

На правах рукописи

Сабиров Рустам Рустямович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
КОНВЕКЦИИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ
ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

*Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук*

Пермь – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет»

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

Официальные оппоненты: **Зюзгин Алексей Викторович**,
доктор физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет»,
кафедра общей физики, профессор

Костарев Константин Геннадьевич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ФГБУН "Институт механики сплошных сред УрО РАН,
лаборатория гидродинамической устойчивости,
заведующий

Ведущая организация: ФГБУН "Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе
СО РАН", г. Новосибирск

Защита состоится " ____ " сентября в 15-15 час. на заседании диссертационного совета Д 212.189.06 при ФГБОУ ВПО "Пермский государственный национальный исследовательский университет" по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пермского государственного национального исследовательского университета; электронная версия автореферата доступна на сайте ПГНИУ по адресу: <http://www.psu.ru/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015 г.

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

В.Г. Гилев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Интерес к изучению конвекции во вращающихся полостях под действием осложняющих факторов обусловлен широким спектром практических приложений, как технологических, так и геофизических. Влияние вращения на гидродинамические системы связано с действием сил инерции: центробежной силы и силы Кориолиса. К настоящему времени достаточно хорошо изучена тепловая конвекция в полостях, вращающихся вокруг вертикальной оси. При этом поле силы тяжести статично в системе отсчета полости. Качественно новые свойства тепловая конвекция приобретает при вращении полости с неизотермической жидкостью вокруг горизонтальной оси. Сила тяжести совершает вращение в системе отсчета полости, вызывая приливные колебания и играя, таким образом, роль осциллирующего силового поля. Известно, что высокочастотное воздействие переменного силового поля на неоднородно нагретую жидкость приводит к появлению осредненного конвективного движения (термовибрационный механизм возникновения конвекции без учета вращения описан, например, в работах С. М. Зеньковской и И. Б. Симоненко (1966), Г. З. Гершуни и Д. В. Любимова (1998); термовибрационная конвекция во вращающихся полостях – в статье В. Г. Козлова (2004)). В уравнениях вибрационной тепловой конвекции при вращении вокруг горизонтальной оси в качестве управляющих параметров выделяются центробежное число Рэлея, безразмерная скорость вращения и модифицированный вибрационный параметр. В экспериментальных работах эти параметры успешно применены для описания возникновения и развития осредненной конвекции в плоском слое, вращающемся вокруг горизонтальной оси перпендикулярной слою, и коаксиальном зазоре, вращающемся вокруг горизонтальной оси симметрии. Тепловыделяющие жидкости, а также плавящиеся и затвердевающие системы вызывают значительный интерес ученых в связи с большим количеством практических приложений. Комбинированное воздействие осциллирующих силовых полей и вращения может использоваться для управления тепломассопереносом в замкнутых системах. Распространённость вращающихся систем в природе (звезды, планеты, галактики) делает поставленную задачу важной с точки зрения фундаментальной науки. Интерес к конвекции тепловыделяющей жидкости во вращающихся полостях отчасти обусловлен астрофизическими приложениями, в связи с задачей тепловой конвекции в жидких ядрах планет.

Целью работы является экспериментальное исследование конвекции и тепло-массопереноса в тепловыделяющей жидкости во вращающейся полости под действием осциллирующих силовых полей: изучение порогов возникновения, теплопереноса и структуры течения.

Научная новизна работы. В работе впервые с позиций вибрационной гидромеханики экспериментально исследовано влияние безразмерной скорости вращения и относительной длины полости на пороги конвективной устойчивости тепловыделяющей жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре.

Обнаружены и изучены сравнительно слабые течения, вызываемые инерционной волной, распространяющейся от торцов цилиндра, и определяющие теплоперенос в жидкости до порога возникновения осредненной конвекции.

Обнаружено, что вариации вязкости жидкости и относительной длины полости

оказывают влияние, прежде всего, на теплоперенос в докритической области. В области надкритичности обнаружено несколько режимов конвекции. При любых параметрах цилиндра проявляется стационарная конвекция в виде трехмерных вихрей, которая при повышении надкритичности сменяется колебательной модой. В полостях большего радиуса (высокие безразмерные скорости вращения) проявляется двумерная мода конвекции в виде валов, параллельных оси вращения.

Впервые исследовано влияние вибраций на тепловыделяющую жидкость, устойчиво стратифицированную во вращающемся цилиндре под действием центробежной силы инерции. В отсутствие вибраций теплоперенос в полости близок к молекулярному. Показано, что вибрации вызывают интенсификацию теплопереноса при частотах, близких к частоте вращения. Обнаружено, что кривая теплопереноса в зависимости от разности частот вибраций и вращения имеет несколько экстремумов, связанных с резонансным возбуждением инерционных колебаний жидкости.

Автором выносятся на защиту:

- результаты экспериментального исследования конвекции тепловыделяющей жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре:
 - определение границ устойчивости квазиравновесия в зависимости от вязкости жидкости и относительной длины кювет;
 - изучение структуры течений в докритической области;
 - изучение надкритических режимов конвекции: двумерных и трехмерных течений, автоколебательного режима;
 - изучение теплопереноса, обусловленного различными режимами конвекции, в том числе в докритической области;
- результаты экспериментального исследования конвекции под действием поперечных вибраций:
 - обнаружение резонансного характера влияния вибраций на теплоперенос в цилиндре;
 - изучение зависимости динамики жидкости от амплитуды и безразмерной частоты вибраций;
 - изучение теплопереноса при точном совпадении частот вибраций и вращения.

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных методик измерения и обработки данных, использованием современного оборудования, сравнением полученных результатов с теоретическими и экспериментальными данными других авторов, где такое сопоставление возможно.

Научная и практическая ценность работы определяется широким распространением систем с внутренним тепловыделением под действием вибраций и вращения в природе и широкими возможностями эффективного применения осциллирующих силовых полей для управления технологическими процессами. Результаты исследования могут быть применены для разработки новых способов управления тепломассопереносом в земных условиях и в условиях пониженной гравитации, когда вибрации и вращение могут играть ключевую роль. Исследования вносят существенный вклад в развитие теории вибрационной тепловой конвекции и являются одним из

приближений к моделированию процессов, происходящих в жидких ядрах планет. Исследование конвекции тепловыделяющих жидкостей также является значимым для атомной энергетики.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 24 работах, включая 3 статьи в журналах из списка ВАК [1, 2, 4] и 1 статью, индексируемую в Scopus [3], 4 – в сборниках научных статей [5 – 8] (индексированы в РИНЦ), 4 – в трудах конференций [9 – 12] и 12 тезисов докладов.

Личный вклад. Автор непосредственно участвовал в планировании исследований, постановке задач и проведении экспериментов. Во всех работах экспериментальные исследования и обработка результатов выполнены автором при участии А.А. Вяткина. Анализ и подготовка публикаций осуществлялись совместно с соавторами и научным руководителем.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на 17 и 18 Зимних школах по механике сплошных сред (Пермь, 2011, 2013), международных летних школах «Advanced Problems in Mechanics» (Санкт Петербург, 2012, 2014), международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях» (Санкт Петербург, 2013), 61-й, 63-й и 65-й международных конференциях «International Astronautical Congress (Чехия, 2010, Италия, 2012 и Канада, 2014), Пермских гидродинамических чтениях (Пермь, 2014), V всероссийской конференции с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Бийск, 2014), Пермском гидродинамическом семинаре и Учебно-методическом семинаре ПГГПУ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа (142 страницы текста, включая 68 рисунков и 2 таблицы) состоит из введения, четырех глав, содержащих результаты, заключения и списка литературы (153 источника).

Содержание работы

Во введении дан обзор литературы, посвященной влиянию вращения и вибраций на неоднородные гидродинамические системы, сформулирована цель и актуальность исследования. Изложено краткое содержание работы, научная новизна и апробация результатов.

В первой главе (разделы 1.1 – 1.3) представлена постановка задачи (рис. 1) и дано описание экспериментальной установки с методикой исследования [2, 6]. Горизонтальный цилиндр 1 длиной L и радиусом R , закрытый фланцами 2 и заполненный тепловыделяющей жидкостью, вращается вокруг горизонтальной оси с угловой скоростью Ω_r . Внешняя граница полости поддерживается при постоянной температуре. Для этого кювета помещается в цилиндрическую полость 3 большего радиуса. В зазоре между цилиндрами прокачивается термостатированная вода.

Система подшипников и сальников позволяет рабочему цилиндру свободно вращаться внутри неподвижной внешней полости. Вращение задается шаговым двигателем 4. Скорость вращения варьируется в пределах 0.01 – 2.00 об/с. Нестабильность скорости вращения не превышает 0.01 об/с.

Температура в цилиндре измеряется при помощи термометров сопротивления, один из которых расположен на оси вращения (T_1), а второй на внутренней поверхности цилиндрической стенки (T_2). Данные с терморезисторов считываются при помощи прибора «Термодат» 5. Внутреннее тепловыделение обеспечивается за счет пропускания через жидкость переменного электрического тока; к фланцам с внутренней стороны прикреплены круглые медные электроды. Для увеличения электропроводности

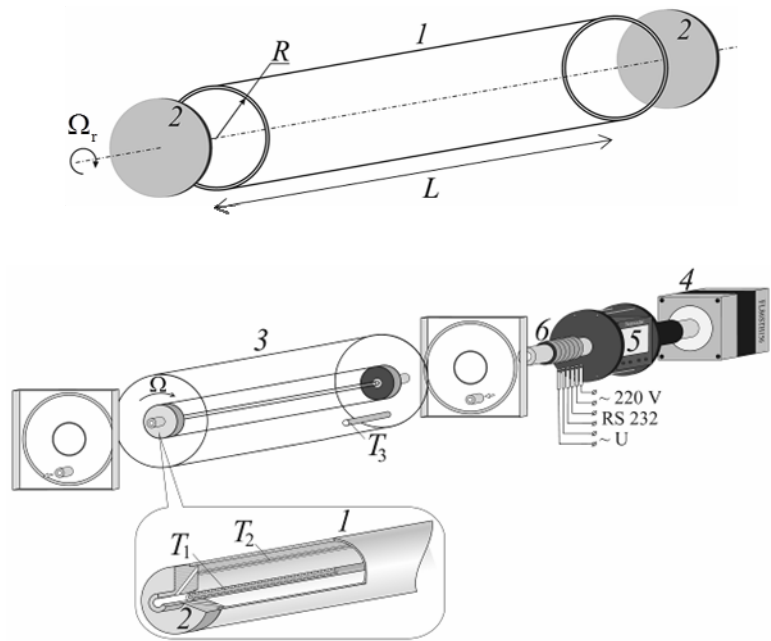


Рис. 1. Постановка задачи и схема экспериментальной установки

в рабочий раствор добавляется небольшое (до 5 % по массе) количество медного купороса. Подача напряжения на кювету и «Термодат», а также снятие показаний термодатчиков осуществляется через электрический коллектор 6. В качестве рабочих жидкостей используются вода и водные растворы глицерина.

Для визуализации течений используются пластиковые частицы диаметром 50 мкм, плотность которых выше плотности воды, но ниже плотности водоглицериновых растворов. При фоторегистрации камера фокусируется на световом ноже, рассекающем цилиндр вертикально по диаметру, либо на цилиндрической стенке. Еще одним визуализатором является алюминиевая пудра.

В разделе 1.4 показано, что изучение тепловыделяющей жидкости при вращении в указанной постановке осложняется рядом факторов, таких как неоднородность тепловыделения и влияние растворенной соли на параметры жидкости, и дана оценка этих особенностей [6].

Вторая глава посвящена исследованию порогов конвективной устойчивости при изменении вязкости жидкости (за счет изменения концентрации C глицерина в водном растворе), удельной мощности тепловыделения q (раздел 2.1) [2] и геометрических характеристик кюветы (раздел 2.2) [1, 4].

При быстром вращении под действием центробежной силы инерции жидкость устойчиво стратифицирована (рис. 2 а, область I). Температурное поле в цилиндре осесимметрично, имеет максимум на оси и слабо изменяется со скоростью вращения.

В экспериментах с растворами глицерина частицы визуализатора располагаются вблизи оси вращения и под действием внутренних инерционных волн, распространяющихся от торцов цилиндра, образуют скопления и разрежения. В области I при понижении скорости вращения распределение частиц не претерпевает качественных изменений.

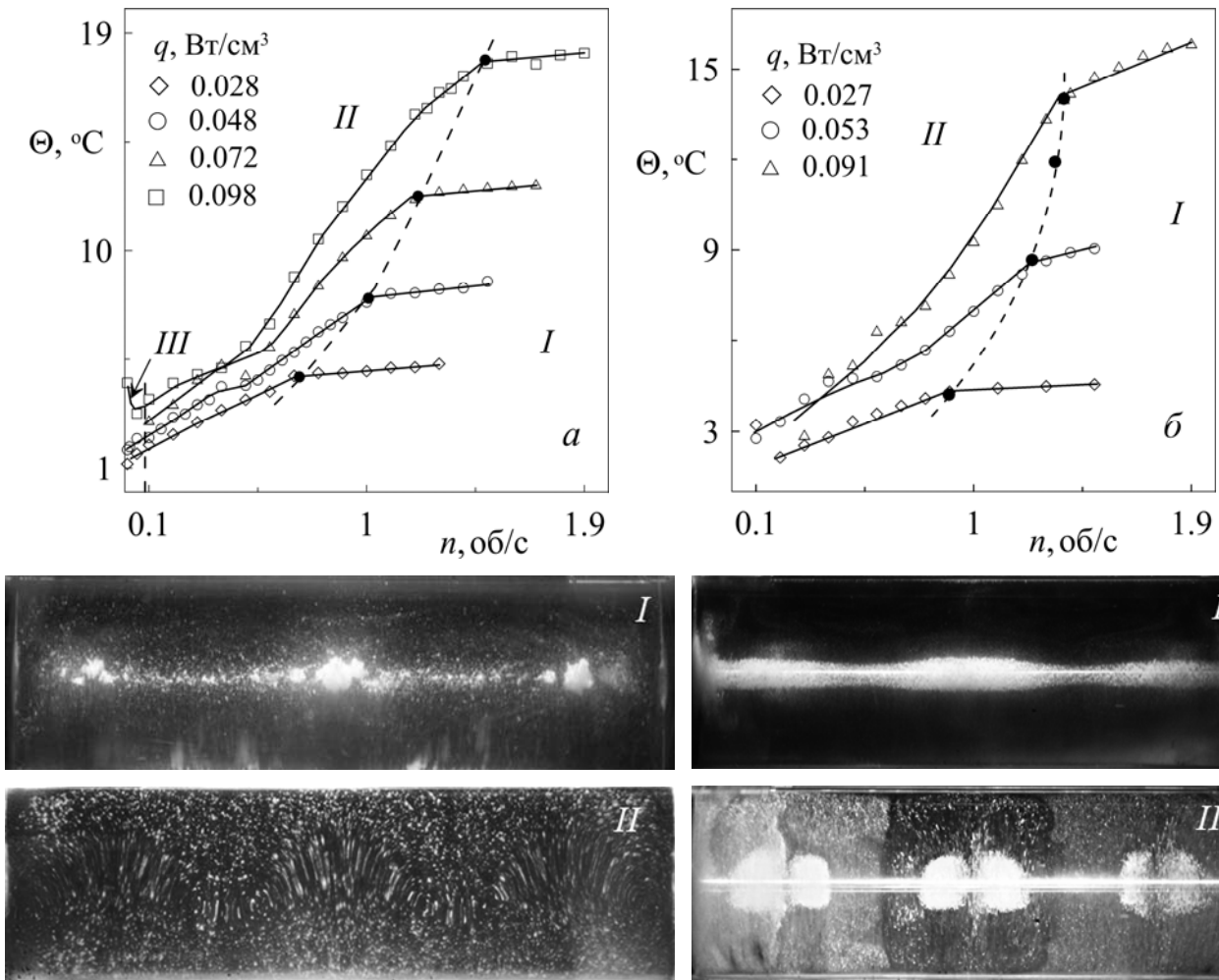


Рис. 2. Зависимость температуры Θ в центре цилиндра относительно боковой стенки от скорости вращения и вид структур в растворе глицерина с концентрацией $C = 50\%$; $R = 18$ мм; $\gamma = 2.9$ (а) и 2.6 (б)

В опытах используются цилиндры с различным аспектным соотношением, изменяются и длина L , и радиус R кюветы. Относительная длина цилиндра $\gamma = 2L/\Lambda$ определяется через пространственный период инерционной волны Λ , распространяющейся от торцов полости вдоль конических характеристических поверхностей. Обнаружено, что относительная длина оказывает влияние на конвективную устойчивость, так, при $\gamma = 2.6$, течения, вызываемые инерционными волнами, существенно меняют температурное поле в цилиндре (рис. 2 б, область I).

Конвекция возникает пороговым образом при дальнейшем понижении скорости вращения n (рис. 2, граница областей I и II), что приводит к критическому возрастанию теплопереноса и снижению температуры Θ на оси (рис. 2, область II). Кризис теплопереноса связан с возникновением и развитием в цилиндре конвективных течений в виде вихрей, периодически расположенных вдоль оси вращения. При повышении плотности внутренних источников тепла порог конвективной устойчивости жидкости смещается в область более высоких значений скорости вращения, что определяется повышением характерной разности температур между осью цилиндра и боковой стенкой.

В разделе 2.3 показано, что в развитии конвекции определяющую роль играет термовибрационный механизм [1, 2, 4]. Для описания используется вибрационный

параметр, представляющий собой вибрационное число Рэлея, модифицированное для условий задачи, $R_v = (g\beta\Theta R^3 q)^2 / 2\nu\chi^3\rho^2 c_p^2 \Omega^2$, где q – удельная мощность внутреннего тепловыделения, $\Omega = 2\pi n$ – угловая скорость вращения, остальные обозначения – обычные. Стабилизирующее действие центробежной силы инерции характеризуется центробежным числом Рэлея, также записанным через удельную мощность тепловыделения, $Ra = \Omega^2 R^6 \beta q / \nu \chi^2 \rho c_p$. Третьим определяющим параметром является безразмерная скорость вращения $\omega = \Omega R^2 / \nu$.

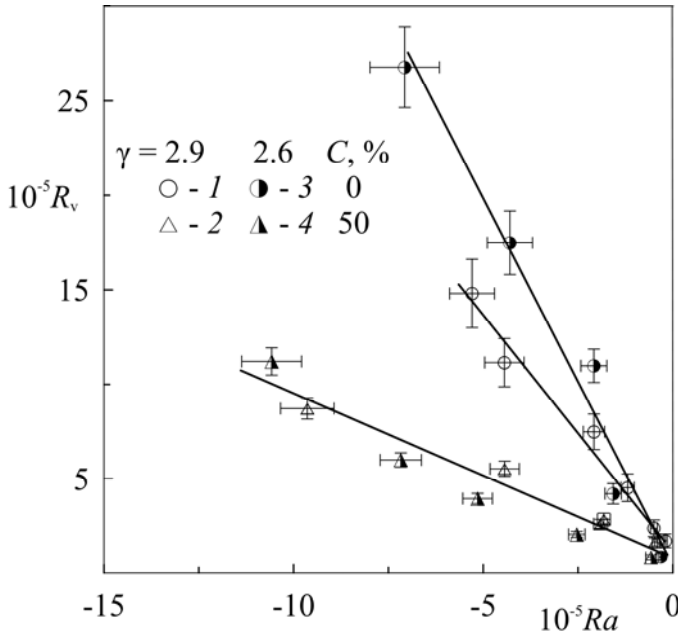


Рис. 3. Границы устойчивости на плоскости управляющих параметров

Третьим управляющим параметром – безразмерная скорость вращения – характеризует действие силы Кориолиса на конвективные потоки. При понижении ω (повышение вязкости жидкости) устойчивость квазиравновесия жидкости снижается. Возникновение конвекции в жидкости большей вязкости (точки 2, 4) происходит при меньших значениях вибрационного параметра, чем в экспериментах с водой (точки 1, 3).

В кювете со значением относительной длины $\gamma = 2.6$, близким к полуцелому, возникновение осредненной конвекции происходит при больших значениях вибрационного параметра, чем в случае $\gamma = 2.9$ (точки 1 и 3; одинаковая безразмерная скорость вращения). Повышение устойчивости связано с различной интенсивностью течений, вызываемых инерционной волной, и изменением температурного поля до порога возникновения осредненной конвекции. Наиболее ярко эти различия проявляются в экспериментах с водой.

Увеличение безразмерной скорости вращения (увеличение радиуса полости) приводит к качественному изменению вида зависимости температуры на оси цилиндра от скорости вращения (рис. 4). Эксперименты проводились с кюветами радиусом $R = 22$ мм и относительными длинами $\gamma = 2.9$ и 2.2.

Поле силы тяжести, вращающееся в системе отсчета полости, вызывает колебания неизотермической жидкости относительно стенки цилиндра. При понижении скорости вращения и уменьшении стабилизирующего эффекта центробежного поля эти приливные колебания становятся причиной возникновения осредненного движения жидкости.

Результаты экспериментов обобщены на плоскости управляющих параметров (рис. 3). Общей закономерностью является возрастание критического значения R_v при повышении $|Ra|$. Это объясняется стабилизирующим действием центробежной силы инерции.

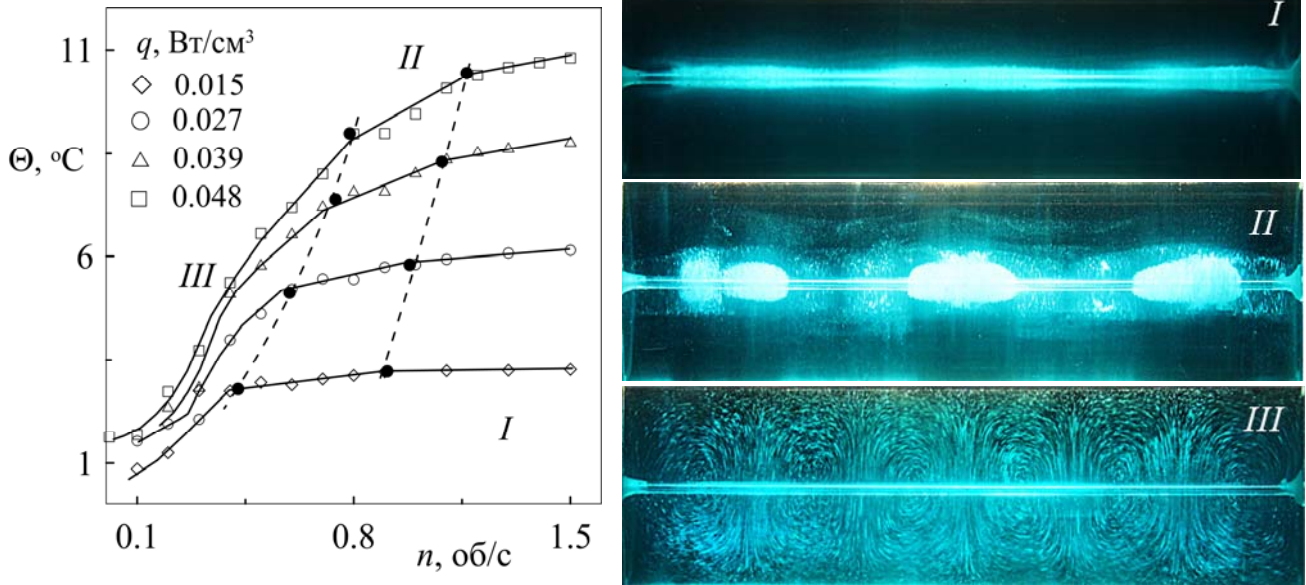


Рис. 4. Зависимость температуры Θ на оси цилиндра от скорости вращения при различной мощности тепловыделения и фотографии конвективных структур, возникающих в различных областях; $C = 25\%$, $R = 22$ мм, $\gamma = 2.9$

При интенсивном вращении жидкость в кювете находится в состоянии устойчивого механического равновесия, однако теплоперенос несколько отличается от молекулярного в результате действия инерционных волн, распространяющихся от торцов цилиндра (область *I*). В центробежном поле частицы визуализатора собираются вблизи оси вращения. При понижении скорости вращения после достижения ее критического значения n' температура на оси цилиндра начинает снижаться с каждым шагом по скорости (область *II*). Часть визуализатора отходит от оси, у границы видны вытянутые вдоль оси вихревые жгуты. По достижении значения скорости вращения n'' происходит еще один кризис теплопереноса (граница областей *II* и *III*); медленное снижение температуры сменяется быстрым (область *III*), аналогичным тому, которое наблюдалось в цилиндрах меньшего радиуса. Образующиеся при этом конвективные структуры имеют вид вихрей, периодически расположенных вдоль оси вращения. Таким образом, при высокой безразмерной скорости вращения наблюдаются два режима конвекции, обеспечивающие теплоперенос различной интенсивности.

На рисунке 5 пороговые кривые представлены на плоскости управляющих параметров. Темные точки соответствуют первому кризису теплопереноса (2 и 4), светлые – второму (1 и 3). Видно, что критические значения вибрационного параметра возрастают с увеличением влияния центробежной силы инерции. Изменение безразмерной скорости вращения (увеличение вязкости жидкости) не влияет на порог развития двумерных течений (переход от области *I* к области *II*), о чем свидетельствует хорошее согласование кривых 2 и 4. Однако второй кризис теплопереноса (кривые 1 и 3; переход от области *II* к области *III*) в жидкостях большей вязкости наблюдается при меньших значениях R_v , чем в воде, так же, как при потере устойчивости в полостях меньшего радиуса.

В третьей главе изучается структура конвективных течений. Проводится подробный анализ различных режимов конвекции и теплопереноса, обусловленного каждым из них [1, 4].

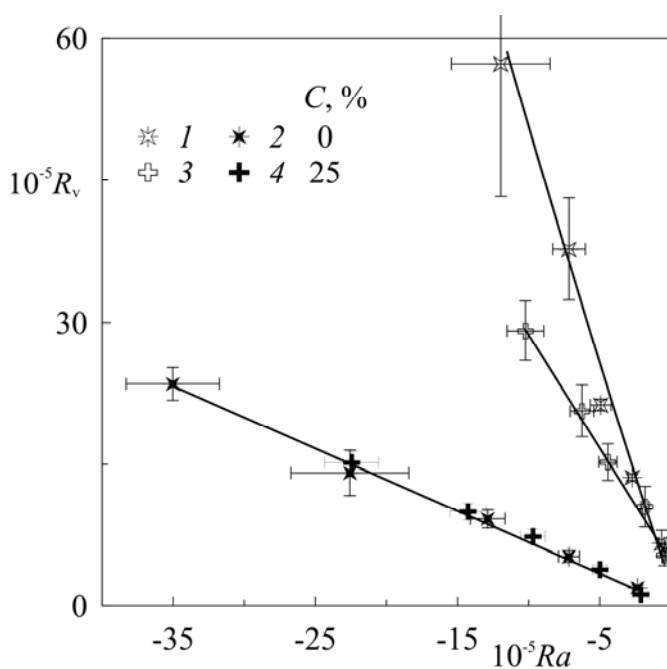


Рис. 5. Границы устойчивости на плоскости управляющих параметров, $R = 22$ мм, $\gamma = 2.9$

стических поверхностей, представленных на рисунке штриховыми линиями. В результате различия плотности в экспериментах с водой частицы визуализатора располагаются у стенки в линиях отражения инерционных волн (рис. 6 а), а в растворах глицерина перераспределяются вдоль оси вращения (рис. 6 б – г).

Интенсивность течений, вызываемых инерционной волной, зависит от мощности тепловыделения, вязкости жидкости и относительной длины полости. В частности, высокая интенсивность допороговых течений наблюдается в цилиндре с относительной длиной $\gamma = 2.6$. Схема распространения инерционных волн представлена на рис. 6 в. Несовпадение характеристических поверхностей волн, распространяющихся от противоположных торцов, приводит к значительной интенсификации теплопереноса, связанной с возникновением многослойной осесимметричной вихревой структуры (рис. 6 г).

В области надкритичности проявляются несколько режимов конвекции (3.3). В цилиндрах большего радиуса сразу после потери устойчивости проявляется двумерная мода (рис. 6 д). Течения представляют собой валы, параллельные оси вращения и локализующиеся вблизи стенки цилиндра; их возникновение сопровождается первым кризисом теплопереноса (рис. 4, область II). При понижении скорости вращения валы сменяются трехмерной вихревой структурой (рис. 6 е). Крупномасштабные трехмерные вихри, периодически расположенные вдоль оси цилиндра, обеспечивают теплоперенос существенно больший, чем двумерные валы (рис. 4, область III).

Двумерные вихри, локализованные вблизи цилиндрической стенки, не испытывают влияния силы Кориолиса. С этим связано хорошее согласование границ перехода к двумерному режиму конвекции в жидкостях разной вязкости (разная безразмерная скорость вращения) на плоскости управляющих параметров (рис. 5, точки 2 и 4).

Обнаружено, что в некоторых случаях в докритической области теплоперенос в цилиндре отличается от молекулярного, несмотря на сильное стабилизирующее действие центробежной силы инерции (пункт 3.2). Эксперименты с визуализацией при помощи пластиковых частиц Resine Amberlite выявили наличие слабых течений жидкости до порога возникновения вибрационной конвекции. Распределение визуализатора (рис. 6 а, б) свидетельствует, что теплоперенос в докритической области связан с потоками, возбуждаемыми инерционными волнами. Волны распространяются от торцов вращающегося цилиндра вдоль конических характеристических

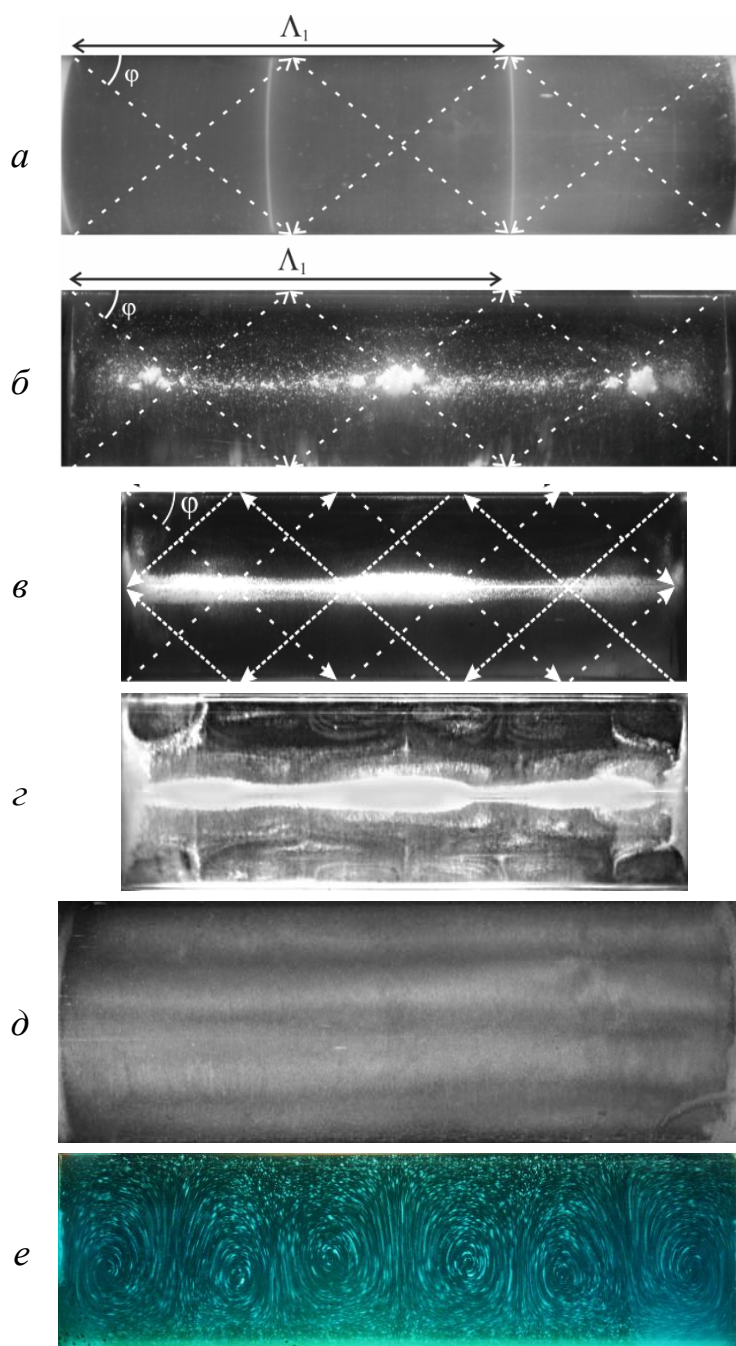


Рис. 6. Вид конвективных структур при различной скорости вращения цилиндра

	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>
γ	2.9	2.9	2.6	2.6	2.2	2.9
R , мм	18	18	18	18	22	18
n , об/с	1.1	1.5	1.8	1.1	0.5	0.3
C , %	0	50	50	50	0	25

ры вновь возникают. С понижением скорости вращения период температурных колебаний уменьшается. Разрушение системы вихрей со временем в течение четверти периода показано на рис. 7 справа. Временной интервал между кадрами составляет 50 секунд.

В случае трехмерных вихрей сила Кориолиса оказывает существенное стабилизирующее действие, которое проявляется в повышении порога устойчивости относительно трехмерной моды конвекции при увеличении безразмерной скорости вращения (рис. 5, кривые 1, 3).

С повышением надкритичности, независимо от мощности тепловыделения, вязкости жидкости и относительной длины цилиндра, стационарная конвекция сменяется колебательным режимом. Система трехмерных вихрей периодически разрушается и восстанавливается, это сопровождается колебаниями температуры (рис. 7). Возникновение автоколебательного режима связано с ростом интенсивности конвективных течений. Теплоотвод из центра цилиндра становится настолько эффективным, что разность температур между осью и стенкой становится недостаточной для поддержания конвективного движения, в результате чего конвекция затухает. После полного разрушения системы вихрей и достижения минимальной температуры происходит медленный (по сравнению с охлаждением) прогрев жидкости в центре полости до некоторого критического значения Θ , при котором конвективные структу-

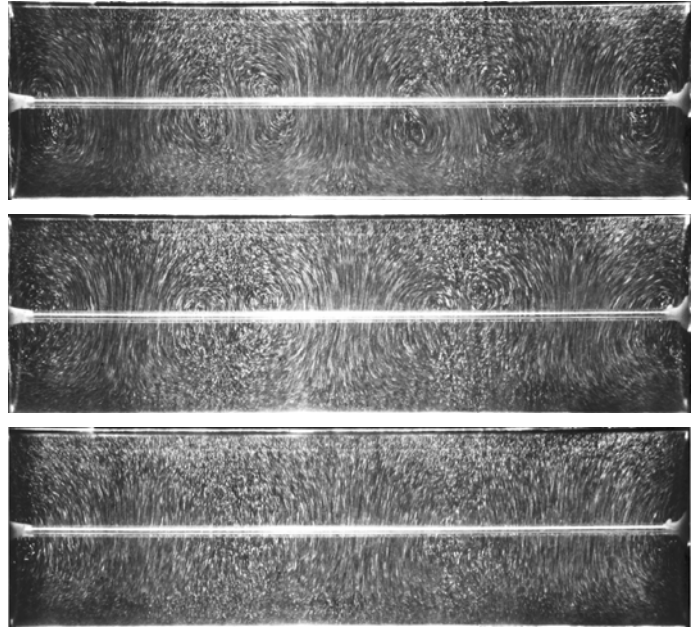
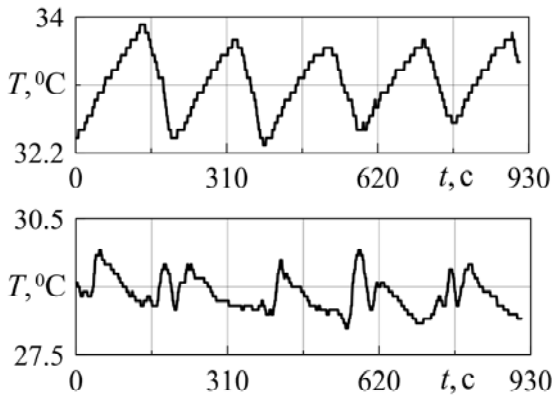


Рис. 7. Показания интегральных датчиков температуры в области автоколебаний и эволюция конвективных структур со временем в течение четверти периода (справа); $\gamma = 2.9$, $n = 0.4$ об/с, вода

При очень низкой скорости вращения ($n < 0.1$ об/с) конвективные структуры оказываются стационарными в лабораторной системе отсчета. Термодатчик, движущийся вместе со стенкой цилиндра, фиксирует максимальную температуру в верхнем положении и минимальную в нижнем. Показано, что в этих условиях движение жидкости определяется гравитационным механизмом конвекции (пункт 3.4).

В четвертой главе исследуется влияние вибраций, перпендикулярных оси вращения, на тепловыделяющую жидкость, устойчиво стратифицированную в центробежном поле [3, 8, 12].

Обнаружено, что вибрационное воздействие может нарушать квазиравновесие жидкости в случае, когда частоты вибраций и вращения близки (пункт 4.2). Нарушение стационарного состояния проявляется в резком возрастании теплопереноса Θ_0/Θ (рис. 8 а), где Θ_0 – температура в центре цилиндра относительно боковой стенки в отсутствие вибраций, Θ – то же, но при воздействии вибраций.

В области близких значений частот величина теплопереноса зависит от амплитуды и частоты вибраций. Зависимость теплопереноса от относительной частоты f_v/f_r имеет сложную форму. При точном совпадении частот вибраций и вращения теплоперенос превосходит молекулярный, но оказывается существенно меньше, чем при разности частот вибраций и вращения $|f_v - f_r| \approx 0.05$ об/с.

При воздействии вибраций с частотой, далекой от скорости вращения, нарушения квазиравновесного состояния жидкости не происходит (рис. 8 б) в том числе и в случае кратных частот. Распределение частиц визуализатора не отличается от случая отсутствия вибраций. С приближением величины f_v/f_r к единице происходит качественное изменение распределения пудры (рис. 8 в, г, д). Частицы отходят от оси вращения и располагаются в виде поверхности на некотором удалении от капилляра (рис 8 в, г). Скопление частиц движется вдоль азимута. В лабораторной системе отсчета это движение быстрее вращения цилиндра при $f_v/f_r > 1$ (опережающее вращение) и медленнее в случае $f_v/f_r < 1$ (отстающее вращение). Расстояние между осью и

частицами зависит от соотношения частот вибраций и вращения. Максимальное удаление наблюдается при $f_v/f_r \approx 0.98$ (рис. 8 *з*) и совпадает с максимумом теплопереноса. При совпадении частот $f_v/f_r=1$ частицы распределяются в виде параллельного оси вращения «жгута», неподвижного в системе отсчета полости (рис. 6 *з*); на кривой теплопереноса при этом наблюдается минимум. Расстояние между осью вращения и жгутом определяется амплитудой вибраций.

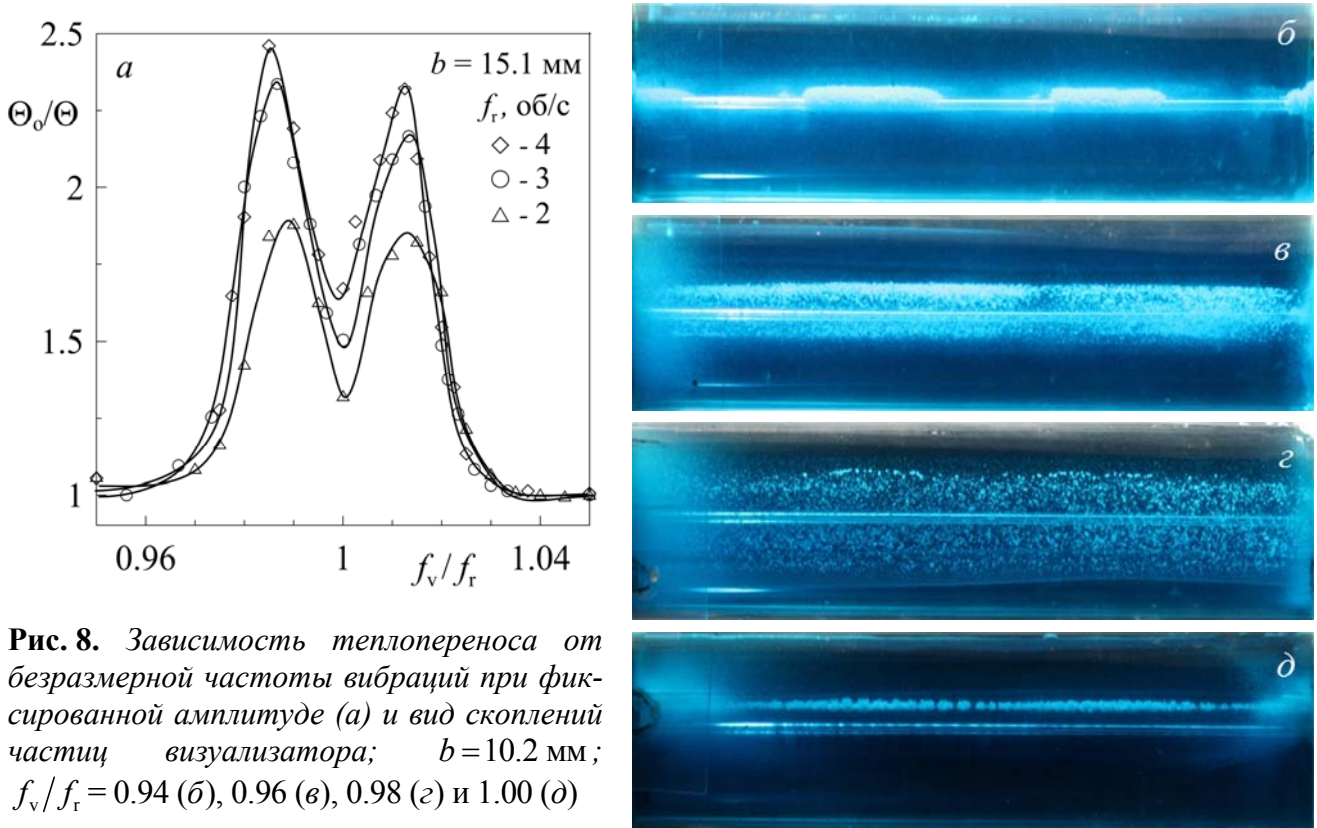


Рис. 8. Зависимость теплопереноса от безразмерной частоты вибраций при фиксированной амплитуде (*а*) и вид скопления частиц визуализатора; $b=10.2$ мм; $f_v/f_r=0.94$ (*б*), 0.96 (*в*), 0.98 (*з*) и 1.00 (*д*)

При наложении вибраций в системе возникает инерционное силовое поле, вращающееся в системе отсчета полости со скоростью $f_v - f_r$ и вызывающее нарушение осевой симметрии, обусловленной действием центробежной силы. В зависимости от соотношения частот вращение поля может быть отстающим или опережающим. Частицы визуализатора, сместившись от оси вращения, движутся вместе с отстающим или опережающим полем. В результате этого азимутального движения визуализатор распределяется в виде цилиндрической поверхности. При точном совпадении частот вибраций и вращения инерционное поле оказывается стационарным относительно полости. Азимутальное движение отсутствует, и частицы визуализатора собираются в жгут, параллельный оси вращения.

Максимальные значения теплопереноса Θ_0/Θ , соответствующие максимальному удалению частиц пудры от оси вращения, наблюдаются при совпадении частоты вращения инерционного силового поля в системе отсчета полости $f_v - f_r$ с одной из собственных частот системы.

Определяющими параметрами в условиях данного эксперимента являются центробежное $Ra = \Omega^2 R^6 \beta q / \nu \chi^2 \rho c_p$ и вибрационное $Ra_v = b \Omega^2 \beta q R^5 / \nu \chi^2 \rho c_p$ числа Рэлея, модифицированные для условий задачи с внутренними источниками тепла. Влияние

этих параметров на теплоперенос при точном совпадении частот вибраций и вращения показано на рис. 9.

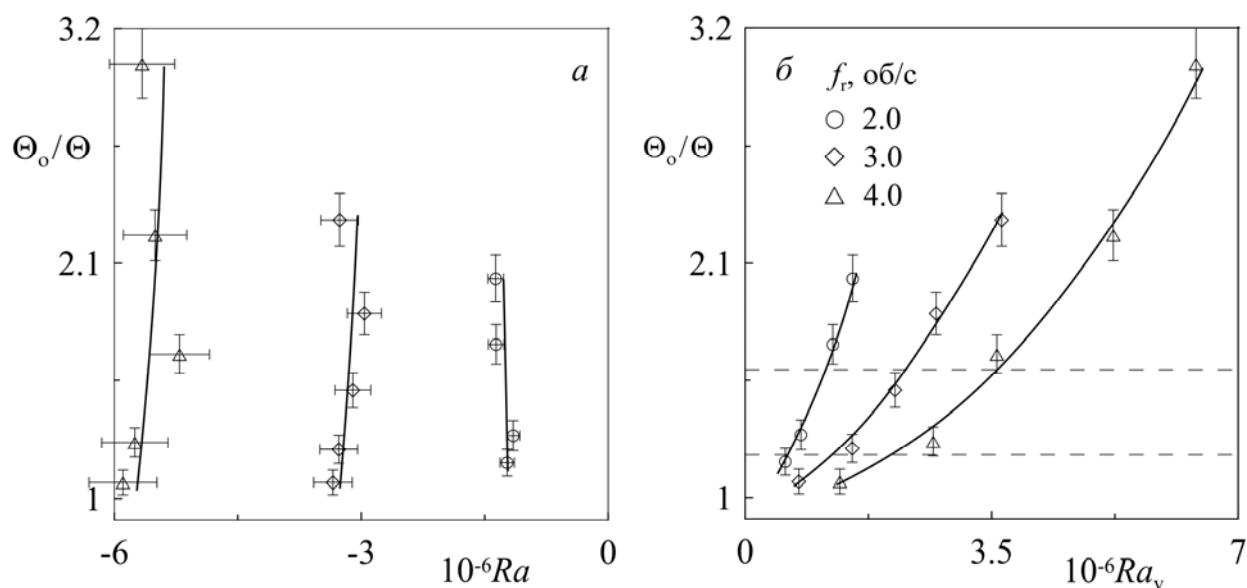


Рис. 9. Зависимость теплопереноса от управляющих параметров при совпадении частот $f_v = f_r$; $\gamma = 2.9$. Каждой серии экспериментов соответствуют постоянные значения f_r и различные значения b

С повышением амплитуды вибраций в отдельной серии экспериментов влияние Ra (центробежный механизм) остается практически неизменным (рис. 9 а), в то время как Ra_v (вибрационный механизм) возрастает. Как видно из рис. 9 б, теплоперенос повышается с увеличением влияния вибрационного механизма.

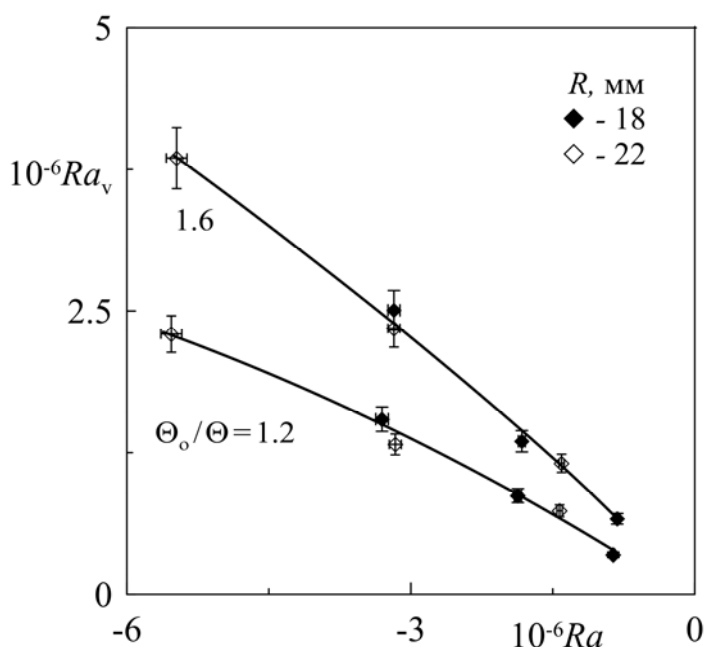


Рис. 10. Изолинии теплопереноса на плоскости управляющих параметров

На зависимости Θ_0/Θ от Ra и Ra_v сделаны «срезы» при постоянных значениях теплопереноса (штриховые линии $\Theta_0/\Theta = 1.2$ и 1.6). Изолинии теплопереноса, фиксируемого при точном совпадении частот вибраций и вращения, представлены на плоскости управляющих параметров (рис. 10). Видно, что теплоотвод возрастает с Ra_v при фиксированном значении Ra . Кривые, полученные в кюветах различного радиуса, хорошо согласуются между собой, что свидетельствует об определяющей роли вибрационного параметра в возникновении конвекции (4.3).

Основные результаты и выводы

1. Выполнено систематическое экспериментальное исследование устойчивости квазиравновесия тепловыделяющей жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре с изотермической боковой границей.
 - Исследовано возбуждение осредненной тепловой конвекции, происходящее пороговым образом при понижении скорости вращения полости. Показано, что возникновение квазистационарных в системе отсчета полости конвективных потоков происходит под действием термовибрационного механизма, характеризуемого вибрационным параметром R_v . При этом центробежная сила инерции, характеризуемая центробежным числом Рэлея Ra , играет стабилизирующую роль.
 - Показано, что граница конвективной устойчивости зависит от безразмерной скорости вращения полости ω . Последняя характеризует действие силы Кориолиса.
 - Обнаружено, что в области высоких значений ω порог возникновения двумерных конвективных валов не зависит от ω , в то время как порог возникновения трехмерных вихревых структур повышается с безразмерной частотой вращения, которая оказывает стабилизирующее действие на трехмерные конвективные течения.
 - Показано, что в области предельно низкой скорости вращения конвекция в полости определяется гравитационным механизмом.
2. Изучены структура конвективных течений и теплоперенос в тепловыделяющей жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре.
 - Обнаружено, что теплоперенос может отличаться от молекулярного в докритической области (ниже порога возбуждения термовибрационной конвекции). Это связано с потоками, возбуждаемыми в неизотермической жидкости внутренними инерционными волнами, распространяющимися от торцов полости.
 - Показано, что теплоперенос и конвективные течения, возбуждаемые инерционными волнами в докритической области, существенно определяются относительной длиной полости. Исследования, выполненные в полостях различной относительной длины, свидетельствуют, что минимальное воздействие инерционные волны оказывают в случае, когда характеристические поверхности волн, распространяющихся в противоположных направлениях, совпадают.
 - Обнаружены и изучены различные режимы конвекции в надкритической области, характеризующиеся различной величиной теплопереноса и зависящие от значений управляющих параметров Ra , R_v и безразмерной скорости вращения ω .
3. Впервые экспериментально исследована конвекция тепловыделяющей жидкости во вращающемся цилиндре, совершающем поступательные вибрации в направлении, перпендикулярном оси вращения.
 - Обнаружено, что равновесное состояние жидкости, возникающее под действием центробежной силы инерции в быстро вращающемся цилиндре, нарушается при вибрациях с частотой, близкой частоте вращения.
 - Показано, что вибрационное воздействие с частотой, равной частоте вращения, приводит к генерации во вращающейся системе осредненного силового поля, нарушающего симметрию центробежного поля; при этом конвекция и теплоперенос в цилиндре определяются центробежным и вибрационным числами Рэлея. На плоскости этих параметров построена карта режимов теплопереноса.

- Обнаружено, что значительная интенсификация теплопереноса наблюдается также при резонансном возбуждении двумерных азимутальных инерционных колебаний неизотермического столба жидкости. Показано, что собственные частоты колебаний в системе отсчета полости, в виде опережающей и отстающей волн, малы по сравнению со скоростью вращения полости и монотонно возрастают с увеличением неоднородности плотности.

Основные публикации по теме диссертации

1. Kozlov V., Vjatkin A., Sabirov R. Convection of liquid with internal heat release in a rotating container // *Acta Astronautica*. 2013. Vol. 89. P. 99–106.
2. Вяткин А.А., Иванова А.А., Козлов В.Г., Сабиров Р.Р. Конвекция тепловыделяющей жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре // *Изв. РАН. МЖГ*. 2014. № 1. С. 21–30.
3. Ivanova A., Sabirov R., Vjatkin A., Kozlov V. Thermal convection in rotating cavity subject to transversal vibrations // *Proc. 65th Intern. Astronautical Congress, IAC2014, Toronto, Canada*. Vol. 1, P. 831-836.
4. V.G. Kozlov, A.A. Ivanova, A.A. Vjatkin, R.R. Sabirov. Vibrational convection of heat-generating fluid in a rotating horizontal cylinder. The role of relative cavity length // *Acta Astronautica*. 2015. Vol. 112. P. 48–55.
5. Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сабиров Р.Р. Конвекция тепловыделяющей жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре // *Конвективные течения...* Перм. гос. пед. ун-т. Пермь, 2011. Вып. 5. С. 5–17.
6. Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сабиров Р.Р. Методика экспериментального исследования конвекции жидкости с внутренним тепловыделением при вращении // *Конвективные течения...* Перм. гос. гум.-пед. ун-т. Пермь, 2013. Вып. 6. С. 285–298.
7. Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сабиров Р.Р. Роль относительной длины полости в конвекции тепловыделяющей жидкости во вращающемся цилиндре // *Конвективные течения...* Перм. гос. гум.-пед. ун-т. Пермь, 2013. Вып. 6. С. 311–325.
8. Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сабиров Р.Р. Влияние вибраций на конвекцию тепловыделяющей жидкости во вращающемся цилиндре // *Конвективные течения...* Перм. гос. гум.-пед. ун-т. Пермь, 2013. Вып. 6. С. 21–31.
9. Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сабиров Р.Р. Экспериментальное исследование конвекции тепловыделяющей жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре // *Труды XVII Зимней школы по механике сплошных сред (Электронный ресурс)* – Пермь-Екатеринбург, 2011. 10 р.
10. Vjatkin A.A., Kozlov V.G., Sabirov R.R. Convection and heat transfer in liquid with internal heat release in a rotating horizontal cylinder // *Proc. XL Summer School - Conference ADVANCED PROBLEMS IN MECHANICS, APM 2012*, P. 419–427.
11. Vjatkin A.A., Kozlov V.G., Sabirov R.R. The influence of the cavity size on the averaged convection of heat-generating viscous fluid in a rotating horizontal cylinder // *Proc. Fluxes and Structures in Fluids. Russia. St. Petersburg. A. Ishlinsky Inst. for Problems in Mech. RAS. June 25–28. 2013*. P. 325–326.
12. Vjatkin A.A., Kozlov V.G., Sabirov R.R. Convection of heat-generating fluid in a rotating cylinder subjected to transversal vibrations // *Proc. XLII Summer School - Conference ADVANCED PROBLEMS IN MECHANICS, APM 2014*, P. 139–145.

Подписано в печать 15.06.2015. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1. Тираж 110 экз. Заказ

Отпечатано на ризографе ПГГПУ. 614990, г. Пермь, ул. Сибирская, 24.