

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Демина Виталия Анатольевича 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.

Существует несколько важных областей в механике жидкости, газа и плазмы, которые в настоящее время интенсивно развиваются по причине крайней актуальности. Среди них одним из наиболее важных направлений является гидродинамика атмосферы и океана. В эту науку сегодня в мире производятся огромные финансовые вложения. В частности, именно в интересах предсказания крупномасштабных атмосферных процессов и прогнозирования изменения климата на нашей планете выполняются наиболее затратные высокопроизводительные вычисления на самых современных суперкомпьютерах. Еще более ресурсоемкими являются прямые космические наблюдения и натурные океанографические исследования. Однако, как бы это удивительно ни было, но природа многих атмосферных и океанских явлений может быть наглядно проиллюстрирована экспериментально на простых лабораторных гидродинамических системах. История показывает, что эти модели внесли колоссальный вклад в развитие науки об атмосферных явлениях и позволили прийти к надежным заключениям о природе многих крупномасштабных гидродинамических процессов задолго до прямых аэрокосмических наблюдений и высокопроизводительного компьютерного моделирования. По мнению рецензента, роль простых лабораторных моделей в настоящее время не только не уменьшилась, а наоборот, существенно выросла. Модельные эксперименты помогают выявлять единую природу на первый взгляд разных физических явлений, отбрасывать все лишнее, оставляя лишь фундаментальные черты, присущие рассматриваемому процессу, позволяют охватить изучаемое явление целиком. Принципиально роль подобных экспериментов возросла по причине появления новых точных и достаточно экономичных методов прямого измерения локальных кинематических и термодинамических характеристик нестационарных течений жидкостей и газов с высокой степенью разрешения. Иными словами, речь идет о практически полном восстановлении как пространственной картины течения, так и записи сколь угодно длинных временных рядов экспериментальных данных. Именно к такого рода работам принадлежит диссертационное исследование А.Н. Сухановского, которое представляет собой разностороннее

применение PIV-технологий, современных методов температурных измерений и новейших подходов по обработке больших массивов данных в задачах тепловой конвекции, а именно, неизотермических турбулентных движений, адвективных течений, закрученных конвективных потоков. В отличие от состояния экспериментальных исследований двадцати-, тридцатилетней давности, когда технические возможности не позволяли многое измерить напрямую, сейчас о лабораторных течениях можно получать максимально полную информацию. Может быть эта точка зрения будет выглядеть сильно преувеличенной, но сегодня при желании гидродинамические эксперименты можно выполнять так, что в результате о течении становится *“известно фактически все”*: трехмерные поля скорости, температуры, давления, линии тока отдельных жидких частиц и все вторичные величины, включая такие экзотические, как спиральность или значение кинетической энергии течения. Диссертационная работа А.Н. Сухановского «Конвективные течения различных масштабов в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах» является наглядной иллюстрацией значительного развития гидродинамики в настоящее время.

Диссертация состоит из введения, содержательной части, заключения и списка литературы. Собственно, изложение защищаемых результатов диссертационного исследования представлено в виде шести глав и включает 204 рисунка.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, описывается степень разработанности выбранной области исследований, сформулированы цель и задачи работы, указана ее научная новизна, перечислены методы диссертационного исследования и представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** изложены результаты экспериментального и теоретического исследования динамики крупномасштабной циркуляции применительно к турбулентной конвекции Рэлея-Бенара в кубической полости. Описана структура и локальные характеристики турбулентной конвекции при подогреве снизу. Внимание было сфокусировано на пространственном распределении энергии пульсаций, определении локальных спектральных характеристик скорости и временной динамике крупномасштабной циркуляции. Показано, что варьирование управляющих параметров влияет на интенсивность течений, однако общая структура крупномасштабной циркуляции сохраняется, демонстрируя неожиданную устойчивость. При помощи термопарных измерений обнаружено, что плоскость крупномасштабной циркуляции может менять ориентацию, переходя с одной диагонали на другую. Оказалось, что крупномасштабная циркуляция сопровождается спонтанно формирующейся глобальной азимутальной завихренностью с отличным от нуля значением вертикальной компоненты интегрального углового момента.

Во **второй главе** продемонстрированы результаты исследования формирования вторичных горизонтальных валов в случае естественной конвекции, генерируемой ступенчатым перепадом температуры на дне. Показана общность конвективных явлений, наблюдаемых в прямоугольной и цилиндрической кюветах. Установлено, что ключевыми факторами, влияющими на формирование валов в данной постановке, являются наложенный перепад температуры и доминирующее крупномасштабное адвективное течение. Построена карта конвективных режимов, с продольными и поперечными валами, а также выделена область параметров, в которой имеет место смешанный режим с наложением продольных и поперечных валов.

Третья глава логически продолжает предыдущую в том смысле, что в ней экспериментально рассматривается цилиндрическая полость со ступенчатым нагревом, но других размеров, что позволило пройти по параметрам, которые дают большую вариацию вторичных течений. Надежно подтвержден эффект сильного увеличения теплопотока через нижнюю границу при появлении валиковых структур.

В **четвертой главе** изучается дифференциальное движение жидкости в цилиндрической полости в условиях локального центрального или периферийного нагрева снизу при наличии вращения. Постановка задачи имеет давнюю историю и восходит к известным экспериментам, выполненным в Пермском государственном университете (*Богатырев Г.П.* Возбуждение циклонического вихря или лабораторная модель тропического циклона // Письма в ЖЭТФ, 1990, Т. 51, № 11, с. 557-559). Замечательно то, что созданная Г.П. Богатыревым установка, оказалась оптимально соразмерной по своим параметрам и достаточно простой гидродинамической системой, которая позволила удивительно точно моделировать в лабораторных условиях процесс формирования тропического циклона. А.Н. Сухановский усовершенствовал эксперимент, проведя тщательные промеры скоростей в данной постановке. Прямые измерения полей скорости в горизонтальных сечениях на разной высоте производились для стационарных режимов при помощи PIV-технологии в лабораторной системе координат с хорошим разрешением, соответствующим современным возможностям. Показано, что в случае прямой циркуляции доминирует циклоническое движение, которое занимает большую часть полости, за исключением небольших зон на периферии вблизи дна. Обратная ячейка характеризуется конкуренцией между циклоническим течением в центральной области и антициклоническим течением на периферии. 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. Механизм формирования дифференциального вращения определяется меридиональным транспортом и диффузией углового момента.

В пятой главе проведено исследование лабораторного аналога тропического циклона. Основной целью являлось изучение наиболее важных факторов, влияющих на характеристики стационарного конвективного циклонического вихря. Принципиальным отличием от ранее выполненных исследований было использование бесконтактного панорамного метода измерений скорости. Показано, что для фиксированной геометрии определяющее значение при формировании циклонического движения во вращающейся полости играют три фактора – это нагрев (заданный тепловой поток или перепад температур), 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, отвечающим за толщину экмановского слоя. Вязкость определяет диффузию углового момента, и наряду с угловой скоростью вращения и толщиной слоя, величину экмановского пограничного слоя. Отдельное внимание уделяется формированию вторичных течений в пограничном слое. Вблизи 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 числа Рейнольдса по величине существенно ниже критического значения для динамической неустойчивости, оба типа наблюдаемых вторичных течений (валы и спиральные полосы) имеют конвективную природу, что соответствует наблюдаемым и численным исследованиями дождевых полос в тропических циклонах.

На основе перечисленных выше выводов А.Н. Сухановский существенно развил исследования в направлении возможности интенсификации тропического циклона. Автором показано, 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 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 дало основание предположить существование 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. Важным этапом моделирования геофизических течений, в частности тропических циклонов, является реализация обратной связи между гидродинамическими и термодинамическими процессами. Создана специализированная 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 экспериментального оборудования 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.

Шестая глава посвящена разностороннему изучению и обсуждению некоторой специфической характеристики, которую пока достаточно редко используют при описании гидродинамических течений. Речь идет о спиральности в вынужденных и конвективных потоках. В каком-то смысле спиральность напоминает общее производство энтропии системы. А именно, спиральность – это весьма трудоемкая характеристика, и в первую очередь ее крайне сложно экспериментально измерять. Также, по причине того, что она отражает свойства трехмерного движения, ее тяжело вычислять, причем делать это имеет смысл на каждом шаге по времени. Плюс не до конца ясно, что она описывает, и за какие процессы она отвечает.

Результаты измерений спиральности в механически закрученных струях показали, что создание струи с доминирующей спиральностью (одного знака) при помощи вращающихся лопаток является нетривиальной задачей. Подача струи воздуха с выраженной закруткой приводит к генерации положительной спиральности во внутренней части струи и отрицательной – 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. Отмечается, 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.

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. По ходу течения структура потока быстро эволюционирует и становится осесимметричной с хорошо сбалансированными азимутальным и аксиальным вкладом 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.

По ходу прочтения диссертации у рецензента сформировались **замечания**, как общего, так и частного характера, которые, тем не менее, имеет смысл перечислить по порядку:

1) В первой главе проводится расчет для изотермических горизонтальных теплообменников и адиабатических вертикальных границ. В то же время в эксперименте теплообменники были изготовлены из меди, а вертикальные стенки – из плексигласа. Трудно согласиться с тем, что плексиглас дает условия близкие к адиабатическим. Особенно, когда речь идет о создании бенчмарка. Представляется, что теплопроводность плексигласа такова, что в системе скорее создаются условия промежуточные по отношению к идеально теплопроводным и теплоизолированным границам. Почему нельзя было решать заведомо сопряженную задачу? Рецензент сам сталкивался с подобной проблемой при исследовании тепловой конвекции в ячейке Хеле-Шоу. Впоследствии эта проблема неоднократно поднималась в работах Г.В. Кузнецова и М.А. Шеремета (Томск). Следует заметить, что особенно существенной разница в расчетах и экспериментальных данных была бы заметна в пограничных слоях вблизи вертикальных стенок. Однако термодары, по-видимому, отстоят довольно далеко от вертикальных границ, и по большей части отражают картину в конвективном ядре течения. На больших временах это может приводить к качественной разнице в наблюдаемых конвективных структурах и интегральных характеристиках течения.

2) Одним из сквозных понятий, которое использует диссертант при обсуждении различных задач практически во всех главах своей работы, является пограничный слой. Однако удивительным для рецензента является тот факт, что это понятие используется автором довольно “туманно”. Часто автором просто не уточняется о гидродинамическом или тепловом пограничном слое идет. В подтверждение этому замечанию рецензент хотел бы дополнительно указать на то, что нигде не производится оценка величины ни температурного, ни гидродинамического пограничного слоя. Отсутствуют ссылки на классические работы по конвективному пограничному слою (Шлихтинг, “Теория пограничного слоя”). В

результате работа приобретает более описательный характер, тогда как хотелось бы видеть рассуждения “по существу”. Более глубокий анализ пограничных слоев, несомненно, добавил бы физичности диссертации.

3) Представляется весьма взвешенной оценка диссертантом экспериментальных работ Богатырева Г.П., которые касаются объяснения природы тропических циклонов на примере простых модельных конвективных систем. Автор диссертации оценивает работы Богатырева Г.П. как “чрезвычайно перспективные”, однако справедливо замечает, что “целый ряд интересных и важных результатов, описанных в этих работах, не получил своего развития из-за ограниченных возможностей используемых измерительных систем”. В связи с этим продолжение исследований А.Н. Сухановским в данном направлении рецензент считает весьма продуктивным именно по причине весьма успешного применения им методов PIV в данной задаче. Считаю, очень важным тот факт, что задача Г.П. Богатырева нашла свое продолжение именно в эксперименте. Иными словами, автор диссертации успешно развил и внедрил новые бесконтактные методы исследования в обсуждаемой задаче об адвективном течении в цилиндрическом слое при наличии ступенчатого нагрева, которая с одной стороны имеет модельный характер, а с другой стороны, как было показано еще Г.П. Богатыревым, имеет чрезвычайно серьезные практические приложения.

4) На стр. 9 в тексте диссертации при перечислении **задач** диссертационного **исследования** выступает тезис (в пункте 1):

«Изучение использования турбулентной конвекции в кубической полости в качестве тестовой задачи для верификации численных кодов»

Представляется, что эта формулировка выглядит как узкая задача частного характера, не “докторского” уровня. По мнению рецензента, этот пункт стоило сформулировать иначе, т.к. в первой главе есть заслуживающие внимания результаты, более весомые, чем «верификация численных кодов», хотя рецензент понимает, что это тоже важный, но все же *сопутствующий* результат.

Автореферат диссертации качественно оформлен и **адекватно отражает содержание** диссертации. В нем представлены все необходимые процессуальные пункты, а именно, показана актуальность диссертационного исследования, четко сформулированы цели и задачи работы, продемонстрирована новизна и указана значимость защищаемых результатов, подтверждена апробация материалов диссертации, очерчено их место в той области знаний, по которой осуществляется защита. В отношении автореферата у рецензента сложилось несколько небольших замечаний.

1) Одно из них касается рис. 2а, на котором явно не хватает координатных осей, чтобы можно было с уверенностью делать какие-то выводы по результатам

эксперимента и расчета, представленным далее на рис. 3. Плюс, приходится только догадываться, о каких фрагментах полости на рис. 3 идет речь.

2) Второе замечание относится к автореферату в целом. А именно, нигде по тексту не расшифровываются безразмерные управляющие комплексы Gr_f , Re , Ra , E , что сильно затрудняет восприятие материала. 3) Также, по мнению оппонента на стр. 3 автореферата при формулировке базовых положений о состоянии дел в области тепловой конвекции не хватает ссылок. Это касается некоторых утверждений:

«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»

«Особенно остро проблема выбора бенчмарков проявляется при верификации кодов, используемых для разработки объектов атомной промышленности»

Эти утверждения могут быть понятны людям в родной лаборатории, которые знают состояние проблемы изнутри. Сторонние специалисты эти предложения могут воспринять по-своему вне привязки к работам сотрудников ИМСС УрО РАН.

Все основные результаты диссертации, вынесенные на защиту, опубликованы в журналах из списка ВАК, большинство из которых индексируются признанными международными базами данных Web of Science и Scopus. Помимо систематического изложения результатов исследований в указанных публикациях, материалы диссертации прошли апробацию на многочисленных Международных и Всероссийских конференциях и были обсуждены узкими специалистами в самых разных аудиториях. Столь широкое представление материалов диссертации подчеркивает **достоверность** защищаемых результатов.

Можно утверждать, что цели, поставленные автором в диссертации, достигнуты, а полученные им научные результаты обладают необходимой новизной и актуальностью. Диссертационная работа **А.Н. Сухановского** “Конвективные течения различных масштабов в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах”, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, удовлетворяет всем квалификационным требованиям ВАК, включая п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена применением современных перспективных **экспериментальных** методов и **численных** подходов к решению поставленных задач. Полученные автором диссертации результаты характеризуются внутренней непротиворечивостью и качественно согласуются с экспериментальными и теоретическими данными

других авторов. В некоторых случаях можно отметить очень хорошее количественное согласие теории и эксперимента.

Точность формулировок при изложении полученных результатов, структурированность работы, ясность и логичность при подаче материала, полнота изложения, все это позволяет говорить о том, что представленная к защите диссертация носит фундаментальный характер, и будет востребована в будущем последующими поколениями исследователей в области гидродинамики.

Можно утверждать, что по совокупности полученных результатов, научной значимости рассмотренных вопросов, широте использованных методов и подходов диссертация **Сухановского Андрея Николаевича** “Конвективные течения различных масштабов в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах” является **крупным научным достижением в гидродинамике, а именно, технологии экспериментальных наблюдений и обработки данных в области тепловой конвекции.** Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, **Сухановский Андрей Николаевич**, заслуживает присуждения ученой степени **доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».**

заведующий кафедрой теоретической физики

Пермского государственного национального

исследовательского университета, доктор

физико-математических наук, доцент

Демин Виталий Анатольевич

17 июня 2021 г.

demin@psu.ru , рабочий тел.: 8 (342) 2396227, 8 (342) 2396208

адрес места работы: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15,

Пермский государственный национальный исследовательский университет, кафедра теоретической физики

Я, Демин Виталий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации **Сухановского Андрея Николаевича** “Конвективные течения различных масштабов в неподвижных и вращающихся замкнутых объемах” и их дальнейшую обработку.



Я, **Демин Виталий Анатольевич**, заверяю
Первый секретарь совета
Е.Ф. Антропов