

ФАНО РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ
им. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТ СО РАН)
проспект Академика Лаврентьева, 1
г. Новосибирск, 630090
Тел.: (383)330-70-50; 330-84-80; факс 330-84-80
Эл. почта: aleks@itp.nsc.ru
ИНН/КПП 5408100040/540801001
ОКПО 03534009 ОГРН 1025403648786

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН,
чл.-корр. РАН
_____ С.В. Алексеенко

5 сентября 2015 г.

От _____ № 15314 _____

На _____ от _____

Г _____

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Сабирова Рустама Рустямовича
“Экспериментальное исследование конвекции тепловыделяющей жидкости во
вращающемся горизонтальном цилиндре”, представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика
жидкости, газа и плазмы

В диссертации Сабирова Рустама Рустямовича систематизированы результаты экспериментальных исследований конвекции жидкости с внутренними источниками тепла в горизонтальных цилиндрах, равномерно вращающихся в поле тяжести. Эксперименты проведены при наличии и отсутствии поперечных вибраций. Тепло выделяется в объеме жидкости при пропускании переменного электрического тока и отводится через внешнюю границу цилиндра, поддерживаемую при постоянной температуре. Исследованы осредненные эффекты, возникающие в виде приливных колебаний при вращении вокруг горизонтальной оси и при наличии модуляции сил плавучести. Определены пороги возникновения конвекции и пространственные формы надкритических и докритических конвективных течений, исследовано влияние особенностей конвективных течений на осредненные характеристики полей температуры. Изучено влияние относительных размеров цилиндрической полости и вязкости жидкости на пороги устойчивости и на структуру течений. Рабочими средами были водные и водо-глицериновые растворы медного купороса с концентрацией до 5%. При конвекции под действием поперечных вибраций обнаружен резонансный характер влияния вибраций на конвективный теплообмен во вращающейся цилиндрической полости, изучена зависимость конвективного течения от амплитуды и безразмерной частоты вибраций.

Актуальность темы работы определяется в первую очередь наличием большого разнообразия технологических процессов и систем с использованием индукционного

нагрева или пропускания электрического тока через электропроводящие жидкости и расплавы, в которых сочетаются объемное тепловыделение, вращение и вибрации, и необходимостью разработки методов управления режимами конвективного теплообмена в таких системах. В первую очередь необходимы знания о возможных режимах течения. Все реальные процессы и оборудование находятся под воздействием вибраций в широком диапазоне частот и амплитуд. Технологическими примерами вращающихся полостей с жидкими средами являются тигли в методах Бриджмена-Стокбаргера и Чохральского с индукционным нагревом, используемых для получения совершенных монокристаллов. Есть варианты ампульных технологий получения монокристаллов с произвольной ориентацией вращающихся контейнеров с расплавами относительно вектора силы тяжести. Полученные в работе данные могут быть полезными при анализе процессов конвективного теплообмена и в технологиях непрерывного получения слитков (например, непрерывная разливка стали). При адекватном использовании теорий подобия и аналогий результаты лабораторных экспериментов могут быть полезны при анализе крупномасштабных геофизических (возможные приливные процессы в жидких ядрах вращающихся планет при наличии спутников) и астрофизических (звезды) процессов.

Связь работы с планами отраслей науки и народного хозяйства определяется тем, что она выполнялась в соответствии с заданиями по программам: 1. Министерства образования Пермского Края, С-26/625, «Вибрационная гидромеханика в приложении к современным биологическим и химическим технологиям», 2013 – 2015. 2. Программа стратегического развития ПГПУ проект 029-Ф «Вибрационная тепловая конвекция, эксперимент и теория», 2012-2014. И в рамках выполнения работы по грантам РФФФ: РФФИ 12-08-31379мол_а, 2012-2013. Экспериментальное исследование тепловой конвекции жидкости с внутренними источниками тепла во вращающемся горизонтальном цилиндре; РФФИ 13-01-00675а, 2013-2015, "Влияние осциллирующих силовых полей на тепловую конвекцию и тепло-массоперенос во вращающихся системах"

Структура и содержание диссертации. Диссертационная работа состоит из *Введения*, в котором приведен обзор работ по теме диссертации и сформулирована цель исследований, четырех глав, содержащих основные результаты, заключения и списка литературы.

В первой главе приведено описание экспериментальной установки, методики исследований, особенностей изучения тепловыделяющих жидкостей и сложностей, возникающих в экспериментах из-за отклонений от идеальности, дан анализ дополнительных факторов, влияющих на пространственную форму конвективных течений и теплообмен. Представлены результаты экспериментальных исследований

влияния концентрации медного купороса на теплофизические свойства воды и водоглицериновых растворов, используемых в качестве рабочих сред.

Вторая глава посвящена исследованию порогов конвективной устойчивости при изменении удельной мощности тепловыделения, вязкости жидкости и геометрических характеристик кюветы. При достаточно быстром вращении под действием центробежной силы жидкость устойчиво стратифицирована и находится в режиме теплопроводности (нет конвективного движения). Максимальное значение температуры жидкость имеет в приосевой зоне цилиндрической полости. Конвекция возникает пороговым образом при понижении скорости вращения. При повышении плотности внутренних источников тепла порог конвективной устойчивости жидкости смещается в область более высоких значений скорости вращения, что определяется повышением характерной разности температуры между приосевой областью объема жидкости и боковой стенкой цилиндра. Повышение вязкости жидкости также приводит к снижению устойчивости квазиравновесия при всех исследованных относительных размерах полостей. Для изучения влияния размеров полости на пороги возникновения конвекции использованы цилиндры с различным аспектным соотношением длины к радиусу, изменялись и длина, и радиус полости. Обнаружено, что относительная длина оказывает влияние не только на порог конвективной устойчивости, но и на структуру течений в надкритической области и до порога возникновения конвекции.

В третьей главе представлены результаты изучения пространственных форм конвективных течений и влияние интенсивности конвективного перемешивания жидкости на относительный радиальный перепад температуры. Обнаружено, что в некоторых случаях в докритической области, при сильном стабилизирующем действии центробежной силы, теплообмен в цилиндрическом слое жидкости отличается от режима теплопроводности. Эксперименты с визуализацией при помощи пластиковых частиц выявили наличие слабых течений жидкости до порога возникновения вибрационной конвекции. На основе анализа вызываемого этими течениями распределения частичек-трассеров сделан вывод, что в докритической области интенсификация теплообмена может быть вызвана инерционными волнами, распространяющимися от торцов вращающегося цилиндра вдоль конических характеристических поверхностей. Интенсивность этих течений зависит от мощности тепловыделения, вязкости жидкости и относительной длины полости. В надкритической области обнаружено несколько режимов конвекции. В полостях большего радиуса после потери устойчивости проявляется двумерная мода. Течения представляют собой валы, параллельные оси вращения и локализующиеся вблизи стенки цилиндра; это сопровождается интенсификацией теплообмена. При понижении скорости вращения валы сменяются трехмерной вихревой структурой.

Крупномасштабные трехмерные вихри, периодически расположенные вдоль оси цилиндра, обеспечивают теплообмен более интенсивный, чем двумерные вали.

С повышением надкритичности, независимо от мощности тепловыделения, вязкости жидкости и относительной длины цилиндра, стационарная конвекция сменяется колебательным режимом. Система конвективных структур периодически разрушается и восстанавливается. Возникновение колебательной моды неустойчивости связано с ростом интенсивности конвективных течений термогравитационной природы.

При очень низкой скорости вращения конвективные структуры оказываются стационарными в лабораторной системе отсчета. Показано, что в этих условиях движение жидкости определяется термогравитационным механизмом конвекции.

В четвертой главе представлены результаты исследований влияния вибраций, перпендикулярных оси вращения, на тепловыделяющую жидкость, устойчиво стратифицированную в центробежном поле. Обнаружено, что вибрационное воздействие может нарушать квазиравновесие жидкости в случае, когда частоты вибраций и вращения близки. Нарушение стационарного состояния проявляется в резкой интенсификации конвективного теплообмена. В области совпадения частот теплообмен (распределение температуры в объеме жидкости) зависит от амплитуды и частоты вибраций. При наложении вибраций с частотой, близкой к скорости вращения, в системе отсчета полости возникает инерционное силовое поле, вызывающее нарушение осевой симметрии, возникающей из-за действия центробежной силы. Определяющими параметрами в условиях данного эксперимента являются центробежное и вибрационное числа Рэлея.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертации.

Научная новизна проведенных в работе исследований и полученных результатов. К настоящему времени достаточно хорошо изучена тепловая конвекция в слоях и полостях, вращающихся вокруг вертикальной оси. Качественно новые свойства тепловая конвекция приобретает при вращении полости с неизотермической жидкостью вокруг горизонтальной оси. Было 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). Комбинированное воздействие осциллирующих силовых полей и вращения на конвективные течения в тепловыделяющей жидкости изучены недостаточно полно.

В рецензируемой 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 теплообмен в докритической области.

В области надкритичности обнаружено несколько режимов конвекции. При любых относительных размерах цилиндрической полости (в исследованных диапазонах) проявляется стационарная конвекция в виде трехмерных вихрей, которая при повышении надкритичности сменяется колебательной модой. В полостях большего радиуса (при высоких безразмерных скоростях вращения) проявляется двумерная мода конвекции в виде валов, параллельных оси вращения.

Впервые исследовано влияние поперечных к оси вращения вибраций на тепловыделяющую жидкость, устойчиво стратифицированную во вращающемся цилиндре под действием центробежной силы. В отсутствие вибраций теплообмен в полости близок к режиму теплопроводности. Вибрации вызывают интенсификацию теплообмена при частотах, близких к частоте вращения. Обнаружено, что интенсивность теплообмена в зависимости от разности частот вибраций и вращения имеет несколько экстремумов, связанных с резонансным возбуждением инерционных колебаний жидкости.

Научная и практическая ценность работы определяется тем, что результаты исследования могут быть применены для разработки новых способов управления тепломассообменом в условиях, когда вибрации и вращение могут играть ключевую роль. Обнаруженные закономерности в поведении гидродинамической системы с внутренним тепловыделением, находящейся под действием вибраций и вращения, могут быть применены при конструировании и эксплуатации технологических установок. Исследования вносят существенный вклад в развитие теории вибрационной тепловой конвекции и являются одним из подходов к лабораторному моделированию процессов, происходящих в жидких ядрах планет.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений, сделанных на основе полученных результатов обеспечивается использованием апробированных современных методик измерений температуры и визуализации, компьютерной обработки данных, теоретическим анализом результатов и сравнением с данными других авторов.

По рецензируемой диссертации необходимо сделать следующие **замечания**:

1. Введение, выполняющее роль обзора литературы и оценки современного состояния проблемы, имеет характер перечисления большого количества работ, но нет выводов и нет анализа результатов уже проведенных исследований, направленного на обоснование выбора темы и конкретную постановку задач данной работы. Нет четкого и ясного обозначения решенных и нерешенных проблем к началу данной работы и обоснования постановки задач экспериментальных исследований.

2. В главе 1 описание рабочего участка установки неоправданно упрощено: не указаны технические характеристики шагового двигателя, прибора "Термодат", источника переменного тока. В результате не понятно насколько равномерным было вращение, насколько точно контролируется и измеряется температура стенок и капилляра в центре слоя, насколько стабильно поддерживается и с какой точностью измеряется сила тока, напряжение и мощность? Параметры термометров сопротивления и сила тока через них, чувствительность (? мкВ/К) не указаны. Если показания с них снимаются цифровым прибором, то с какой частотой опроса? Этот вопрос возникает при анализе данных на рис. 1.5, (на котором не обозначены кривые и в тексте описание слишком поверхностное): видно, что при понижении угловой скорости, начиная от 0,6, показания термометров сопротивления (по-видимому?) имеют колебательный характер (почему?) и для определения характерных перепадов температуры требуется усреднение (какое использовалось и по какому ансамблю данных?). От этого зависит точность и достоверность данных представленных на рис.1.6 и фактически аналогичных им или данных, использующих аналогичную первичную информацию и представленных на графиках зависимостей $\Theta(n)$ и $\Theta_0/\Theta = f(R_v)$ в главах 2 и 3. Аналогичный вопрос вызывают данные на рис.2.4 и рис.4.6.

3. Используемая на стр.20 и далее по всему тексту диссертации терминология "Нарушение стационарного состояния проявляется в резком возрастании *теплопереноса* Θ_0/Θ , где Θ_0 – температура в центре цилиндра относительно боковой стенки в отсутствие вибраций, Θ_0 – то же, но при воздействии вибраций.", "Изолинии теплопереноса" некорректна по физическому смыслу и не соответствует смысловому содержанию общепринятой терминологии в теории теплообмена. Отношение перепадов температуры Θ_0/Θ , как индикатор начала и интенсификации конвективного теплообмена, конечно обусловлено и зависит от интенсивности конвективного течения, но это не тепловые потоки, не "*теплоперенос*". А утверждение об аналогии числу Нуссельта (с.75) требует доказательства или серьезного обсуждения. Практически по всему тексту и в подписях к рисункам перепады температуры именуются "*температурой*".

4. При анализе особенностей пространственной формы течений в экспериментах в водными растворами глицерина не принимается во внимание зависимость вязкости от

температуры и эффекты радиальной неоднородности разогрева слоя жидкости, о чем достаточно подробно говорится в методической части работы.

Сформулированные замечания не снижают ценности диссертационной работы в целом. Несмотря на замечания результаты, полученные в работе, являются достоверными, а основные выводы являются обоснованными. Материалы диссертации хорошо опубликованы в научной печати (в том числе в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций).

Автореферат отражает содержание диссертации. Материалы диссертации прошли хорошую апробацию на большом числе авторитетных международных и всероссийских конференций. Рукопись диссертации написана достаточно ясным языком. Автор диссертации владеет материалом и является квалифицированным специалистом в данной области науки. Серьезных замечаний по оформлению диссертации и автореферата диссертации нет.

На основании анализа представленных в диссертации Р.Р. Сабилова материалов можно сделать обоснованное заключение о том, что диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи экспериментального исследования комбинированного влияния вращения и вибраций на режимы конвективного течения и теплообмена в объеме тепловыделяющей жидкости, имеющей существенное значение для отрасли знаний - механика жидкости, газа и плазмы в области вибрационной гидродинамики и соответствует всем требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор, Рустам Рустамович Сабиров, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа Р.Р. Сабилова полностью заслушана на семинаре «Физическая гидродинамика» Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (протокол №__5__ от «_30_» _июня_ 2015 г.). Настоящий отзыв составлен на основании решения семинара и с учетом сделанных по диссертации замечаний.

Зав. лабораторией свободноконвективного теплообмена,
доктор физико-математических наук, с.н.с.

Бердников Владимир Степанович

(контактный телефон: 8 (383) 53 32,
e-mail: v@itp.nsc.ru)

ФАНО России Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского Отделения Российской Академии Наук, Россия, 630090, Новосибирск-90, проспект Академика Лаврентьева, д. 1, контактный телефон: 8 (383) 330 84 80, e-mail: aleks@itp.nsc.ru