Кроме того, не очень ясны (возможно, искажены) обозначения в уравнениях (2.1) и (2.2). Так, в уравнении (2.1) исчез знак градиента перед квадратной скобкой. Кроме того, на этой и на следующей странице есть досадная неточность. На стр. 89 в число определяющих параметров входит ширина прямоугольной области D . В то же время, на стр. 90 в числе Рэлея (2.4) почему-то фигурирует длина прямоугольника L .

7) При обсуждении приложений к атмосфере автор не всегда точен в терминологии. Так, на стр. 183 «пыльные дьяволы» (dustdevils) приписываются только марсианской атмосфере, хотя они, будучи правда несколько меньших размеров, существуют и на Земле и называются пыльными вихрями. Интенсивные полярные (мезо-) циклоны, являющиеся определенными аналогами тропических циклонов, в современной литературе обычно называются polar lows, а использованный автором на стр. 184 термин cut-off flows относится скорее к перемещающимся в субтропические широты интенсивным циклонам.

8) При численном моделировании генерации ненулевой суммарной спиральности в Главе 6 имело бы смысл проверить, происходит ли при этом генерация ненулевого добавочного углового момента в системе? Надо бы отметить и более широкую применимость используемых здесь подходов, в частности, в задачах "разрушения вихря", эффекта Ранка...

9) При чтении диссертации иногда ускользает – и здесь желательно пояснение автора – почему в одних случаях в качестве основного определяющего параметра используется число Грасгофа, а в других случаях – число Рэлея?

Например, это относится к пункту 3 основных результатов исследования на стр. 368 и 369, где вначале речь идет о числах Грасгофа, а потом о числе Рэлея. В чем здесь нюанс?

10) В исследованиях настоящей диссертационной работы использовались разные численные коды, как коммерческие, так и открытые. Краткое приложение со сводкой их применения исистемным сравнением было бы желательным.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Она выполнена на высоком механико-математическом и физическом уровне, содержит новые результаты и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК России к докторским диссертациям по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы. Её автор, Сухановский Андрей Николаевич, несомненно, заслуживает присуждение ему искомой степени доктора физико-математических наук.

Результаты диссертации были доложены соискателем 03 июня 2021 г. на научном семинаре Отдела динамики атмосферы Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН под председательством академика Г.С. Голицына и получили положительные отзывы специалистов.

Настоящий отзыв на диссертацию А.Н. Сухановского рассмотрен и одобрен 09 июня 2021 г. (Протокол № 1) на заседании семинара Лаборатории геофизической гидродинамики Отдела динамики атмосферы.

Зам. директора ИФА им. А.М. Обухова РАН,
зав. лабораторией геофизической гидродинамики,
Д.ф.-м.н.

О.Г. Чхетиани

119017 Москва, Пыжевский пер. 3
Тел.: +7-495-951-84-80
E-mail: chkheti@ifaran.ru

Главный научный сотрудник
лаборатории геофизической гидродинамики ИФА РАН
Д.ф.-м.н.

М.В. Курганский

119017 Москва, Пыжевский пер. 3
Тел.: +7-495-959-41-03
E-mail: kurgansk@ifaran.ru

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук

09.06.2021