

О Т З Ы В

официального оппонента д.ф.-м.н. Демина Виталия Анатольевича на диссертацию **Рысина Кирилла Юрьевича** «Экспериментальное исследование вибрационной тепловой конвекции во вращающемся плоском слое», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация **Рысина Кирилла Юрьевича** посвящена экспериментальному исследованию вибрационно-индуцированных движений в жидких средах в поле тяжести при наличии температурных неоднородностей в системе. В качестве рабочей геометрии выступает плоский слой, который уже не одно столетие является классической полостью для подобного рода исследований. Несмотря на большой спектр работ, посвященных гидродинамической устойчивости слоев жидкости с плоскими границами, до сих пор исследователи обнаруживают новые удивительные эффекты, пытаются объяснить их, прослеживают параллели с крупномасштабными природными явлениями, а теоретики находят аналитические решения, которые имеют фундаментальные математические свойства, оказывающиеся общими по отношению к процессам из других разделов физики.

Необходимо отметить, что тепловая конвекция во вращающихся полостях с учетом вибраций является важным направлением, как с точки зрения фундаментальной науки, так и приложений. Особый интерес представляют специфические механизмы возбуждения конвекции, которые могут генерировать конвективные движения даже в условиях невесомости. Несмотря на достаточно большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных термовибрационной конвекции, данная тематика по-прежнему характеризуется большим количеством белых пятен, что определяет актуальность защищаемой диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав с описанием методики эксперимента и результатами исследований, заключения и списка литературы. Ее общий объем – 139 страниц; изложение включает 69 различных иллюстраций и графиков. Список литературы на удивление содержит такое же число наименований, как и число страниц – 139.

Во введении обосновывается **актуальность** рассматриваемой тематики, формулируется **цель** работы и дается краткое описание всего диссертационного исследования. Указывается научная новизна представленных результатов, в том числе перечисляются основные положения, выносимые на защиту, отмечается **практическая значимость** работы, обосновывается **достоверность** полученных в диссертационном исследовании результатов и указан **личный вклад** автора в ходе их получения. Помимо формальных пунктов, касающихся описания параметров диссертации, во введении дается обзор литературы по рассматриваемой тематике. А именно, анализируется современное состояние исследований в РФ и за рубежом по вибрационной гидромеханике. Показано, что данная тематика абсолютно себя не исчерпала и требует дальнейших, весьма серьезных экспериментальных исследований, что, в свою очередь, послужило побудительным мотивом для модификации хорошо известных и апробированных в гидродинамике методов под рас-

смаатриваемую задачу и позволило разработать оригинальные технические приемы для достижения поставленных целей.

Первая глава посвящена описанию экспериментального оборудования и применявшихся методов исследования. Подробно излагается работа отдельных приборов и экспериментальной установки в целом. Проведено тестирование экспериментальной установки на предмет определения порога возбуждения гравитационной конвекции во вращающемся вокруг вертикальной оси плоском слое жидкости. Результаты экспериментов (пороги гравитационной конвекции) обобщены на плоскости безразмерных управляющих параметров. Созданная экспериментальная установка имеет большое число электромеханических элементов, узлов теплофизического характера и современных цифровых устройств обработки информации, которые умело скомпонованы в единое целое. Самые важные составляющие – кюветы, теплообменники, подготовка рабочих жидкостей, автоматизация эксперимента, все это изготавливалось и отлаживалось соискателем самостоятельно.

Дальнейшее усложнение постановки задачи с целью изучения новых явлений побудили диссертанта рассмотреть случай с горизонтальной ориентацией оси вращения, когда поле силы тяжести вращается в системе отсчета, связанной с полостью, вызывая колебания жидкости относительно полости. Показано, что неоднородности плотности приводят к генерации инерционных волн в углах торцевой части полости. В точках отражения инерционных волн от границ кюветы наблюдается возникновение осредненных течений в виде тороидальных вихрей, которые незначительно, но, тем не менее, интенсифицируют теплоперенос в системе.

Во второй главе представлены результаты экспериментального исследования тепловой конвекции во вращающемся плоском слое для промежуточных значений угла наклона оси вращения относительно вертикали. Показано, что в этих условиях по-прежнему конкурируют два конвективных механизма: рэлеевский и термовибрационный, которые полностью описывают состояние системы. Эксперименты подтвердили, что при отклонении оси вращения от вертикали, нормальная к плоскости слоя компонента статического внешнего поля остается постоянной во вращающейся системе отсчета, тогда как тангенциальная составляющая поля оказывает на жидкость сильное модулирующее действие. Именно эта составляющая приводит в действие «вибрационный» механизм тепловой конвекции, вызывая колебания неизотермической жидкости относительно полости.

Третья глава посвящена изучению экспериментальными методами вибрационной тепловой конвекции в горизонтальном плоском слое с границами высокой теплопроводности при разных температурах, совершающем круговые вибрации в горизонтальной плоскости в условиях заданного (независимого) вращения полости вокруг вертикальной оси. При этом инерционное силовое поле имеет горизонтальное направление и в системе отсчета полости вращается вокруг вертикальной оси с заданной частотой осцилляций. Отдельное внимание уделяется случаю отрицательных значений гравитационного числа Рэ-лея, что соответствует подогреву слоя сверху, когда вибрационная конвекция возбуждается в условиях сильного стабилизирующего действия поля силы тяжести. Показано, что при круговых поступательных вибрациях полости вибрационная тепловая конвекция в го-

горизонтальном слое определяется классическим вибрационным параметром (аналогом термовибрационного критерия Зеньковской и Симоненко) и гравитационным числом Рэлея.

Обосновывается вывод, что существует общность влияния вращения на различные по природе конвективные механизмы. Обнаружено, что значения волнового числа в исследованном интервале безразмерных скоростей вращения практически не меняется, а сила Кориолиса не влияет на структуру течения. Показано, что при одновременном воздействии вибраций и вращения инерционные волны, возбуждаемые вблизи торцевых границ полости, генерируют в неизотермической жидкости потоки в виде регулярной системы азимутальных вихрей задолго до возбуждения вибрационной конвекции.

В заключении перечислены основные результаты, сформулированы выводы и продемонстрированы перспективы дальнейших исследований в области вибрационной гидромеханики.

В качестве обобщения, хотелось бы отметить, что диссертация представляет собой выполненное по всем канонам экспериментальное исследование. Более того, степень обобщения, полученных опытным путем данных, позволяет утверждать, что работа К.Ю. Рысина выходит за рамки простой констатации результатов натуральных наблюдений и количественных данных, полученных по результатам непосредственных измерений. В диссертации присутствует то, что, несомненно, отличает в соискателе квалифицированного физика-экспериментатора, а именно, все результаты не просто обобщены на итоговых графиках и картах режимов в терминах безразмерных величин: автор понял и раскрыл физическую суть наблюдавшихся процессов и нашел скрытые связи между различными явлениями. Это указывает на глубокий анализ рассматриваемых явлений и высокую степень обобщения представленных результатов.

Исключительно положительную оценку заслуживает высокая техническая квалификация соискателя как экспериментатора, которую нельзя не отметить при прочтении работы. В ходе выполнения исследований диссертант овладел большим числом новых навыков и компетенций, что и привело к получению столь значимых результатов. В число несомненных достижений соискателя можно включить освоение технологии локальных температурных измерений в тепловой конвекции, а также реализацию различных методик визуализации течений в неинерциальных системах отсчета, осциллирующих и вращающихся с высокой частотой. Следует отметить, что вибрационная установка не может функционировать без механической части, отладка работы которой тоже требует определенной квалификации, но уже из совсем другой области. Работа коллекторного двигателя с частотой и амплитудой которые не “плавают”, а дают действительно осевое вращение системы, подключение теплообменников и визуализирующих устройств, подгонка механизмов различного назначения друг к другу так, чтобы все работало как надо, все это требует мастерства от исполнителя и разносторонних навыков. Иными словами, хотелось бы подчеркнуть, что для выполнения поставленных задач были необходимы знания в области электроники и теплофизики, опыт инженерно-конструкторской деятельности, а также квалификация для создания системы автоматизированной обработки информации: все эти навыки, очевидно, присутствуют у диссертанта.

Несмотря на общее положительное мнение, сложившееся в отношении диссертации, у оппонента при ее прочтении возникли следующие вопросы и замечания разной степени значимости. Чтобы не вносить чехарду в обсуждение, предлагается перечислить их по порядку в соответствии с изложением материала:

1. В самом начале диссертации во введении на стр. 5 автор при описании основных вех развития гидродинамики упоминает основателей Пермской гидродинамической школы Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Г.Ф. Шайдурова, а затем отмечает, несомненно, большой вклад Д.В. Любимова в ее дальнейшее руководство и развитие. Однако, насколько я понимаю историю вопроса, сами Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкий считали, что инициатором интенсивных исследований в области гидродинамики у нас в Перми был ученый с большой буквы, неординарная и фантастически эрудированная личность, проф. Г.А. Остроумов, который и заложил колоссальный заряд энергии в данное направление исследований в Перми и возбудил интерес в людях, продолживших с энтузиазмом работать в этой области.

2. Вызывает некие противоречивые чувства фраза на стр. 29, которая судя по стилистике, имеет некий обобщающий характер в отношении всей диссертации

«Исследуется тепловая конвекция в плоском слое жидкости с изотермическими границами разной температуры».

Однако, впоследствии для определения структуры течения в экспериментах используется термохромная пленка, которая очевидно реагирует на неоднородности температуры вдоль твердой поверхности рабочей области. Иными словами, о какой изотермичности границы может идти речь, если термохромная пленка регистрирует сложное распределение температуры на ней? Понятно, что упомянутое вводное предложение на стр. 29 сформулировано не совсем аккуратно. Наверное, более правильно было бы говорить о границах высокой теплопроводности.

3. Черно-белые фотографии, иллюстрирующие картину течений, объективно тяжело воспринимаются, по причине явного доминирования черноты. Особенно угнетает восприятие фотографий, на которых отсутствует течение (см., например, рис. 1.11, а). Здесь просто имеет место черный однородный фон так, как если бы это был знаменитый квадрат Малевича. В то время как конвективные структуры отображаются светлыми пятнами. Можно было бы попробовать инвертировать цвета или попытаться изменить их. Сегодня современная обработка фотографий вроде бы позволяет это сделать.

4. На стр. 43 утверждается что

«В допороговой области **теплоперенос** отсутствует, жидкость находится в состоянии покоя».

Здесь, наверное, стоит поправить диссертанта. А именно, должно быть

«В допороговой области **конвективный теплоперенос** отсутствует, жидкость находится в состоянии покоя».

5. Вызывает вопрос область III на рис. 1.14. Создается ощущение, что в этой области имеются две подобласти с разными режимами конвекции. Трудно допустить, что гексагональные ячейки, изображенные на рис. 1.15 д), можно отнести к тому же ти-

пу движений, что и на рис. 1.15 з). На рис. 1.15 з) вообще-то просматриваются шляпки и ножки плюмов, плоскость движения которых разворачивается из вертикального положения в горизонтальное. Именно поэтому имеются некоторые изломы на зависимостях Θ от f и ΔT от f , которые автор игнорирует.

6. Возникает небольшое замечание по терминологии, используемой в третьей главе.

По тексту утверждается, что

«Вибрационная тепловая конвекция, возбуждаемая вращающимся инерционным силовым полем, проявляется в виде пространственных структур (рис. 3.9 б, в, г), размер которых определяется толщиной слоя».

Это предложение с упоминанием «пространственных структур» несколько запутывает ситуацию, т.к. представляется, что эта наблюдаемая картина имеет не пространственный (трехмерный характер), а выглядит как система двумерных валов (по крайней мере, в главном приближении).

Перечисленные замечания абсолютно не умаляют положительного мнения о диссертации К.Ю. Рысина и тех результатов, которые, по мнению оппонента, заслуживают весьма высокой оценки. Следует отметить высокую квалификацию автора в плане владения высокотехнологичным оборудованием при проведении удивительно точных и заслуживающих доверия измерений, насколько это вообще возможно в вибрационной гидромеханике. С одной стороны, немалую роль в формировании диссертанта как исследователя сыграла его принадлежность к научной группе проф. В.Г. Козлова из Пермского педагогического университета. Тем не менее, хотелось бы выделить и определенные индивидуальные положительные качества, или, если можно так выразиться, фирменный стиль соискателя, работу которого отличает не только высокое мастерство владения техникой эксперимента, но и хороший язык, что свидетельствует о научной зрелости соискателя. Можно смело утверждать, что в РФ лишь в нескольких крупных научных центрах оборудование и уровень научного руководства позволяют выполнять эксперименты в области вибрационной гидромеханики на столь высоком научном уровне. Результаты, полученные К.Ю. Рысиным, показывают наличие всех составляющих, необходимых для получения результатов на мировом уровне: широкий кругозор и понимание перспектив исследования, наличие высококлассного экспериментального оборудования, уверенное владение экспериментальными методиками в области гидромеханики.

В первую очередь диссертационное исследование К.Ю. Рысина обладает **практической и общефизической** значимостью по причине того, что в ней на опыте наглядно продемонстрировано сложное действие инерционных сил на гидродинамические течения в замкнутых полостях, когда имеет место комбинация нагрева, вращения, вибраций и наклона полости.

Далеко не полный список организаций, в которых материалы диссертации могут оказаться востребованными, включает Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск), Институт механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь), Пермский государственный национальный исследовательский университет, Национальный исследова-

тельский Томский государственный университет, Московский государственный университет, Нижегородский государственный университет, Институт проблем механики (г. Москва) и т.д.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 14 печатных работах. В том числе 4 статьи изданы в ведущих рецензируемых зарубежных изданиях и отечественных журналах из списка ВАК. Еще 10 работ опубликовано в профильных сборниках научных статей и трудах конференций. В указанных публикациях достаточно полно отражены основные результаты диссертации. Помимо всего прочего результаты исследований докладывались на профильных секциях многочисленных международных и всероссийских конференций.

Автореферат качественно оформлен и полностью соответствует содержанию диссертации. Однако по автореферату у рецензента тоже сформировалось три небольших замечания:

1. Весьма размыто прописана в автореферате цель диссертационного исследования. Описание цели ограничивается одной фразой: «Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование вибрационной тепловой конвекции во вращающемся плоском слое». Иными словами получается, что целью диссертационного исследования является «исследование».
2. Одно и то же обозначение Rv используется для, в общем-то разных, безразмерных комплексов. Между ними, конечно, имеется определенная общность, но формально безразмерные комплексы разные, поэтому во избежание путаницы можно было бы их обозначать по-разному.
3. Инерционные волны играют большую роль при формировании картины течений в рассматриваемых задачах, поэтому можно было бы в начале автореферата уделить некоторое место описанию физической сути этого явления.

Тем не менее, можно утверждать, что все **цели**, поставленные автором в рамках диссертационного исследования, **достигнуты**, а полученные экспериментальные результаты являются оригинальными и обладают необходимой **новизной**. Диссертационная работа К.Ю. Рысина «**Экспериментальное исследование вибрационной тепловой конвекции во вращающемся плоском слое**», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, удовлетворяет 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 надежных и хорошо зарекомендовавших себя экспериментальных методов, корректностью постановки экспериментов, использованием современного высокоточного оборудования и скрупулезным анализом систематических и случайных погрешностей. Полученные автором диссертации результаты характеризуются внутренней непротиворечивостью и качественно согласуются с экспериментальными и теоретическими данными других авторов.

Полагаю, что по совокупности полученных результатов и степени их обобщения диссертация **Рысина Кирилла Юрьевича** «Экспериментальное исследование вибраци-

онной тепловой конвекции во вращающемся плоском слое» является законченным **научным исследованием в области вибрационной гидромеханики**. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, **Рысин Кирилл Юрьевич**, заслуживает присуждения ученой степени **кандидата 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
(специальность 01.02.05 – Механика жидкости газа и плазмы), доцент



Демин Виталий Анатольевич

16 ноября 2020 г.

demin@psu.ru, рабочий тел.: 8 (342) 2396227, 8 (342) 2396208
адрес места работы: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»,
8 (342) 237-16-11, info@psu.ru; http://www.psu.ru

Подпись Демина В.А. удостоверяю:

Я, Демин Виталий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации **Рысина Кирилла Юрьевича** «Экспериментальное исследование вибрационной тепловой конвекции во вращающемся плоском слое», и их дальнейшую обработку.



Подпись *В.А. Демина* заверяю
именный секретарь совета
Е.Я. Антонова