

На правах рукописи



Рысин Кирилл Юрьевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВИБРАЦИОННОЙ ТЕПЛОЙ КОНВЕКЦИИ
ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПЛОСКОМ СЛОЕ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2020

Работа выполнена на кафедре физики и технологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Пермский государственный гуманитарно-педагогического университет (ФГБОУ ВО ПГПУ), г. Пермь.

Научный руководитель: **Козлов Виктор Геннадьевич**, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Бердников Владимир Степанович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск.
Демин Виталий Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь.

Ведущая организация: Институт вычислительного моделирования – обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр "Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук", г. Красноярск.

Защита состоится **03 декабря 2020 г.** в 10:30 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » октября 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент



/ А.Л. Зуев

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Тепловая конвекция во вращающихся полостях является важным в фундаментальном и прикладных аспектах научным направлением. Особый интерес представляют механизмы возбуждения конвекции, отличные от гравитационного, например, вибрационный, который может выступать генератором конвективного движения в условиях невесомости. Актуальность использования вибраций во вращающихся системах определяется простотой их использования для регулирования интенсивности конвекции, возбуждения или подавления, для управления конвективными потоками как в земных условиях, так и в условиях космических полетов. С точки зрения фундаментальной науки вибрационная тепловая конвекция во вращающихся системах играет важную роль в различных геофизических процессах, протекающих в атмосферах и ядрах планет. Так, гравитационное взаимодействие планеты с массивным спутником приводит к осцилляциям силового поля во вращающейся системе, в частности, к приливным колебаниям атмосферы, океанов и жидкого ядра планеты. Осциллирующее силовое поле может быть источником вибрационной тепловой конвекции, при этом в неизотермической жидкости генерируется осредненная по периоду подъемная сила. Экспериментальные исследования в данной области относятся к случаю, когда силовое поле осциллирует во вращающейся системе с частотой вращения. Остается слабо изученной задача о вибрационной конвекции, вызываемой быстровращающимся силовым полем при заданной (независимо) скорости вращения полости. Результаты экспериментов в такой постановке важны для понимания действия вибрационного механизма конвекции во вращающейся системе, а также влияния вибраций на режимы конвективных течений. Актуальным является экспериментальное изучение вибрационной тепловой конвекции (осредненных эффектов), возбуждаемой под действием осциллирующих силовых полей во вращающихся системах.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование вибрационной тепловой конвекции во вращающемся плоском слое.

Задачи исследования:

- Гравитационная и термовибрационная конвекция в плоском слое жидкости, вращающемся вокруг нормальной плоскости слоя оси в зависимости от наклона оси вращения в поле силы тяжести;
- Теплоперенос в надкритической области, обусловленной действием термовибрационного механизма, а также в допороговой области в условиях распространения инерционных волн;
- Структура конвективных течений в докритической и надкритической областях;
- Вибрационная тепловая конвекция, возбуждаемая поляризованными по кругу вибрациями во вращающемся вокруг вертикальной оси плоском слое жидкости.

Научная новизна результатов. Впервые с позиции вибрационной конвекции экспериментально изучены конвективные течения и теплоперенос в плоском слое, вращающемся вокруг перпендикулярной плоскости слоя оси в зависимости от угла наклона оси вращения. Обнаружено что во вращающемся наклонном слое даже при подогреве сверху возможна тепловая конвекция. Показано, что тепловая конвекция

генерируется в результате осредненных эффектов, вызываемых колебаниями неизотермической жидкости относительно полости, т.е. вибрационной тепловой конвекцией. Обнаружена и исследована область существования инерционных волн до порога вибрационной тепловой конвекции.

Теоретическая и практическая значимость работы. Важность выполненного экспериментального исследования определяется широким распространением вращающихся гидродинамических систем, испытывающих действие осциллирующих силовых полей в природе (звезды и жидкие ядра планет) и технологических процессах. Большой интерес с фундаментальной и прикладной точки зрения представляется выяснение влияния внешнего осциллирующего силового поля на развитие вибрационной тепловой конвекции во вращающемся слое. Результаты эксперимента способствуют развитию теоретических основ вибрационной тепловой конвекции. На основе результатов исследования возможно разработка новых способов управления тепломассопереносом в невесомости и в земных условиях.

Методы и методология диссертационного исследования. При выполнении диссертационной работы используются хорошо апробированные методы экспериментального исследования тепловой конвекции, современное экспериментальное оборудование и технологии контроля и последующей обработки экспериментальных данных. Температурные измерения осуществлялись при помощи термопар, располагающихся в датчике теплового потока, и датчиков температур, прикрепленных к границам слоя. Тепловизионные измерения поля температур поверхности границы слоя проводились при помощи тепловизора. В качестве визуализатора течений в быстровращающихся полостях применяется термохромная пленка, её применение обосновано быстрым откликом на изменение температурного поля и высокой разрешающей способностью. При оценке качества задаваемых круговых вибраций используется скоростная камера, регистрирующая положение маркера (располагающегося на столике) относительно лабораторной системы отсчета при перемещении столика по круговой траектории. Определение эффективной толщины тонких слоев осуществлялось путем расчета с использованием экспериментально полученного порогового значения разности температур границ слоя при подогреве слоя воды снизу, и дальнейшей нормировки порогового значения гравитационного числа Рэлея на значение $Ra = 1708$.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментального исследования вибрационной тепловой конвекции во вращающемся вокруг горизонтальной оси плоском слое жидкости:
 - изучение теплопереноса и структуры течений, обусловленных возникновением инерционных волн в докритической области;
 - построение схемы распространения инерционных волн в слое;
- результаты экспериментального исследования вибрационной тепловой конвекции в вращающемся наклонном плоском слое:
 - изучение зависимости теплопереноса и структуры течений от угла наклона слоя, скорости вращения и разности температур границ слоя;
 - исследование границ устойчивости вибрационной и гравитационной конвекций в зависимости от безразмерной скорости вращения;

• результаты экспериментального исследования вибрационной тепловой конвекции в плоском слое при круговых поступательных вибрациях в горизонтальной плоскости и вращении:

- изучение теплопереноса и структуры течений в зависимости от частоты вибраций, как при заданной скорости вращения, так и в её отсутствие;
- изучение границы устойчивости вибрационной конвекции при подогреве слоя сверху, а также оказываемого на неё стабилизирующего действия вращения;
- исследование зависимости безразмерной длины инерционной волны тороидальных структур в допороговой области вибрационной конвекции в зависимости от безразмерной частоты осцилляций полости.

Достоверность результатов. Использование апробированных и современных методов измерения и обработки данных, детальное и систематическое изучение, согласие полученных результатов с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов позволяет обоснованно утверждать о надежности результатов.

Апробация результатов. Результаты исследования были представлены на следующих конференциях: Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2013 г., 2015 г., 2017 г., 2019 г.); XI и XII Всероссийские съезды по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015 г.; Уфа, 2019 г.); XXI и XXII Международные конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» (Москва, 2014 г., 2016 г.); Пермские гидродинамические чтения (Пермь, 2013 г., 2016 г., 2018 г.); Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях» (Санкт-Петербург, 2013 г.); Международная научная школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 2014 г., 2016 г.); 65 и 66 международная конференция «International Astronautical Congress (Канада, 2014 г.; Израиль, 2015 г.); Международная летняя школа «Advanced Problems in Mechanics» (Санкт-Петербург, 2014 г.); Всероссийская конференция молодых ученых-механиков «YSM-2018» (Сочи, 2018 г.); Актуальные задачи механики сплошных сред (Пермь, ПГГПУ, 2014 г.); 10th European Fluid Mechanics Conference EFMC10. (Дания, 2014 г.); 25th European Low Gravity Research Association. Biennial Symposium and General Assembly (Франция, 2017 г.); Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Барнаул, 2017 г.). Результаты исследования также были представлены на Пермском гидродинамическом семинаре (Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, 2015 г., 2019 г. и 2020 г.). Результаты диссертационного исследования получены в рамках проектов РФФИ (грант 13-01-00675а), РНФ (гранты 14-11-00476, 18-71-10053), в рамках заданий Минобрнауки РФ (2014/372 проект 2176) и Пермского края (проект С-26/625).

Публикации. Результаты диссертационного исследования изложены и опубликованы в 14 работах, включая 4 статьи [1-4] в журналах из списка ВАК (две индексированы в WOS, а две в SCOPUS), 3 статьи в сборниках научных статей [5-7] и 7 статей в сборниках трудов конференций [8-14] (индексированы в РИНЦ), а также в 15 тезисах докладов.

Личный вклад

Диссертантом лично выполнены экспериментальные исследования и обработка результатов. Конструирование экспериментальной установки, обсуждение и анализ результатов осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами.

Содержание и структура работы

Основной текст состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 139 страниц текста, включающих в себя 69 рисунка и список литературы из 139 источников.

Во введении приведен обзор литературы по теме диссертации, обозначены цель и задачи исследования, её новизна, научная значимость, а также представлено краткое содержание диссертации.

Первая глава включает в себя новые результаты экспериментального исследования осредненной конвекции, возбуждаемой внешним силовым полем, вращающимся в системе отсчета полости.

В п.1.1 приведено описание экспериментальной установки и методики исследования. Рабочий слой образован двумя плоскими теплообменниками 1 и 2 (рис. 1), между которыми устанавливается прокладка 3 с боковой нетеплопроводной круговой границей. Параметры прокладки задают толщину слоя h и диаметр боковой границы $R = 7.0 \pm 0.1$ см. Поддержание постоянных значений температуры

границ рабочего слоя осуществляется за счет циркуляции воды заданной температуры в теплообменниках, поступающей от мощных струйных термостатов. При помощи системы гибких шлангов (штриховые линии, рис. 1), соединяющих теплообменники 1, 2 с

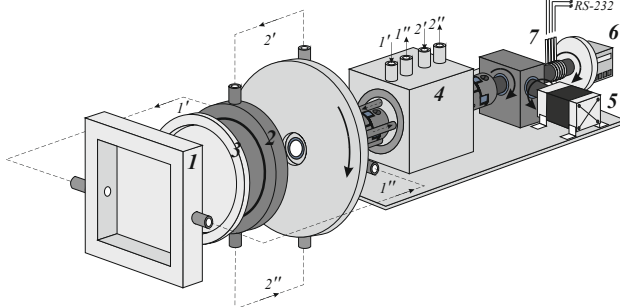


Рис.1. Схема экспериментальной установки

гидравлическим распределителем 4, а также при помощи сальников внутри распределителя осуществляется разграничение потоков жидкости разной температуры (подвод $1', 2'$; отвод $1'', 2''$) и циркуляция термостатированной жидкости во вращающейся системе. Вращение задается шаговым двигателем 5 с точностью 0.01 об/с в интервале $f_{\text{tot}} = 0.1 - 3.0$ об/с вокруг нормальной плоскости слоя оси. Теплообменник 1 сделан прозрачным с целью изучения структуры потоков в слое. Другой теплообменник изготовлен из алюминия и оборудован интегральным датчиком теплового потока, который измеряет перепад температуры ΔT на тепловом сопротивлении. Измерение температуры границ слоя T_1 и T_2 проводится с помощью термометров сопротивления, которые изготовлены из медной проволоки диаметром $d = 0.01$ мм и располагаются диаметрально на границах слоя при помощи самоклеящейся прозрачной пленки толщиной 0.05 мм. Сигналы с датчиков

температуры обрабатываются измерительным модулем «Термодат 13ИК» 6 (вращается вместе с кюветой), после чего передаются через электрический коллектор 7 на компьютер. Погрешность температурных измерений не превышает 0.1°C . В качестве рабочих жидкостей используется вода и 95% раствор спирта. Уделяется внимание точному вычислению эффективной толщины рабочего слоя h в каждом эксперименте.

В п.1.2 проведено испытание экспериментальной установки при исследовании порога возбуждения гравитационной конвекции во вращающемся вокруг вертикальной оси плоском слое жидкости (рис. 2а). Результаты экспериментов (пороги гравитационной конвекции) обобщены на плоскости безразмерных управляющих параметров ω_{rot} , Ra , где $\omega_{\text{rot}} = \Omega_{\text{rot}} h^2 / \nu$ – безразмерная скорость вращения (аналог числа Тейлора), а $Ra = g\beta\Theta h^3 / \nu\chi$ – гравитационное число Рэлея. Здесь g – ускорение свободного падения,

$\Omega_{\text{rot}} = 2\pi f_{\text{rot}}$ – угловая скорость вращения полости, Θ , h и R – характерные разность температур, размер полости (например, толщина слоя) и расстояние до оси вращения, β , χ и ν – коэффициенты объемного расширения, температуропроводности и кинематической вязкости жидкости.

Визуализация течений осуществляется при помощи добавления в жидкость частиц алюминиевой пудры (рис. 3). На плоскости безразмерных параметров ω_{rot} , k волновые числа для ячеистых конвективных структур рассчитанные по формуле $k = 4\pi h / \sqrt{3} \lambda$ согласуются с теоретически предсказанными, где λ – расстояние между центрами соседних ячеек.

Согласие результатов проведенных экспериментов с теорией позволяет сделать вывод о высокой точности методик температурных измерений и визуализации течений.

В п.1.3 экспериментально исследуется осредненная конвекция, развивающаяся во вращающемся вокруг горизонтальной оси плоском слое (рис. 2б). Изучается теплоперенос и структура течений. Температура на границах слоя задается и поддерживаются постоянной. При сравнительно высокой скорости вращения жидкость находится в

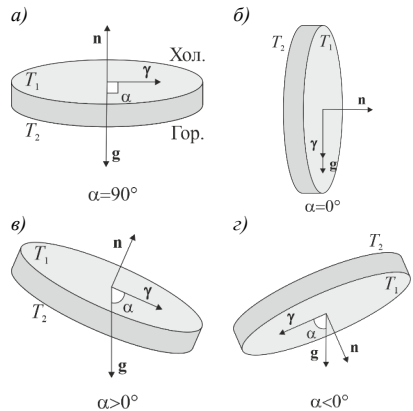


Рис.2. Постановка задачи гл.1 – а, б; гл.2 – в, г



$$Ra = 7.8 \cdot 10^4, \omega_{\text{rot}} = 545, \\ k = 13.2 \pm 0.5$$

Рис.3. Конвективные структуры рэлевской конвекции

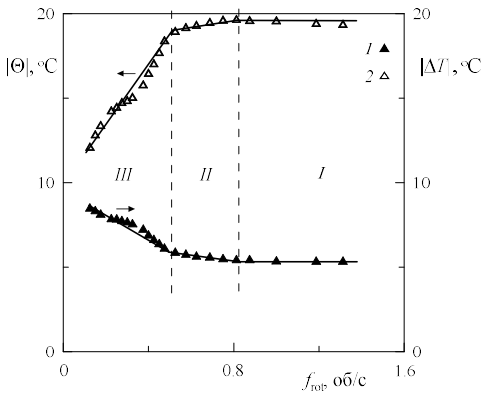
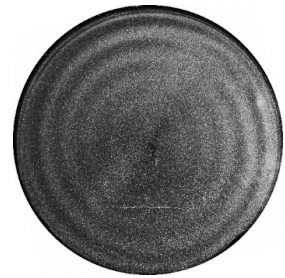


Рис.4. Температурные измерения при понижении скорости вращения в слое воды толщиной $h = 1.5$ см

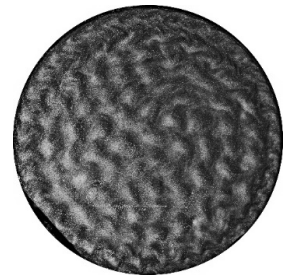
связанная с развитием конвекции. Осредненная конвекция возникает пороговым образом при дальнейшем понижении скорости вращения f_{tot} (рис. 4, область III). Кризис теплопереноса связан с возникновением и дальнейшим развитием в слое конвективных ячеек вибрационной природы (рис. 5б).

При горизонтальном расположении оси вращения поле силы тяжести возмущает равновесие неоднородно нагретой вращающейся жидкости, вызывая ее колебания относительно полости. Колебания жидкости приводят к генерации инерционных волн в углах полости. В точках отражения инерционных волн от границ полости наблюдается возникновение осредненных течений в виде тороидальных вихрей (рис. 5а), которые незначительно интенсифицируют теплоперенос (рис. 4, область II). Анализ длин волн Λ тороидальных структур, где Λ – расстояние между центрами последовательных светлых полос (рис. 5а), показал, что безразмерная длина волны в большом интервале ω_{tot} имеет постоянное значение $\Lambda/h = 1.15 \pm 0.02$ (рис. 6). В проведенных экспериментах при различных толщинах слоя h и условиях нагрева Θ значение параметра Λ/h согласуется с теоретическим, рассчитанным для случая взаимодействия инерционных волн с неизотермической жидкостью $\Lambda_{\text{ин}}/h = 1.155$, где $\Lambda_{\text{ин}}$ – расстояние между двумя последовательными точками отражения инерционной волны, рождаемой в торцевых углах вращающейся полости.

состоянии механического равновесия, разность температур Θ не изменяется, тепловой поток, который характеризуется падением температуры ΔT на тепловом сопротивлении, остается постоянным (рис. 4, область I). С некоторого критического значения скорости f_{tot} наблюдается слабое возрастание ΔT , которое сопровождается незначительным падением Θ (рис. 4, область II). Интенсивность теплового потока в области II незначительна, в полости наблюдается система тороидальных вихрей (рис. 5а) не



а) $f_{\text{tot}} = 0.8$ об/с



б) $f_{\text{tot}} = 0.55$ об/с

Рис.5. Конвективные структуры в допороговой (а) и надкритической (б) областях в слое $h = 1.5$ см

Помимо фотографий структур с частицами визуализатора как с холодной (рис. 7, левая часть), так и с горячей границы слоя (правая часть), в экспериментах применяется тепловизор для изучения температуры течений. В дополнение к этому проводится поперечный диаметральный разрез слоя, выполненный с помощью лазерной подсветки. Сравнивая термограмму и фотографии структур можно предположить схему течений в слое (рис. 7, центральная часть). На представленных схемах показаны: направления распространения инерционных волн и их характеристические поверхности; направление течений, генерируемых внутри торoidalных вихрей.

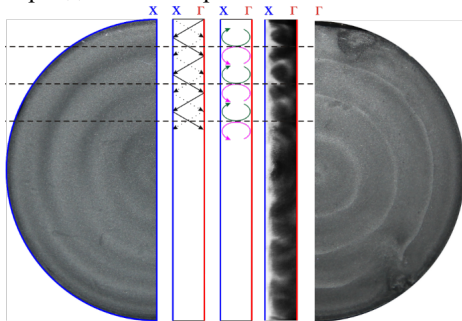


Рис.7. Конвективные структуры в допороговой области. Схема распространения инерционных волн. Срез в луче лазера с предполагаемыми течениями внутри слоя

определяющим параметром является безразмерная скорость вращения $\omega_{\text{rot}} = \Omega_{\text{rot}} h^2 / \nu$, характеризующая отношение силы Кориолиса к силе вязкости. На плоскости параметров ω_{rot}, R_v показано, что граница возбуждения вибрационной конвекции (пороговое значение R_v) зависит от безразмерной скорости (рис. 8, кривая I). Символами «набла» обозначен ход эксперимента, представленного на рис. 4. Порог устойчивости повышается с увеличением безразмерной скорости вращения. Приведена граница возникновения торoidalных вихрей – кривая II. Штриховыми линиями приведены результаты эксперимента [Козлов, МЖГ, 2003, № 1] в области малых значений безразмерной скорости вращения.

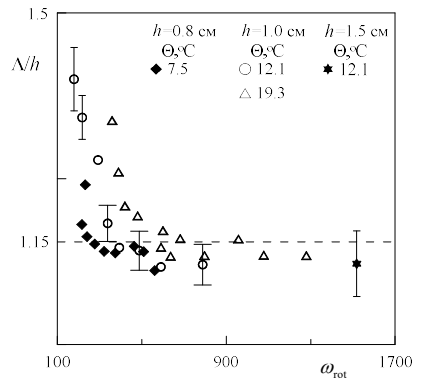


Рис.8. Безразмерная длина волны в зависимости от безразмерной скорости вращения

Анализ порогов конвекции проводится на плоскости безразмерных управляющих параметров. Осредненная конвекция определяется термовибрационным механизмом, в основе которого лежат колебания неизотермической жидкости, вызванные вращающимся в системе отсчета полостью внешним силовым полем. Для описания осредненного действия поля используется модифицированный вибрационный параметр

$$R_v = (g\beta\Theta h)^2 / 2\nu\chi\Omega_{\text{rot}}^2 . \quad \text{Вторым}$$

безразмерная скорость вращения

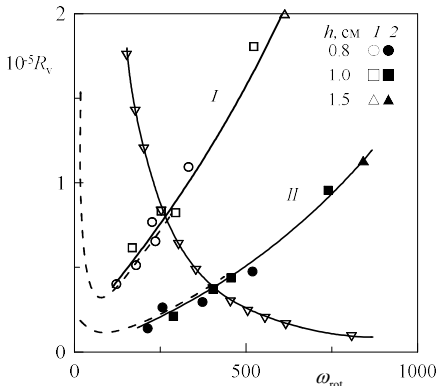


Рис.8. Граница вибрационной конвекции при вертикальном положении слоя, $Ra = 0$

(рис. 2б,г). В этих условиях проявляются два конвективных механизма, рэлеевский и термовибрационный, которые полностью описывают состояние системы.

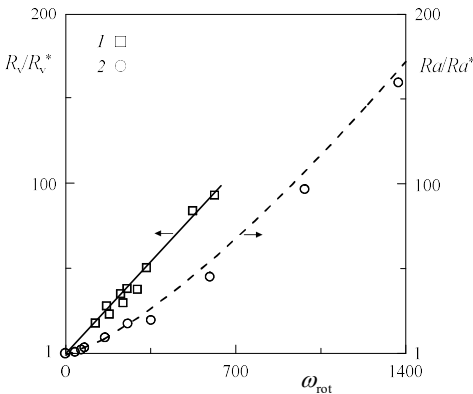


Рис.9. Влияние вращения на пороги вибрационной (символы 1) и гравитационной (символы 2) конвекции

наличия (ΔT) и в отсутствие конвекции (ΔT_0) при одном и том же значении разности температур границ слоя Θ . Теплопроводному режиму соответствует $Nu = 1$. В случае горизонтального положения слоя ($\alpha = -90^\circ$ – нагрев сверху, $\Theta < 0$) конвекция в слое отсутствует, $Nu = 1$ во всем интервале изменения Θ (символы 1 рис. 10). При нагреве снизу ($\alpha = 90^\circ$) с повышением Θ пороговым образом в слое развивается рэлеевская конвекция (см. п.1.2) в виде конвективных ячеек (см. рис.3), число Nu возрастает. При $\alpha = -40^\circ$ (расположение слоя показано на рис. 2г) теплоперенос во всем интервале монотонно повышается с $|\Theta|$ (символы 2 на рис. 10 в области $\Theta < 0$), при этом в слое наблюдаются кольцевые конвективные валы (схожие с рис. 5а).

В п.1.4 проведено сравнение стабилизирующего действия вращения на порог возбуждения рэлеевской и вибрационной конвекции (рис. 9). Различные по своей природе механизмы возбуждения конвекции, когда проявляются независимо, имеют схожий закон роста порога устойчивости $R_v(\omega_{rot})$ и $Ra(\omega_{rot})$ в области высоких частот.

Во второй главе представлены результаты экспериментального исследования тепловой конвекции во вращающемся плоском слое при отклонении оси вращения от вертикали

Изучены в п.2.1 теплоперенос, а в п.2.2. структура течений при заданных значениях угла наклона α и скорости вращения слоя f_{rot} в зависимости от разности температур границ слоя $\Theta = T_2 - T_1$. Теплоперенос во вращающемся слое приведен на плоскости Θ, Nu (рис. 10), где число Нуссельта $Nu = \Delta T / \Delta T_0$ определяется отношением падения температуры на тепловом сопротивлении (характеризующее мощность теплового потока через слой) при

В области положительных Θ наблюдается пороговое возбуждение рэлеевской конвекции, однако в сравнении с горизонтальным положением слоя порог смещается в область больших значений Θ . С ростом надкритичности в области $\Theta > 0$ (расположение слоя показано на рис. 2в) форма ячеек претерпевает изменение, размер их увеличивается. При $\alpha = \pm 24^\circ$ на кривой теплопереноса (символы 3 на рис. 10) обнаружены два излома, и оба термовибрационной природы. При нагреве слоя сверху ($\Theta < 0$) с увеличением $|\Theta|$ теплоперенос незначительно повышается, как в случае $\alpha = -40^\circ$. Но при дальнейшем повышении $|\Theta|$ наблюдается критическое возрастание теплопереноса, связанное с пороговым возбуждением термовибрационной конвекции. До критического значения Θ в слое наблюдаются конвективные тороидальные структуры, которые пороговым образом сменяются конвективными ячейками. При $\Theta > 0$ теплоперенос с увеличением $|\Theta|$ изменяется аналогично случаю $\Theta < 0$, наблюдаются области существования как тороидальных, так и ячеистых структур.

В п.2.3 проводится анализ осредненной конвекции на плоскости управляющих параметров. Помимо гравитационного поля конвекция при вращении определяется действием силы Кориолиса и центробежной силы. К управляющим безразмерным параметрам относится гравитационное число Рэлея $Ra = g_n \beta \Theta h^3 / \nu \chi$, модифицированный вибрационный параметр $R_v = (g_\tau \beta \Theta h)^2 / 2\nu \chi \Omega_{\text{rot}}^2$, а также скорость вращения $\omega_{\text{rot}} = \Omega_{\text{rot}} h^2 / \nu$ и центробежное число Рэлея $Ra_c = \Omega_{\text{rot}}^2 R \beta \Theta h^3 / \nu \chi$. В условиях проведенного эксперимента, при отклонении оси вращения от вертикали, нормальная к плоскости слоя компонента статического внешнего поля $g_n \equiv g \sin \alpha$ остается постоянной во вращающейся системе, тогда как тангенциальная составляющая поля $g_\tau \equiv g \cos \alpha$ оказывает сильное возмущающее действие на жидкость в слое. Именно эта составляющая приводит в действие «вибрационный» механизм тепловой конвекции, вызывая колебания неизотермической жидкости относительно полости.

В п.2.4 построена карта режимов конвекции на плоскости Ra, R_v (рис. 11), где выделяются области молекулярного теплопереноса (I), вибрационной (II) и рэлеевской (III) конвекции, которые различаются структурой и размером конвективных ячеек (размер рэлеевских ячеек существенно меньше вибрационных).

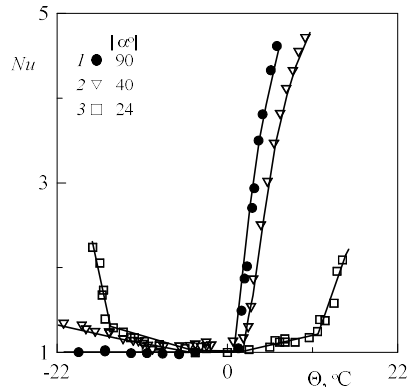


Рис.10. Зависимость теплопереноса от разности температур границ слоя. Слой воды толщиной $h = 1.5$ см при скорости вращения $\omega_{\text{rot}} = 570$

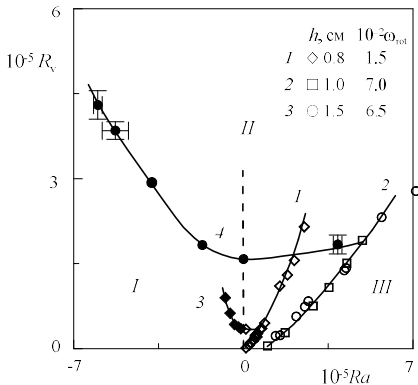


Рис.11. Карта режимов конвекции и порогов устойчивости квазиравновесия на плоскости управляющих параметров Ra, R_v при различных значениях ω_{rot}

гравитационному не превышает значения $Ra_c/Ra = 0.1$. В допороговой области (I) во вращающемся наклонном слое наблюдаются тороидальные структуры сравнительно малой интенсивности. Их возникновение связано с колебаниями жидкости, вызываемыми внешним полем, размер структур совпадает с длиной инерционной волны, рождаемой в торцевых углах полости.

В **третье** главе экспериментально исследуется вибрационная тепловая конвекция в горизонтальном плоском слое с изотермическими границами разной температуры, совершающем круговые вибрации в горизонтальной плоскости в условиях заданного (независимого) вращения полости вокруг вертикальной оси (рис. 12). При этом инерционное силовое поле имеет горизонтальное направление и в системе отсчета полости вращается вокруг вертикальной оси с заданной частотой осцилляций $N = \Omega_{osc} / \Omega_{rot}$ (где $\Omega_{osc} = \Omega_{vib} - \Omega_{rot}$ – частота колебаний жидкости в системе отсчета полости, а Ω_{rot} и Ω_{vib} – угловая скорость вращения и круговая частота вибраций полости). Особое внимание уделяется случаю отрицательных значений гравитационного числа Рэлея (подогреву слоя сверху), когда вибрационная конвекция возбуждается в условиях сильного стабилизирующего действия поля силы тяжести.

В п.3.1 приводится детальное описание разработанного и изготовленного вибрационного стенда, способного независимо задавать круговые поступательные вибрации и вращение. Показано, что технические решения, используемые при

Пороговые точки, представленные вдоль горизонтальной ($R_v = 0$) и вертикальной ($Ra = 0$) оси, согласуются с результатами исследований границ устойчивости рэлеевской конвекции из п.1.2 и вибрационной конвекции из п.1.3 (рис. 8) соответственно. Вибрационная конвекция развивается, в том числе, в области отрицательных значений Ra , когда наклонный слой нагревается сверху. Вращение оказывает стабилизирующее действие: с повышением частоты вращения границы областей смещаются, пороговые значения Ra и R_v возрастают. В условиях выполненных экспериментов центробежная конвекция не играет роли, отношение центробежного числа Рэлея к

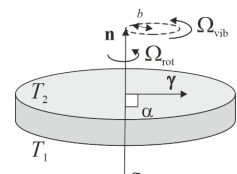


Рис.12. Постановка задачи гл.3

разработке вибростенда, обеспечивают поддержание амплитуды и частоты круговых вибраций с погрешностью не более 1.5 % и 0.5 % соответственно.

Важным предельным случаем является рассматриваемая в п.3.2 вибрационная тепловая конвекция, генерируемая вращающимся силовым полем в отсутствие вращения. При заданных разности температур и амплитуде вибраций в слое жидкости, подогреваемом сверху, при низких частотах вибраций значения Θ и ΔT не изменяются, жидкость находится в состоянии квазиравновесия (рис. 13, символы 1-4). По достижении некоторого критического значения частоты f_{vib} наблюдается пороговое возрастание ΔT через слой (рис. 13 символы 1,2), которое сопровождается падением температуры на границе слоя (рис. 13 символы 3,4). При уменьшении разности температур Θ , при заданной амплитуде, порог возникновения происходит при большей частоте вибрации f_{vib} . При малых значениях разности температур границ слоя (символы 5, 6), значения ΔT и Θ не меняются, конвекция отсутствует на всем интервале f_{vib} . Показано, что при заданных параметрах эксперимента с увеличением толщины слоя пороговое значение частоты вибраций повышается.

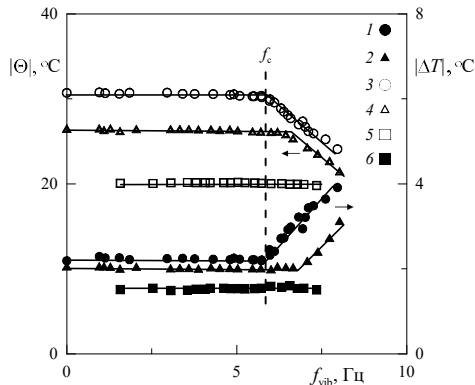
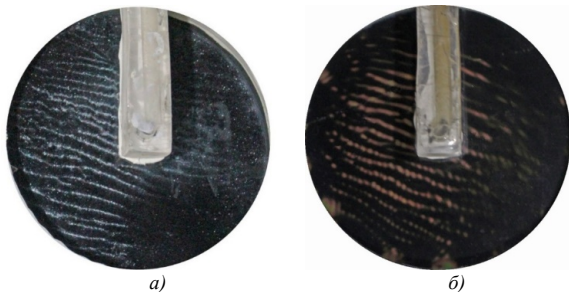


Рис.13. Тепловые измерения в слое спирта толщиной $h = 0.42 \text{ см}$, $\omega_{\text{rot}} = 0$

Вибрационная тепловая конвекция, возбуждаемая вращающимся инерционным силовым полем, проявляется в виде пространственных структур (рис. 14), размер которых определяется толщиной слоя. В экспериментах с подогревом слоя сверху при использовании мелкодисперсного визуализатора – каллироскопа (характерный размер частиц составлял $(40 \pm 5) \text{ мкм}$, рис. 14а) наблюдаются (разрешаются) только сравнительно крупномасштабные конвективные структуры.



$h = 0.32 \text{ см}$, $f_{\text{vib}} = 7.25 \text{ Гц}$

Рис.14. Визуализация виброконвективных структур при одинаковых параметрах эксперимента с помощью: а) частиц каллироскопа; б) термохромной пленки

Предложена новая методика визуализации с использованием пленки, расположенной на нижней границе полости (рис. 14б). Разрешающая способность пленки позволила

определить сравнительно коротковолновые периодические структуры вдоль наблюдаемых валиковых структур. Показано, что безразмерное волновое число k в исследованной области параметров не изменяется с надкритичностью. Волновое число рассчитывается в виде $k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$ (где $k_{1,2} = 2\pi h / \lambda_{1,2}$, а λ_1 и λ_2 – длины волн во взаимно перпендикулярных направлениях), среднее значение которого $k = 6.5 \pm 0.5$ удовлетворительно согласуется с теоретически предсказанным пороговым значением $k = 7.0$ в предельном случае высоких безразмерных частот вибрации полости при соответствующем условиях эксперимента значении числа Рэлея [Козлов, МЖГ, 2003, № 3].

При круговых поступательных вибрациях полости вибрационная тепловая конвекция в горизонтальном слое определяется вибрационным параметром $R_v = (b\Omega_{\text{vib}}\beta\Theta h)^2 / 2\nu\chi$ (где b амплитуда, а Ω_{vib} частота вибраций) и гравитационным числом Рэлея $Ra = g\beta\Theta h^3 / \nu\chi$. Сплошными линиями на плоскости безразмерных параметров Ra, R_v (рис. 15) отображено изменение параметров в ходе эксперимента при $\Theta = 31^\circ\text{C}$ и $\Theta = 26^\circ\text{C}$ (см. рис.13). Пороги вибрационной тепловой конвекции, полученные на разных толщинах и разностях температур, ложатся вблизи теоретической кривой [Gershuni, Lyubimov, 1998] (штриховая линия рис.15). Теоретическая пороговая кривая пересекает вертикальную ось R_v при значении $R_v = 2129$, а горизонтальную ось Ra при значении $Ra = 1708$. Результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов пороговой кривой.

В п.3.3 исследуется тепловая вибрационная конвекция во вращающейся полости при круговых поступательных вибрациях слоя. Методика проведения эксперимента и визуализации течений аналогична представленной выше в п.3.2. При заданной амплитуде и разности температур границ слоя повышение фиксированной скорости вращения приводит к смещению пороговой частоты вибраций f_{vib} в область больших значений. Эксперименты для случая совпадения направления вращения и круговых вибраций полости согласуются с экспериментами при вращении полости в сторону противоположную круговым вибрациям. Структуры, наблюдаемые в надкритической области, имеют схожий характер, что и в отсутствие вращения.

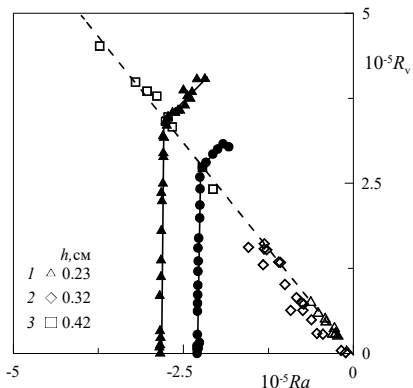


Рис.15. Кривая устойчивости на плоскости управляющих безразмерных параметров Ra, R_v , сплошные символы – ход эксперимента (см. рис. 13)

Сравнение порогов вибрационной конвекции при вращении с порогоми в отсутствие вращения проводится на плоскости управляющих параметров Ra, R_V (рис. 16). Теоретическое значение границы устойчивости (случай $\omega_{rot} = 0$) показано сплошной темной линией. Аналогично кривой $\omega_{rot} = 0$ приведены пороговые кривые при постоянном значении безразмерной скорости вращения $\omega_{rot} = 30$ и $\omega_{rot} = 75$. Сплошные линии соединяют соответствующие данным частотам пороговые значения на плоскости Ra, R_V для двух заданных близких чисел Рэлея.

Штриховые линии являются продолжением сплошных линий ($\omega_{rot} = const$) и упираются в пороговые значения Ra , соответствующие данным частотам в отсутствие вибраций $R_V = 0$

(см. п.1.2 устойчивость гравитационной конвекции).

С ростом безразмерной скорости вращения при заданном значении Ra пороги смещаются в область больших значений параметра R_V . Вращение стабилизирует порог возникновения вибрационной конвекции.

В возбуждении осредненной конвекции участвует одновременно два механизма, при этом отрицательное число Рэлея подавляет развитие конвекции, а круговые вибрации возбуждают вибрационную тепловую конвекцию. Предполагается, что в результате такого одновременного взаимодействия двух механизмов и вращения стабилизация порога устойчивости с повышением безразмерной скорости вращения происходит заметно слабее, кривая возбуждения вибрационной конвекции ложится ниже (символы 3-5, рис. 17). Из анализа влияния вращения на вибрационный

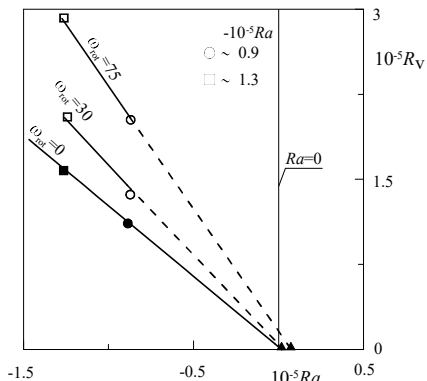


Рис.16. Пороги возбуждения вибрационной конвекции на плоскости Ra, R_V

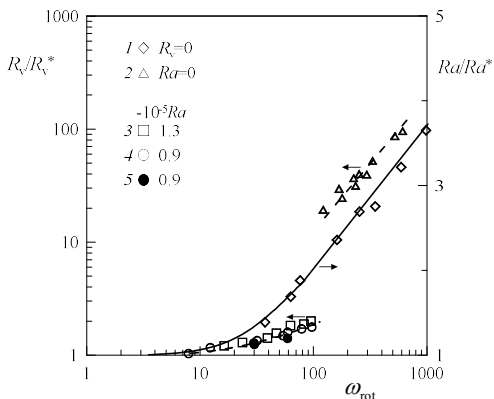


Рис.17. Пороговые значения вибрационного и гравитационного чисел Рэлея, нормированные на их пороговые значения в отсутствие вращения, в зависимости от безразмерной скорости вращения

механизм в области $\omega_{\text{rot}} < 100$ следует, что по виду закона изменение пороговых значений вибрационного параметра подобно изменению гравитационного параметра (символы 1). Существует общность влияния вращения на различные по природе конвективные механизмы. Обнаружено, что значения волнового числа в исследованном интервале безразмерных скоростей вращения $\omega_{\text{rot}} = 0 - 100$ практически не меняется (рис. 18), сила Кориолиса не влияет на структуру течения. Обнаружено, что при одновременном воздействии вибраций и вращения

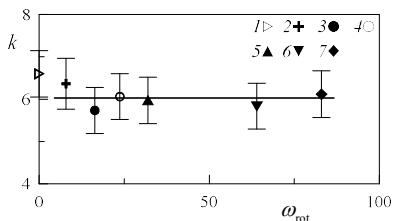


Рис.18. Волновое число в зависимости от безразмерной скорости вращения

инерционные волны, возбуждаемые вблизи торцевых границ полости, генерируют в неизотермической жидкости потоки в виде регулярной системы азимутальных вихрей (рис. 19а) задолго до возбуждения вибрационной конвекции. Слева на рис.19а приведена схема части слоя в поперечном диаметральном разрезе, линиями показаны характеристические поверхности инерционных волн. Направление распространения волн и угол φ между образующей поверхности конуса и осью вращения рассчитывается из теории. На рис. 19б приведена зависимость безразмерной длины волны Λ/h конвективных структур от относительной частоты осцилляций жидкости $N = \Omega_{\text{osc}}/\Omega_{\text{rot}}$. Сплошной кривой показано теоретически рассчитанное значение безразмерной длины волны Λ_{in}/h . В области положительных N , когда силовое поле совершает опережающее вращение относительно вращающейся полости, результаты экспериментов согласуются с

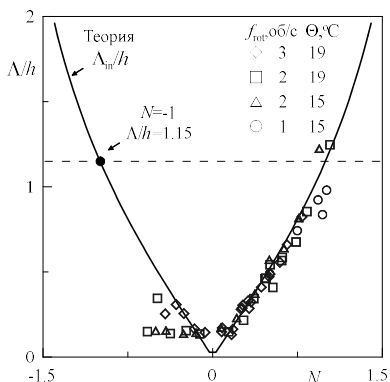
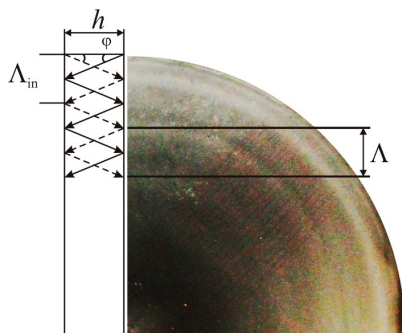


Рис.19. а – конвективные структуры, генерируемые инерционными волнами во вращающемся подогреваемом сверху горизонтальном слое при круговых вибрациях; б – зависимость безразмерной длины волны конвективных структур от безразмерной частоты осцилляций жидкости

теоретической зависимостью Λ_{in}/h . В области отрицательных N длина волны концентрических валов не зависит от частоты вибраций. Темным символом отмечен частный случай возникновения инерционных волн в слое, вращающемся вокруг горизонтальной оси (см. п.1.3 и гл.2), когда колебания жидкости в системе отсчета полости происходят с частотой вращения $N = -1$.

Заключение

В диссертационной работе выполнено экспериментальное исследование тепловой вибрационной конвекции во вращающейся полости, возбуждаемой внешним осциллирующим силовым полем. Исследование проведено в широком диапазоне безразмерных частот вибраций и скорости вращения при варьировании геометрических размеров полости, свойств жидкости, условий нагрева и вращения. Результаты исследований обобщены в пространстве управляющих безразмерных параметров.

1. Изучена осредненная тепловая конвекция во вращающемся вокруг горизонтальной оси вертикальном плоском слое с границами разной температуры.

- Обнаружено, что во вращающемся слое при понижении скорости вращения f_{tot} пороговым образом развивается осредненная тепловая конвекция в виде регулярной системы конвективных ячеек. Показано, что конвекция генерируется приливными колебаниями, вызываемыми полем силы тяжести, и определяется термовибрационным механизмом, характеризуемым модифицированным вибрационным параметром R_v .
 - Построены пороговые кривые возбуждения конвекции в зависимости от безразмерной частоты. Показано, что действие вращения на термовибрационную конвекцию аналогично действию вращения на конвекцию Рэлея – с повышением безразмерной скорости вращения ω_{tot} пороговое значение R_v^* возрастает.
 - Обнаружено, что ниже порога возбуждения вибрационной конвекции во вращающемся слое существуют осредненные течения в виде тороидальных валов малой интенсивности, безразмерная длина волны которых Λ/h не зависит от безразмерной скорости вращения слоя ω_{tot} .
 - Показано, что тороидальные вихри генерируются распространяющимися во вращающейся жидкости и отражающимися от границ слоя инерционными волнами, а их размер совпадает с теоретически рассчитанным расстоянием между точками отражения инерционной волны.
2. Впервые с позиции вибрационной конвекции исследована конвекция во вращающемся наклонном плоском слое в зависимости от угла наклона оси вращения.
- Найдены пороги возбуждения конвекции, изучены структура осредненных конвективных течений и теплоперенос в зависимости от угла наклона оси вращения. Показано, что конвекция во вращающемся наклонном слое

определяется двумя независимыми механизмами, рэлеевским и термовибрационным, доминирующая роль которых зависит от угла наклона. Обнаружено, что возникновение вибрационной конвекции во вращающемся наклонном слое возможно даже в случае, когда верхняя граница слоя имеет более высокую температуру.

- Изучена и построена граница возбуждения вибрационной и гравитационной конвекции на плоскости управляющих параметров Ra, R_v при различных значениях безразмерной скорости вращения полости ω_{rot} . Показано, что с повышением ω_{rot} граница возбуждения вибрационной конвекции смещается в область больших значений параметров R_v , граница гравитационной конвекции – в область больших значений чисел Ra .
3. Экспериментально изучены пороги возбуждения вибрационной конвекции, структура конвективных течений и теплоперенос в подогреваемом сверху горизонтальном плоском слое жидкости, совершающем круговые колебания в горизонтальной плоскости в отсутствие вращения.
- Обнаружено, что вибрационная конвекция в устойчиво стратифицированном в поле силы тяжести слое развивается пороговым образом при повышении интенсивности вибраций в виде пространственных структур, имеющих форму валов, разбитых по длине на сравнительно короткие сегменты.
 - Найденная граница возбуждения вибрационной конвекции на плоскости управляющих параметров Ra, R_v и волновые числа конвективных структур согласуются с найденными ранее теоретическими значениями.
 - Впервые исследовано влияние вращения подогреваемого сверху слоя вокруг вертикальной оси на конвекцию жидкости при вибрациях круговой поляризации.
 - Показано, что вращение оказывает стабилизирующее влияние на возбуждение высокочастотной вибрационной конвекции в устойчиво стратифицированном в поле силы тяжести слое, аналогично тому, как это происходит в отсутствие рэлеевского конвективного механизма (случай, рассмотренный в главе 1).
 - Обнаружено, что при сравнительно быстром вращении (в ограниченной области изменения относительной частоты осцилляций жидкости во вращающейся системе, $|N| < 2$) в слое генерируются осредненные течения в виде тороидальных вихрей слабой интенсивности задолго до порога развития вибрационной конвекции. Показано, что эти течения возбуждаются отражающимися от границ слоя инерционными волнами, рождающимися вблизи боковой границы слоя в результате инерционных колебаний неизотермической жидкости. Длина волны конвективных структур, изученных в широком интервале значений N , полностью определяется величиной N и согласуется с теоретической траекторией распространения инерционных волн.

Публикации по теме диссертации

1. **Kozlov V., Rysin K. Effect of tangential external force field on thermal convection in a rotating plane layer // Proc. 65th Intern. Astronautical Congress (IAC2014). Canada, Toronto. 29 September-3 October 2014. P. 422-426.**
(Url: <https://iafastro.directory/iac/archive/browse/IAC-14/A2/2/23193/>).
2. **Kozlov V., Rysin K., Sabirov R., Vjatkin A. Inertial waves and vibrational thermal convection // Proc. 66th Intern. Astronautical Congress (IAC2015). Israel, Jerusalem. 12-16 October 2015. P. 697-704.**
(Url: <https://iafastro.directory/iac/archive/browse/IAC-15/A2/IP/30295/>).
3. **Вяткин А. А., Иванова А. А., Козлов В. Г., Рысин К. Ю. Влияние тангенциальной составляющей силового поля на конвекцию во вращающемся плоском слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 215-222.**
4. **Kozlov V. G., Rysin K. Y., Vjatkin A. A. Vibroconvective stability of liquid in horizontal plane layer subject to circular translational vibrations // Microgravity Sci. Technol. – 2019. – V. 31– P. 759–765.**
5. **Козлов В. Г., Рысин К. Ю. Экспериментальное изучение тепловой конвекции во вращающемся наклонном плоском слое // Конвективные течения. – 2013. – № 6. – С. 32-48.**
6. **Вяткин А. А., Козлов В. Г., Рысин К. Ю. Стенд для изучения влияния осциллирующих силовых полей на вращающиеся гидродинамические системы // Конвективные течения. – 2015. – № 7. – С. 61-72.**
7. **Вяткин А. А., Козлов В. Г., Рысин К. Ю. Экспериментальное изучение влияния частиц визуализатора на конвекцию и теплоперенос в вибрирующей полости // Конвективные течения. – 2019. – № 7. – С. 61-72.**
8. **Kozlov V. G., Rysin K. Y. Average convection in rotating tilted plane layer // Proc. of the Advanced Problems in Mechanics Conference (APM 2014). Russia, St. Petersburg, IPME RAS. 30 June - 5 July 2014. P. 85-91.**
9. **Иванова А. А., Козлов В. Г., Рысин К. Ю. Термовибрационная конвекция во вращающемся контейнере. Роль инерционных волн // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань. 20-24 августа 2015 г. С. 1881-1882.**
10. **Козлов В. Г., Рысин К. Ю. Конвективные структуры во вращающемся наклонном плоском слое // Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные задачи механики сплошных сред». Пермь, ПГГПУ. 18-19 ноября 2014 г. С. 38.**
11. **Вяткин А. А., Рысин К. Ю. Влияние круговых вибраций на конвективную устойчивость горизонтального слоя жидкости // Материалы IV Всероссийской конференции «Пермские гидродинамические чтения». Пермь, ПГНИУ. 9-10 декабря 2016 г. С. 24-25.**
12. **Вяткин А. А., Козлов В. Г., Рысин К. Ю. Вибрационная тепловая конвекция в плоском слое, подогреваемом сверху, при круговых вибрациях // Материалы V Всероссийской конференции с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения». Пермь, ПГНИУ. 26-29 сентября 2018 г. С. 89-91.**
13. **Вяткин А. А., Рысин К. Ю. Влияние круговых вибраций на тепловую конвекцию в плоском слое, подогреваемом сверху // XXI Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь, ИМСС УрО РАН. 18-22 февраля 2019 г. С. 82-91.**
14. **Вяткин А. А., Козлов В. Г., Рысин К. Ю. Влияние вращения на тепловую конвекцию в плоском слое при круговых вибрациях // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа. 19-24 августа 2019 г. Т. 2. С. 225-226.**