

ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Зюзгин Алексей Викторович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕПЛОЙ КОНВЕКЦИИ  
В ПЕРЕМЕННЫХ СИЛОВЫХ ПОЛЯХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Пермь – 2011

Работа выполнена на кафедре общей физики Пермского государственного университета

Научный консультант: доктор физико-математических наук,  
профессор Г.Ф. Путин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
доцент А.Л. Зуев,

доктор физико-математических наук,  
профессор В.Г. Козлов,

доктор физико-математических наук,  
профессор В.А. Саранин.

Ведущая организация: Институт Проблем Механики РАН,  
(г. Москва).

Защита состоится « \_\_\_\_ » октября 2011 г. в 15.15 на заседании диссертационного совета Д 212.189.06 в Пермском государственном университете по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пермского государственного университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.189.06,

кандидат физико-математических наук, доцент

В.Г. Гилев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследований

Тепловая конвекция широко распространена и часто бывает определяющей в технологических и природных процессах. Зачастую это явление протекает в нестационарных условиях, в частности, при изменении силовых полей по величине и направлению. Более того, модуляция таких полей может генерировать конвективные потоки вибрационной или параметрической резонансной природы. Это делает важным изучение условий возникновения и пространственно-временной эволюции гравитационно-конвективных, виброконвективных и резонансных течений в таких условиях. Устойчивый интерес к задачам этого круга вызван развитием космических технологий, поскольку быстроменяющиеся инерционные и остаточные гравитационные ускорения в условиях орбитального полета могут определять динамику тепло- и массообмена в стратифицированных по плотности средах. В настоящее время исследования в этом направлении проводятся интенсивно и составляют содержание целого ряда научных журналов и международных конференций. Отметим также, что изменение силовых полей может оказывать управляющее влияние на эволюцию конвективных систем, и это направление исследований является перспективным как с точки зрения определения общетеоретических закономерностей, так и многочисленных технологических приложений. Представляемая работа, в которую вошли результаты экспериментальных исследований, проведенных в 1989–2011 гг., содержит постановку и экспериментальное решение широкого класса задач по исследованию конвективных процессов в переменных по величине и направлению силовых полях.

### Цель работы

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование устойчивости механического равновесия и конвективных течений неизотермических жидкостей, находящихся в переменных инерционных полях

и в условиях реальной невесомости орбитального космического полета, а также управляющего воздействия изменяющегося силового поля на состояние конвективной системы.

### **Научная новизна и значимость работы**

Научная новизна работы заключается в проведении экспериментов по реализации и исследованию вибрационной и параметрической конвекции, поэтапного перехода к хаотическому режиму гравитационной конвекции в простых системах, конвекции в невесомости, автоматического управления конвекцией. При этом впервые:

- экспериментально исследована конвективная неустойчивость подъемно-опускного течения в вертикальном слое жидкости в режиме развитого взаимодействия температурных волн, обнаружен переход к хаосу через последовательность нестационарных режимов;
- экспериментально исследованы устойчивость и надкритические течения в вертикальном слое при совместном действии статического гравитационного и вибрационного механизмов конвекции, обнаружены термо-вибрационная мода неустойчивости, а также стабилизирующие и хаотизирующие эффекты;
- экспериментально реализован эффект стабилизации статически неустойчивого механического равновесия горизонтального слоя неизотермической жидкости высокочастотными вертикальными вибрациями;
- экспериментально реализованы параметрические резонансные конвективные течения при модуляции поля тяжести инерционными ускорениями;
- предложена программа и проведено наземное сопровождение экспериментов с французскими приборами “ALICE-1” и “ALICE-2” по изучению процессов теплообмена в окрестности термоди-

намической критической точки во время полета орбитальной станции “Мир”. Исследована фоновая микрогравитационная обстановка и реализованы контролируемые микроускорения с помощью поступательных и качательных вибраций, а также вращения станции. Обнаружены и описаны осредненное вибро-конвективное движение, низкочастотные инерционные конвективные колебания и течения, вызванные квазистатической компонентой микроускорений. Изучено влияние этой компоненты на структуру вибро-конвективных движений;

- проведено наземное моделирование течений применительно к условиям реальной невесомости и воспроизведены эффекты, полученные в орбитальных опытах;
- экспериментально реализован эффект динамической стабилизации механического равновесия в термосифоне методом автоматического управления с обратной связью;
- экспериментально исследовано управление устойчивостью течений в прямоугольном термосифоне и подавление хаоса с помощью отрицательной обратной связи;
- экспериментально определено влияние осложняющих факторов - шума в сигнале, поступающего на вход управляющей подсистемы, и запаздывания управляющего воздействия на достижение цели динамического управления. Обнаружено, что шум и запаздывание вызывают снижение эффективности управления и могут сделать его цель недоступной, генерируя колебательный режим конвективной циркуляции. С другой стороны, переменное время запаздывания позволяет осуществлять интеллектуальный режим управления с повышенной эффективностью.

**Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается использованием апробированных современных методов измерения и обработки данных, детальной проработкой методических вопросов, подробным**

анализом погрешностей и хорошей воспроизводимостью результатов. В тех задачах, для которых имеются теоретические результаты, наблюдается их согласие с экспериментальными данными автора.

### **Практическая ценность и использование результатов работы**

Полученные в работе экспериментальные результаты имеют фундаментальное значение для понимания общих закономерностей термодинамических систем в переменных силовых полях, условий возникновения и пространственно-временной эволюции гравитационно-конвективных течений при воздействии переменных инерционных ускорений, таких как в орбитальном космическом полете. Большая часть задач, изучаемых в работе, непосредственно связана с подготовкой экспериментов по гидромеханике невесомости и их наземной проработкой, а также с лабораторным моделированием конвекции в технологических процессах и теплообменных устройствах, в задачах физики атмосферы и океана.

Результаты экспериментальных исследований использовались в Институте проблем механики РАН, Институте прикладной математики РАН, Институте механики сплошных сред УрО РАН, Ракетно-космической корпорации “Энергия”, Центральном научно-исследовательском институте машиностроения, Международном научно-техническом центре полезной нагрузки космических объектов, Пермском государственном университете, Пермском государственном педагогическом университете. На основании результатов диссертации составлены заявка и техническое задание на космический эксперимент “Управление режимами теплообмена в условиях микрогравитации” на Российском сегменте Международной космической станции (шифр “Конкон” – контроль конвекции), одобренные Советом по космосу РАН в 2011 году. Результаты диссертации использовались при создании программы экспериментов “Крит” и разработке прибора по изучению теплообменных процессов в гравитационно-чувствительных околокритических средах на Российском сегменте Международной космической станции.

Работа проводилась по проектам и грантам "Университеты России" (1992), Международного научного фонда MF 5000 (1993), Европейского Союза INTAS-94-529, Миннауки РФ (1995), Поддержки ведущих научных школ 96-15-96084, 00-15-00112, Федеральной целевой программы "Интеграция" № 97-03, 1997-98, Международного научно-технического центра полезной нагрузки космических объектов (1998), Минобразования РФ (1992, 1994, 1996, 2000), Российского фонда фундаментальных исследований 01-02-96479, 04-02-96038, 06-08-00754-а (2001-2007).

Материалы диссертации используются в лекциях и лабораторных практикумах "Гидромеханика невесомости", "Динамика жидкостей с особыми свойствами" и "Конвекция в замкнутых объемах" для студентов 3 – 5 курсов физического факультета по специализациям "Физическая гидродинамика" и "Теоретическая физика", а также "Физика атмосферы и океана" для студентов специализации "Метеорология" 3 курса географического факультета Пермского государственного университета.

**Автор защищает:**

1. Результаты экспериментального исследования конвективной неустойчивости подъемно-опускного течения в вертикальном слое обогреваемой сбоку жидкости в режиме развитого взаимодействия температурных волн и последовательности нестационарных надкритических течений;
2. результаты исследования устойчивости и надкритических режимов в вертикальном слое при совместном действии статического гравитационного и вибрационного механизмов конвекции;
3. эффект стабилизации статически неустойчивого механического равновесия неизотермической жидкости в горизонтальном слое посредством высокочастотных вертикальных вибраций;
4. обнаружение параметрического резонанса в горизонтальном слое жидкости при модуляции поля тяжести инерционными ускорениями;

5. обнаружение и описание влияния термо-инерционного и термо-гравитационного механизмов конвекции на теплообмен от точечного источника тепла в околокритической среде, находящейся в микрогравитационной обстановке орбитального полета;
6. методику и результаты наземного моделирования течений, существующих в реальной невесомости при орбитальном полете;
7. эффект динамической стабилизации механического равновесия в термосифоне методом автоматического управления с обратной связью;
8. результаты управления устойчивостью течений в прямоугольном термосифоне и подавление хаоса с помощью отрицательной обратной связи.

### **Апробация работы**

Все основные результаты диссертации опубликованы в 69 печатных работах, в том числе в 10 журнальных статьях (из них 8 – список ВАК), в 6 статьях в периодических университетских сборниках, в 7 статьях в трудах и материалах международных конференций, в 14 статьях в университетских и академических сборниках и 32 тезисах.

Результаты работы докладывались на Ith International Symposium “Physical Problems of Ecology” (Izhevsk, 1992); 8th European Symposium on Materials and Fluid Sciences in Microgravity (Brussels, 1992); International Workshop “Non-Gravitational Mechanisms of Convection and Heat/Mass Transfer” (Zvenigorod, 1994); 1, 11, 12, 13 Международных зимних школах по механике сплошных сред, УрО РАН (Пермь, 1995, 1997, 1999, 2003); Xth European and VIth Russian Symposium on Physical Sciences in Microgravity (St. Peterburg, 1997); Международных симпозиумах по устойчивости течений гомогенных и гетерогенных жидкостей (Новосибирск, 1996, 1998); 1 и 2 Российских конференциях по космическому материаловедению (Калуга, 1999, 2003); VII Российском симпозиуме “Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем” (Москва,



2000); International Symposium “International Scientific Cooperation onboard Mir” (Lyon, 2001); Международных школах “Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости”, МГУ (Москва, 2000, 2002); 41st AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit (Reno, 2003); 34th COSPAR Scientific Assembly the Second World Space Congress (Houston, 2002); International Conference on Advanced Problem in Thermal Convection (Perm, 2003); 35th Committee on Space Research (COSPAR) Scientific Assembly (Paris, 2004); 2nd International Symposium on Physical Sciences in Space held jointly with Spacebound 2004 (Toronto, 2004); ASME Summer Heat Transfer Conference (San-Francisco, 2005); 5 Международном аэрокосмическом конгрессе IAC'06 (Москва, 2006); International Symposium “Science on the European Soyuz Missions and the International Space Station (2001-2005)” (Toledo, 2006), а также на Пермском городском гидродинамическом семинаре (1998, 2004, 2011), семинаре “Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы” ИПМех РАН (2002, 2009), семинарах ИТ СО РАН (1998), ИМСС УрО РАН (1996), кафедры теплообмена МЭИ (2009).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из 6 глав и заключения и содержит 229 страниц текста, 122 рисунка и список литературы, включающий публикации автора по теме диссертации (72 наименования) и цитированную литературу (222 наименования).

### **Вклад автора**

Во всех вошедших в диссертацию экспериментальных исследованиях автор принимал непосредственное участие в постановке задач, конструировал вибростенды и конвективные ячейки, проводил или руководил проведением экспериментов. Обработка и анализ экспериментальных данных осуществлялись либо автором, либо при его непосредственном участии.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** носит вводный характер, где описывается, что диссертационная работа относится к интенсивно развивающейся области исследований, проводимых с целью изучения конвективных процессов в нестационарных условиях, связанных с изменением по величине или направлению силового поля.

Актуальность темы исследований обосновывается тем, что явления такого круга широко реализуются в природных процессах и многих отраслях народного хозяйства, в частности, при развитии космических технологий.

**Вторая глава** содержит обзор современного состояния исследований, обсуждение методики экспериментов и результаты опытов по воздействию переменных инерционных ускорений на устойчивость конвективных течений в вертикальном слое жидкости (керосин, число Прандтля  $Pr = 26$ , относительная высота 50 и 75 калибров), обогреваемом с широкой стороны.

Основные результаты приведены на рис. 1 в виде карты режимов движения в плоскости управляющих параметров задачи: число Рэлея  $Ra_g$  и его вибрационный аналог  $Ra_v$ .

В области “А” существует устойчивое подъемно-опускное течение. Горизонтальная линия 1 соответствует порогу возбуждения пространственного колебательного режима термогравитационной природы, который существует в области параметров “В”. Экспериментальные данные обозначены точками и образуют границу  $Ra_g = (5.1 \pm 0.3) \cdot 10^4$ . Теоретическое значение<sup>1</sup>  $Ra_g^* = 5.3 \cdot 10^4$  показано на карте режимов сплошной горизонтальной линией. Вибрации не оказывают влияния на эту границу. Течение представляет собой стоячие колебания, при которых интенсивность соседних продольных горизонтальных вихрей периодически меняется в противофазе.

---

<sup>1</sup> Bratsun D.A., Zyuzgin A.V., Putin G.F. Nonlinear dynamics and pattern formation in a vertical fluid layer heated from the side // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2003. Vol. 24. № 6. P. 835–852.

В области параметров “С” течение теряет устойчивость по отношению к трехмерным возмущениям. В отсутствие вибраций численные расчеты конвекции<sup>2</sup> дают критическое значение  $Ra_g^{**} = 5.5 \cdot 10^4$ . В эксперименте пороговая величина составила  $Ra_g^{**} = (5.9 \pm 0.3) \cdot 10^4$ . Горизонтальные вихри испытывают изгибы вдоль своей оси (зигзаговая неустойчивость). Дальнейший рост  $Ra_g$  ведет к усилению трехмерных эффектов, изгиб вихрей увеличивается, порождая усиление выбросов из середины слоя в местах, периодически расположенных вдоль осей вихрей (область параметров “D”).

В области “E” карты ( $Ra_g^{***} > (6.9 \pm 0.6) \cdot 10^4$ ) интенсивность выбросов жидкости из середины слоя нарастает, что приводит к их объединению в вер-

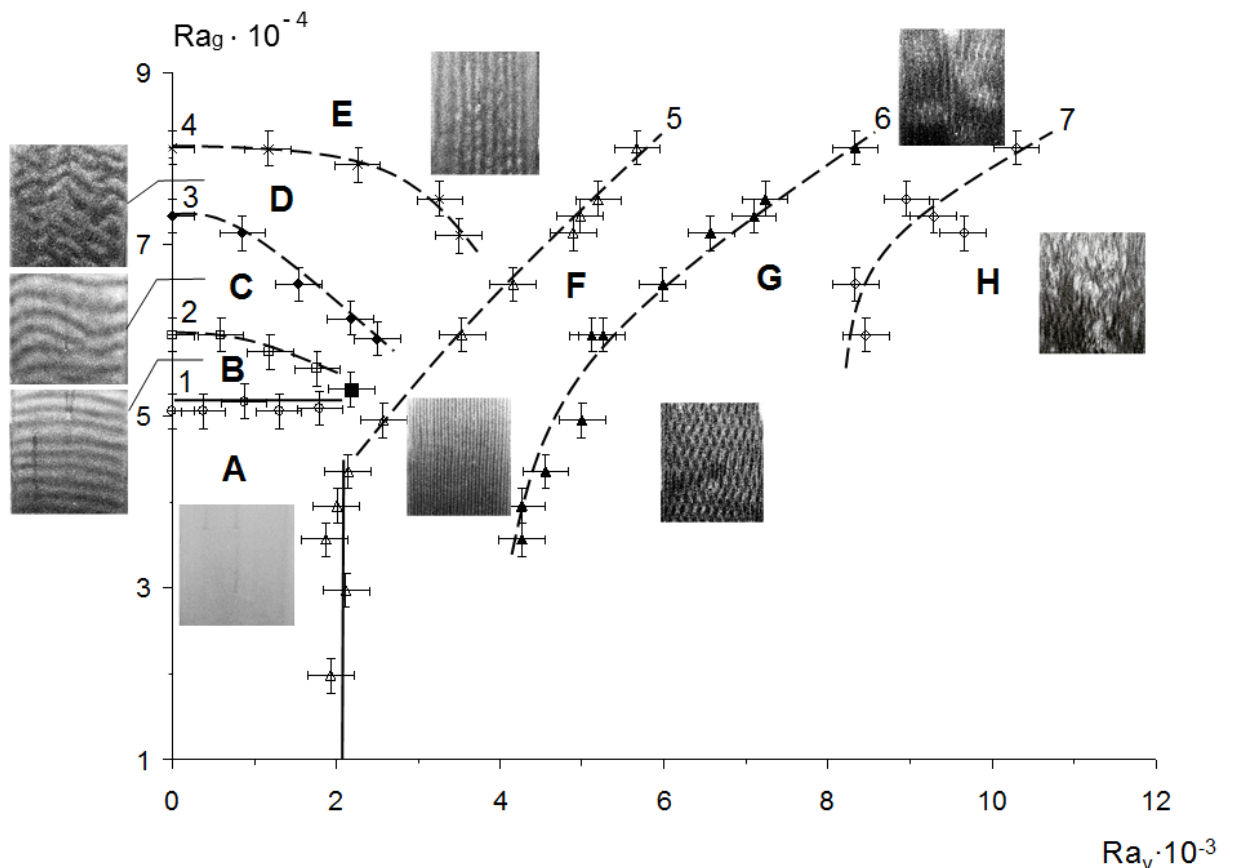


Рис. 1. Карта режимов конвекции в вертикальном слое жидкости при высокочастотных, горизонтальных продольных вибрациях, фотосъемка выполнена фронтально, через прозрачный теплообменник

<sup>2</sup> Nonlinear dynamics and pattern formation... P. 835–852.

тикальные спиралевидные структуры, периодически расположенные вдоль слоя. Движение в соседних струях осуществляется во встречных направлениях. При этом вертикальные структуры не являются стационарными и совершают незначительные колебания вдоль своих осей.

Граничная линия 5 карты отделяет область существования термогравитационных течений (“А” – “Е”) от области параметров “F”, в которой термо-вибрационный механизм неустойчивости вызывает появление виброконвективного режима. Вертикальная часть линии 5 соответствует порогу возбуждения вибрационной конвекции на фоне невозмущенного подъемно-опускного течения. Экспериментальные данные, обозначенные точками, в области низких значений  $Ra_g$  образуют прямую граничную линию  $Ra_v = (2.1 \pm 0.4) \cdot 10^3$  и в пределах погрешности измерений совпадают с теоретическим значением<sup>3</sup>  $Ra_v = 2129$ , изображенным сплошной линией. В области надкритических величин  $Ra_g$  пороговые значения  $Ra_v$  меняются. Здесь они уже не являются постоянными и нарастают по мере увеличения  $Ra_g$ .

Конвективное движение в области параметров “F” представляет собой суперпозицию подъемно-опускного течения и системы стационарных вертикальных валов вибрационной природы. Оси вибрационных валов параллельны между собой и перпендикулярны направлению вибраций.

В области параметров “G” карты режимов структура конвективного движения зависит от значения  $Ra_g$ . В области малых (подкритических) чисел  $Ra_g$  в окрестности полувисоты слоя возникает ромбовидный квазистационарный режим. В верхней части области “G” при высоких (надкритических) значениях  $Ra_g \geq 5.1 \cdot 10^4$  на фоне ромбовидных структур, искажая их и делая нестационарными, проявляются горизонтально ориентированные пульсирующие валы обусловленные неустойчивостью подъемно-опускной циркуля-

---

<sup>3</sup> Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. М.: Наука, 1989. 320 с.

ции термо-гравитационной природы. По-видимому, вибрационные валики, сами испытывая зигзаговую неустойчивость, уже не могут подавить нестационарные термо-гравитационные течения, как в области параметров “F”.

В области “H” высоких значений параметров  $Ra_v$  и  $Ra_g$  увеличение интенсивности вибрационного воздействия привело к разрушению пространственной упорядоченности и возникновению нестационарной конвекции. Вертикальные вибрационные валики испытывают хаотические изгибы и разрывы вдоль оси вращения. Линия, огибающая построенный в логарифмическом масштабе спектр пульсаций температуры (измеренных термопарой на полувысоте слоя), имеет прямой участок с наклоном, близким к  $-5/3$  (закон Колмогорова).

Таким образом, из рис. 1 видно, что низкоинтенсивные вибрации ( $Ra_v < 2.1 \cdot 10^3$ ) понижают порог устойчивости нестационарных режимов термо-гравитационной природы. Подобный результат в данной главе получен и для вертикальных продольных вибраций слоя жидкости. Более интенсивное вибрационное воздействие вызывает термо-вибрационную конвекцию, нарушающую устойчивость подъемно-опускной циркуляции.

**В третьей главе** содержится обзор современного состояния исследова-

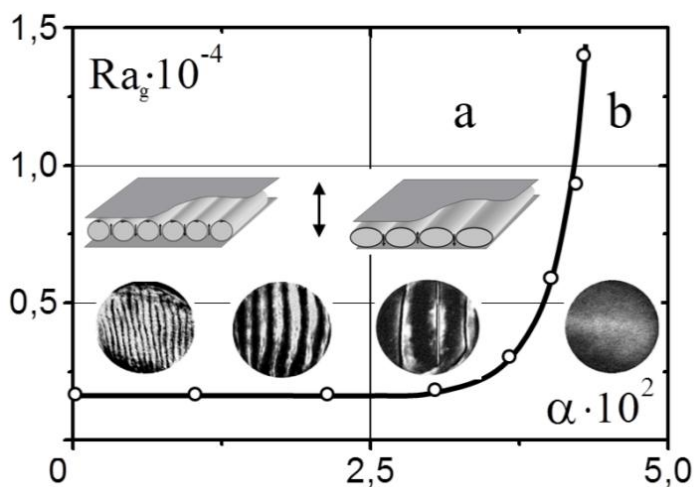


Рис. 2. Карта конвективных режимов в горизонтальном слое при подогреве снизу и поперечных вибрациях

ний, описание методики вибрационных экспериментов и изучается устойчивость механического равновесия горизонтального слоя неоднородно нагретой жидкости под воздействием переменных инерционных ускорений, ориентированных вертикально. Показано стабилизирующее действие вибраций на

рэлеевскую конвекцию и, наоборот, обнаружен эффект возбуждения параметрического резонансного течения. Основные результаты для подогреваемого снизу слоя этанола приведены на карте режимов (рис. 2) в плоскости управляющих параметров: число Рэлея – безразмерная вибрационная скорость  $\alpha$ .

В области “а” карты, ограниченной справа линией, наблюдались конвективные валики рэлеевского типа. Пороговая кривая имеет вертикальную асимптоту  $\alpha^* = (4.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}$ . Эволюция конвективных структур при увеличении вибрационного воздействия (наращивании  $\alpha$ ) происходила следующим образом. В статическом поле существовала структура рэлеевских валиков. В промежутке между соседними темными линиями располагаются два вала; их

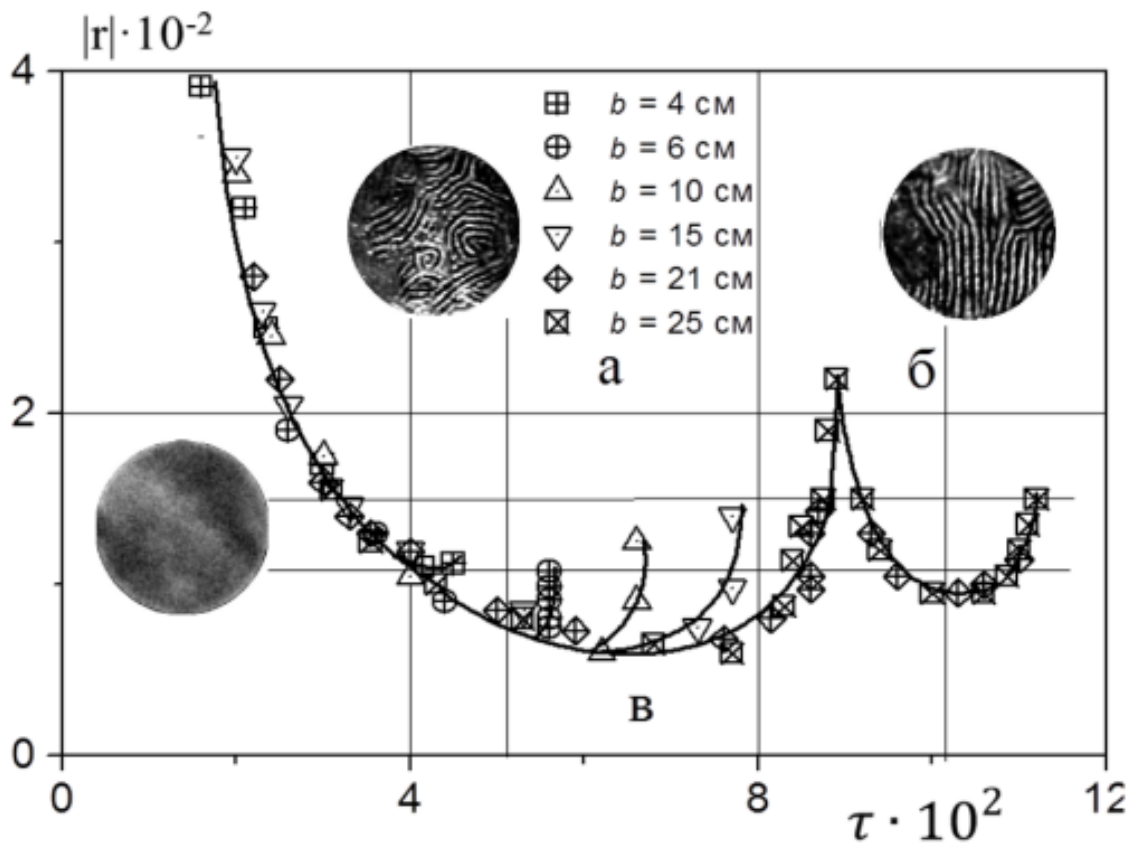


Рис. 3. Карта режимов параметрической конвекции в нагреваемом сверху слое гептана при вертикальной модуляции поля тяжести,  $b$ -амплитуда вибраций, фотоизображения – вид сверху через прозрачный теплообменник

поперечный горизонтальный размер в отсутствие вибраций примерно равен толщине полости. Модуляция поля тяжести приводит к увеличению этого размера. В левой окрестности пороговой кривой наблюдалось двухваликовое движение с пространственным периодом, возросшим почти на порядок. Справа от границы – в области “b” карты – статически неустойчивое механическое равновесие приобретало устойчивость.

В областях “a” и “b” карты изложенные результаты согласуются с теорией<sup>4</sup>; однако экспериментальное значение вибрационной скорости  $\alpha^*$ , при которой происходит полная стабилизация, превосходит теоретическое на 20 %.

Результаты изучения дестабилизирующего влияния вибраций на статически абсолютно устойчивое механическое равновесие нагреваемого сверху слоя гептана и возбуждение параметрической резонансной конвекции представлены на рис. 3 в виде карты режимов в плоскости параметров: безразмерная амплитуда модуляции  $r$  подъемной силы Архимеда – безразмерный период колебаний инерционного ускорения  $\tau$ . Экспериментальные точки и проведенные через них кривые описывают границы резонансных областей при различных амплитудах вибраций  $b$ . Области “a” и “б” рисунка, располагающиеся выше этих кривых и имеющие характерный вид параметрических мешков, отвечают динамическому возбуждению конвекции. В области “a” существуют “полуцелые”, а в зоне “б” “целые” колебания<sup>5</sup>. При значениях параметров, лежащих ниже пороговых кривых (область “в”), конвективное движение в жидкости отсутствует.

**В главе 4** приведен обзор современного состояния исследований, методика экспериментов и представлены результаты опытов на оборудовании “ALICE-1” и “ALICE-2” по изучению течений и теплопереноса в околоскри-

---

<sup>4</sup> Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.

<sup>5</sup> Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. 392 с.

тических средах в реальной невесомости или при воздействии искусственно создаваемых ускорений.

Рассмотрено влияние термо-вибрационного и термо-гравитационного (инерционного) механизмов конвекции на поведение температурной неоднородности, создаваемой в дальней окрестности критической точки локальным источником тепла. Оценки, выполненные для условий эксперимента, показывают (см. рис. 4), что при реализованных умеренных отклонениях температуры среды  $T$  от критического значения  $T_c$  ( $T - T_c = (3 \cdot 10^{-2} \div 15)$  К) критерий подобия  $Ra_g$  и его вибрационный аналог  $Ra_v$  могут достигать и значительно превосходить значение  $10^3$ , характерное для развития интенсивных конвективных движений.

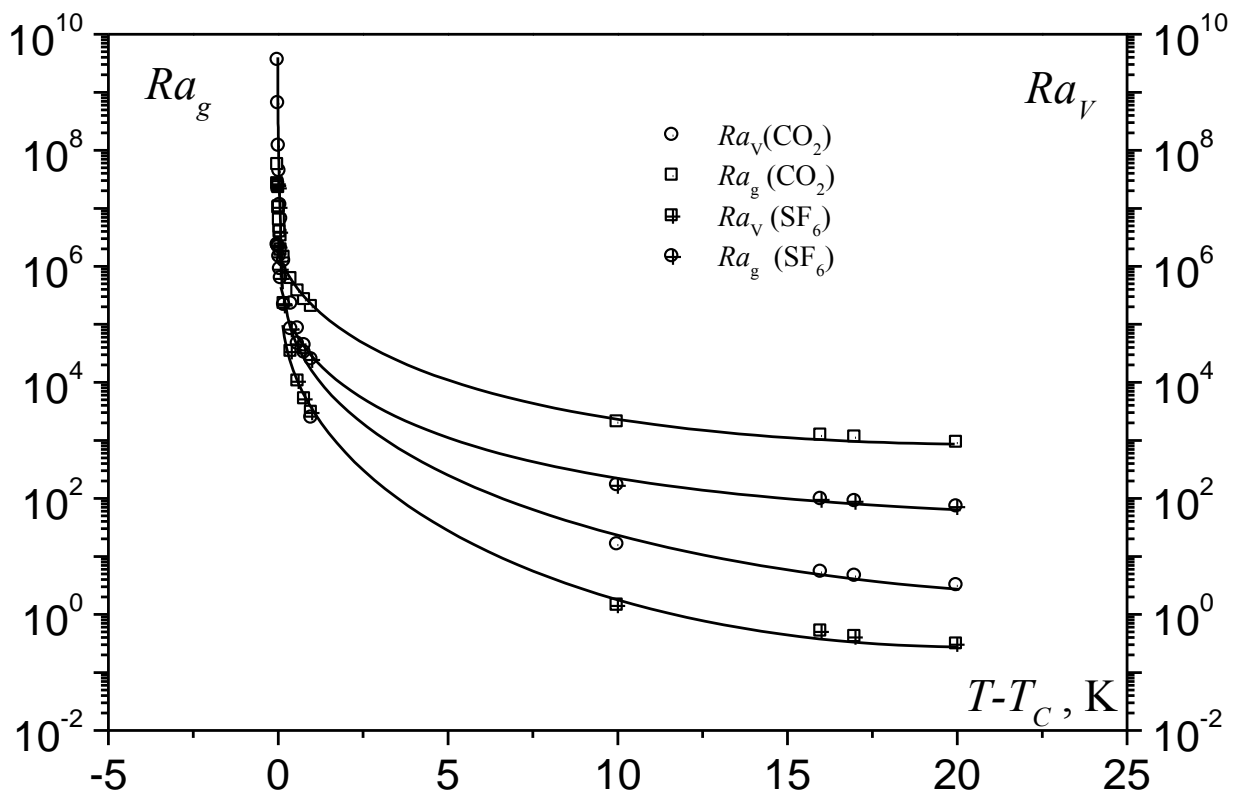


Рис. 4. Зависимость критериев подобия  $Ra_g$  и  $Ra_v$  от удаления от критической точки  $T - T_c$  для использовавшихся рабочих сред – двуокиси углерода  $\text{CO}_2$  и шестифтористой серы  $\text{SF}_6$



Обнаружено, что при  $T - T_c \leq 1$  К высокочастотные  $f = 1.7, 2.8, 5.0$  Гц, низкочастотные  $f = 0.3, 0.5, 0.8$  Гц и квазистатические микроускорения вызывают соответственно термо-вибрационные, термо-инерционные и термо-гравитационные конвективные движения, существенно искажающие симметрию теплопроводного режима.

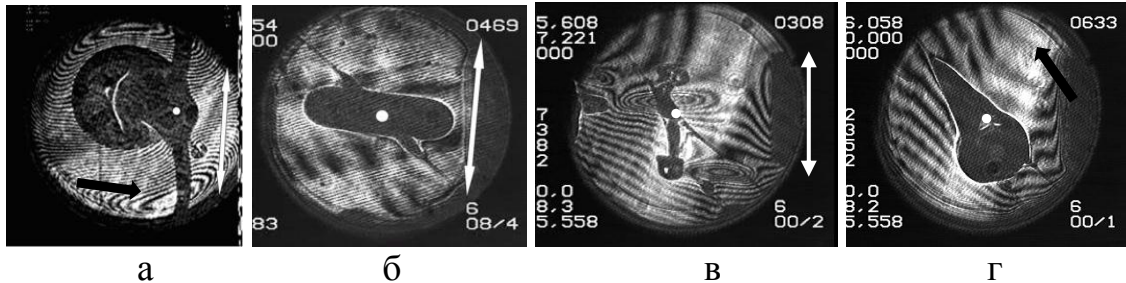


Рис. 5. Изображения теневых картин, обусловленных температурной зависимостью показателя преломления среды, распространения области тепловой неоднородности в рабочих ячейках приборов “Alice-1, 2” в условиях фоновых (а) и контролируемых (б, в, г) микроускорений при орбитальном полете ОК “Мир”; а – термо-вибрационный режим, 39 с после подачи теплового импульса,  $T - T_c = 0.5$  К,  $g = 9.2 \cdot 10^{-5} g_0$ ,  $b \omega^2 / g_0 = 10^{-3}$ ,  $f = 5$  Гц; б – термо-вибрационный режим, кадр выполнен через 65 с,  $T - T_c = 0.4$  К,  $b \omega^2 / g_0 = 10^{-1}$ ,  $f = 2.8$  Гц,  $Ra_v \sim 10^4$ ; в – термо-инерционный режим, 5 с,  $T - T_c = 0.05$  К,  $f = 0.3$  Гц,  $Ra_g = 3.3 \cdot 10^5$ , г – конвективный теплоперенос при равномерном вращении ОК “Мир”, средняя угловая скорость  $\omega_{cp} = 0,0034 c^{-1}$ ,  $g = 4.7 \cdot 10^{-4} g_0$ , 77 с,  $T - T_c = 0.5$  К; черными стрелками указано направление проекции квазистатической компоненты микроускорений  $g$  на плоскость ячейки, белыми – ориентация наиболее сильно меняющейся компоненты высокочастотных (а, б) или низкочастотных (в) микроускорений, белыми кружками – положение нагревателя,  $g_0$  - ускорение поля тяжести Земли

На фрагменте “а” рис. 5 изображена теневая картина несимметричного, относительно нагревателя и проводов его подвеса, распространения области оптической неоднородности, обусловленного термо-вибрационным механизмом. Искажение симметричности фронта теневой зоны развивалось перпендикулярно ориентации наиболее сильно меняющейся компоненты микроускорений, а его направление было противоположно проекции вектора ква-

зистатического микроускорения, восстановленного по телеметрической информации о полете ОК “Мир” по методике<sup>6</sup>.

На фрагменте “б” иллюстрируется также термо-вибрационный режим (наиболее интенсивно тепло распространяется в перпендикулярном вибрациям направлении). Поскольку относительное вибрационное ускорение на два порядка превышает значение в случае “а”, то квазистатическая компонента микроускорений не влияет на структуру движения. Фрагмент “в” соответствует термо-инерционному конвективному режиму в виде термиков, меняющих направление движения два раза за период низкочастотного воздействия. На кадре “г” иллюстрируется конвективное искажение тепловой неоднородности, вызванное равномерным вращением ОК “Мир”. Изучены эволюция и пространственно-временные характеристики теплопроводных и конвективных режимов.

**В 5 главе** содержится описание методик и результатов наземного лабораторного моделирования теплообменных процессов в реальной невесомости. Изучалось влияние быстроменяющихся ускорений инерционной природы и квазистатической компоненты остаточных ускорений на структуры конвективных течений от точечного источника тепла или холода. Рассмотрим методику наземного моделирования тепломассообмена, обнаруженного в условиях реальной невесомости. Анализ микрогравитационной обстановки, выполненный по записям встроенного в приборы “Alice-1, 2” трехкомпонентного линейного микроакселерометра, показал, что одна из компонент высокочастотной составляющей ускорений на два и более порядка превышает другие. Тогда, в лабораторных условиях, высокочастотные микроускорения можно моделировать поступательными, линейно поляризованными вибрациями. В космических экспериментах центрально-симметричное распро-

---

<sup>6</sup> Сазонов В.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Стажков В.М., Бабкин Е.В. Определение квазистатической составляющей микроускорения на станции Мир // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 2. С. 136–147.

странение нагретой области обусловлено бесконвективным режимом теплопередачи. Влияние термо-вибрационного механизма нарушает такую симметрию. При наземном моделировании центрально-симметричный теплоперенос от нагревателя вызван естественной конвекцией термо-гравитационной природы. Вибрационные эффекты также приводят к нарушению симметрии. В областях, где градиент температуры и ось вибраций параллельны, имеет место стабилизация, а где перпендикулярны – дестабилизация конвективных движений. Таким образом, эллипсоидальное искажение центральной симметрии зоны, охваченной конвекцией, является естественной мерой интенсивности термо-вибрационной конвекции  $I = c/d$ . Здесь  $c$  – длина большой, а  $d$  – малой осей эллипса, вписанного в конвективную структуру. Квазистатическая компонента микроускорений моделировалась отклонением конвективной камеры от горизонтальной ориентации на угол  $\alpha = 2^\circ$ . Тогда проекция вектора  $g_{0x}$  на направление вдоль слоя жидкости  $x$  имела порядок величины  $g_{0x}/g_0 = 10^{-2}$ . Относительное вибрационное ускорение платформы достигало величины  $10^1$ . Различие между  $g_{0x}/g_0$  и  $b\omega^2/g_0$  имело тот же порядок, что и в моделируемых космических экспериментах.

На рис. 6 изображены характерные структуры конвективных потоков в

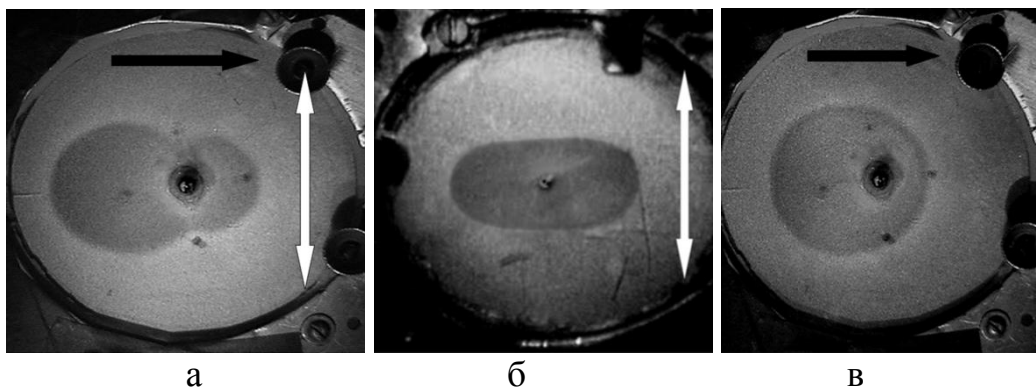


Рис. 6. Изображения конвективной камеры (вид сверху), области, охваченные конвекцией, имеют темный цвет; а – конвективная структура при вибрациях наклонного слоя жидкости, кадр выполнен через 100 с после начала нагрева,  $Ra_v = 1.1 \cdot 10^5$ ; б – продольные вибрации горизонтального слоя жидкости, кадр выполнен через 140 с,  $Ra_v = 9.0 \cdot 10^4$ ; в – статический случай, наклон, кадр выполнен через 100 с после начала нагрева; черная стрелка показывает ориентацию  $g_{0x}$ , а белая – оси вибраций

плоском слое этанола в случаях высокочастотных вибраций “а” и статического положения “в” наклонной полости, а также горизонтальной ориентации вибрирующего слоя “б”.

Результаты исследования приведены на рис. 7 в виде карт режимов движения в плоскости координат  $I(Ra_v)$  для горизонтального “а” и наклонного “б” слоев жидкости. В области значений  $Ra_v < 3.2 \cdot 10^4$  форма области, охваченной конвекцией, имела центрально-симметричную относительно нагревателя форму. Такое движение жидкости вызвано термо-гравитационным механизмом конвекции. Однако когда величина  $Ra_v$  превышала значение  $(3.2 \pm 0.3) \cdot 10^4$ , термо-вибрационный механизм конвекции определял структуру движения, что хорошо согласуется с результатами орбитальных опытов ( $Ra_v \sim 10^4$ , см. рис. 4, 5). Наблюдается хорошее согласие и по скоростям и по структурам течений (фрагменты “б” рис. 5 и 6).

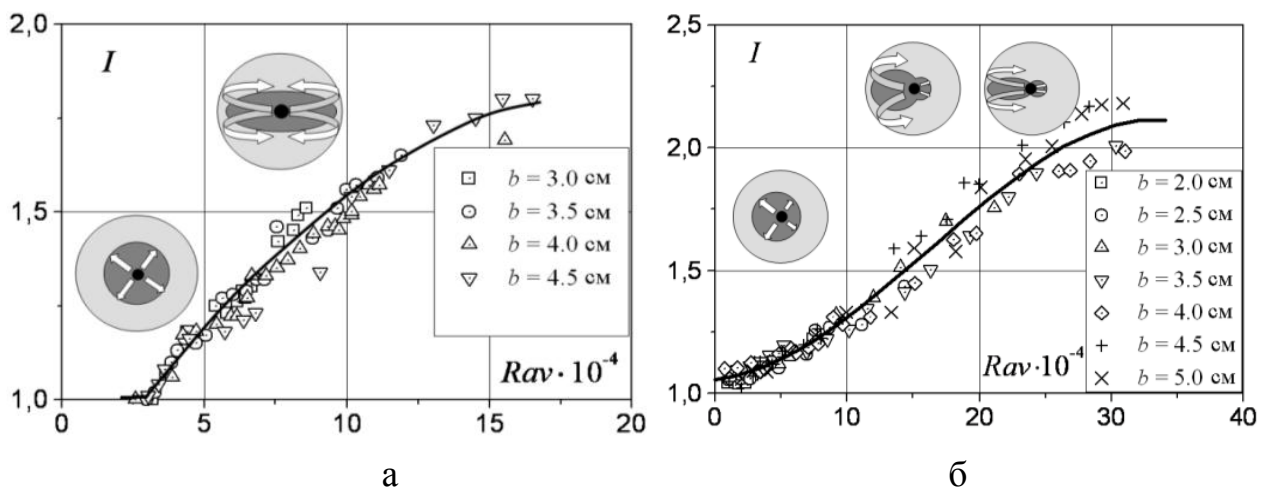


Рис. 7. Карты режимов движения в плоскости параметров  $I(Ra_v)$ ; а – горизонтальный слой, б – наклонный слой (моделирование квазистатической компоненты ускорения); на выносках схематически изображены режимы течений; стрелки указывают направление движения жидкости

В случае моделирования наклоном квазистатической компоненты микроускорений термо-вибрационный механизм конвекции также оказывает сильное влияние на структуру движения жидкости. Максимальная интенсификация тепло и массопереноса возникает в направлении, противоположном ориентации  $g_{0x}$  и перпендикулярном оси вибраций. Результаты также хорошо

согласуются (см. фрагменты “а” рис. 5 и 6). Отметим, что в статическом случае продольная компонента ускорения приводила, как в орбитальном эксперименте (см. фрагменты “Г” рис. 5 и “В” рис. 6), с учетом теплоотдачи от нити подвеса термистора, к дрейфу тепловой неоднородности как целого.

**В главе 6** приводится описание современного состояния исследований, методики эксперимента и рассматривается задача об автоматическом поддержании механического равновесия неоднородно нагретой жидкости, подавления конвективного движения и хаоса в конвективной петле с помощью отрицательной обратной связи. Равновесие стабилизируется с помощью управляющей подсистемы, которая реагирует на возникновение конвективного движения посредством малых изменений пространственной ориентации петли в поле тяжести. Необходимость управления вызвана тем, что в главах 4, 5 описано влияние квазистатической компоненты микроускорений на термо-гравитационную и термо-вибрационную конвекции, препятствующие проведению гравитационно-чувствительных технологических процессов на борту орбитальных комплексов.

Основные результаты представлены на рис. 8 в виде карты режимов движения в координатах надкритичность  $r$  – безразмерный коэффициент усиления обратной связи  $k_n$ . В широком диапазоне параметров получен эффект динамической стабилизации равновесия (область “В” карты режимов), которое без управления или при слабом управляющем воздействии неустойчиво (область “А”). Обнаружено, что чрезмерное усиление обратной связи возбуждает в системе колебания (область “С” карты режимов), причина которых кроется в запаздывании управляющей подсистемы корректировать состояние управляемой системы. Определено, что искусственно внесенное время запаздывания управляющего воздействия  $\tau$  снижает эффективность управления (см. линии 1-3 на карте режимов рис. 8). Показано, что добавление шума в сигнал, поступающий на вход управляющей подсистемы, также снижает эффективность управления и может сделать цель управления недостижимой. Изучены эффекты управления устойчивостью конвективных те-

чений и подавления динамического хаоса. Полученные экспериментальные результаты согласуются с теоретическими, так, сплошными линиями на карте режимов (рис. 8) обозначены результаты численного моделирования<sup>7</sup>.

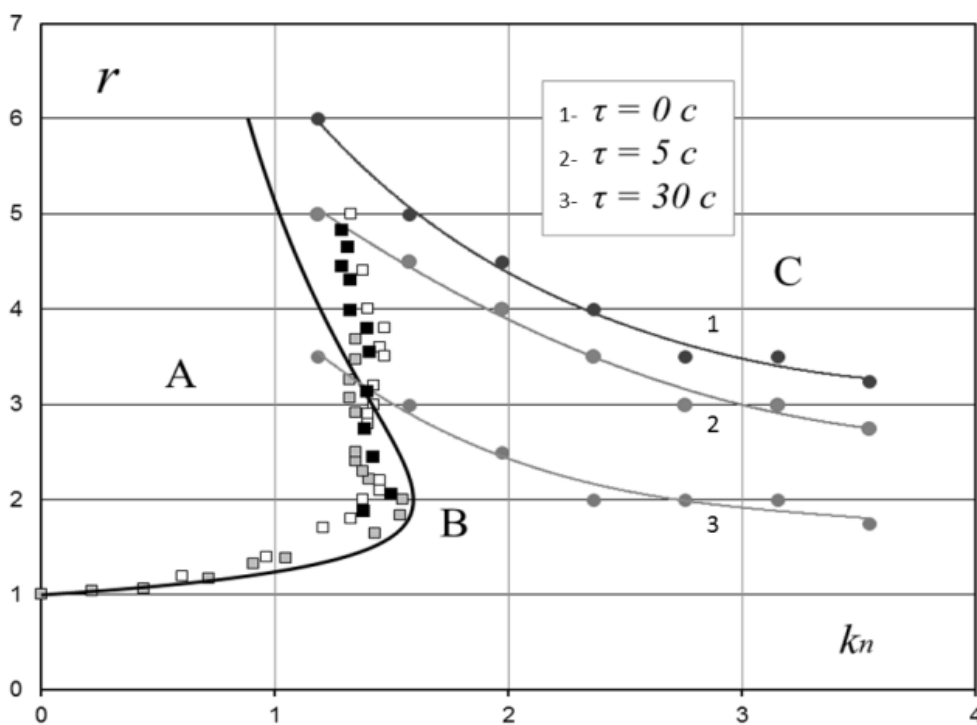


Рис. 8. Карта режимов конвекции в термосифоне

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследованы надкритические движения, возникающие в результате потери устойчивости подъемно-опускного течения в плоском вертикальном слое жидкости, обогреваемом с широкой боковой стороны. Подбором рабочей жидкости и увеличением относительной высоты слоя реализована ситуация, когда температурные волны, бегущие во встречных потоках, образуют стоячую волну, состоящую из пульсирующих продольных горизонтальных вихрей. Определены области стабильности,

<sup>7</sup> Брацун Д.А., Зюзгин А.В., Половинкин К.В., Путин Г.Ф. Об активном управлении равновесием жидкости в термосифоне // Письма в журнал технической физики. 2008. Т. 34. С. 36-42.

зигзаговой неустойчивости и распада этих вихрей на слабоупорядоченную “шахматную” структуру. Обнаружено объединение элементов такой структуры и их выстраивание подъемно-опускным течением в вертикальные вихревые струи, а также разрушение этих струй, связанное с хаотизацией течения.

2. В опытах с вертикальным слоем жидкости, совершающим, как целое, высокочастотные линейные продольные перемещения, реализован механизм термо-вибрационной конвекции. Изучены устойчивость надкритических режимов, эволюция их структуры и теплоперенос при совместном действии гравитационного и вибрационного механизмов. Экстраполяцией получены характеристики вибрационной тепловой конвекции в невесомости. Показано дестабилизирующее влияние переменных инерционных ускорений на устойчивость конвективных течений при перпендикулярной ориентации градиента температуры и направления вибраций.
3. Изучена тепловая конвекция в горизонтальном слое жидкости при поперечных переменных инерционных ускорениях. Реализованы параметрическое резонансное возбуждение конвекции при нагреве слоя сверху и динамическая стабилизация статически неустойчивых состояний при подогреве снизу.
4. Проведены эксперименты с французской аппаратурой “ALICE – 1, 2”, находившейся на орбитальной станции “Мир”, по изучению теплообмена в неизотермической жидкости, находящейся в окрестности термодинамической критической точки. Обнаружено, что переменные инерционные и остаточные квазистатические микроускорения могут вызывать заметные движения термо-вибрационного и термо-гравитационного типов.
5. Разработаны кюветы и вибростенды для наземного моделирования конвекции, существующей в условиях микрогравитации на космических аппаратах. Выполнено лабораторное моделирование термо-

конвективных процессов в этих конвективных камерах применительно к условиям орбитального полета, в результате которого воспроизведены основные эффекты, наблюдавшиеся в космических опытах.

6. Экспериментально реализованы эффекты динамической стабилизации механического равновесия, устойчивости течений и подавления хаоса в термосифоне методом автоматического управления с обратной связью при помощи переменного по направлению силового поля.
7. Экспериментально изучена эффективность динамического управления при наличии осложняющих факторов – шума и запаздывания управляющего воздействия. Обнаружено, что эти причины могут сделать недоступной цель управления, генерируя колебательный режим конвекции. С другой стороны переменное время запаздывания позволяет осуществлять интеллектуальный режим управления с повышенной эффективностью.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Зюзгин А.В., Миклин А.В., Никонов Д.И., Шишкин С.В. Исследование пространственных характеристик надкритических конвективных течений в вертикальном слое жидкости // В кн. Физика конденсированного состояния вещества. Пермь : ПермГУ, 1996. С. 23–33.
2. Гордеев А.А., Зюзгин А.В., Линевиц М.А., Трушникова М.С., Шилков А.В. Динамическое управление конвективной устойчивостью // В кн. Физика конденсированного состояния вещества. Пермь : ПермГУ, 1996. С. 34–41.
3. Заварыкин М. П., Зюзгин А. В., Путин Г. Ф. Экспериментальное исследование параметрической конвекции в переменном инерционном поле // Материалы Международного симпозиума “Устойчивость течений гомогенных и гетерогенных жидкостей”. Новосибирск. 1996. С. 40–41.



4. Putin G.F., Zyuzgin A.V. Experimental realization of dynamic control of convective stability // Proceedings of Joint Xth European and VIth Russian Symposium on Physical Sciences in Microgravity. St. Petersburg. 1997. Vol. 1. P. 262–265.
5. Зюзгин А.В., Брацун Д.А., Путин Г.Ф. Надкритические нестационарные движения в плоском вертикальном слое жидкости // Вестник Пермского Университета. Физика. Пермь : ПермГУ, 1997. Вып. 2. С. 59–76.
6. Avdeev S.V., Ivanov A.V., Kalmikov A.V, Gorbinov A.A., Nikitin S.A., Polezhaev V.I., Putin G.F., Zyuzgin A.V., Sazonov V.V., Beysens P., Garrabos Y., Zappoli B., Frohlich T. Experiments in the far and near critical fluid aboard “MIR” station with the use of “ALICE-1” instrument // Proceedings of Joint Xth European and VIth Russian Symposium on Physical Sciences in Microgravity. St. Peterburg. 1997. Vol. 1. P. 333–340.
7. Брацун Д.А., Зюзгин А.В., Путин Г.Ф. Об устойчивости конвективного движения в запыленной среде // Труды 5 Международного семинара по устойчивости течений гомогенных и гетерогенных жидкостей. Новосибирск. 1998. С. 28–36.
8. Зюзгин А.В., Путин Г.Ф. Устойчивость подъемно-опускного течения в вертикальном слое жидкости под воздействием высокочастотных вибраций // Сб. Вибрационные эффекты в гидродинамике. Пермь : ПермГУ, 1998. С. 130–141.
9. Брацун Д.А., Зюзгин А.В. Метод восстановления фазового портрета при экспериментальном исследовании тепловой конвекции в плоском вертикальном слое // Вестник Пермского университета. Физика. Пермь : ПермГУ, 1998. Вып. 4. С. 148–152.
10. Зюзгин А.В., Путин Г.Ф. Динамическое управление устойчивостью механического равновесия конвективной системы // Сб. Гидродинамика. Пермь : ПермГУ, 1998. Вып. 11. С. 123–139.
11. Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И., Путин Г.Ф., Соболева Е.Б. Исследование околокритической жидкости в условиях микрогравитации:

эксперименты на станции “Мир” и численное моделирование // Космонавтика и ракетостроение. 2000. № 19. С. 56–63.

12. Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И., Путин Г.Ф. О конвекции околокритической жидкости в условиях реальной невесомости на орбитальной станции “Мир” // Сб. Вибрационные эффекты в гидродинамике. Пермь : ПермГУ, 2000. Вып. 2. С. 100–121.
13. Заварыкин М.П., Зюзгин А.В., Путин Г.Ф. Экспериментальное исследование параметрической тепловой конвекции // Сб. Вибрационные эффекты в гидродинамике. Пермь : ПермГУ, 2000. Вып. 2. С. 80–99.
14. Polezhaev V.I., Emelianov V.M., Gorbunov A.A., Soboleva E.B., Putin G.F., Zyuzgin A.V., Sazonov V.V., Avdeev S., Ivanov A., Kalmykov A.V., Beyensens D., Garrabos Y., Frolich T., Zappoli B. Study of near-critical fluid on “MIR” using the ALICE-1 instrument // Proceedings of International Symposium “International Scientific Cooperation onboard Mir”. Lyon. France. 2001. P. 309–316.
- 15. Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И., Путин Г.Ф., Соболева Е.Б. Конвективные движения в околокритической жидкости в условиях реальной невесомости // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 2. С. 188–201.**
16. Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И., Путин Г.Ф. Тепловая конвекция сверхкритической жидкости в условиях реальной невесомости // Материалы Международной школы “Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости”. М.: МГУ, 2002. С. 143–157.
17. Полежаев В.И., Горбунов А.А., Емельянов В.М., Леднев А.К., Соболева Е.Б., Бабушкин И.А., Глухов А.Ф., Путин Г.Ф., Зильберман Е.А., Зюзгин А.В., Сазонов В.В., Иванов А.И., Калмыков А.В. Состояние исследований конвекции и процессов теплопереноса в околокритической жидкости и уточнение требований к аппаратуре для экспериментов, планируемых по проекту “Крит”, на российском сегменте международной космической станции // Аннотации докладов Научно-исследовательского семинара

“Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы”. М.: ИПМех РАН, 2002. С. 16–18.

18. Путин Г.Ф., Бабушкин И.А., Богатырев Г.П., Глухов А.Ф., Зильберман Е.А., Зюзгин А.В., Ишуткин А.И., Козлов А.А. Исследование тепловой конвекции в условиях микрогравитации на космических аппаратах // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований за 2001. Аннотационные отчеты. Сборник статей. Пермь : Пермский научный центр УрО РАН, 2002. С. 56–58.
19. Путин Г.Ф., Бабушкин И.А., Богатырев Г.П., Глухов А.Ф., Зильберман Е.А., Зюзгин А.В., Ишуткин А.И., Козлов А.А. Исследование тепловой конвекции в условиях микрогравитации на космических аппаратах // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований за 2002. Аннотационные отчеты. Сборник статей. Пермь : Пермский научный центр УрО РАН, 2003. С. 125–128.
20. **Zyuzgin A.V., Putin G.F., Ivanova N.G., Chudinov A.V., Ivanov A.I., Kalmykov A.V., Polezhaev V.I., Emelianov V.M. The heat convection of nearcritical fluid in the controlled microacceleration field under zero-gravity condition // Advances in Space Research. 2003. Vol. 32. № 2. P. 205–210.**
21. **Bratsun D.A., Zyuzgin A.V., Putin G.F. Nonlinear dynamics and pattern formation in a vertical fluid layer heated from the side // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2003. Vol.24. № 6. P. 835–852.**
22. **Polezhaev V.I., Gorbunov A.A., Emelianov V.M., Soboleva E.B., Sazonov V.V., Levtov V.L., Romanov V.V., Putin G.F., Zyuzgin A.V., Ivanov A.I. Convection and heat transfer in near-critical fluid: study on MIR and project of the experiment CRIT on ISS // AIAA. 2003. № 2003-1305. 11 p.**
23. Зюзгин А.В. Экспериментальное изучение процессов тепломассопереноса в околокритической жидкости, в условиях реальной невесомости на борту орбитального комплекса “МИР” // В кн. “Наука пермского края. Год

2003”. Издание администрации Пермской области и Пермского научного центра УрО РАН, 2004. С. 78–79.

- 24. Emelianov V.M., Lednev A.K., Polezhaev V.I., Ivanov A.I., Putin G.F., Zyuzgin A.V., Beysens D., Garrabos Y. Convection and heat transfer experiments in supercritical fluid under microgravity: from MIR to ISS // Microgravity Science and Technology Journal. 2005. Vol. XVI. Iss. 1 (2005). P. 164–169.**
25. Бабушкин И.А., Герцен Ю.П., Глухов А.Ф., Зюзгин А.В., Козлов А.А., Любимов Д.В., Любимова Т.П., Мельников П.А., Осокин А.Г., Путин Г.Ф. Исследование тепловой конвекции в переменных инерционных полях // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований, полученные за 2005 год. Аннотационные отчеты. Сборник статей. Пермь : Пермский научный центр УрО РАН, 2006. С. 118–121.
26. Зюзгин А.В., Иванов Н.А., Осокин А.Г., Путин Г.Ф. Термовибрационная и термогравитационная неустойчивость встречных потоков в вертикальной клиновидной щели // НОЦ “Неравновесные переходы в сплошных средах”. Итоги работы за 2005 год. 2006. С. 44–47.
- 27. Putin G.F., Zavarykin M.P., Zyuzgin A.V. Parametric resonance convection in a modulated gravity field // Heat Transfer ASME. IMECE 2005-80714. 2005. Part B. 8 P.**
28. Зюзгин А.В., Иванов Н.А., Осокин А.Г., Путин Г.Ф. Влияние вибраций на взаимодействие встречных потоков // НОЦ “Неравновесные переходы в сплошных средах”. Итоги работы за 2005 год. 2006. С. 39–40.
29. Зюзгин А.В., Иванов Н.А., Кузнецов С.М., Путин Г.Ф. Влияние вращения орбитального комплекса на теплообмен от точечного источника тепла в сверхкритической жидкости // НОЦ “Неравновесные переходы в сплошных средах”. Итоги работы за 2005 год. 2006. С. 51–54.
- 30. Зюзгин А.В., Путин Г.Ф., Харисов А.Ф. Наземное моделирование термо-вибрационной конвекции в реальной невесомости // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2007. № 3. С. 21–30.**

31. Зюзгин А.В., Иванов Н.А., Осокин А.Г., Путин Г.Ф. О взаимодействии термо-вибрационного и термо-гравитационного механизмов неустойчивости встречных потоков в вертикальной клиновидной щели // НОЦ “Неравновесные переходы в сплошных средах”. Итоги работы за 2006 год. 2007. С. 37–38.
32. Брацун Д.А., Давлетшина А.А., Зюзгин А.В., Павлов В.В., Путин Г.Ф. Управление с обратной связью конвективной устойчивостью жидкости методом малых изменений взаимной ориентации градиента температур и ускорения силы тяжести // НОЦ “Неравновесные переходы в сплошных средах”. Итоги работы за 2006 год. 2007. С. 39–42.
33. Polezhaev V.I., Emelyanov V.M., Gorbunov A.A., Putin G.F., Zyuzgin A.V., Ivanov A.I., Beysens D., Garrabos Y. Preparation for the VIP-CRIT space experiment on the ISS: an analysis of MIR experiments and ground-based studies of heat transfer and phase separation in near-critical fluid // Journal of The Japan Society of Microgravity Application. 2008. Vol. 25. № 3. P. 285–290.
- 34. Брацун Д.А., Зюзгин А.В., Половинкин К.В., Путин Г.Ф. Об активном управлении равновесием жидкости в термосифоне // Письма в журнал технической физики. 2008. Т. 34. С. 36–42.**
35. Брацун Д.А., Зюзгин А.В., Половинкин К.В., Путин Г.Ф. Управление с обратной связью конвективной устойчивостью жидкости методом малых изменений взаимной ориентации градиента температур и ускорения силы тяжести // Материалы Пятого аэрокосмического конгресса. Москва. 2008. С. 727–733.
36. Бабушкин И.А., Глухов А.Ф., Зюзгин А.В., Кузнецов С.М., Путин Г.Ф., Емельянов В.М., Полежаев В.И., Иванов А.И., Калмыков А. В., Максимова М.М. Конвективные датчики с газообразной и околокритической средой для обнаружения и измерения микроускорений в реальной невесомости: Эксперименты на станции МИР и проекты на МКС // Материалы Пятого аэрокосмического конгресса. Москва. 2008. С. 719–726.

37. Емельянов В.М., Горбунов А.А., Леднев А.К., Никитин С.А., Полежаев В.И., Соболева Е.Б., Иванов А.И., Путин Г.Ф., Зюзгин А.В. Эксперимент “Крит” и его подготовка на МКС. Результаты моделирования и анализ экспериментов на станции “Мир” // Аннотации докладов Научно-исследовательского семинара “Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы”. М.: ИПМех РАН, 2009. препринт. С. 41–46.
38. Зюзгин А.В. Использование конвективных датчиков для обнаружения и измерения микроускорений в реальной невесомости. Управление конвекцией в реальной невесомости. Наземное моделирование. Комплексные практикумы // Аннотации докладов Научно-исследовательского семинара “Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы”. М.: ИПМех РАН, 2009. препринт. С. 49–50.



**Зюзгин Алексей Викторович**

**Экспериментальное исследование тепловой конвекции в перемен-  
ных силовых полях**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

---

Подписано в печать                      Формат 60x84/16.

Бум.тип. N 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2.

Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 100 экз. Заказ

614600, Пермь, ул. Букирева, 15

Типография Пермского университета.

614600, Пермь, ул. Букирева