

А.В. Зюзгин

# ГИДРОМЕХАНИКА РЕАЛЬНОЙ НЕВЕСОМОСТИ

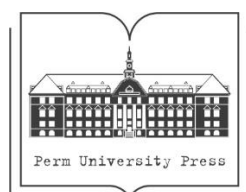


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. В. Зюзгин

# ГИДРОМЕХАНИКА РЕАЛЬНОЙ НЕВЕСОМОСТИ

*Допущено методическим советом  
Пермского государственного национального  
исследовательского университета в качестве  
учебного пособия для студентов, обучающихся  
по направлению подготовки магистров  
«Физика»*



Пермь 2023

УДК 532.5(075.8)  
ББК 22.253я73  
3981

**Зюзгин А. В.**

- 3981 Гидромеханика реальной невесомости [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. В. Зюзгин ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2023. – 4,42 Мб ; 88 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/zyuzgin-gidromekhanika-realnoj-nevesomosti.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-3978-6

Пособие предназначено для студентов магистратуры физфака ПГНИУ, изучающих курс «Гидромеханика невесомости», а также для специалистов, интересующихся данной проблематикой. В пособии описаны постановки задач приоритетных космических экспериментов по обнаружению и описанию термо-вибрационной и термоинерционной конвекций в жидкостях при орбитальном полете. Опыты проводились с околокритическими средами французского оборудования серии «ALICE» на орбитальной станции «Мир». Обсуждаются обработка и интерпретация их результатов. Кроме этого, приведена методика наземного лабораторного моделирования влияния микрогравитационной обстановки орбитального полета на гравитационно-чувствительные системы и обсуждаются результаты такого моделирования, воспроизводящие конвективные эффекты орбитальных экспериментов.

Устойчивый интерес к задачам этого круга вызван развитием космических технологий, поскольку вибрационные, 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 очень интенсивно и составляют содержание целого ряда научных журналов и серий международных конференций.

**УДК 532.5(075.8)**  
**ББК 22.253я73**

*Издается по решению ученого совета физического факультета  
Пермского государственного национального исследовательского университета*

*Рецензенты:* кафедра «Прикладная физика» ПНИПУ (зав. каф. д-р физ.-мат. наук **Д. А. Брацун**);  
декан математического факультета ПГГПУ, канд. пед. наук  
**А. Ю. Скорнякова**

ISBN 978-5-7944-3978-6

© ПГНИУ, 2023  
© Зюзгин А. В., 2023

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ТЕПЛООБМЕН В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА.....	8
1.1. Конвективные процессы в реальной невесомости.....	8
1.2. Описание оборудования и методик проведения экспериментов со сверхкритическими средами.....	12
1.3. Теплообмен при фоновых микроускорениях.....	27
1.4. Режимы теплообмена в высокочастотном микрогравитационном поле...30	
1.5. Теплообмен в околокритической жидкости под действием низкочастотных микроускорений.....	41
1.6. Совместное действие термовибрационного и термоинерционного механизмов конвекции.....	47
1.7. Влияние квазистатических микроускорений на теплообмен.....	50
2. НАЗЕМНОЕ ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ.....	55
2.1. Методика наземного моделирования конвекции в реальной невесомости.....	55
2.2. Результаты исследования теплообмена от точечного источника тепла или холода в поле переменных инерционных ускорений.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	70
БЛАГОДАРНОСТИ.....	71
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	72

## ВВЕДЕНИЕ

Начало изучению состояния невесомости было положено в трудах К.Э. Циолковского<sup>1</sup>, где рассматривались вопросы промышленного использования космоса. В дальнейшем стало принято рассматривать невесомость, возникающую при орбитальном полете, как ресурс космического аппарата и специфическую среду для технологических процессов в гравитационно-чувствительных системах<sup>2, 3</sup>.

Научные и технологические эксперименты по физике жидкостей, выращиванию кристаллов, измерению теплофизических свойств жидкостей и расплавов, выполненные в невесомости, свидетельствуют о значительном влиянии на эти процессы микрогравитационной обстановки, существующей на борту космических аппаратов<sup>4, 5, 6</sup>. Отмечается слабая повторяемость результатов космических экспериментов, проведенных на одном и том же оборудовании и в аналогичных условиях. Например, некоторые из кристаллов, выращенные в условиях орбитального полета, имеют большую неоднородность свойств, чем соответствующие кристаллы-аналоги, полученные на Земле<sup>7, 8, 9, 10</sup>. В связи с высокой гравитационной чувствительностью названных и многих других явлений, значительные усилия как отечественных, так и зарубежных исследователей были посвящены мониторингу динамических условий и определению допустимых уровней инерционных микроускорений для различных процессов на космических аппаратах<sup>11, 12, 13, 14</sup>.

По своему происхождению возмущающие ускорения на орбитальном комплексе (ОК) могут быть условно разделены на три вида/группы<sup>15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24</sup>.

Первую группу образуют квазистатические ускорения, имеющие частоту ниже 0.01 Гц. Общее определение микроускорения в некоторой точке, находящейся на расстоянии  $l$  от центра масс искусственного спутника в орбитальном космическом полёте, задается формулой:

$$\vec{n} = \dot{\vec{\omega}} \times \vec{l} + (\vec{\omega} \times \vec{l}) \times \vec{\omega} + \varepsilon \left( 3(\vec{e} \cdot \vec{l}) \vec{e} - \vec{l} \right) + \vec{n}_a, \quad (1)$$

где

$$\varepsilon = \frac{\mu}{L^3}, \quad \vec{e} = \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|}, \quad \vec{n}_a = c\rho_a |\vec{v}| \vec{v}.$$

В формуле  $\vec{\omega}$  – абсолютная угловая скорость спутника, точкой обозначено дифференцирование по времени  $t$ ,  $\vec{l}$  – радиус-вектор точки Р относительно центра масс спутника,  $\mu$  – гравитационный параметр Земли,  $\vec{L}$  – геоцентрический радиус-вектор центра масс спутника,  $v$  – скорость этого центра масс относительно поверхности Земли,  $\rho_a(L, t)$  – плотность атмосферы в точке, которую в данный момент времени пролетает спутник,  $c$  – баллистический коэффициент спутника. Первые два слагаемых в правой части (1) обусловлены вращательным движением спутника относительно центра масс, в частности, при управляющих воздействиях систем ориентации и вследствие прецессии под действием момента сил трения в неуправляемом полете. Третье слагаемое учитывает неоднородность гравитационного поля Земли в пределах космического аппарата, совершающего орбитальный полет (см. рис. 1)<sup>25</sup>, а четвертое описывает составляющую микроускорения, вызываемую аэродинамическим торможением.

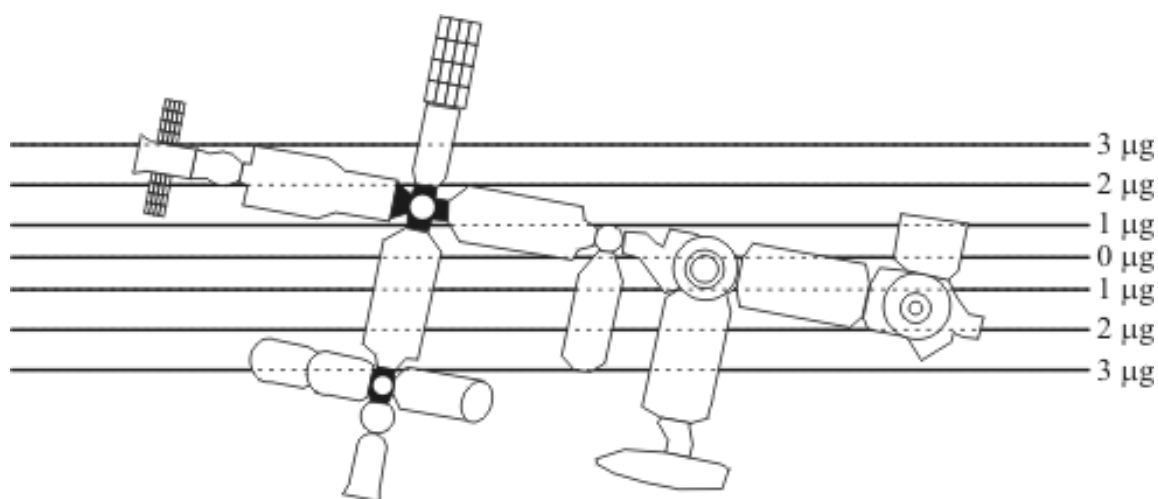


Рис. 1. Схема уровня остаточных ускорений, вызванных градиентом гравитационного поля на Международной космической станции

Ко второй группе – низкочастотной – относят микроускорения в диапазоне 0.01 – 1 Гц, создаваемые, например, колебаниями гибких навесных элементов конструкции, таких как солнечные батареи и антенны. Вибрационными (третий вид) принято называть возмущения с частотами, большими 1 Гц, вызванными функционированием различных систем, агрегатов и деятельностью экипажа. Например, на орбитальном комплексе «Мир» наиболее мощными, практически постоянно действующими источниками вибро-возмущений были бортовой компрессор системы кондиционирования влаги (периодические полигармонические возмущения с фундаментальными частотами до 50 Гц) и силовые гиродины (периодические полигармонические возмущения с фундаментальными частотами более 160 Гц). В низкочастотную область спектра возмущений существенную роль вносит активная жизнедеятельность экипажа, особенно при проведении физических упражнений. В условиях орбитального полета уровень микроускорений инерционной природы лежит в интервале  $10^{-3} \div 10^{-6} g_0$ , причем в диапазоне частот 0.1 ÷ 14 Гц сосредоточено до 95 % их мощности.

Ниже приведем строгие определения некоторых терминов, сделанных в диссертационной работе В.П. Яремчука <sup>26</sup>:

*Определение 1. Механикой гравитационно-чувствительных систем («microgravity science») назовем раздел науки, в котором изучается влияние остаточных ускорений на борту космического аппарата (КА) на широкий круг процессов, включающих в себя как явления, которые имеют место лишь в условиях микрогравитации, так и явления, которые происходят в земных условиях, однако в условиях орбитального полета проявляются более отчетливо.*

*Определение 2. Микроускорениями (остаточными ускорениями) назовем ускорения, которые неизбежно возникают в условиях космического полета, экспериментах на баинях сбрасывания или в самолетах, совершающих свободное падение. Причем эти ускорения могут иметь достаточно сложную природу и нестационарный характер, однако их модуль должен быть много меньше ускорения свободного падения на поверхности Земли.*

*Сами по себе микроускорения чаще всего подразделяют на две основные составляющие: квазистатическая составляющая микроускорений и вибрационная составляющая микроускорений (в англоязычной литературе принят термин g-jitter). Такое разделение имеет отнюдь не условный характер, а разделяет составляющие, которые различным образом влияют на гравитационно-чувствительные системы.*

Таким образом, в книге приведено описание приоритетных экспериментов по конвективным процессам жидкости в обсужденной микрогравитационной обстановке орбитального полета, т.е. реальной невесомости (1995 год, станция «Мир», прибор «ALICE-1») и вынужденных поступательных и качательных вибраций, а также при вращении корабля (1999-2000 годы, станция «Мир», прибор «ALICE-2»). Кроме этого, рассмотрены методы, пути преодоления «сложностей»<sup>27</sup>, и результаты наземного моделирования влияния микрогравитационной обстановки на гравитационно-чувствительную жидкостную систему. При этом получены структуры и эффекты, сходные с наблюдаемыми в орбитальных экспериментах.

# 1. ТЕПЛООБМЕН В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

В главе представлены результаты обработки и интерпретации данных экспериментов по изучению конвективных течений и теплопереноса в околокритических средах в реальной невесомости. Эксперименты проводились на ОК «Мир» с использованием французских установок «ALICE-1» и «ALICE-2». Рассмотрено влияние термовибрационного и термогравитационного (инерционного) механизмов конвекции на поведение температурной неоднородности, создаваемой в дальней окрестности критической точки локальным источником тепла. Исследования выполнены в условиях фоновой микрогравитационной обстановки, существовавшей на ОК «Мир», а также при воздействии искусственно создаваемых переменных инерционных ускорений.

Результаты опубликованы в работах <sup>28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62</sup>.

## 1.1. Конвективные процессы в реальной невесомости

В работах <sup>63,64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72</sup> на основании численного моделирования показывается, что возмущающие ускорения на орбитальных объектах достаточно высоки для того, чтобы создать в жидкой и газовой фазах течения, способные повлиять на распределения концентрации, температуры и иные характеристики процессов.

К выводу о возможности гравитационно-инерционных течений на космических аппаратах приводят также результаты наземного моделирования, при котором обеспечивается (насколько это возможно) одинаковая величина управляющих критериев подобия в лабораторных и натурных условиях <sup>73, 74</sup>.

Одной из причин возбуждения таких течений в орбитальном полете, интенсивно изучаемой в последнее время, являются угловые ускорения <sup>75, 76, 77, 78, 79, 80, 81</sup>. Отметим, что переменные непоступательные перемещения сосуда с жидкостью или газом вызывают движение как в однородной, так и в стратифицированной по плотности среде. Течение в однородной жидкости вызывает

ее вязкое трение о стенки испытывающего угловые ускорения сосуда. При высокочастотных непоступательных вибрациях, как и в случае, когда пульсационное течение в пристеночных погранслоях неоднородно вдоль границ, завихренность диффундирует из пограничных слоев и создает осредненное течение в основном объеме полости. На возможность генерации изотермических течений в невесомости под действием пристеночного механизма неконвективной природы впервые указано в <sup>82</sup>. Течения изотермической жидкости при вращательных качаниях теоретически и экспериментально исследуются в <sup>83, 84, 85</sup>.

В неоднородной по плотности (неизотермической либо имеющей переменный состав) жидкости при переменных вращениях, наряду с описанным выше пристеночным механизмом генерации течений, действует объемный конвективный механизм, обусловленный силой инерции, связанной с угловыми ускорениями, центробежной силой и силой Кориолиса. Поля этих сил могут создавать в неоднородной среде конвективные пульсации скорости, температуры и концентрации, а при высокочастотных вращательных колебаниях – осредненные виброконвективные течения<sup>86</sup>. Воздействие маятниковых качаний на поведение неизотермических сред применительно к условиям невесомости изучалось теоретически и эмпирически (методами наземного лабораторного моделирования в недавно упомянутых работах).

Безразмерными критериями подобия, характеризующими термоконвективные механизмы в квазистатическом силовом поле и при высокочастотных линейных и угловых качаниях, являются, соответственно, число Рэлея  $Ra_g$ , критерии  $Ra_V$ <sup>87, 88</sup>,  $Ra_S = (\alpha_0 \omega)^2 R_0 \beta \Delta T h^3 / 2 \nu \chi$  и число Прандтля  $Pr$ .

Расчеты<sup>89</sup> позволяют объяснить периодические неоднородности распределения легирующих примесей в монокристаллах, выращенных во время совместного полета аппаратов «Аpollo»-«Союз»<sup>90</sup>, на автоматических научных спутниках «Фотон»<sup>91</sup>, EURECA<sup>92</sup> и космических кораблях Space Shuttle<sup>93</sup>, конвективным тепломассопереносом, вызываемым медленно меняющимися по величине и направлению остаточными микроускорениями, обусловленными орбитальным

движением космического аппарата. В то же время, существуют и другие объяснения этих экспериментов; так, авторы<sup>94</sup> называют причиной образования регулярных полос не конвекцию в расплаве, а колебания температуры внутри спутника вследствие его перемещений из освещенной Солнцем области в тень и обратно, также совершаемых с орбитальным периодом.

Перечисленные выше обстоятельства делают актуальным обнаружение и визуализацию течений в микрогравитационном поле космических аппаратов. Первый эксперимент<sup>95</sup> по конвекции в невесомости проводился во время возвращения корабля «Аpollo-14» от Луны к Земле в феврале 1971 г. В нем предусматривалось наблюдение структуры рэлеевской конвекции в плоском неизотермическом слое жидкости с помощью термочувствительной жидкокристаллической пленки и регистрация теплопереноса. В двух других экспериментах, выполненных на кораблях Space Shuttle, поведение неоднородно нагретой жидкости изучалось с помощью электрохимической метки нейтральной плавучести, IML-2<sup>96</sup>, июль 1994 г., и интерферометром, STS-73<sup>97</sup>, октябрь 1995 г. Все три указанных эксперимента не принесли положительных результатов.

Изучение течений жидкостей в квазистатических и вибрационных полях планировалось провести в рамках Программы по исследованию гидродинамических явлений в невесомости<sup>98</sup> в составе автоматизированного измерительно-управляющего комплекса «Фаза», разрабатывавшегося конструкторским бюро общего машиностроения им. В.П Бармина (КБОМ). С этой целью была изготовлена и испытана в наземных условиях ячейка, рассчитанная на применение интерференционных и температурных методов, лазерной доплеровской анемометрии, визуализирующих меток. Результаты наземного моделирования движений жидкости в этой кювете описаны в<sup>99, 100</sup>; при этом впервые были экспериментально реализованы в конвекции параметрический резонанс, динамическая стабилизация и вибрационные течения<sup>101, 102, 103</sup>. Аппаратурный комплекс «Фаза» на орбитальную станцию «Мир» доставлен не был, в связи с чем Программа осталась невыполненной.

В серии французских и российско-французских орбитальных экспериментов с околокритическими средами был обнаружен ряд новых явлений, изложенных, например, в<sup>104, 105, 106</sup>. Однако часть наблюдавшихся эффектов не получила полного объяснения, т.к. при интерпретации экспериментальных данных не учитывалась возможность конвективного тепломассопереноса. Например, в последней из упомянутых работ отрицалась возможность термогравитационной конвекции, вызванной остаточными микроускорениями, и осредненных движений, генерированных вибрациями, а при оценке параметра, определяющего конвективный механизм генерации тепломассообмена, в качестве характерного размера задачи был использован диаметр малого по сравнению с размером полости источника нагрева. Это привело к получению на несколько порядков заниженных значений конвективного критерия подобия.

В 1995 году на станции «Мир» для обнаружения конвекции в неоднородно нагретой околокритической жидкости в условиях реальной невесомости была проведена серия экспериментов ALI-71,72,73 с использованием оборудования «ALICE-1». В результате была получена интерпретация некоторых из полученных эффектов<sup>107, 108</sup> с учетом существования крупномасштабных конвективных движений<sup>109, 110, 111, 112</sup> в системе, находящейся в сверхкритическом состоянии в поле неконтролируемых остаточных микроускорений космического аппарата. Следующая серия экспериментов в 1999-х и 2000-х годах ALI-R01T10, R02T10, R03T08, R04T08, R05T08 и «Алис-вибро-2000» с оборудованием «ALICE-2» имела целью визуализировать и изучить теплообмен околокритической жидкости при специально пониженных фоновых микроускорениях и в условиях контролируемых поступательных и качательных вибраций<sup>113</sup>.

Обнаружение конвективных течений в неоднородно нагретом газе, находящемся в микрогравитационном поле, было выполнено на орбитальной станции «Мир»<sup>114, 115, 116</sup> в период с июня 1998 по май 2000 годов прибором «Дакон» (Датчик конвекции). Наземное и математическое моделирование течений в цилин-

дрической камере полетного варианта прибора «Дакон» применительно к динамической обстановке на орбитальной станции ОС «Мир» выполнено в работах<sup>117, 118</sup>.

В настоящее время конвективные движения воспроизведены и в других орбитальных опытах, например, в «IVIDL»<sup>119</sup> (Influence of Vibrations on Diffusion of Liquids), с учетом при подготовке многих запланированных экспериментов<sup>120</sup> в реальной невесомости.

## 1.2. Описание оборудования и методик проведения экспериментов со сверхкритическими средами

Жидкости принято называть сверхкритическими в тех случаях, когда их температура и давление приближаются сверху к критическим значениям температуры  $T_c$  и давления  $p_c$  в термодинамической критической точке (рис. 2). В связи

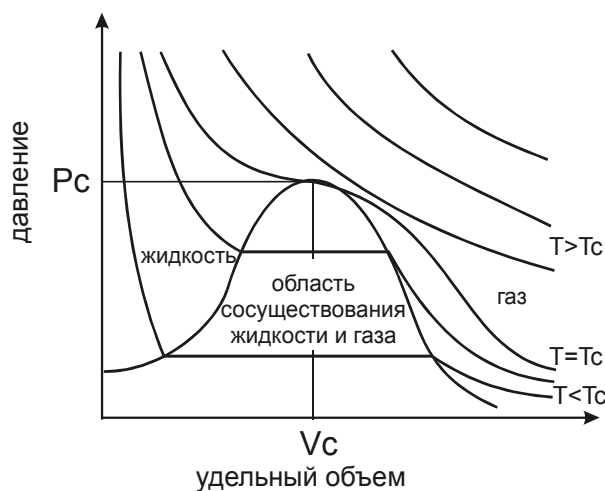


Рис. 2. Термодинамическая фазовая диаграмма

с большой плотностью, малой вязкостью и большим коэффициентом диффузии, они становятся промежуточными между жидкостями и газами. Интерес к исследованию явлений тепломассообмена в таких средах, находящихся в условиях пониженной гравитации, обусловлен различными факторами. Во-первых, развитием космических технологий, в частности, вопросами хранения криогенного топлива. Во-вторых, необходимостью устранения влияния термогравитационной конвекции, которая в наземных экспериментах существенно искажает тепловые и динамические процессы в околоскритической среде.

Особые свойства, характерные для жидкости или газа вблизи точки фазового перехода, делают такие среды чрезвычайно привлекательным объектом для

фундаментального изучения чувствительности стратифицированных по плотности систем к условиям реальной невесомости. Такие исследования имеют большое значение для разработки орбитальных технологических процессов и определения требований к сертификации космических аппаратов с точки зрения гравитационной (инерционной) чувствительности размещенных на них систем.

В неоднородно нагретой околокритической среде, находящейся в силовом поле с указанными во введении характеристиками, возможна генерация конвективных течений. В статическом и медленно меняющемся силовых полях конвекция может быть вызвана термогравитационным (инерционным) механизмом, характерным для несжимаемой среды и определяемым критерием подобия Рэлея  $Ra_g$ . Учет сжимаемости приводит к еще одному управляющему параметру – числу Шварцшильда <sup>121</sup>.

Оценим вклад различных механизмов конвекции в возбуждение крупномасштабного движения околокритической жидкости применительно к условиям эксперимента, описанным в данном параграфе ниже.

В общем случае управляющий параметр, определяющий условия возникновения конвективной неустойчивости, представляет собой сумму чисел Рэлея и Шварцшильда, причем вклад каждого из параметров определяется <sup>122</sup> величиной  $(r/l_1)^4$ . Здесь,  $r$  – характерный размер полости, а  $l_1$  – определяется следующим выражением:

$$l_1 = \left[ \frac{Ra_g^* \nu \chi}{g^2 (\partial \rho / \partial p)_T (1 - C_V / C_p)} \right]^{1/4},$$

где  $Ra_g^*$  – критическое значение числа Рэлея,  $p$ ,  $\rho$  – давление и плотность, жидкости соответственно, а  $C_p$  и  $C_v$  – теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме.

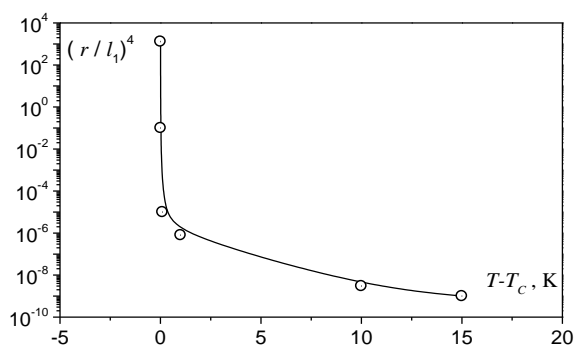


Рис. 3. Зависимость параметра  $(r/l_1)^4$  от удаления от критической точки  $T - T_c$

Если величина параметра  $(r/l_1)^4 \gg 1$ , то основной вклад в сумму вносит число Шварцшильда, а при  $(r/l_1)^4 \ll 1$  можно пренебречь изотермической сжимаемостью, и тогда определяющим становится критерий Рэлея. Рассмотрим зависимость величины этого параметра от отклонения температуры  $T$  полости с жидкостью от  $T_c$

(рис. 3). Из рисунка видно, что в экспериментально реализованном диапазоне  $T - T_c \approx 3 \cdot 10^{-2} \div 15 \text{ K}$  по мере приближения к критической точке вплоть до наименьших экспериментальных значений  $T - T_c = 10^{-2} \text{ K}$  величина параметра  $(r/l_1)^4$  не превосходила значения  $10^{-1}$ . Это означает, что в описываемых условиях должны преобладать конвективные процессы, характерные для слабосжимаемой среды. Таким образом, изучаемый диапазон параметров следует охарактеризовать как далекую окрестность критической точки, в противоположность ближайшей окрестности, где эффекты сжимаемости являются преобладающими.

Оценим теперь достижимые в условиях обсуждаемых экспериментов величины критерия подобия  $Ra_g$ , определяющего термогравитационный (инерционный) механизм конвекции, и учтем, что быстро меняющаяся компонента микроускорений способна возбудить интенсивное осредненное движение термовибрационной природы – соответствующий механизм определяется вибрационным аналогом числа Рэлея<sup>123</sup>  $Ra_v$ .

С приближением к критической точке коэффициент объемного расширения жидкости быстро растет, в то время как коэффициент температуропроводности, напротив, принимает малые значения. Поэтому при умеренных отклонениях от критической точки критерии  $Ra_g$  и  $Ra_v$  могут достигать и, более того, значительно превосходить величину  $10^3$ , характерную для развития интенсивных конвективных движений. Рис. 4 иллюстрирует оценку величин критериев подобия

$Ra_g$  и  $Ra_v$  в зависимости от  $T - T_c$ . Для расчета в качестве характерного размера  $r$  использован радиус полости, а перепад температур  $\Theta$  между нагревательным термистором и стенками полости оценивался по методике, приведенной в работе <sup>124</sup>. Отметим, что результаты расчетов согласуются с данными прямых измерений <sup>125</sup>.

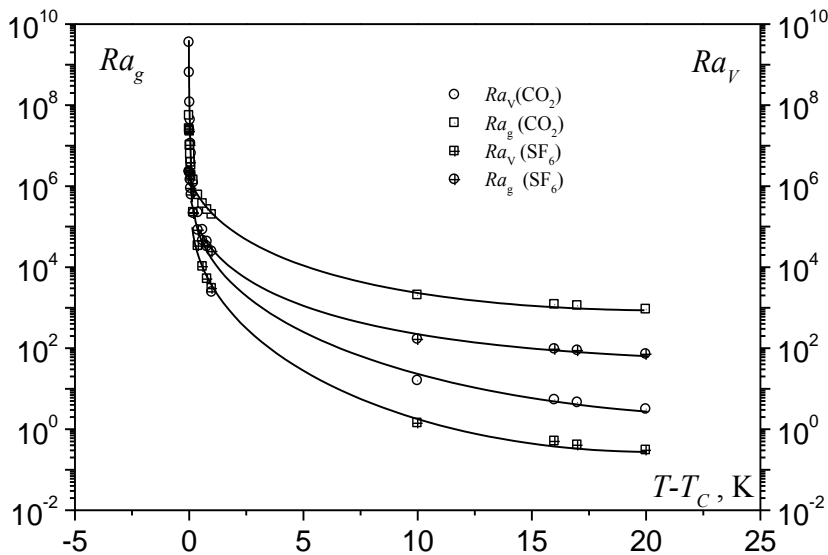


Рис. 4. Зависимость критериев подобия  $Ra_g$  и  $Ra_v$  от удаления от критической точки  $T - T_c$

Из рис. 4 видно, что параметры  $Ra_g$  и  $Ra_v$  достигают величины  $10^3$  уже при  $T - T_c \sim 1$  К.

Из приведенных оценок следует, что конвективные процессы термо-гравитационного и термо-вибрационного типов могут играть существенную роль в тепло-

массообмене стратифицированной по температуре сверхкритической жидкости, находящейся в микрогравитационной обстановке орбитального полета.

### Описание оборудования «ALICE-1» и «ALICE-2»

Конструктивно установка «ALICE-1» (аббревиатура от фр. «Analyse des

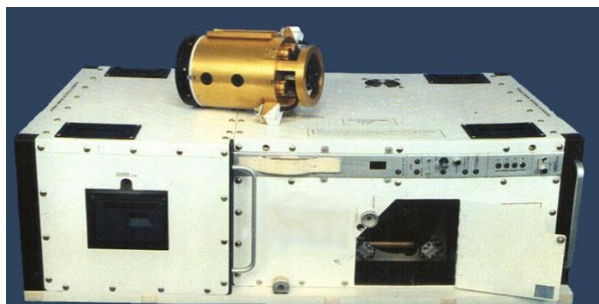


Рис. 5. Внешний вид установки «ALICE-1» и сменного термостата (наверху)

Liquides Critiques dans l'Espace») выполнена в виде единого блока (рис. 5), состоящего из трех подсистем (рис. 6): оптической, управляющей и регистрирующей.

Управляющая подсистема в автоматическом режиме поддерживала заданные температуры в термостатах,

обеспечивала включение и выключение видеокамеры и выполняла все необходимые операции в течение всего эксперимента. Последовательность работы

обеспечивалась предварительно подготовленной программой, считываемой с РСМСІА-карт встроенным компьютером, который и выполнял программу, состоящую из последовательности управляющих операторов («action point»).

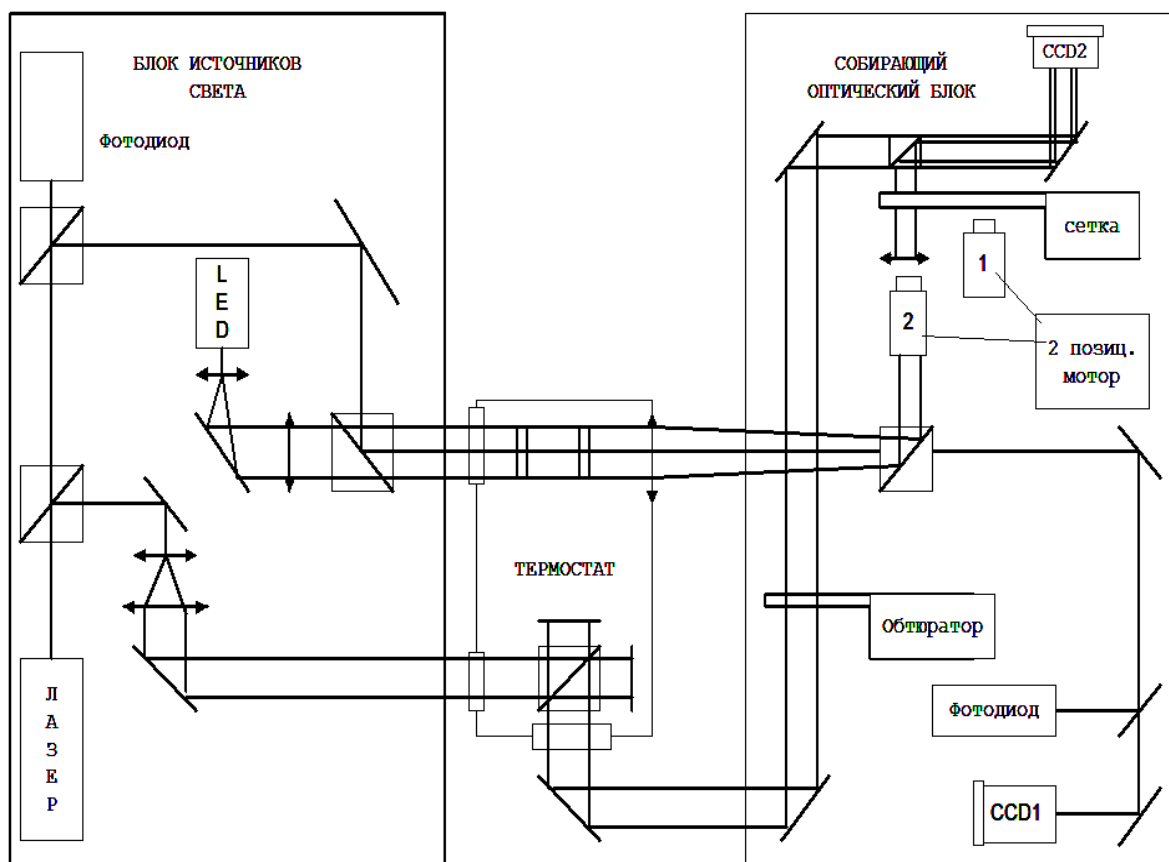


Рис. 6. Блок-схема установки «ALICE-1»

Регистрирующая подсистема вела запись видеоизображения в формате Hi-8 ячейки с рабочим телом, записывала на РСМСІА-карты показания акселерометров, термостатов, термисторов, время эксперимента и номера управляющих операторов.

Оптическая подсистема состоит из блока источников света и собирающего оптического блока. В качестве источников света использованы светодиод (LED) со спектром вблизи 660 нм и гелий-неоновый лазер с длиной волны 633 нм.

Луч лазера с помощью двух полупрозрачных зеркал делится на два луча, один из которых направляется оптической схемой в интерферометр Тваймана-Грина, частью которого была рабочая ячейка, а второй луч используется для диагностики параметров оптической системы.

Интерференционные картины и изображение рабочей ячейки регистрируются видеокамерой CCD2; видеокамера CCD1 используется для записи данных диагностики установки, поэтому регистрируемые ею данные не представляют интереса с точки зрения обработки научных данных. Три двухпозиционных мотора используются для управления сеткой, обтюратором и двумя группами линз. Возможности оптического блока позволяют использовать 6 методов наблюдения, в том числе микроскопический.

Полное описание конструкции «ALICE-1» содержится, например, в работе <sup>126</sup>. Здесь ограничимся рассмотрением тех узлов и систем оборудования, которые были задействованы в рассматриваемой серии экспериментов ALI-71, 72, 73.

Рабочая полость, схематически представленная на рис. 7, представляет собой полый металлический цилиндр кругового сечения высотой 6.7 мм и диаметром 11.6 мм, ограниченный оптическими стеклами. Полученный объем в эксперименте ALI-71 заполнялся двуокисью углерода  $CO_2$  ( $T_c = 304.122$  К,  $\rho_c = 467.9$  кг/м<sup>3</sup>,  $p_c = 7.37$  МПа) или, как в экспериментах ALI-72, 73, шестифтористой серой  $SF_6$  ( $T_c = 319.383$  К,  $\rho_c = 737$  кг/м<sup>3</sup>,  $p_c = 3.75$  МПа). Внутри рабочей полости на полувысоте цилиндра располагались два сферических термистора на проволочных растяжках. Диаметр термисторов составлял 0.9 мм (ALI-71) или 0.25 мм (ALI-72, 73), расстояние между их центрами – 4.6 мм, а расстояние между центром термистора и стенкой цилиндра – 3.5 мм. Оба термистора являлись измерительными плечами мостов Уитстона и могли работать в режиме регистрации температуры. Кроме того, верхний термистор (см. рис. 7) служил источником нагрева с выделяемой мощностью 10 мВт.

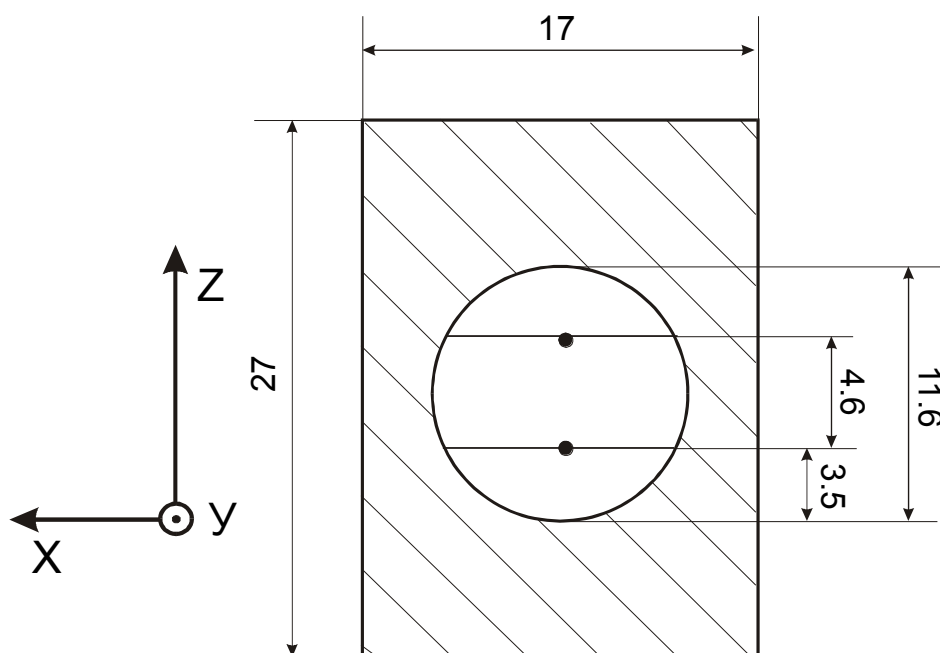


Рис. 7. Схема рабочей ячейки «ALICE-1» и система координат микроакселерометра (размеры указаны в миллиметрах)

Прямоугольный параллелепипед из бериллиевой меди (рис. 7) с внешними размерами  $17 \times 24 \times 27$  мм<sup>3</sup>, в котором находилась рабочая полость, размещался в термостатирующем устройстве. Термостат мог поддерживать температуру ячейки в диапазоне  $283 \div 338$  К со стабильностью 50 мК/ч.

В корпусе установки «ALICE-1» располагался микроакселерометр типа 5947 фирмы Briel & Kjaer, составленный из трех однокомпонентных акселерометров, имеющих номинальную чувствительность  $0.001$  м/с<sup>2</sup> или  $10^{-4} g_0$ . Прибор мог регистрировать величину линейных микроускорений в трех взаимоперпендикулярных направлениях  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , совмещенных на рис. 7 со схематическим изображением рабочей ячейки.

Оборудование «ALICE-2» (рис. 8) является модернизированным вариантом вышеописанного прибора, появившимся в результате обобщения опыта его эксплуатации. Полное описание конструкции содержится, например, в работе <sup>127</sup>. Здесь ограничимся рассмотрением тех узлов и систем оборудования, которые были задействованы в рассматриваемой серии экспериментов ALI-R01T10, R02T10, R03T08, R04T08, R05T08 и «Алис–вибро–2000».

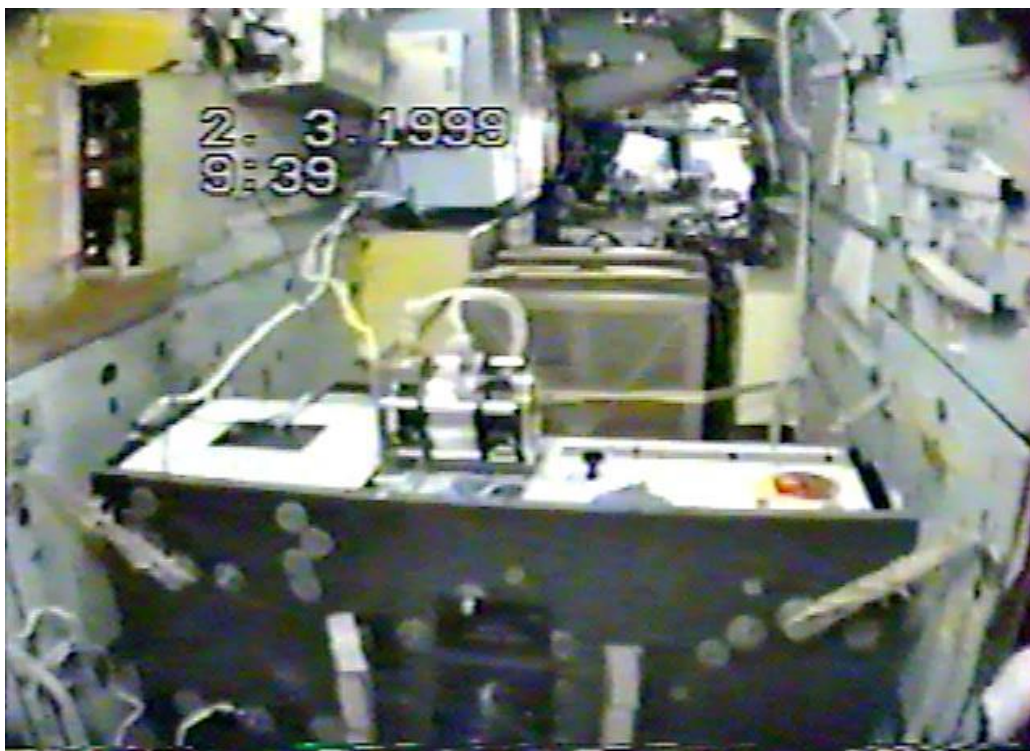


Рис. 8. Изображение прибора «ALICE–2» в модуле «Природа» ОК «Мир».  
*На верхней панели слева датчик конвекции «Дакон»,  
 в центре фронтальной панели электродинамический вибратор*

Внешне прибор представлял собой параллелепипед размером  $950 \times 600 \times 320$  мм и массой 55 кг, внутри которого были размещены регулировочный, управляющий, оптический блоки, термостат, видеомагнитофон и другие обеспечивающие проведение эксперимента устройства.

Экспериментальная ячейка с рабочей жидкостью (шестифтористой серой  $SF_6$ ) помещалась внутрь термостата. Ячейка оборудована прозрачными стенками, что позволяет осуществлять визуальные наблюдения за процессом и проводить интерферометрические измерения. Внутри ячейки расположены нагревательный (он же измерительный) термистор ТНЗ, два измерительных термистора ТН1 и ТН2, а также пьезорезисторный датчик давления PR. Схема ячейки с указанием геометрических размеров, расположения термисторов и датчика давления приведена на рис. 9. В опытах использовались два термостата: термостат Т10 (опыты R01-R02) и термостат Т08 (опыты R03-R05). Рабочая ячейка являлась частью лазерного интерферометра Тваймана-Грина.

Интерференционные картины регистрировались видеокамерой стандарта Hi-8 и записывались в цифровом виде на кассеты формата DS3. Опрос датчиков проводился в двух режимах: с частотой 25 Гц и с частотой 2 кГц (только температуры). Данные записывались на PCMCIA-карту.

Прямоугольный параллелепипед из бериллиевой меди с внешними размерами  $17 \times 24 \times 27$  мм, в котором находилась рабочая полость, размещался в термостатирующем устройстве. Термостат мог поддерживать температуру ячейки в диапазоне  $283 \div 338$  К со стабильностью  $50 \text{ } \mu\text{К/ч}$ .

В корпусе установки «ALICE-2» располагался также микроакселерометр типа 5947 фирмы Briel & Kjaer, оси чувствительности которого совмещены на рис. 9 со схематическим изображением рабочей ячейки.

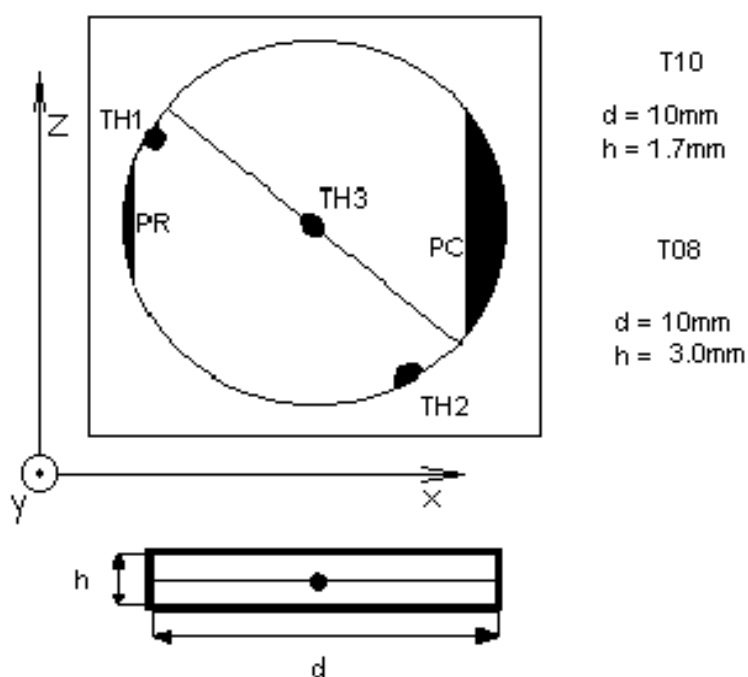


Рис. 9. Схема экспериментальной ячейки «ALICE-2» с привязкой к системе координат микроакселерометра

### Описание методики проведения экспериментов

Оборудование «ALICE-1» размещалось на орбитальной станции «Мир» в модуле «Кристалл» со значениями координат X, Y, Z: -4.16 м, -0.86 м, -8.07 м относительно центра масс ОК (положение в сентябре 1995 г.). Прибор «ALICE-2»

располагался в модуле «Природа» (см. рис. 10): -11.0 м, 0.2 м, 4.1 м соответственно, относительно центра системы строительных координат корабля (СКК), привязанного к 9 шпангоуту базового блока. В обоих случаях координаты указаны по осям СКК.

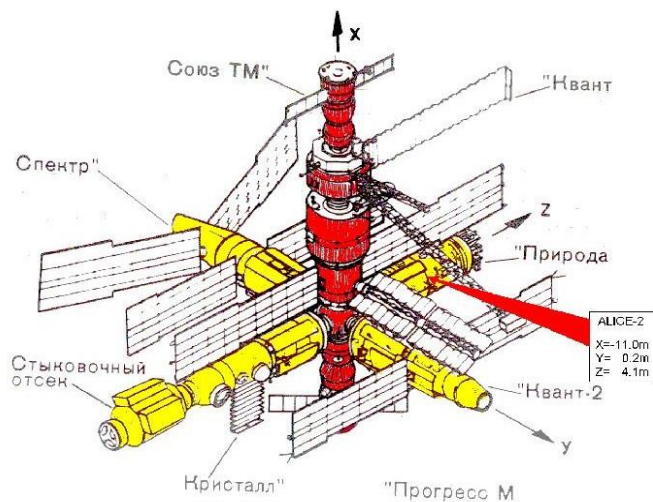


Рис. 10. Структурная схема орбитального комплекса «Мир» во время проведения экспериментов с прибором «ALICE-2»

Для изучения гравитационной (инерционной) чувствительности процессов теплообмена в окрестности критической точки на орбитальной станции «Мир» была выбрана методика проведения экспериментов, предложенная в Программе<sup>128</sup> и отработанная в наземных условиях<sup>129</sup>. Метод заключается в регистрации конвективного движения по изменению скорости распространения температурной волны от источника нагрева.

Эксперименты проводились следующим образом:

эксперимент ALI-71 начался 26.09.1995. в 12:59:00 (ДМВ);

эксперимент ALI-72 начался 30.09.1995. в 16:00:00 (ДМВ);

эксперимент ALI-73 начался 04.10.1995. в 20:07:00 (ДМВ) (здесь ДМВ – декретное московское время, принятое в Центре управления полетами), и состояли из нескольких температурных режимов, в течение которых температура термостата  $T$  оставалась неизменной. Для каждого последующего стационарного режима отклонение температуры термостата от ее критического значения для данной жидкости  $T - T_c$  последовательно уменьшалось. При этом минимальное превышение  $T$  над критическим значением  $T_c$  достигало 30 мК (ALI-71), 50 мК (ALI-72) и 30 мК (ALI-73). В эксперименте ALI-73 реализована также область параметров  $T < T_c$ . Типичная зависимость  $T - T_c$  от времени, соответствующая эксперименту ALI-72, представлена на рис. 11.

Точками на графике обозначены тепловые импульсы. Таким образом, при прочих фиксированных параметрах жидкость из сверхкритической области приближалась к точке фазового перехода за счет уменьшения температуры. Такой ход по температуре был обусловлен выбором метода регистрации экспериментальных данных. О процессах, происходивших в рабочем объеме после подачи теплового импульса, судили по изменению интерференционной картины.

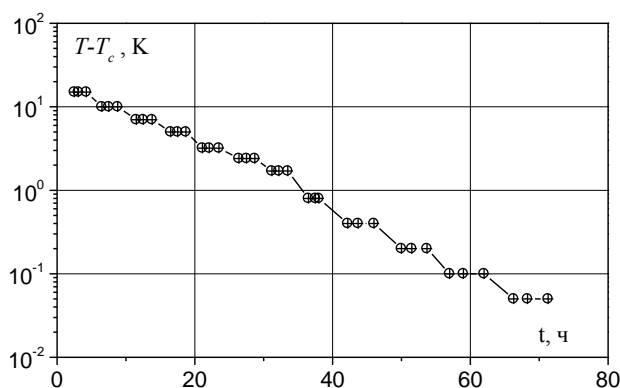


Рис. 11. Изменение отклонения температуры от критического значения  $T - T_c$  во время эксперимента ALI-72

Если температура среды была меньше критического значения, подача теплового импульса приводила к фазовому переходу. Такой скачок, как правило, сопровождался появлением больших градиентов показателя преломления в силу возникновения двух фаз (жидкой и газообразной) с большими различиями по плотности. При этом наблюдение распространения тепла от точечного

источника с помощью интерферометра становилось невозможным.

Во время каждого из стационарных режимов на нагревательный термистор подавались импульсы электрического тока с фиксированной мощностью. В эксперименте ALI-71 производилась непрерывная подача тока длительностью 0.2, 0.4, 1, 2, 4, 10, 20, 40 с, а в ALI-72, 73 – длительностью 40 мс. Кроме этого, эксперименты ALI-72, 73 содержали нестационарные импульсы с общей продолжительностью 40 и 80 с, состоявшие из последовательности 40 миллисекундных пульсов с интервалами 160 мс между ними.

Видеокамера, регистрирующая интерференционные картины, включалась за несколько секунд до подачи теплового импульса и работала в непрерывном режиме несколько минут. После этого, путем нескольких кратковременных включений видеозаписи с интервалом между ними до 10 мин, контролировались

релаксационные процессы. Синхронно с видеокамерой включалась запись показаний микроакселерометра и датчиков.

Все тепловые импульсы длительностью более 1 с приводили к возникновению настолько больших градиентов показателя преломления вблизи термистора, что лучи лазера покидали поле захвата изображения видеокамерой. Таким образом, интерферометр работал в режиме «теневого прибора». Поэтому количественная обработка интерференционных картин с восстановлением поля температуры была невозможна, и о происходящих процессах судили по эволюции затененной области сильной оптической неоднородности, вызванной искажениями поля температур после подачи термистором теплового импульса.

Прибор «ALICE-2» был установлен на упругих подвесах (см. рис. 12) в модуле «Природа» с указанными выше координатами. Эксперимент заключался в подаче тепловых импульсов на нагревательный термистор при различных внешних воздействиях и слежении за процессом тепломассопереноса внутри ячейки с помощью оптических средств, записи температур термисторов, давления и микроускорений.

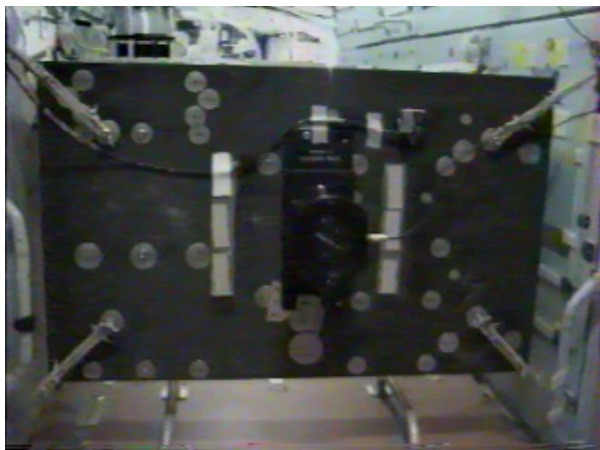


Рис. 12. Фотография прибора «ALICE-2» в модуле «Природа»

Эксперимент проводился с прибором «ALICE-2» для различных начальных температур жидкости, продолжительности и мощности тепловых импульсов (см. табл. 1) при шести различных режимах воздействия:

- **фоновый режим** осуществлялся в те периоды времени, когда все возможные воздействия на установку были сведены к минимуму. Например: во время сна космонавтов и отключенных двигателей ориентации;
- **воздействия с помощью вибратора**, прикрепленного на фронтальной стороне прибора, с частотами 1.6 Гц или 2.5 Гц;

- **ручные воздействия**, которые проводились при непосредственном участии экипажа. Установку равномерно раскачивали с амплитудой 3-4 см и частотой 0.3 Гц;

- **ручные вращательные воздействия**: установку, притянутую одним ребром к полу, раскачивали так, чтобы она имела возможность совершать маятниковые качания относительно указанного ребра. Далее о таких воздействиях будем говорить как о маятниковых качаниях большой амплитуды;

- **вращательные воздействия с помощью вибратора** производились на установку, притянутую одним ребром к полу, так, чтобы она имела возможность совершать вращательные колебательные движения относительно указанного ребра. Далее о таких воздействиях будем говорить как о маятниковых качаниях малой амплитуды;

- при проведении одного из импульсов был осуществлен **разворот станции** вокруг своей оси в течение 15 минут.

Таблица

**Типы тепловых импульсов, подаваемых термистором**

Тип Импульса	Мощность, $\mu\text{Вт}$	Продолжительность, $\mu\text{сек}$
1	0.828	120
2	0.828	3600
3	0.078	120000
4	0.828	120000
5	2.5	120000

Подготовка эксперимента заключалась в установке прибора «ALICE-2» в рабочее положение на упругих подвесах и креплении на нем вибратора и датчика «Дакон». На рис. 13 показано, как расположены оси ячейки относительно СКК.

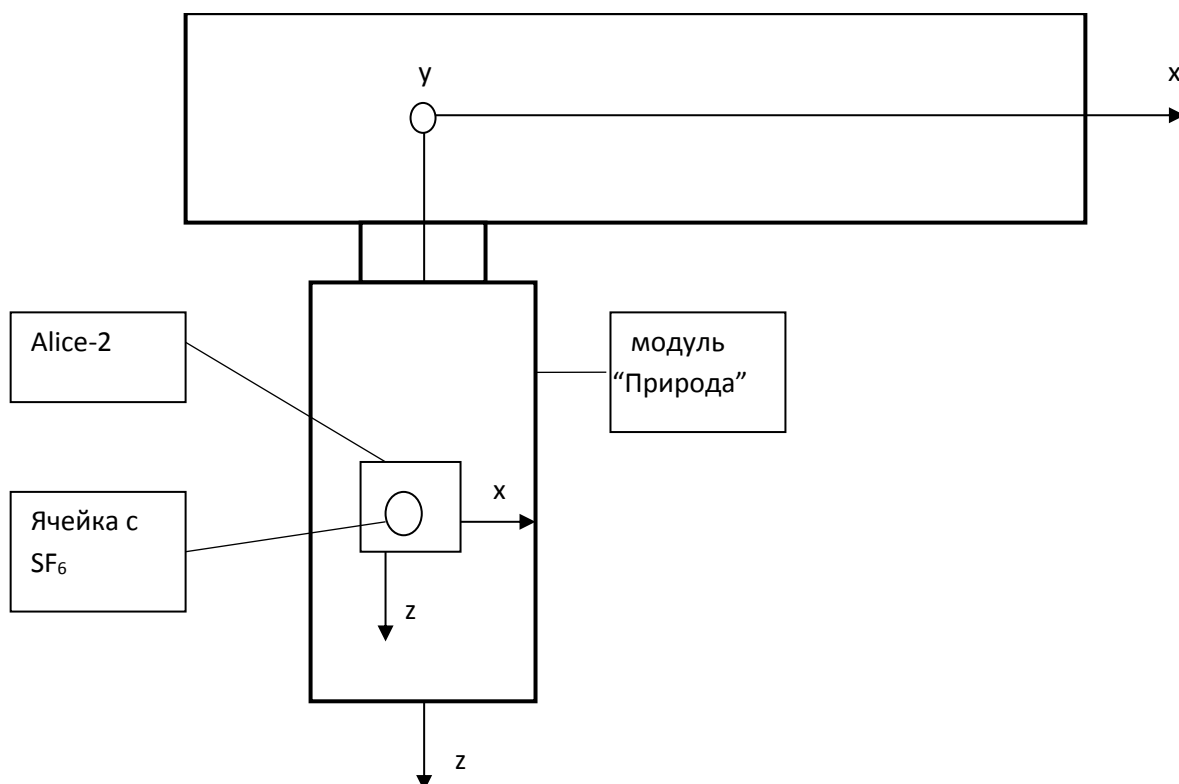


Рис. 13. Схема расположения рабочей полости

Во время подготовки была отработана методика вибрационных воздействий. Были применены несколько типов подвеса: «мягкий» для ручных колебаний (с собственными частотами 0.3, 0.8 Гц), «жесткий» для колебаний с помощью вибратора (1.6, 2.5 Гц), и подвес с притянутым к полу длинным ребром для маятниковых качаний.

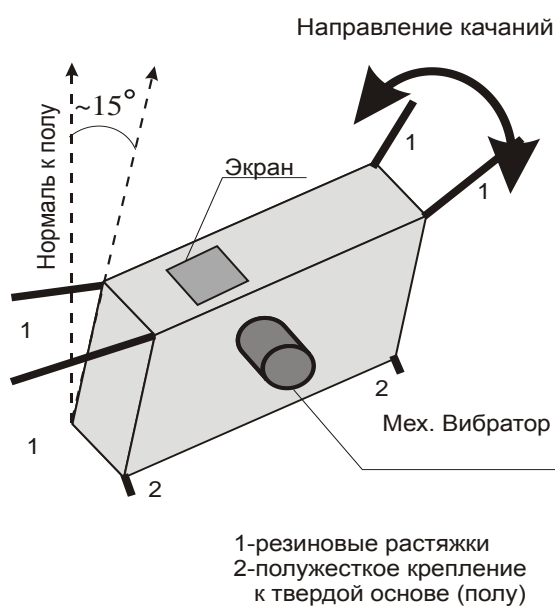


Рис. 14. Схема подвеса аппаратуры для маятниковых качаний

Схема крепления установки в последнем случае представлена на рис. 14. Проведены измерения собственных частот колебаний сборки по трем осям, а также экспериментально подобраны режимы усиления и частоты вибратора, обеспечивающие необходимые в эксперименте амплитуду и частоту колебаний сборки «ALICE-2»–Вибратор–«Дакон».

Эксперимент «Алис–2–Вибро» проводился в два этапа: с 23.02.99 по 27.02.99 (космонавты Авдеев С.В., Падалка Г.И.) и с

1.03.99 по 7.03.99 (космонавты Авдеев С.В., Афанасьев В.М.). Общая продолжительность эксперимента, состоявшего из 5-ти различных серий, составила 187 часов 50 минут. Эксперименты ALI-(R01–R05) состояли из нескольких температурных режимов, в течение которых температура термостата  $T$  оставалась неизменной. Для каждого последующего стационарного режима отклонение температуры термостата от ее критического значения  $T - T_c$  для данной жидкости последовательно уменьшалось. При этом минимальное превышение  $T$  над критическим значением  $T_c$  достигало 20 mK (ALI–R05). В эксперименте ALI–R03 реализована также область параметров  $T < T_c$ .

Алгоритм проведения экспериментов ALI-(R01–R05) на оборудовании «ALICE-2» предусматривал реализацию каждого стационарного температурного режима с соответствующим типом теплового импульса (см. табл. 1) не менее двух раз в различной микрогравитационной обстановке. Если один опыт (активный) выполнялся во время бодрствования экипажа ОК «Мир» и подразумевал внешнее силовое воздействие на прибор, то другой (пассивный) проводился во время сна экипажа, отсутствия маневров коррекции орбиты и положения ОК. При этом обеспечивалось отсутствие процедур раскрутки гироскопов системы пространственной ориентации станции и других процессов, могущих повлечь вибрации корпуса ОК. Это позволяло сравнивать поведение наблюдаемой системы при фоновых микроускорениях в невозмущенном режиме полета ОК с процессами при внешних воздействиях. Таким образом, были реализованы эксперименты:

R01T10 (продолжительность 01д 09ч 50м 03.32с),

$T_c + 5$  K, 10 импульсов (6 пассивных, 4 активных);

$T_c + 0.5$  K, 10 импульсов (4 пассивных, 6 активных);

R02T10 (продолжительность 01д 13ч 30м 00.00с),

$T_c + 0.05$  K, 8 импульсов (4 пассивных, 4 активных);

R03T08 (продолжительность 01д 20ч 30м 00.00с),

$T_c - 0.1$  K, 10 импульсов (5 пассивных, 5 активных);

R04T08 (продолжительность 01д 12ч 30м 00.00с),

$T_c + 0.5 \text{ K}$ , 6 импульсов (4 пассивных, 2 активных);

R05T08 (продолжительность 01д 11ч 30м 00.00с),

$T_c + 0.02 \text{ K}$ , 6 импульсов (3 пассивных, 3 активных).

Эксперимент «Алис–2–Вибро–2000» проводился с 06.06.2000 г. по 09.06.2000 г.; общая продолжительность составила 71 час 3 минуты. Эксперименты состояли из трёх температурных режимов, в течение которых температура термостата  $T$  оставалась неизменной:  $T - T_c = 5, 0.5, 0.05 \text{ K}$ .

Во время каждого из стационарных режимов на нагревательный термистор подавались импульсы электрического тока с фиксированной мощностью и длительностью по времени. Регистрация данных проводилась аналогично опытам с прибором «ALICE-1».

### 1.3. Теплообмен при фоновых микроускорениях

Здесь и далее фоновым микрогравитационным режимом, согласно работе <sup>130</sup>, будут называться колебания ускорений инерционной природы с амплитудой  $\sim 10^{-5} \div 10^{-6} g_0$  и сплошным спектром в диапазоне частот  $0.1 \div 14.0 \text{ Гц}$ , типичные для невозмущенного режима полета орбитального комплекса «МИР» со спящим экипажем и не приводившие к возбуждению интенсивных движений в наблюдаемой системе.

Такие опыты (пассивные импульсы) проводились с экспериментальной установкой «ALICE–2». На фрагменте «а» рис. 15 приведена осциллограмма  $g_x(t)/g_0$  однокомпонентного микроакселерометра, а на фрагменте «б» – спектр характерного сигнала, полученный в результате быстрого преобразования Фурье (БПФ). Из рисунка видно, что в сигнале отсутствуют выделенные частоты, а сплошной спектр свидетельствует о его неперIODичности. Режимы микроускорений, регистрируемые двумя другими однокомпонентными микроакселерометрами, были подобны приведенному. Таким образом, в «фоновом» режиме микроускорений при невозмущенном полете ОК «Мир» амплитуда пульсаций ускорения инерционного поля составляла  $10^{-5} \div 10^{-6} g_0$ , что хорошо согласуется, например, с данными работы <sup>131</sup>.

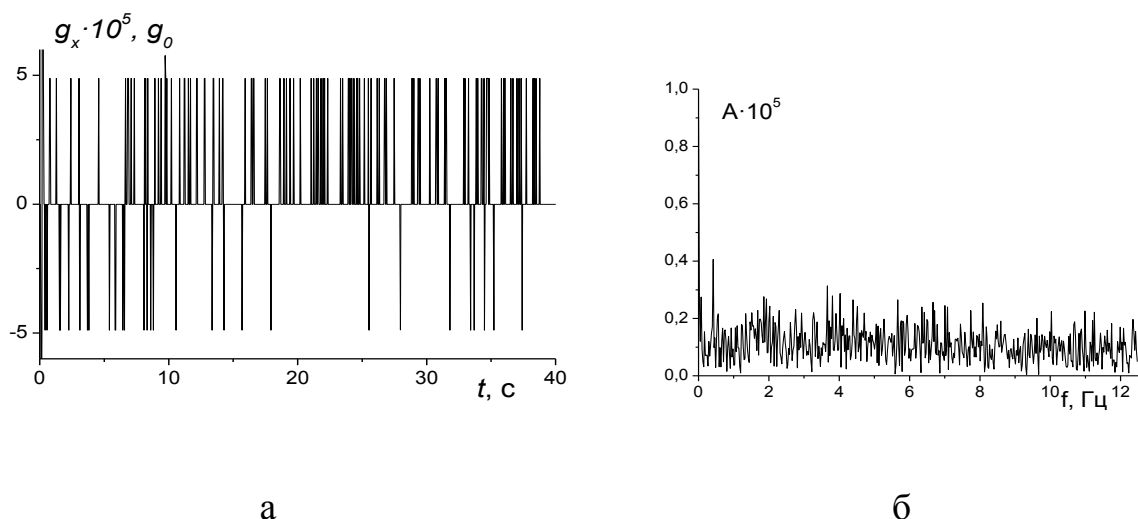


Рис. 15. «а» – осциллограмма, «б» – спектр микроускорений при фоновом режиме

При неконтролируемых фоновых микроускорениях для исследованного диапазона значений  $T - T_c$  (отклонения от критической температуры), лежащих в интервале от 0,02 до 0,5 К, наблюдалось симметричное относительно нагревательного термистора и его растяжки распространение тепловой неоднородности, как представлено на рис. 16.

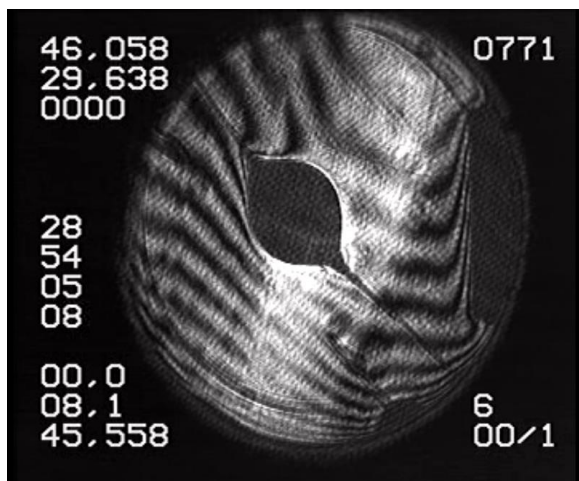


Рис. 16. Симметричное распространение теневой области при фоновом режиме микроускорений

При некоторых импульсах с отклонением начальной температуры жидкости от критического значения на 0.02 К через несколько секунд после подачи импульса тепловая неоднородность немного смещалась как целое. Например, в эксперименте R05T10 ( $T - T_c = 0.02$  К) первые несколько секунд «пятно» распространялось симметрично, а затем медленно смещалось в направлении вектора, расположенного в плоскости осей  $X$  и  $Z$  под углом  $\alpha \gg 135^\circ$

к оси  $X$ . Причины такого дрейфа оптической неоднородности будут обсуждены в параграфе 1.7

При некоторых импульсах с отклонением начальной температуры жидкости от критического значения на 0.02 К через несколько секунд после подачи импульса тепловая неоднородность немного смещалась как целое. Например, в эксперименте R05T10 ( $T - T_c = 0.02$  К) первые несколько секунд «пятно» распространялось симметрично, а затем медленно смещалось в направлении вектора, расположенного в плоскости осей  $X$  и  $Z$  под углом  $\alpha \gg 135^\circ$  к оси  $X$ . Причины такого дрейфа оптической неоднородности будут обсуждены в параграфе 1.7.

Вернёмся к рассмотрению симметричного типа распространения тепловой неоднородности. На рис. 17 представлена зависимость модуля  $X$ -проекции перемещения  $S$  фронта теневой зоны от времени  $t$ . Из графика этой зависимости видно, что смещение фронта сначала нарастает, а затем практически не изменя-

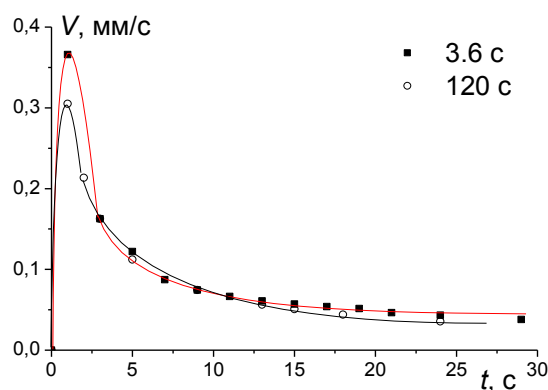
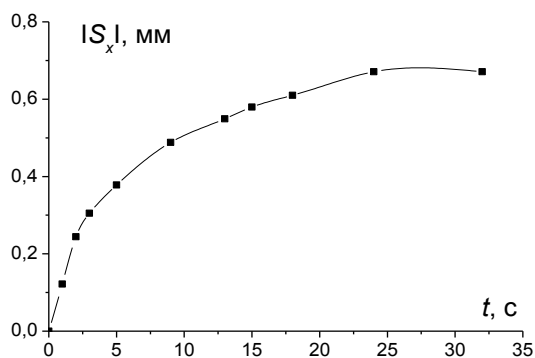


Рис. 17. Зависимости  $|S_x|(t)$  и  $V(t)$  при фоновом режиме микроускорений

ется, т.к. тепловой импульс уже прекратился и начинается процесс релаксации. В данной реализации подавался импульс мощностью 0.828 мВт и продолжительностью 3.6 с. На рис. 17 представлены также графики зависимости скоростей распространения фронта температурной неоднородности  $V(t)$  для двух типов импульсов одинаковой мощности 0.828 мВт, но разной продолжительности (3.6 и 120 с соответственно). Из рисунка видно, что максимальное значение скорости больше для продолжительного импульса, т.к. в этом случае термистор успевает отдать больше тепла. Из-за малой теплопроводности среды максимумы

скоростей наблюдаются в близкие моменты времени.

Можно предположить, что в отсутствие вынужденных воздействий при малом уровне фоновых микроускорений режим распространения тепла был подобен теплопроводному. Действительно, распространение теневой области, образовавшейся в рабочей ячейке после теплового импульса, было симметричным относительно нагревательного термистора, поскольку в этом случае не было постоянной либо осредненной составляющей массовой силы, способной вызвать конвективные течения.

#### **1.4. Режимы теплообмена в высокочастотном микрогравитационном поле**

Здесь и далее высокочастотными будут называться колебания инерционных ускорений, приводившие к осредненным движениям в наблюдаемой системе. Анализ микроускорений на станции «МИР» во время проведения экспериментов ALI-71, 72, 73, проведенный по данным встроенного акселерометра, показал, что можно выделить два характерных режима колебаний инерционного поля. Один из них, с частотой изменения силового поля, близкой к 5 Гц, и средней амплитудой  $10^{-2} g_0$ , в дальнейшем будем называть высокочастотным. Второй, низкочастотный, будет описан в разделе 1.5. Рис. 18 иллюстрирует характерную осциллограмму (фрагмент «а») и спектр (фрагмент «б») высокочастотного режима.

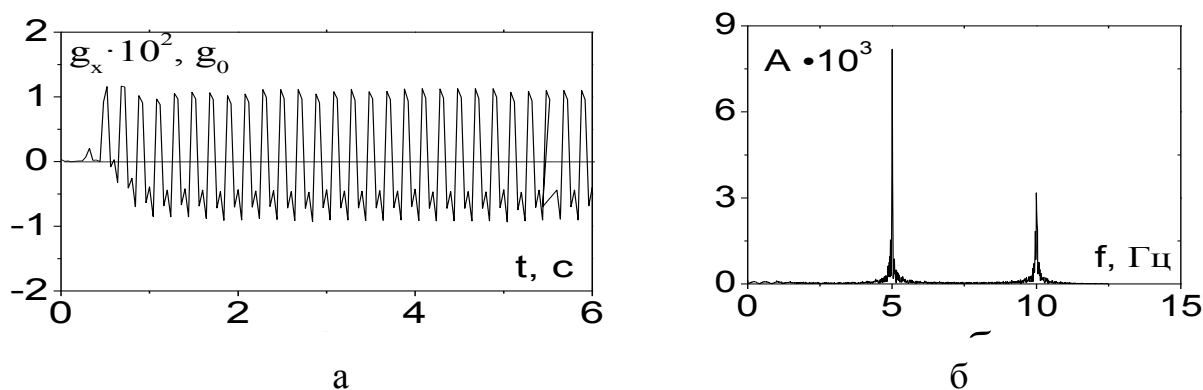


Рис. 18. Характерная осциллограмма (а) и спектр (б)  $g_x$  компоненты высокочастотного режима микроускорений

В данном случае о микрогравитационной обстановке судили по записям акселерометров, которые регистрировали линейную составляющую микроускорений. Одна из пространственных компонент инерционных ускорений, как правило, существенно превышала две другие. Поэтому колебания считались поступательными и линейно-поляризованными.

Изучение оптических картин показало, что существует ярко выраженная зависимость характера распространения фронта температурной неоднородности от режима микроускорений и отклонения температуры  $T - T_c$ . Характерная эволюция теневой области воспроизводилась как в опытах с  $CO_2$ , так и с  $SF_6$ .

Необходимо отметить, что существенных различий в поведении оптической неоднородности при постоянном и пульсирующем нагреве не отмечалось. По-видимому, это объясняется тепловой инерционностью термистора и малой теплопроводностью среды.

В первую очередь рассмотрим характерные режимы распространения области температурной неоднородности при высокочастотном изменении инерционного поля.



Рис. 19. Область оптической неоднородности через 23 с после теплового импульса при  $T - T_c = 5 \text{ K}$

После подачи теплового импульса на нагревательный термистор вокруг него образовывалась оптическая неоднородность.

В случае, если  $T - T_c$  было больше, чем 1 К, фронт такой области распространялся симметрично относительно линии, проходящей через растяжки, на которых крепился термистор. Пример такого режима приведен на рис. 19 для

$T - T_c = 5 \text{ K}$ . После этого тепловая неоднородность медленно рассасывалась в течение часа, и рабочая жидкость снова приобретала температуру термостата.

Качественно иная ситуация возникала, если  $T - T_c$  было меньше, чем 1 К. В этом случае после подачи теплового импульса фронт неоднородности сначала распространялся также симметрично. Однако через несколько секунд симметрия распространения существенно нарушалась (этот эффект проиллюстрирован на рис. 20). На фрагменте «а» изображено первоначально симметричное распространение области через 6 с после начала теплового импульса при

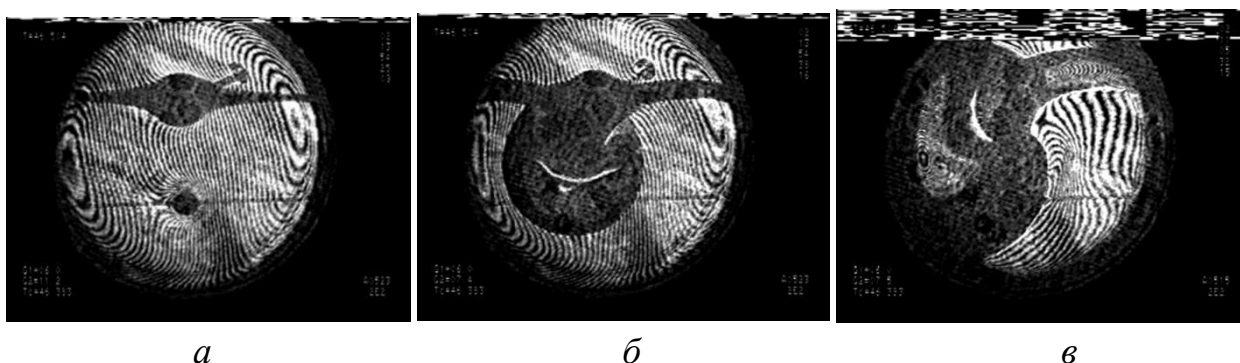


Рис. 20. Распространения области оптической неоднородности при  $T - T_c = 0.121 \text{ K}$ ;

- а) 6 с после начала теплового импульса;  
 б) 23 с после начала теплового импульса (первый тип искажения фронта);  
 в) 65 с после начала теплового импульса (второй тип искажения фронта оптической неоднородности); стрелками указано направление колебаний  $g_x$  компоненты микроускорений

$T - T_c = 0.121$  К. С течением времени распространение фронта теневой зоны становилось неравномерным относительно линии, проходящей через нити подвеса термистора.

Наблюдались два характерных типа искажений фронта, возникавших после одинаковых по длительности тепловых импульсов при равных  $T - T_c$ . Фрагмент «б» соответствует случаю, когда через 23 с после начала импульса ( $T - T_c = 0.121$  К) наиболее сильное искажение фронта произошло в центральной части рабочей полости. На фрагменте «в» такое искажение развивалось вблизи стенки ячейки. Отклонение температуры от критического значения для этого режима было также равно 0.121 К.

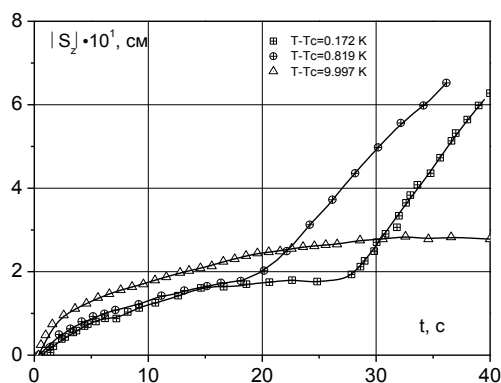


Рис. 21. Перемещения фронта оптической неоднородности  $|s_z|$  в зависимости от времени

Рассмотрим эволюцию оптической неоднородности при симметричном и несимметричном режимах распространения. На рис. 21 представлена зависимость модуля Z-проекции перемещения фронта теневой зоны  $|S_z|$  от времени  $t$  для характерных реализаций при различных значениях  $T - T_c$ . Из рисунка видно, что кривые  $|S_z(t)|$  претерпевают излом при значениях отклонений  $T - T_c < 1$  К. Наблюдение за оптическими изображениями показало, что начало несимметричных искажений затененной области совпадает по времени с моментом излома кривых  $|S_z(t)|$ .

метричных искажений затененной области совпадает по времени с моментом излома кривых  $|S_z(t)|$ .

Рассмотрим скорость  $U$  распространения фронта теневой зоны. На рис. 22 представлена зависимость проекции  $U_z$  от времени  $t$  для тех же реализаций, которые изображены на рис. 21. Если выполнялось условие  $T - T_c > 1$  К, то после подачи теплового импульса скорость распространения фронта неоднородности последовательно уменьшалась, а затем меняла знак (происходило сжатие теневой зоны). В реализациях, когда отклонение  $T - T_c$  не превышало 1 К, скорость фронта первоначально также уменьшалась. Однако в дальнейшем происходило

резкое увеличение скорости  $U_z$ . При этом возрастание скорости совпадает по времени с появлением несимметричных искажений фронта неоднородности.

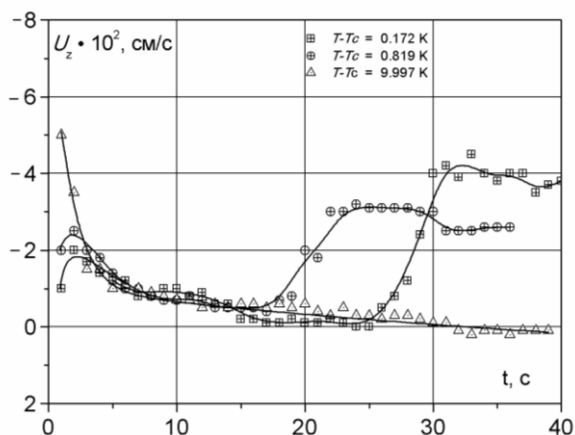


Рис. 22. Скорость распространения температурной неоднородности  $U_z$  в зависимости от времени

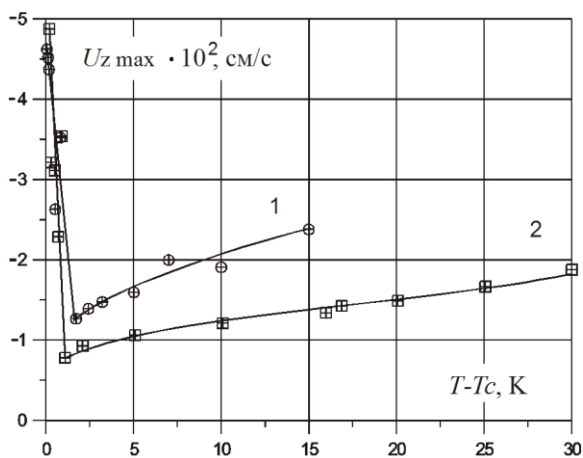


Рис. 23. Максимальная скорость фронта оптической неоднородности в зависимости от отклонения температуры  $T - T_c$  в  $SF_6$  (1),  $CO_2$  (2)

уменьшении отклонения температуры рабочей ячейки от критического значения  $T_c$  кривые  $U_{z max}(T - T_c)$  претерпевают излом, и скорость смещения теплового пятна резко возрастает.

Перейдем к обсуждению зависимости максимальных значений  $Z$ -проекции скорости распространения границы теневой зоны  $U_{z max}$  от величины отклонения  $T - T_c$  для различных рабочих жидкостей (рис. 23). С целью обобщения результатов для обеих сред –  $SF_6$  и  $CO_2$  – в опытах АЛІ – 71, 72, 73 для рассмотрения были выбраны импульсы длительностью 40 с. Значения  $U_z$  регистрировались не раньше, чем через 7 с после начала теплового импульса для того, чтобы не учитывать первоначальный скачок скорости.

Из рис. 23 видно, что кривые  $U_{z max}(T - T_c)$  претерпевают излом и имеют два характерных участка. В области больших отклонений  $T - T_c$  скорость распространения оптической неоднородности сравнительно невелика. По мере приближения температуры полости к критическому значению  $T_c$ , скорость распространения теплового пятна убывает. Это объясняется уменьшением температуропроводности жидкости при приближении к критической точке. При дальнейшем

Важно отметить, что изломы кривых на рис. 23 имеют место при разностях  $T - T_c$ , близких к 1 К, что согласуется с результатами визуального анализа оптических картин. Увеличение скорости теплопереноса и характер распространения затененной области позволяют сделать вывод о возбуждении в рабочей полости крупномасштабного конвективного движения. По мере приближения к критической точке интенсивность такого движения быстро увеличивается (рис. 23). Это объясняется тем, что значения вибрационного критерия  $Ra_v$ , определяющего механизм развития конвекции в быстро меняющемся инерционном поле, также нарастают по мере приближения к критической точке, превышая критическую величину  $10^3$  вблизи  $T - T_c = 1$  К (см. рис. 4).

Перейдем к обсуждению структур интенсивного конвективного движения, возникающего при  $T - T_c < 1$  К. Как отмечалось выше, при таких температурах наблюдалось два типа несимметричного распространения области оптической неоднородности. В одном случае наибольшее конвективное искажение теневой области развивалось в центре рабочей полости (рис. 20, фрагмент «б»). Однако теплоотдача происходила не только с поверхности термистора, но и с растяжек, на которых он крепился. Направление распространения области оптической неоднородности, вызванной теплоотдачей с растяжек, было противоположно направлению движения в центральной части полости. Если учесть, что граница затененной области неоднородности на теневой картине соответствует изотерме, то такой изгиб линий постоянной температуры в полости данной конфигурации характерен для двухвихревого конвективного движения.

Структура такого движения схематически представлена на фрагменте «а» рис. 24. В центральной части рабочей ячейки движется нагретая жидкость, а в пристеночных областях возникают два возвратных течения (направления потоков на схеме изображены штриховыми линиями). Указанная на рисунке компонента микроускорений  $g_x$  на порядок и более превышала по амплитуде две другие.

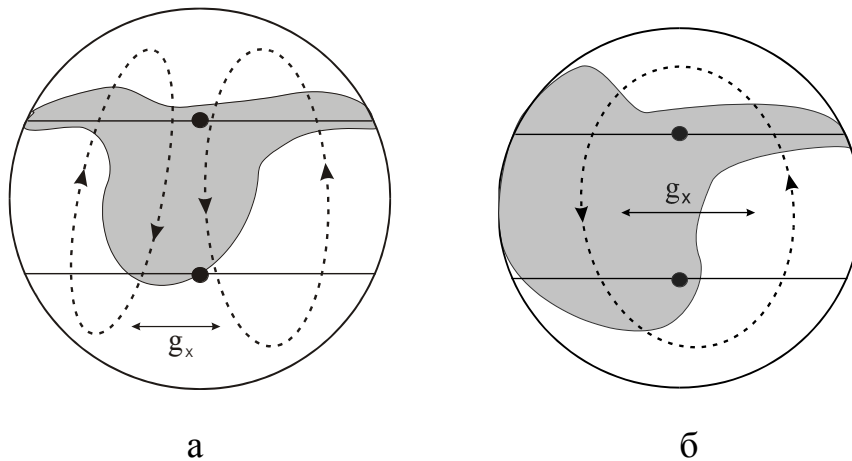


Рис. 24. Схематические изображения конвективных движений, представленных на рис. 4.19 “б” и “в” соответственно

Второй тип несимметричного развития области оптической неоднородности изображен на фрагменте «в» рис. 20. Такой изгиб изотерм характерен для одновихревого конвективного движения, структура которого схематически представлена на фрагменте «б» рис. 24. Вдоль левой стенки рабочей ячейки движется поток горячей жидкости, а вдоль правой существует возвратное течение. Линией со стрелками обозначено направление наиболее сильно меняющейся пространственной компоненты микроускорений  $g_x$ . Причины, вызывающие различие в структурах движений, будут обсуждены в параграфе 1.7.

Перейдем к рассмотрению вынужденного высокочастотного воздействия. Электродинамический вибратор, прикрепленный к фронтальной стороне прибора «ALICE-2», задавал колебания вдоль оси  $Z$  с частотами 1.6 или 2.5 Гц и уровнем микроускорений  $\sim 4 \cdot 10^{-3} g_0$ .

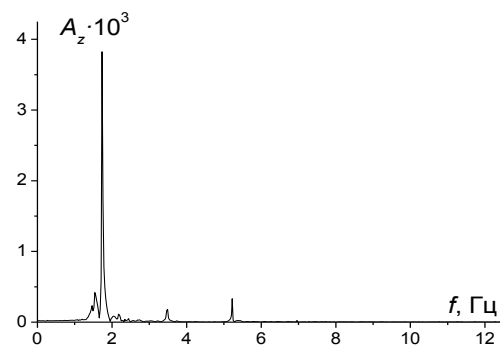
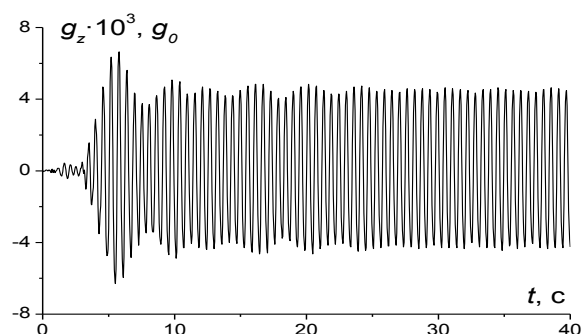
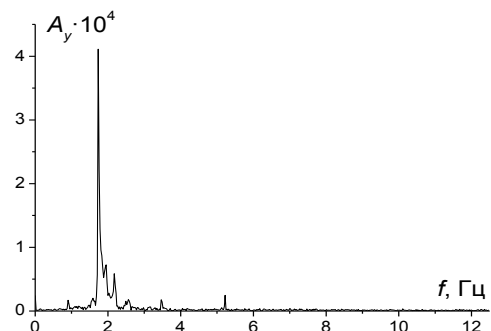
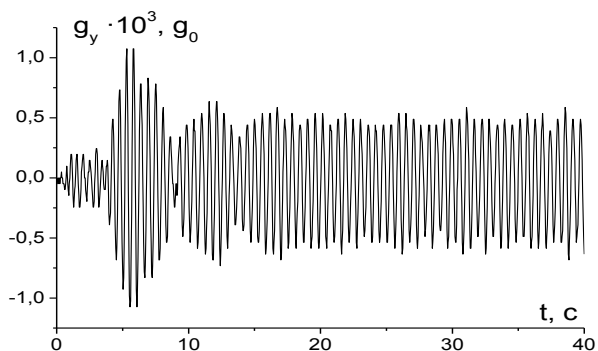
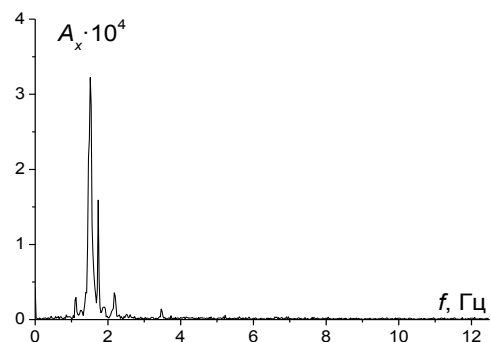
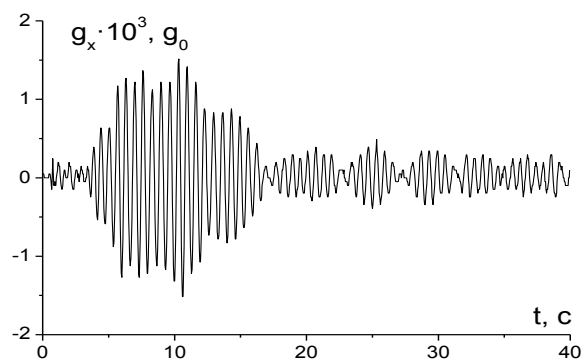


Рис. 25. Осциллограммы и спектры микроускорений при высокочастотном режиме воздействий ( $f = 1.73 \text{ Гц}$ )

Осциллограммы и спектры сигналов акселерометров приведены на рис. 25 и 26. Замечено некоторое отличие эффективной частоты вибраций от запрограммированных значений: в первом случае – 1.73 , а во втором – 2.8 Гц. На осциллограммах (рис. 25) хорошо видно, как в первые секунды после включения вибратора устанавливается колебательный режим. Отметим, что причина появления ускорений вдоль осей  $X$  и  $Y$  состоит в том, что упругий подвес установки не поз-

волял предотвращать смещения прибора вдоль них. Однако уровень таких ускорений на порядок ниже, чем вдоль оси Z. Это позволяет считать колебания, сообщаемые прибору, линейно-поляризованными.

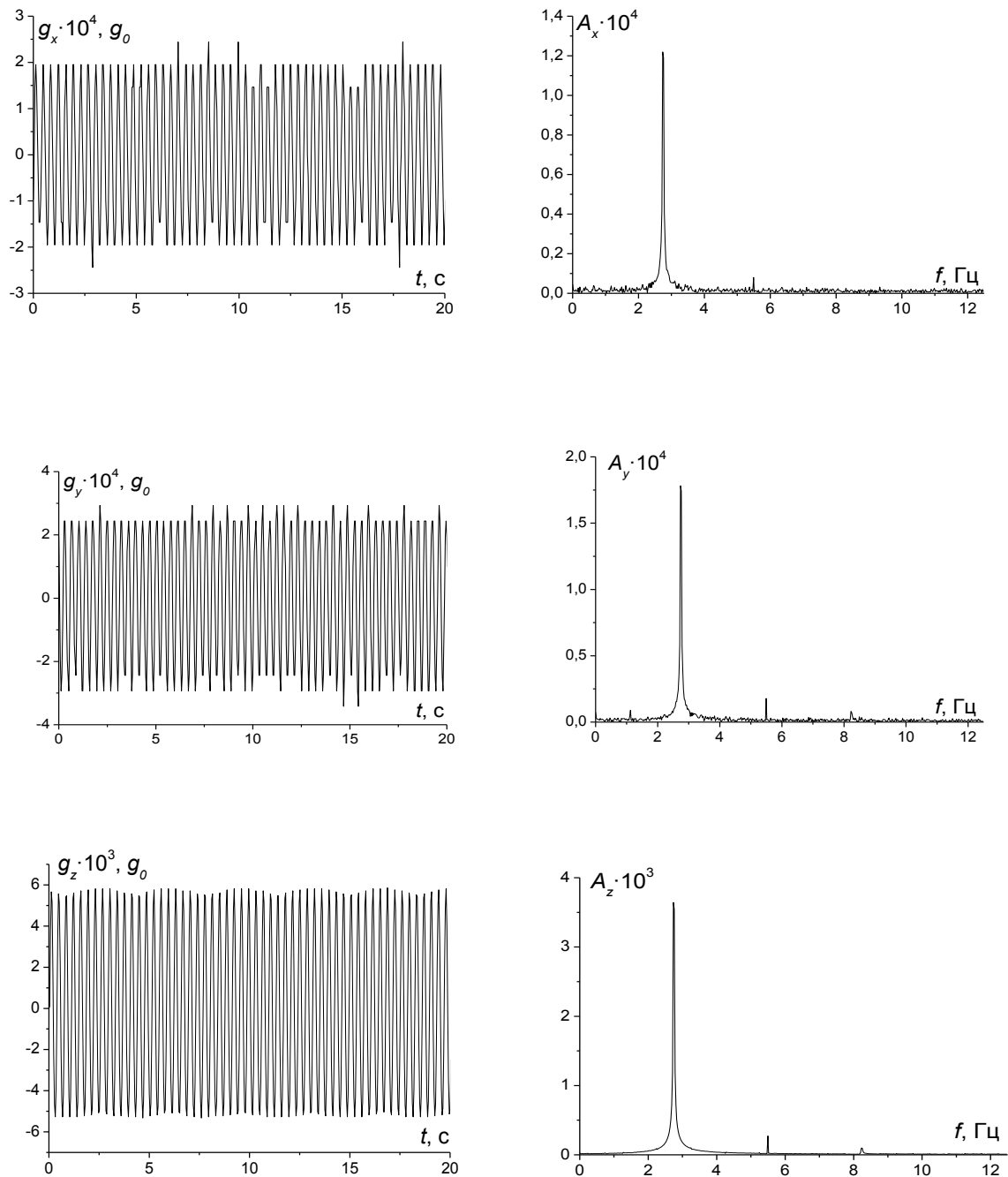
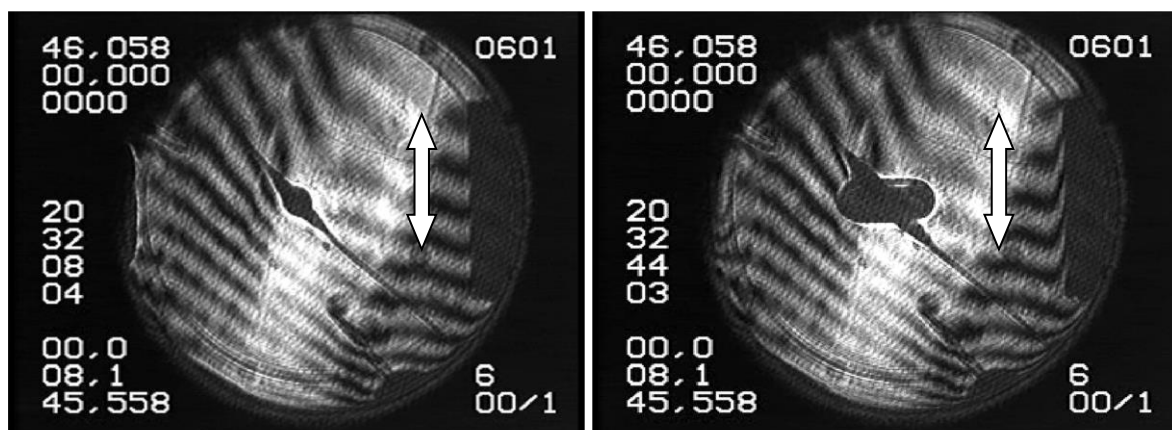


Рис. 26. Осциллограммы и спектры микроускорений при высокочастотном режиме воздействий ( $f = 2.8$  Гц)

Рассмотрим теперь эволюцию области оптической неоднородности при высокочастотных вынужденных вибрациях.

Первое время после подачи теплового импульса затененная область распространялась симметрично относительно линии подвеса нагревательного термистора (см. рис. 27, фрагмент «а») подобно тому, как это происходило при «фоновом» режиме (рис. 16). Через небольшой промежуток времени (около 5 секунд) после начала теплового импульса неоднородность принимала эллипсоидальную форму и симметрично расползалась в направлении, перпендикулярном вибрациям, как показано на рис. 27 (фрагмент «б»). Достигнув максимального размера, пятно медленно рассасывалось, и рабочая жидкость снова приобретала температуру термостата.

Размер неоднородности зависел от типа импульса. При мощных и длительных импульсах, например, 5-го типа (см. табл. 1), оптическая неоднородность распространялась на большую часть рабочей ячейки и достигала стенок. Максимальный размер неоднородности составлял 0.8 – 1.0 диаметра полости.



а

б

Рис. 27. Эволюция области при высокочастотном режиме воздействия (стрелками указано направление вибраций);  
а) через 2 с после начала теплового импульса;  
б) через 38 с после начала теплового импульса.

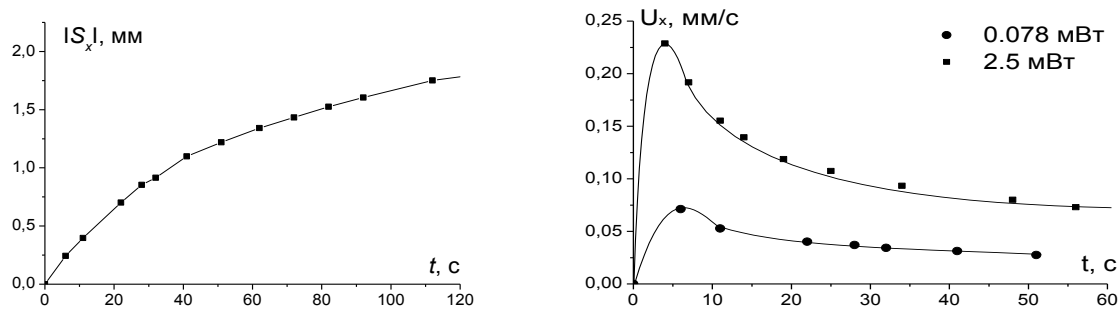
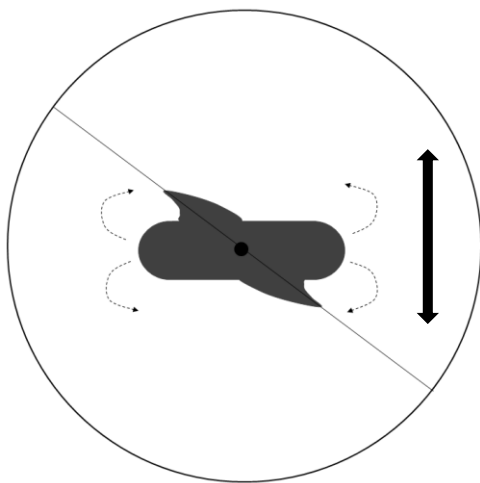


Рис. 28. Графики зависимостей  $|S_x|(t)$  и  $U_x(t)$  в высокочастотном микрогравитационном поле

Рассмотрим характерную эволюцию оптической неоднородности. На рис. 28 представлена зависимость  $|S_x|(t)$ . После подачи теплового импульса модуль перемещения увеличивается, что соответствует интенсивному росту области тепловой неоднородности. На том же рисунке представлен график зависимости X-проекции скорости распространения фронта температурной неоднородности  $U_x$  от времени. Зависимости приведены для импульсов равной продолжительности 120 с, но разной мощности (0.078 мВт, 2.5 мВт). Максимальные значения скорости соответствуют импульсу наибольшей мощности. При этом оценка ве-



личин управляющих параметров даёт значения  $Ra_g = 8 \cdot 10^3$ ,  $Ra_v = 1.6 \cdot 10^4$  ( $T - T_c = 0.5$  K).

Характерный изгиб изотерм (см. рис. 27) предполагает четырехвихревой режим течения, схематически изображенный на рис. 29.

Рис. 29. Схема виброконвективного движения при вынужденном высокочастотном воздействии

### 1.5. Теплообмен в околокритической жидкости под действием низкочастотных микроускорений

Третий тип микроускорений с частотой изменения  $\sim 0.5$  Гц и амплитудой  $10^{-4} \div 10^{-2} g_0$  назовем низкочастотным в силу того, что изучаемая система успевала откликнуться на каждое изменение силового поля. Характерные осциллограмма (фрагмент «а») и спектр (фрагмент «б») для таких микроускорений приведены на рис. 30. Эти данные хорошо согласуются с результатами, приведенными в работе <sup>132</sup>.

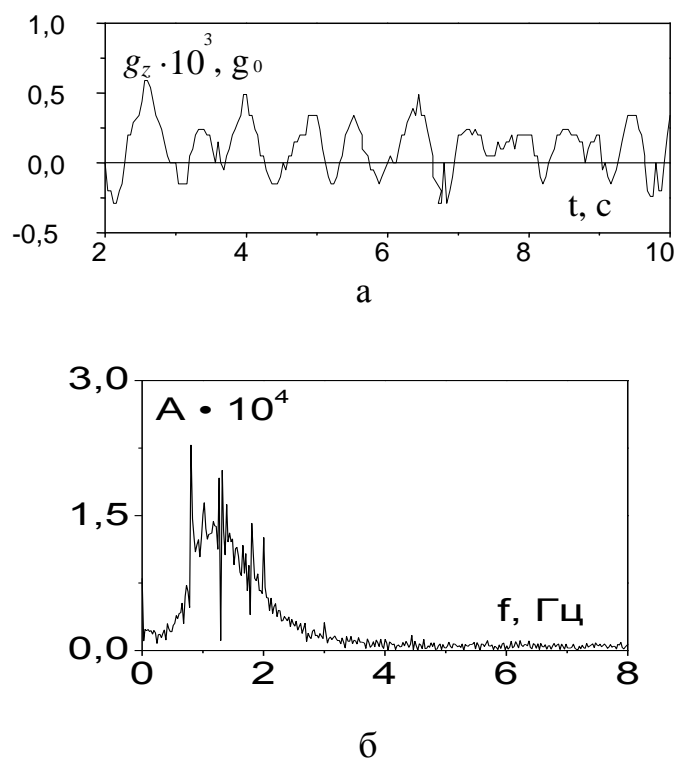


Рис. 30. Осциллограмма (а) и спектр (б) низкочастотного режима микроускорений

Рассмотрим теперь характерные режимы распространения области оптической неоднородности в случае низкочастотного изменения микроускорений. В диапазоне больших значений  $T - T_c$  фронт затененной области распространялся симметрично относительно оси, проходящей через растяжки нагревательного термистора, аналогично режиму, изображенному на рис. 19. При значениях  $T - T_c$  порядка 1 К и меньше низкочастотные микроускорения также не оказывали существенного влияния на распространение фронта затененной зоны. Од-

нако при этом вся область оптической неоднородности совершала периодические колебания в направлении, приблизительно совпадающем с направлением самой сильноменяющейся компоненты микроускорений.

Частота колебаний пятна была близка к частоте изменения инерционного поля, а амплитуда не превышала  $1/5$  радиуса полости. Структура такого режима схематически представлена на рис. 31. Несимметричность теневой зоны относи-

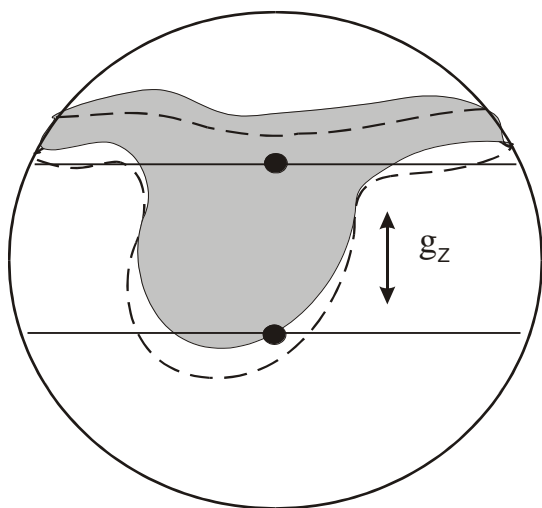


Рис. 31. Схематическое изображение вынужденных колебаний области оптической неоднородности при низкочастотном режиме микроускорений

тельно нагревателя объясняется тем, что низкочастотным микроускорениям предшествовал высокочастотный режим, влияние которого описано в параграфе 1.4. Область оптической неоднородности изображена в моменты максимального отклонения от среднего положения. Стрелкой отмечена ориентация наиболее сильноменяющейся компоненты микроускорений  $g_z$ .

Из графика зависимости  $Ra_g(T - T_c)$  (см. рис. 4) видно, что при  $T - T_c \sim 1$  °С значения чисел Рэлея превышают величину  $10^3$ , достаточную для развития термогравитационного конвективного движения. Таким образом, обнаруженные качания области оптической неоднородности, вызванной тепловым импульсом нагревательного термистора, можно классифицировать как вынужденные инерционно-конвективные колебания.

Перейдем к обсуждению эволюции области тепловой неоднородности при вынужденном низкочастотном воздействии на прибор. Опыты этого типа осуществлялись при непосредственном участии экипажа ОК «МИР». В первой серии экспериментов один из космонавтов должен был производить равномерное раскачивание установки «ALICE-2» с частотой 0,3 Гц и амплитудой около 3-4 см

в направлении оси  $Z$ . На рис. 32 представлены осциллограммы и спектры микроускорений вдоль осей  $X, Y, Z$  СКК. При анализе данного вида воздействия было отмечено, что частота вибраций совпадала с запрограммированным значением 0.3 Гц, а уровень микроускорений был порядка  $10^{-3}g_0$ .

Во время второй серии опытов экспериментальную установку раскачивали с частотой 0,8 Гц и амплитудой около 3 см в направлении оси  $Z$ . На рис. 33 представлены осциллограммы и спектры микроускорений вдоль осей  $X, Y, Z$  СКК. Частота вибраций совпадала с запрограммированным значением 0.8 Гц, а уровень микроускорений составил  $10^{-2}g_0$ .

В первой серии экспериментов после подачи теплового импульса теневая область, вызванная температурной неоднородностью среды, эволюционировала следующим образом: во время каждого полупериода колебаний наблюдался конвективный факел, распространяющийся в направлении, обратном направлению качания в конкретный момент времени (рис. 34). Этому можно дать следующее объяснение: во время колебаний возникала инерционная массовая сила, достаточная для появления конвективного течения, которая меняла направление на противоположное каждые полпериода. Отклик системы на каждое колебание говорит о том, что данный режим является низкочастотным.

Проанализировать зависимость  $|S_x|(t)$  фронта области оптической неоднородности и скорость в полной мере не представляется возможным, т.к. метод, с помощью которого производились измерения перемещений, не позволяет получить значения ранее, чем через 0,042 с после подачи теплового импульса, а перемещение с максимальной скоростью происходит раньше.

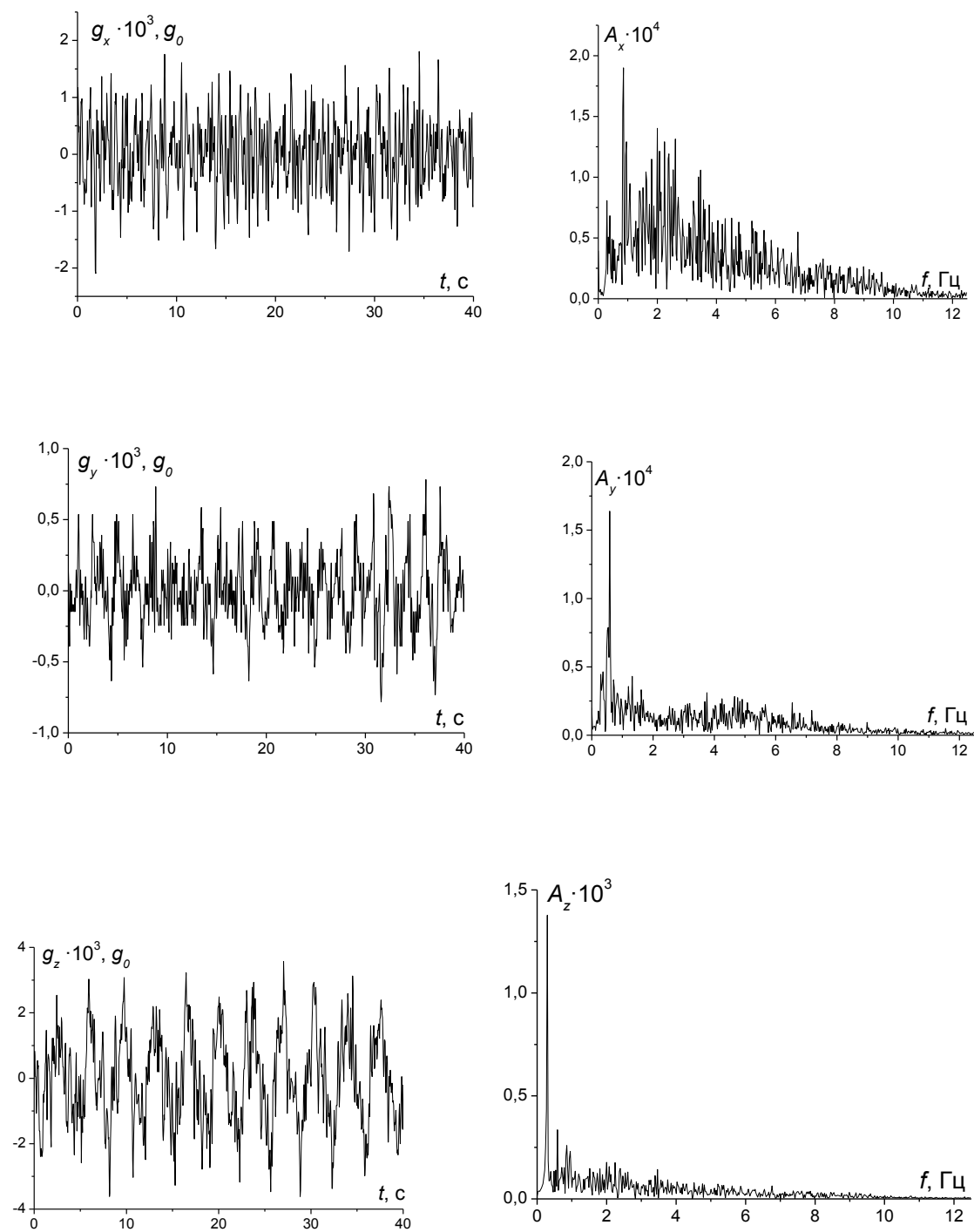


Рис. 32. Осциллограммы и спектры микроускорений при низкочастотном режиме воздействий ( $f = 0.3 \Gamma\text{ц}$ )

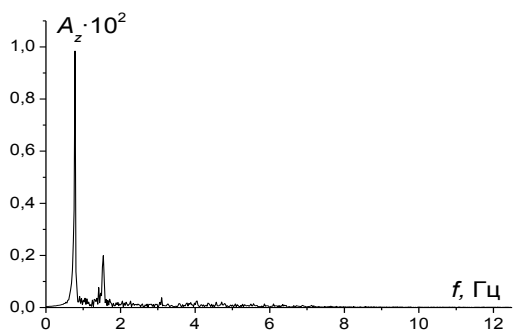
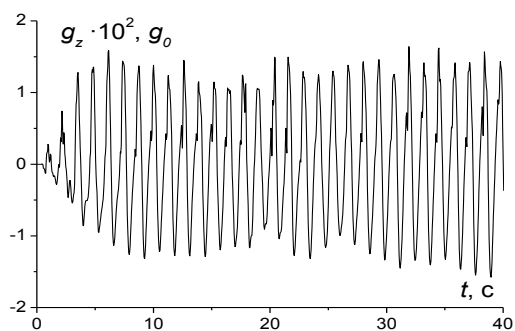
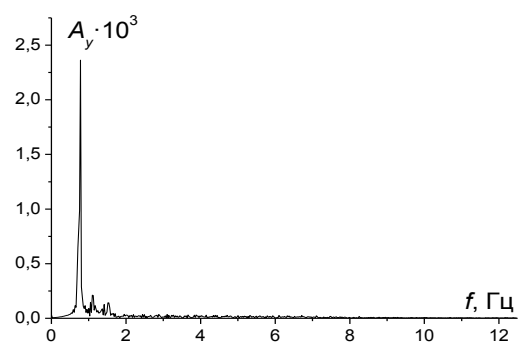
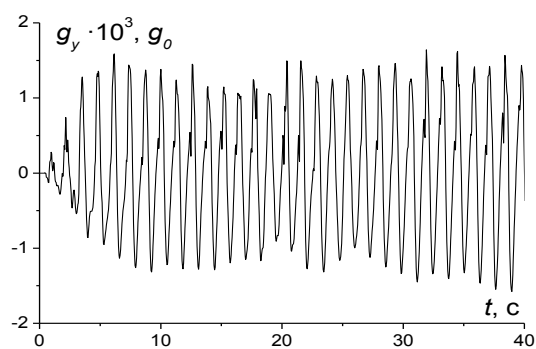
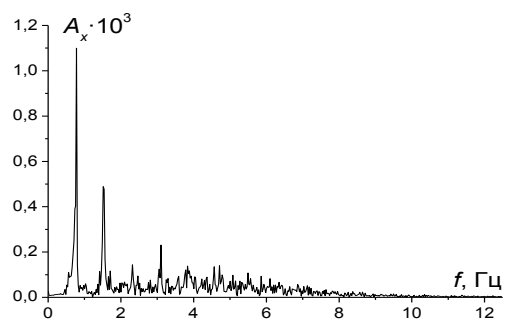
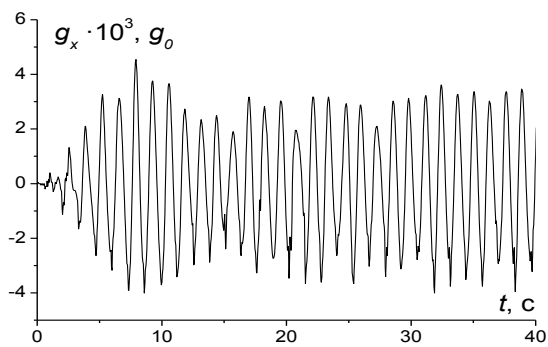


Рис. 33. Осциллограммы и спектры микроускорений при низкочастотном режиме воздействий ( $f = 0.8 \Gamma\text{ц}$ )



Рис. 34. Распространение теневой области при низкочастотном режиме воздействия (стрелками указано направление качаний)

Максимальная скорость, которую удалось зарегистрировать после указанного промежутка времени –  $U = 7$  мм/с (см. рис. 35). При этом оценка величины управляющего параметра  $Ra_g$  дает значение  $3.6 \cdot 10^4$  ( $T - T_c = 0.5^\circ\text{K}$ ).

Вторая серия экспериментов подтверждает приведенные ранее результаты. Несмотря на то, что частота воздействия была больше в 2.5 раза, чем в первой серии экспериментов,

наблюдался такой же тип распространения теневой области. Оценка величины управляющего параметра  $Ra_g$  дает значение  $3.7 \cdot 10^5$  при  $T - T_c = 0.05$  К, и  $Ra_g = 3.3 \cdot 10^5$  при  $T - T_c = 0.5$  К. Структуры движения и скорости распространения неоднородности сопоставимы с результатами первой серии экспериментов.

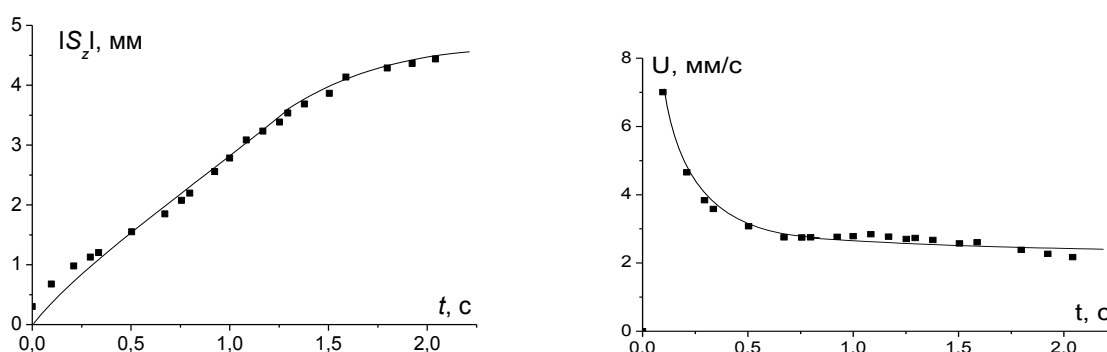


Рис. 35. Графики зависимости перемещения фронта теплового пятна  $|S_z|$  и его скорости  $U$  от времени для низкочастотного режима микроускорений

## 1.6. Совместное действие термовибрационного и термоинерционного механизмов конвекции

В области малых отклонений температуры среды от критического значения ( $T - T_c < 0.5$  К), когда система наиболее чувствительна к микрогравитационной обстановке, наблюдались движения, являющиеся суперпозицией описанных выше режимов.

Так, при вынужденном высокочастотном воздействии на оборудование «ALICE-2» можно было заметить, что сначала тепловая неоднородность распространялась симметрично, а затем, из-за влияния термовибрационного механизма движения, приобретала форму эллипсоида, ориентированного длинной полуосью перпендикулярно вибрациям. В то же время, откликаясь на каждое внешнее воздействие, затененная область совершала колебания в направлении вибраций (ось  $Z$ ) с небольшой амплитудой (примерно 0.1 от поперечного размера неоднородности). Это связано со слабым влиянием термоинерционного механизма.

При низкочастотном вынужденном воздействии ( $f = 0.8$  Гц) во время каждого полупериода колебаний прибора «ALICE-2» как целого появлялся термик, распространяющийся в направлении, обратном движению прибора. Позднее тепловые неоднородности начинали эллипсоидально вытягиваться перпендикулярно вибрациям. Это можно объяснить тем, что после прекращения подачи тепла градиент температуры уменьшался, и, соответственно, уменьшались значения управляющих параметров. Поскольку  $Ra_g = 3.0 \cdot 10^4$ , а  $Ra_v = 3.6 \cdot 10^4$  при  $T - T_c = 0.5^\circ\text{К}$ , то термоинерционный и термовибрационный механизмы конвекции оказывали влияние на движение неоднородности в равной степени. В силу остывания среды действие термоинерционного механизма ( $Ra_g$ ) прекращалось немного раньше (см. рис. 4), чем термовибрационного, и термики постепенно принимали форму эллипсоида (см. рис. 36).

Кроме этого, был реализован эксперимент, в котором вручную задавали вращательные вибрации с частотой 1.0 Гц и амплитудой 10 см. При анализе характерных для данного вида воздействий осциллограмм и спектров (рис. 37) было отмечено, что частота вибраций совпадала с запрограммированным значением 1.0 Гц, а максимальный уровень микроускорений (проекция на ось Z) составил  $\sim 10^{-2}g_0$ .

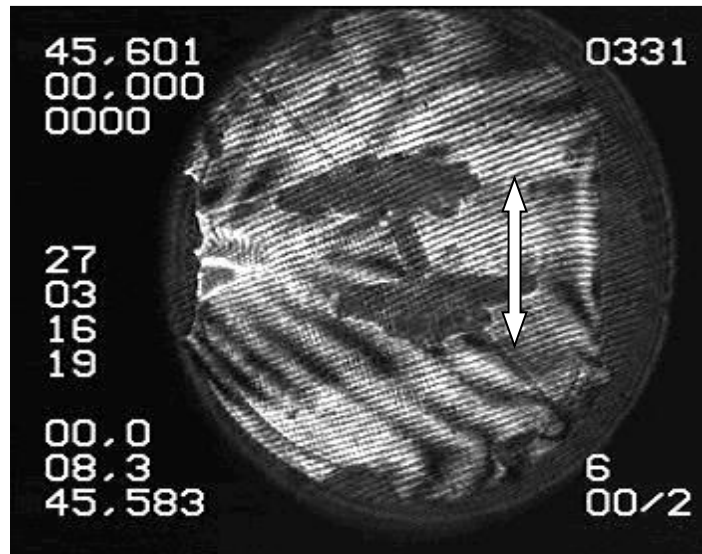


Рис. 36. Распространение тепловой неоднородности под действием двух механизмов конвекции. Стрелкой указано направление вибраций

При этом тепловая неоднородность распространялась каждые полпериода вдоль направления качаний в виде конвективных факелов, которые сразу начинали вытягиваться в эллипсоиды, перпендикулярные этому направлению. Во время воздействий неоднородность немного покачивалась как целое в направлении вибраций. Оценка управляющих параметров дала следующие значения при  $T - T_c = 0.05 \text{ K}$ :  $Ra_g = 3.7 \cdot 10^6$ ,  $Ra_v = 8.0 \cdot 10^8$  и  $Ra_s = 3.5 \cdot 10^4$ . Следовательно, все механизмы движения вносят вклад в эволюцию теневой области. При одинаковых отклонениях от критической температуры структуры тепловых неоднородностей были подобны, а скорости их распространения сопоставимы с таковыми при линейных воздействиях.

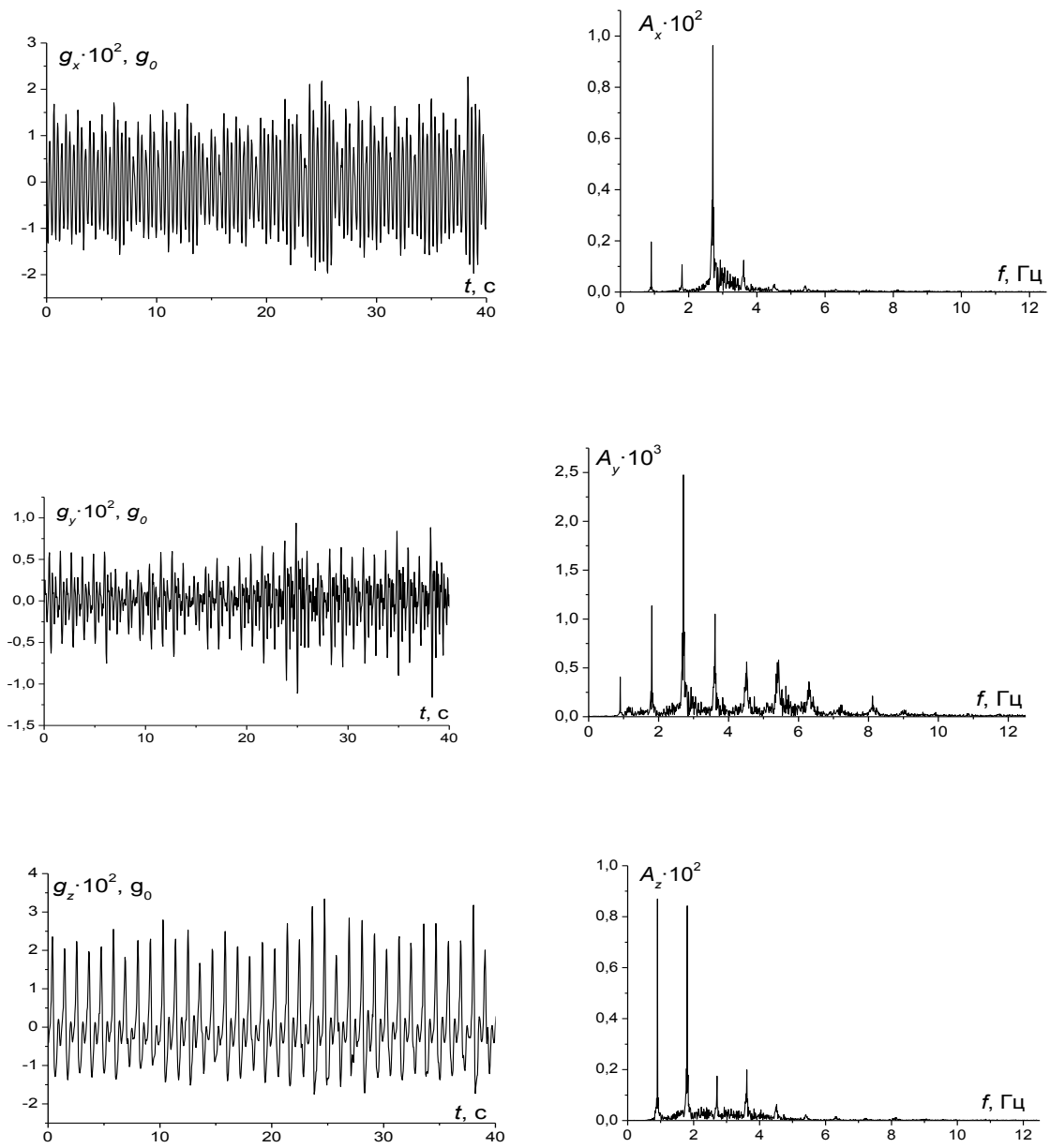


Рис. 37. Осциллограммы и спектры микроускорений  
при маятниковых качаниях большой амплитуды ( $f = 1.0 \Gamma\text{ц}$ )

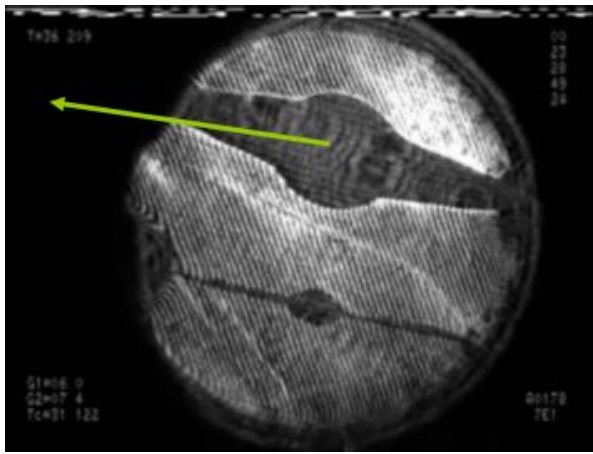
## 1.7. Влияние квазистатических микроускорений на теплообмен

При описании структуры теплообмена в высокочастотном поле микроускорений (см. параграф 1.4) остался открытым вопрос о причинах, вызывающих развитие несимметричности фронта оптической неоднородности в том или ином направлении. Наземное моделирование (см. главу 2) показало, что квазистатическое ускорение, имеющее ненулевую проекцию на плоскость рабочей ячейки, однозначно навязывает направление развития виброконвективного потока.

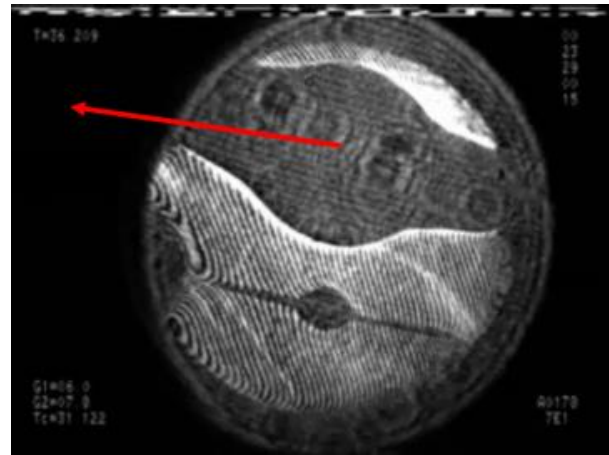
Для обнаружения влияния квазистатической компоненты микроускорения на тепломассообмен в условиях орбитального полета был проведен анализ видеоизображений, полученных в серии опытов ALI-71, 72, 73, и были систематизированы характерные режимы движений области оптической неоднородности. Для типичных реализаций из телеметрической информации о полете ОК «Мир» были рассчитаны<sup>133</sup> значения компонент вектора квазистатического микроускорения  $\vec{n}$  (см. формулу 1) в месте расположения центра масс прибора «ALICE-1». Далее совмещались изображение области оптической неоднородности и проекция  $\vec{n}$  на плоскость рабочей ячейки.

В результате обработки экспериментальных данных обнаружено, что в диапазоне температур рабочей жидкости  $T - T_c > 1$  К квазистатическое микроускорение не влияет на теплообмен в околоскритической среде (см. оценку конвективной чувствительности на рис. 4). На рис. 38 проиллюстрировано симметричное распространение тепловой неоднородности, а также указана величина и ориентация проекции  $\vec{n}$  на плоскость рабочей полости.

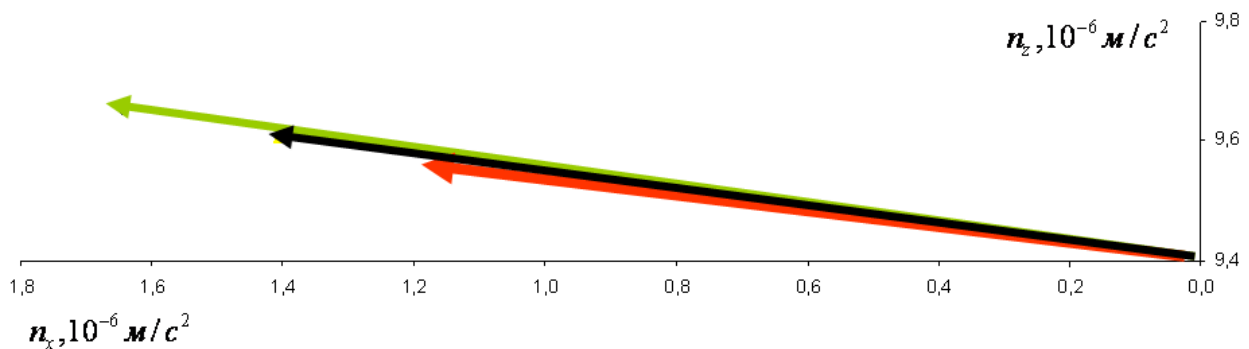
Рассмотрим теперь влияние направления  $\vec{n}$  на структуру теплообмена в области температур рабочей среды  $T - T_c \leq 1$  К.



*Изображение пятна через 25 с после подачи теплового импульса,  $T - T_c = 5.08 \text{ K}$*



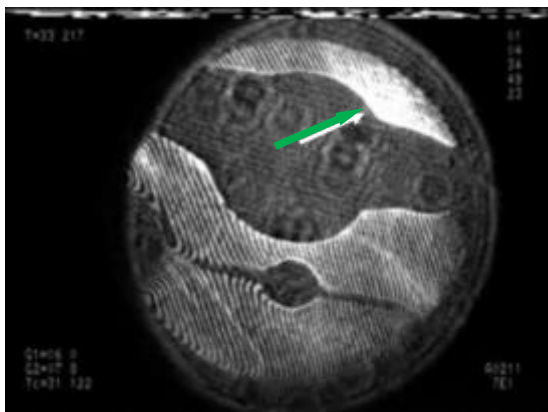
*Изображение пятна через 50 с после подачи теплового импульса,  $T - T_c = 5.08 \text{ K}$*



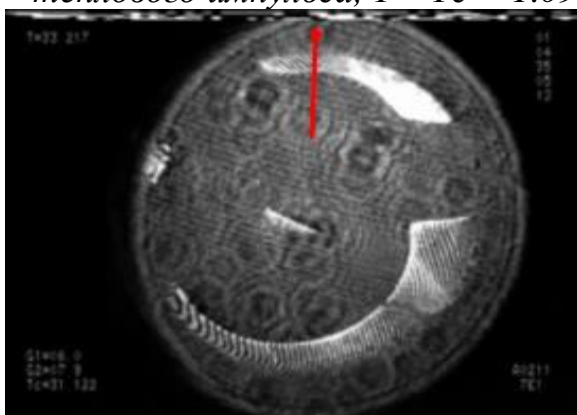
*Проекция квазистатического ускорения  $\vec{n}$  на плоскость рабочей ячейки. Зеленым обозначено ускорение через 25 с после теплового импульса, красным – 50 с, а черным - среднее значение.*

**Рис. 38. Симметричное распространение тепловой неоднородности при  $T - T_c > 1 \text{ K}$**

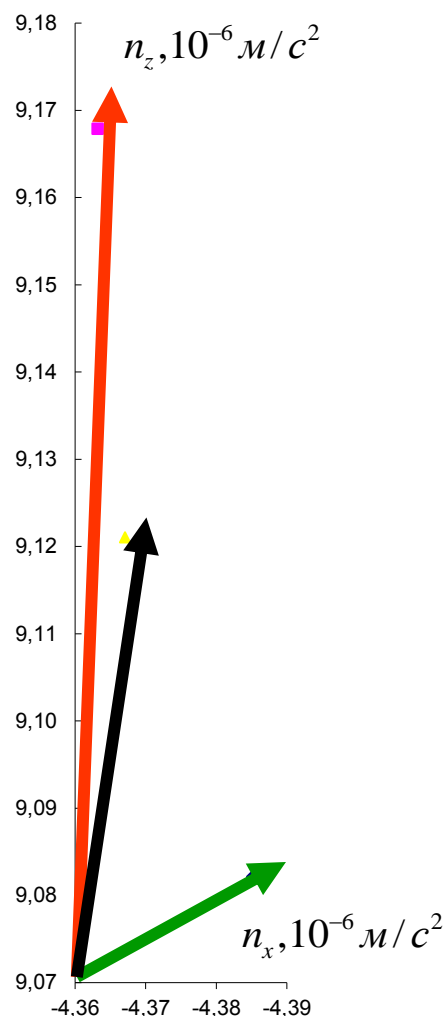
В этом случае направление развития виброконвективного искажения симметричности фронта оптической неоднородности во всех реализациях противоположно квазистатическому микроускорению  $\vec{n}$ . Данный эффект иллюстрируется на рис. 39.



*Изображение пятна через 23 с после подачи теплового импульса,  $T - T_c = 1.09$  K*



*Изображение пятна через 39 с после подачи теплового импульса,  $T - T_c = 1.09$  K*



*Проекция квазистатического ускорения  $\vec{n}$  на плоскость рабочей ячейки. Зеленым обозначено ускорение через 23 с после теплового импульса, красным – 39 с, а черным - среднее значение.*

*Рис. 39. Квазистатическое ускорение задает противоположно направленное развитие виброконвективного искажения симметричности фронта оптической неоднородности при  $T - T_c \leq 1$  K*

Для изучения влияния квазистатических ускорений, возникающих при вращательном движении космического аппарата, на теплообмен в околокритической жидкости, с прибором «ALICE-2» был проведен следующий опыт. За минуту до подачи теплового импульса кратковременным включением двигателей ориентации было создано равномерное вращение ОС «Мир» в течении 15 мин со средней угловой скоростью  $\omega_{cp} = 0,0034$  с<sup>-1</sup>. Сначала тепловая неоднородность в

рабочей ячейке распространялась симметрично, а затем начала медленно смещаться как целое в направлении оси  $Z$ . Эволюция оптической неоднородности иллюстрируется фоторядом на рис. 40.

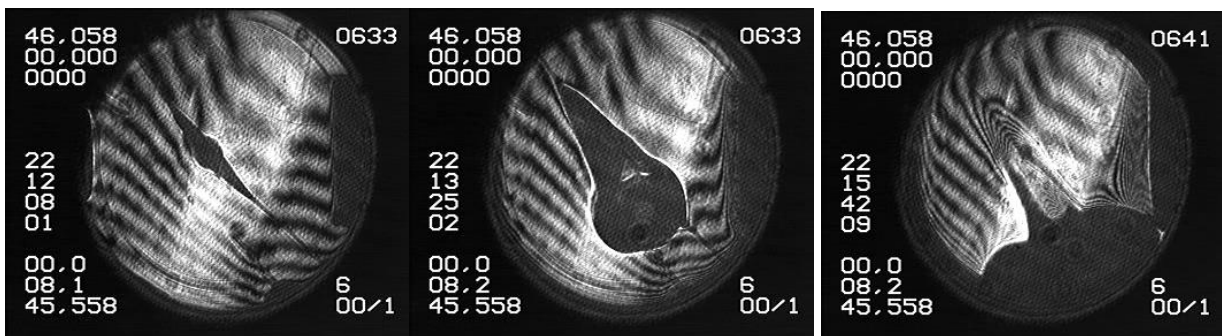


Рис. 40. Эволюция теневой области при развороте станции; изображения пятна через 3, 77 и 214 с после подачи теплового импульса, соответственно

Анализ линейных микроускорений, проведенный по данным встроенных в прибор акселерометров, показал, что осциллограммы не имеют постоянной составляющей  $Z$ -компоненты микроускорений. Схема положения экспериментальной ячейки при вращении с привязкой к СКК представлена на фрагменте «а» рис. 41.

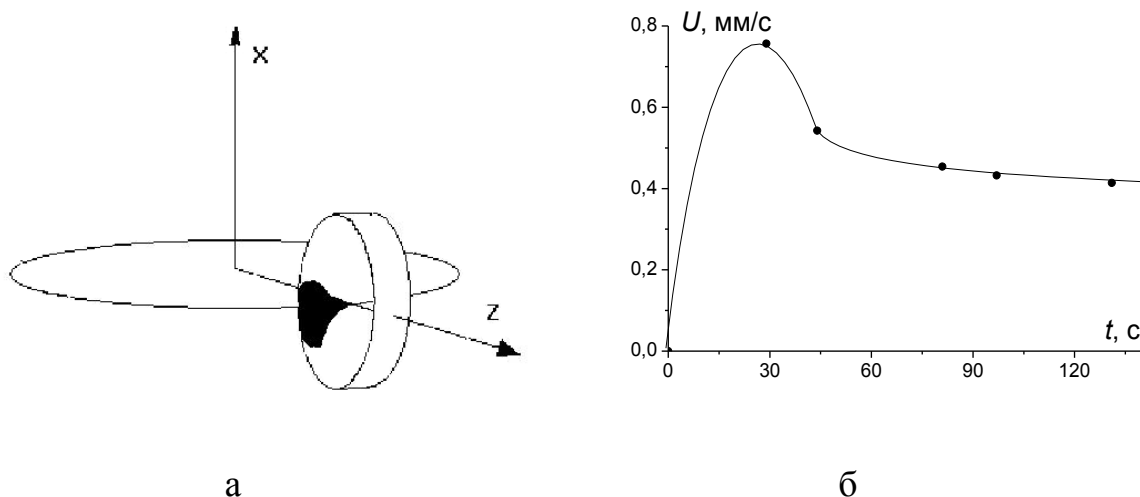


Рис. 41. «а» - положение экспериментальной ячейки при вращении ОК «МИР», «б» - скорость распространения фронта тепловой неоднородности при вращении

Вектор угловой скорости направлен по оси  $X$ . Расчёт квазистатической компоненты микроускорения, обусловленный равномерным вращением, даёт значение  $4.7 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$  в направлении оси  $Z$ . Максимальная скорость распространения неоднородности составила  $7.5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$  (см. фрагмент «б» рис. 41). Это значение на порядок меньше, чем скорость при низкочастотных воздействиях и в 2–3 раза больше, чем при высокочастотных.

### **Контрольные вопросы к главе 1**

1. Почему при интерпретации результатов описываемых опытов пренебрегалось эффектами сжимаемости в околокритической среде?
2. Почему тепловые импульсы термистора производились в тех случаях, когда рабочая жидкость переводилась из сверхкритической области к точке фазового перехода за счет уменьшения температуры среды?
3. Почему по мере приближения температуры среды к критической точке время между тепловыми импульсами увеличивалось?
4. Чем отличается реакция конвективной системы на низко- и высокочастотные инерционные воздействия?
5. Как влияла на виброконвективные процессы квазистатическая компонента микроускорений?

## **2. НАЗЕМНОЕ ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ**

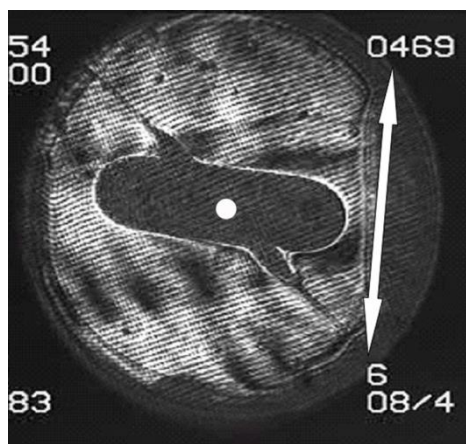
В 1995-2000 годах на орбитальной станции «Мир» проводилась серия российско-французских экспериментов по изучению влияния инерционных микроускорений на режимы теплообмена в сверхкритических жидкостях. Основным результатом исследований стало обнаружение термовибрационного (см. параграф 1.4) и термоинерционного (см. параграф 1.5) конвективных движений в условиях реальной невесомости и контролируемого микрогравитационного воздействия. Однако структуры вибрационной конвекции в разных экспериментах, выполненных на оборудовании серии «ALICE», не воспроизводились. Было предположено, что это обусловлено различной интенсивностью вибрационного воздействия и влиянием квазистатических остаточных микроускорений (см., например, параграф 1.7). Таким образом, актуальным является наземное моделирование термовибрационных течений, генерированных микрогравитационной обстановкой на борту орбитальных аппаратов.

В данной главе описывается лабораторное моделирование влияния быстроменяющихся ускорений инерционной природы и квазистатической компоненты, вызванной остаточной гравитацией, на структуры конвективных течений от точечного источника тепла или холода. Результаты таких моделирований опубликованы, например, в работах <sup>134, 135, 136, 137</sup>.

### **2.1. Методика наземного моделирования конвекции в реальной невесомости**

В космосе серии орбитальных опытов проводились в различное время, но на схожем оборудовании («ALICE-1» и комплексе приборов «Дакон» <sup>138</sup>, «ALICE-2» и электродинамический вибратор ЭДВ-А) в подобной микрогравитационной обстановке. В случае высокочастотного воздействия на систему наблюдались осредненные конвективные течения термовибрационной природы. Однако структуры таких потоков, обнаруженные в различных опытах, существенно

отличались. Например, фрагмент «а» рис. 42 иллюстрирует структуру теплопереноса в контролируемом высокочастотном микрогравитационном поле, а фрагмент «б» – в реальной невесомости. Изображения получены с помощью теневого



а



б

Рис. 42. Структуры теплопереноса в орбитальных экспериментах, а) контролируемые высокочастотные микроускорения, б) фоновый режим

метода в первом случае через 35 с, а во втором – через 23 с после начала теплового импульса. Белыми кружками отмечено место расположения нагревателя, белые стрелки показывают ориентацию максимальной компоненты высокочастотных микроускорений. Отметим также, что в случае фоновых воздействий направление распространения тепловой неоднородности в некоторых реализациях могло изменяться на противоположное.

По нашему мнению, различия в структурах течений могли быть вызваны неодинаковыми начальными условиями и уровнями микроускорений. В ряде экспериментов нагрев точечного источника тепла осуществлялся во время контролируемого микрогравитационного воздействия с характерной высокочастотной составляющей. Тогда несимметричное распространение тепловой неоднородности (рис. 42, фрагмент «а») было вызвано виброконвективными течениями. В других реализациях высокочастотная компонента фоновых микроускорений орбитального комплекса воз-

никала после подачи теплового импульса. В этом случае первоначально симметричное относительно нагревателя распространение тепловой неоднородности затем искажалось (рис. 42 «б») виброконвективным теплопереносом.

Оценка величины относительного вибрационного ускорения  $b \omega^2 / g_0$ , проведенная по показаниям встроенных микроакселерометров приборов «ALICE», дает значения  $10^{-1}$  в первом случае и  $10^{-3}$  во втором. Поскольку интенсивность вибрационного воздействия на конвективную систему значительно меньше в фоновом режиме микроускорений, квазистатическая компонента микрогравитационного поля  $g \sim 10^{-5} g_0$  (см. параграф 1.7) может оказывать влияние на структуру конвективного движения. Однако такие предположения о причинах различия структур виброконвективных течений нуждаются в экспериментальной проверке.

Наземное моделирование актуально также потому, что для повышения микрогравитационной чувствительности конвективной системы в качестве рабочей среды использовалась сверхкритическая жидкость. В таких средах процессы тепло- и массопереноса могут возникать вследствие сжимаемости<sup>139</sup>, а не только под действием термоинерционного или термовибрационного механизмов генерации конвекции. Анализ условий орбитальных экспериментов, выполненный в параграфе 1.2, показал, что определяющее влияние на процессы теплообмена в данном случае оказывала тепловая конвекция. Вывод об основной роли вибрационного и инерционного механизмов возбуждения термоконвекции в обсуждаемых орбитальных опытах также можно принять только после экспериментальной проверки, поскольку в опытах<sup>140</sup> обнаружено ориентирующее воздействие переменных инерционных ускорений на включение легкой или тяжелой фазы.

Рассмотрим условия наземного моделирования тепломассообмена, имеющего место в условиях реальной невесомости на орбитальных космических аппаратах. Анализ микрогравитационной обстановки, выполненный по записям встроенного в прибор «ALICE» трехкомпонентного линейного микроакселерометра, показал, что одна из компонент высокочастотной составляющей ускорений на два и более порядка превышает две другие. Тогда в лабораторных условиях, влияние высокочастотных микроускорений можно моделировать поступательными вибрациями.

Для наземного моделирования процессов тепло- и массопереноса, происходящих в условиях реальной невесомости, необходимо обеспечить термовибрационным течениям интенсивность большую, чем у термогравитационной конвекции в постоянном поле тяжести Земли. В связи с этим нужно использовать конвективную систему с низкой гравитационной чувствительностью. Действие термогравитационного механизма конвекции определяется величиной критерия подобия Рэлея  $Ra_g$ , а термовибрационного – его вибрационным аналогом  $Ra_v$  (для случая поступательных осцилляций). Отношение этих параметров

$$\frac{Ra_v}{Ra_g} = \frac{b^2 \cdot \omega^2 \cdot \beta \cdot \Theta \cdot r^2}{2 g_0 \cdot h^3}$$

показывает, что для увеличения интенсивности вибрационных эффектов в поле тяжести Земли при продольных осцилляциях необходимо выбирать тонкие ( $h$  мало) протяженные ( $r$  велико) горизонтальные слои жидкости с большим значением  $\beta$ . Для достижения высокой вибрационной скорости  $b \omega$  при конечных значениях циклической частоты колебаний  $\omega$  нужно применять механический вибростенд с большой амплитудой вибраций  $b$ . Из условия, обсужденного в параграфе 1.2, следует, что рабочая среда должна удовлетворять приближению несжимаемой жидкости. Поэтому в качестве рабочей жидкости использовался этиловый спирт при нормальных условиях.

Рассмотрим теперь лабораторную установку, удовлетворяющую указанным выше требованиям. На рис. 43 слева направо, сверху вниз изображены горизонтальное сечение слоя жидкости, схема конвективной ячейки (вертикальное сечение) и блок-схема экспериментальной установки. Конвективная камера 1 имела конфигурацию цилиндрического горизонтального слоя с высотой  $h = 0.40$  см и диаметром  $2r = 7.5$  см. Стенки полости изготовлялись из органического стекла. В центре кюветы вертикально располагался цилиндрический керамический нагреватель 2 диаметром 0.18 см. Начальная температура рабочей жидкости 3 была  $20^0$  С. Нагреватель мог поддерживать температуру до  $70^0$  С

с точностью до 0.1 градуса с помощью прибора с обратной связью «Термодат-13». В опытах с источником холода вместо нагревателя устанавливалась медная трубка диаметром 0.4 см, по которой криотермостатом прокачивалась жидкость.

Конвективная ячейка крепилась к вибростендам. Вибрационная платформа могла сообщать кювете поступательные линейно-поляризованные вибрации в горизонтальном направлении. Для измерений и фото-видео-регистрации исполь-

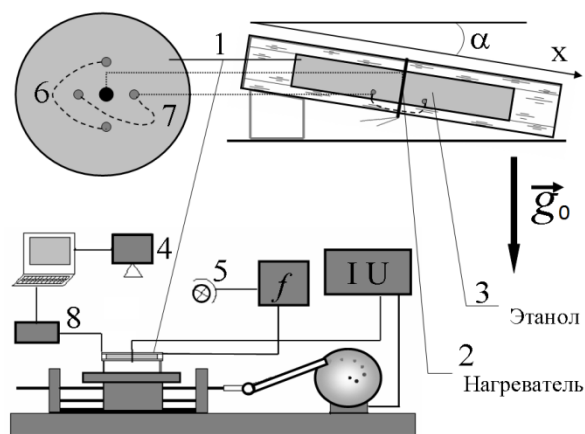


Рис. 43. Схема лабораторной установки

зовались методики, описанные в работе <sup>141</sup>. Отметим лишь, что освещение осуществлялось двумя способами: непрерывное рассеянное освещение светодиодами – для съемок минивидеорегистратором CCIR, совмещенным с кюветой; стробоскопическое освещение 5, синхронизированное с вибростендом, – для цифровой фото-видеокамеры.

Тепловые измерения проводились с помощью двух дифференциальных термопар 6, 7, спаи которых были выставлены в слой жидкости крестообразно относительно нагревателя. Такое расположение датчиков позволяло регистрировать искажение симметрии конвективного теплового потока, распространяющегося от нагревателя. Температура нагревателя измерялась при помощи термопары, один из спаев которой размещался в толще плексигласового кольца, охватывающего рабочую полость, а другой крепился к нагревателю. Сигналы термопар поступали на устройство сбора данных 8 и регистрировались компьютером. Влияние адвективных движений малой интенсивности, неизбежно возникающих в конвективной системе такой конфигурации <sup>142</sup>, выходило за пределы чувствительности методик регистрации данных.

Для визуализации структур конвективных течений в рабочую жидкость примешивались светорассеивающие частицы алюминиевой пудры. Поскольку твердая примесь может оказывать влияние на конвективные движения и вызывать виброконцентрационные эффекты, потребовалось провести серию опытов по определению массовой концентрации пудры, которая не изменяет термогравитационные и термовибрационные потоки. Для этого были приготовлены несколько образцов рабочей жидкости с массовой концентрацией  $C$  алюминиевой пудры, изменявшейся в диапазоне  $10.3 \div 65.8 \text{ кг/м}^3$ .

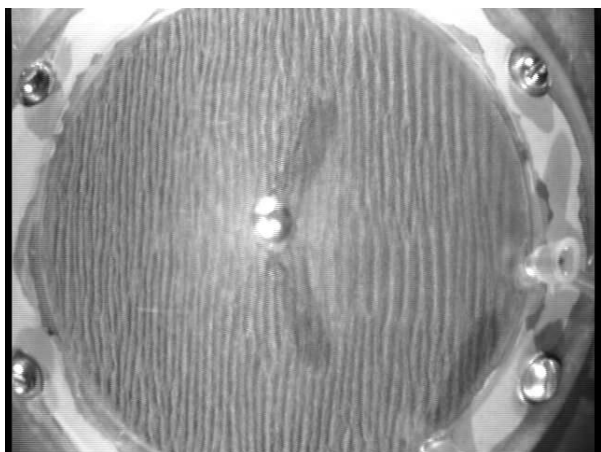


Рис. 44. Изображение волн рельефа на поверхности слоя пудры при  $Ra_g = 7.9 \cdot 10^4$ ,  $Ra_v = 8.6 \cdot 10^3$  для  $C = 65,8 \text{ кг/м}^3$

В результате опытов определено критическое значение массовой концентрации  $C^* = 1.91 \cdot 10^1 \text{ кг/м}^3$ , при котором в исследованном диапазоне параметров возникают ортогональные направлению

вибраций структуры в псевдооживленном слое пудры, подобные обнаруженным в работе <sup>143</sup>. Такой режим проиллюстрирован на рис. 44. Определена (см. рис. 45, фрагмент «а») зависимость порогового значения вибрационного ускорения от концентрации твердой примеси. Зона значений параметров, расположенная выше граничной линии, отвечает области существования концентрационной конвекции. Зависимость волнового числа от частоты колебаний приведена на фрагменте «б» рис. 45. В дальнейшем концентрация твердой примеси, используемой в опытах, была такова, что не оказывала влияния на структуру потоков.

В космических экспериментах центрально-симметричное распространение нагретой области обусловлено бесконвективным режимом теплопередачи. Возникающие термовибрационные конвективные потоки нарушают такую симметрию. При наземном моделировании центрально-симметричный теплоперенос от нагревателя вызван естественной конвекцией термогравитационной природы. Вибрационные эффекты приводят к нарушению симметрии. В области параллельной ориентации градиента температур и оси вибраций имеют место эффекты стабилизации, а в перпендикулярной – дестабилизации конвективных движений. Таким образом, эллипсоидальное искажение центральной симметрии зоны, охваченной конвекцией, является естественной мерой интенсивности термовибрационной конвекции  $I = c/d$ . Здесь  $c$  – длина большой, а  $d$  – малой осей эллипса, вписанного в конвективную структуру.

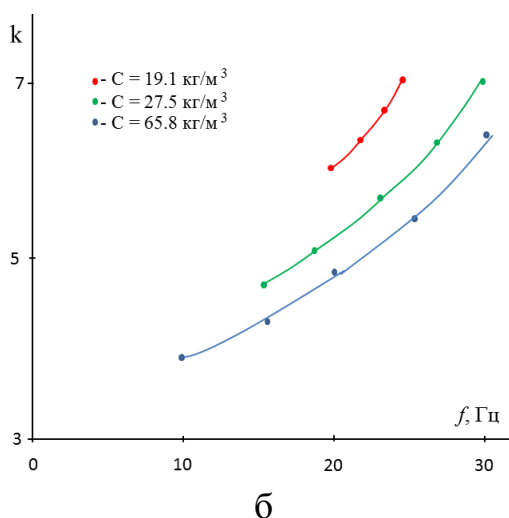
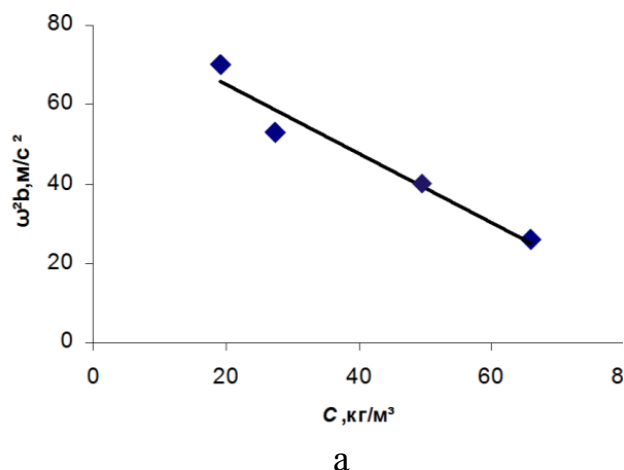


Рис. 45. а) зависимость порогового значения вибрационного ускорения от концентрации примеси, б) зависимость волнового числа концентрационных валиков  $k$  от частоты вибраций

Подобно работе <sup>144</sup>, квазистатическая компонента микроускорений моделировалась с отклонением конвективной камеры от горизонтальной ориентации на угол  $\alpha = 2^\circ$ , который измерялся артиллерийским уровнем АУ-437 М с максимальной погрешностью в  $1'$ . В этом случае проекция вектора  $g_0$  на продольное направление слоя жидкости  $X$  имела порядок величины

татора  $g_0$  на продольное направление слоя жидкости  $X$  имела порядок величины

$g_{0x} = 10^{-2} g_0$ . Относительное вибрационное ускорение платформы достигало величины  $10^1$ . Таким образом, различие между  $g_{0x}/g_0$  и  $b\omega^2/g_0$  имело тот же порядок, что и в обсуждаемых космических экспериментах.

## 2.2. Результаты исследования теплообмена от точечного источника тепла или холода в поле переменных инерционных ускорений

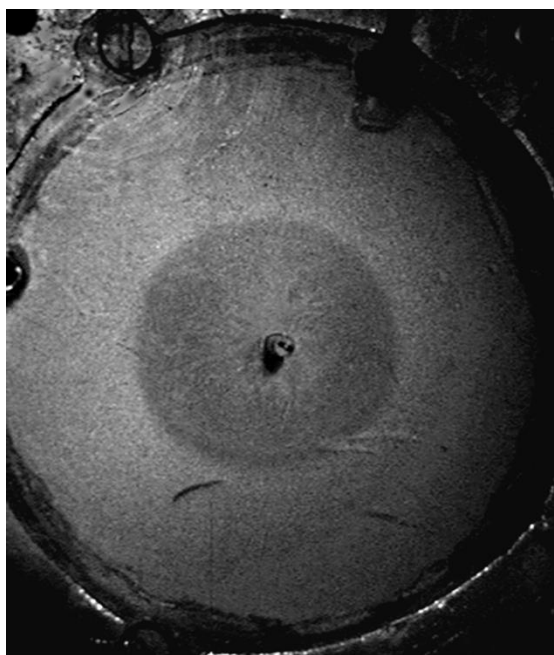


Рис. 46. Фотографическое изображение (вид сверху) конвективной камеры через 100 с после начала нагрева (статический случай).

*Область, охваченная конвекцией, имеет темный цвет.*

*Светлую область образует алюминиевая пудра, осевшая на дно камеры в неподвижной жидкости*

Рассмотрим сначала результаты опытов в статическом поле тяжести. В случае горизонтального расположения слоя жидкости и отсутствия вибраций, при нагреве источника тепла возникала естественная термогравитационная конвекция. Жидкость поднималась вверх около нагревателя и растекалась вдоль верхней границы полости. Возвратный конвективный поток формировался в придонных областях кюветы. Область, охваченная конвекцией, имела центрально-симметричную форму относительно источника нагрева (см. рис. 46). Сигналы дифференциальных термо-

пар 6 и 7 (рис. 42) не превышали уровень шума (0.3 К), что также свидетельствует о симметричном течении. Зависимость скорости распространения конвективного фронта  $V$  от времени  $t$  представлена на рис. 47 (линия 1).

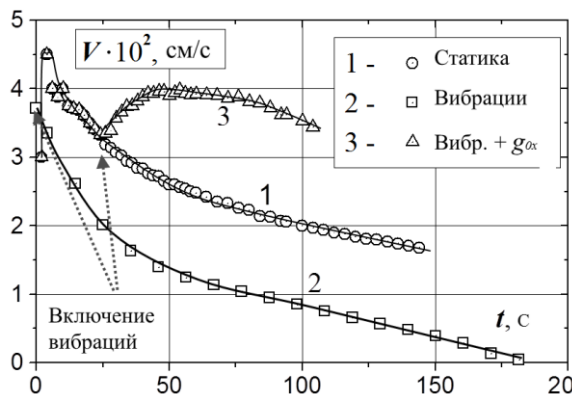


Рис. 47. Зависимость скорости распространения конвективного фронта  $V$  от времени  $t$ . Линия 1 - статический случай, линии 2 и 3 - вибрации горизонтальной и наклонной полости

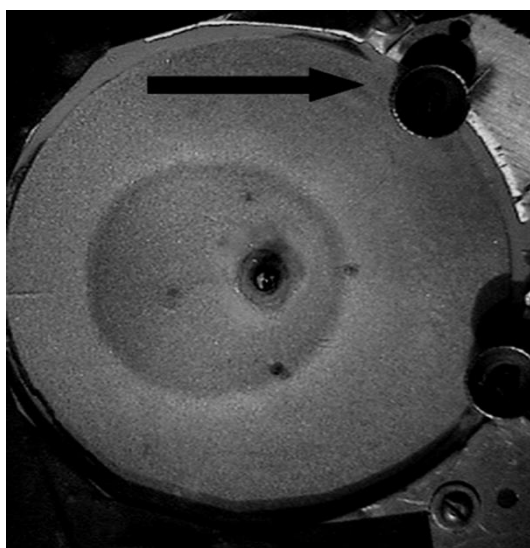


Рис. 48. Изображение (вид сверху) наклонной конвективной камеры (статический случай) через 100 с после начала нагрева. Область, охваченная конвекцией, имеет темный цвет. Черная стрелка показывает ориентацию  $g_{0x}$

Если рабочая ячейка отклонялась ( $\alpha = 2^\circ$ ) от горизонтальной ориентации, то после включения нагрева наблюдалось медленное смещение области, охваченной конвекцией, в сторону верхнего края полости как результат влияния  $g_{0x}$  компоненты ускорения, ориентированной вдоль слоя жидкости (см. рис. 48).

Форма конвективного пятна и скорость  $V$  практически не изменялись. Однако симметрия относительно нагревателя разрушалась и сигнал термомпары 7 достигал значения  $3.2^\circ \text{C}$  через 100 с после включения нагрева, что на порядок превышало показания термомпары 6, которые остались на уровне шума.

Эти результаты соотносятся с данными орбитальных экспериментов при фоновом (неконтролируемом) режиме микроускорений (см. параграф 1.3). Например, зависимость  $V(t)$  на рис. 47 (линия 1) и максимальное значение скорости  $V$  на этой зависимости находятся в качественном и количественном согласии с результатами космических опытов (см. рис. 17), полученными в

бесконвективном режиме. Однако в некоторых орбитальных реализациях тепловая неоднородность медленно дрейфовала относительно термистора. При этом

высокочастотные акселерометры прибора «ALICE» регистрировали характерный фоновый микрогравитационный режим. На основании результатов наземного моделирования можно предположить, что околоритическая конвективная система находилась в поле квазистатической компоненты микроускорений, обусловливавшей такой дрейф тепловой неоднородности.

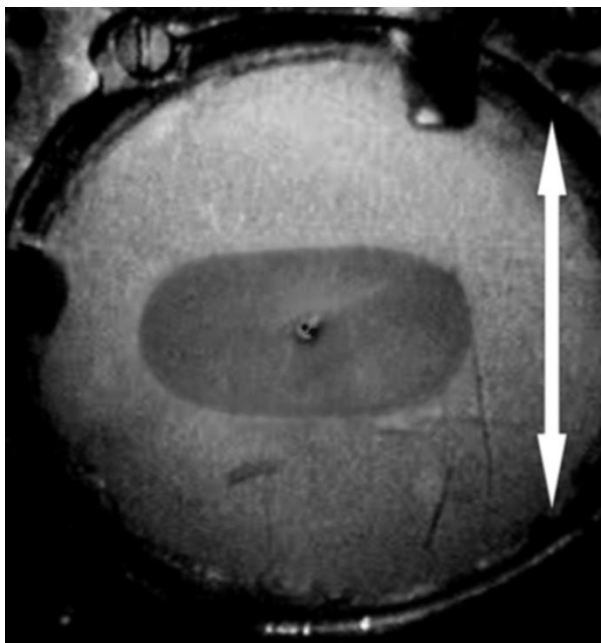


Рис. 49. Изображение (вид сверху) конвективной камеры.

Область, охваченная конвекцией, имеет темный цвет. Изображение приведено через 140 с после начала нагрева, величина параметра  $Ra_v = 9.0 \cdot 10^4$ , белая стрелка показывает ориентацию оси вибраций

Перейдем к рассмотрению результатов опытов в высокочастотном вибрационном поле. В этом случае нагреватель включался после того, как рабочей ячейке придавались высокочастотные осцилляции. Вибрации оказывали существенное влияние на структуру и скорость конвективных потоков. Область, охваченная конвекцией, имела эллиптическую форму, вытянутую в направлении, перпендикулярном направлению колебаний (рис. 49). Изображение получено через 140 с после начала нагрева, величина параметра  $Ra_v = 9.0 \cdot 10^4$ , белая стрелка показывает ориентацию оси вибраций. Зависимость  $V(t)$  в этом случае соответствует линии 2 на рис. 5.6 и находится в хорошем качественном и

количественном согласии с результатами орбитальных экспериментов в поле контролируемых высокочастотных микроускорений (см. параграф 1.4, рис. 28). Карта режимов конвекции изображена на рис. 50 в плоскости параметров  $I$  и  $Ra_v$ . В области значений  $Ra_v < 3.2 \cdot 10^4$  форма пятна, охваченного конвекцией, имела центрально-симметричную относительно нагревателя форму, не отличающуюся от показанной на рис. 46. Такое движение жидкости вызвано термогравитационным механизмом конвекции. Однако, когда величина  $Ra_v$  превышала значение

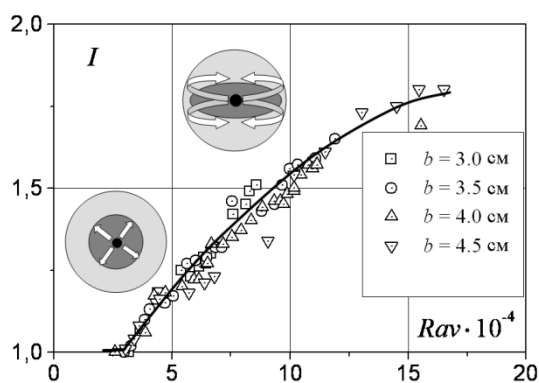
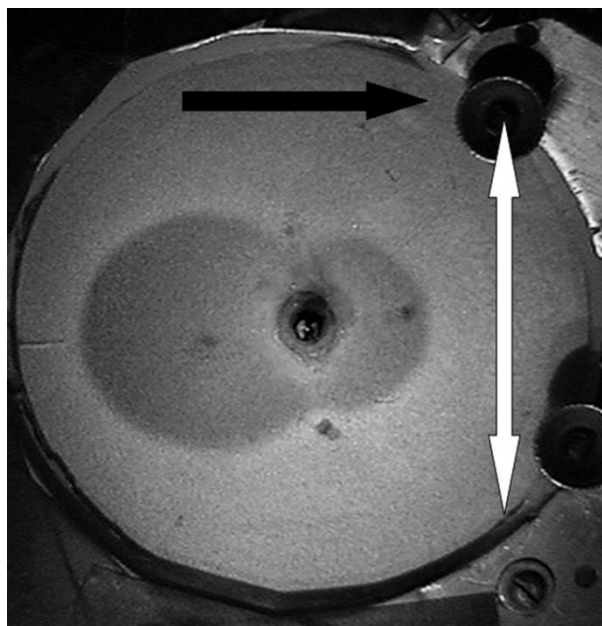


Рис. 50. Карта режимов движения в горизонтальном слое жидкости. На выносках схематически изображены режимы течений. Стрелочки указывают направление движения жидкости

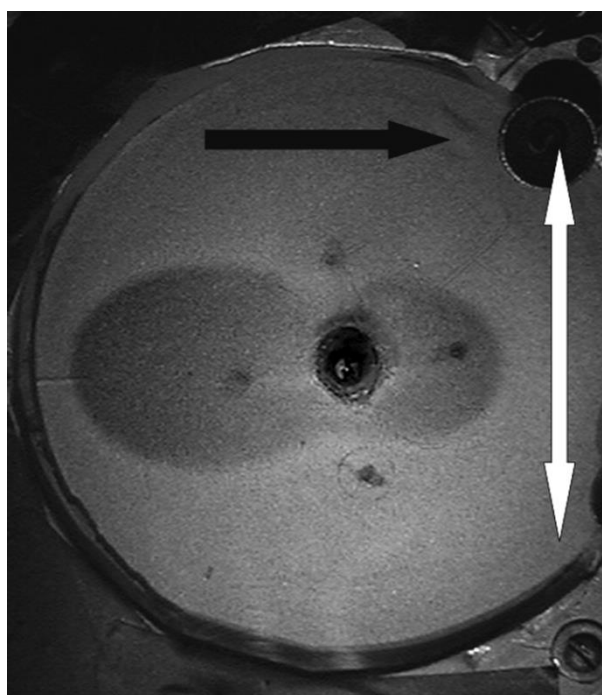
ного направления составлял  $\alpha = 2^0.0'$ . В результате конвективная зона, первоначально имевшая форму окружности (рис. 46), в дальнейшем искажалась так, как показано на рис. 51, фрагмент «а». При этом вибрационное число Рэлея имело значение  $Ra_v = 1.1 \cdot 10^5$ . Изображение получено через 100 с после начала нагрева. Белая стрелка соответствует ориентации оси вибраций, а черная показывает направление продольной составляющей гравитационного поля  $g_{0x}$ . Искращения усиливались по мере роста вибрационного воздействия (рис. 51, фрагмент «б»). Время получения кадра – также 100 с после включения нагрева, а  $Ra_v = 2.3 \cdot 10^5$ .

$(3.2 \pm 0.3) \cdot 10^4$ , структуру движения определял термовибрационный механизм конвекции, что согласуется с результатами орбитальных опытов ( $Ra_v \sim 10^4$ , см параграф 1.4). Наблюдается согласие и по структурам течений (рис. 27, 42 «а»).

Перейдем теперь к рассмотрению высокочастотных вибраций наклонного слоя жидкости. В данном случае для моделирования условий орбитального эксперимента (см. параграф 1.4) вибрации включались через 30 секунд после начала нагрева. Угол отклонения слоя жидкости от горизонталь-



а



б

Рис. 51. Изображение области, охваченной конвекцией при вибрациях наклонного слоя жидкости, “а” -  $Ra_v = 1.1 \cdot 10^5$ , “б” -  $Ra_v = 2.3 \cdot 10^5$ , белая стрелка показывает ориентацию оси вибраций, а черная – направление  $g_{0x}$

Отметим, что отрицательная кривизна фронта конвективной области вблизи нагревателя обусловлена возвратными потоками первоначально покоившейся жидкости, в которой визуализирующие частички успели осесть на дно камеры. Поток имел несимметричную относительно нагревателя форму, и сигнал дифференциальной термопары 7 достигал значения  $4.6^\circ\text{C}$  через 100 с после начала нагрева для случая, изображенного на фрагменте «б». Сигнал термопары 6 вновь не превышал уровня шума измерительного тракта.

Изменение скорости  $V$  со временем для наклонного слоя показано на рис. 47 (линия 3) и по величине, и по виду зависимости хорошо согласуется с данными космических экспериментов (см. рис. 22).

Рассмотрим карту режимов конвекции, представленную на рис. 52 в плоскости параметров  $I$  и  $Ra_v$ . Экстраполируя линию зависимости  $I(Ra_v)$  до пересечения с осью  $I = 1$ , получаем значение параметра  $Ra_v = (3.0 \pm 0.3) \cdot 10^4$ ,

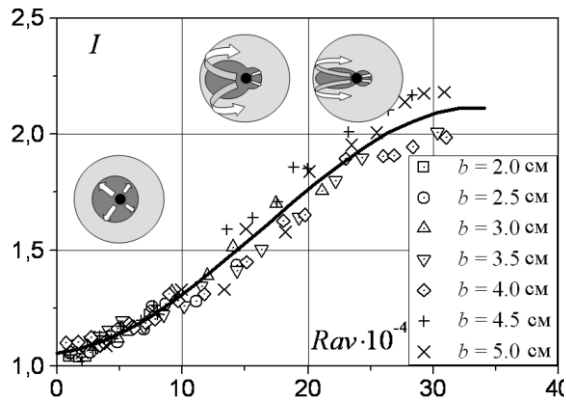
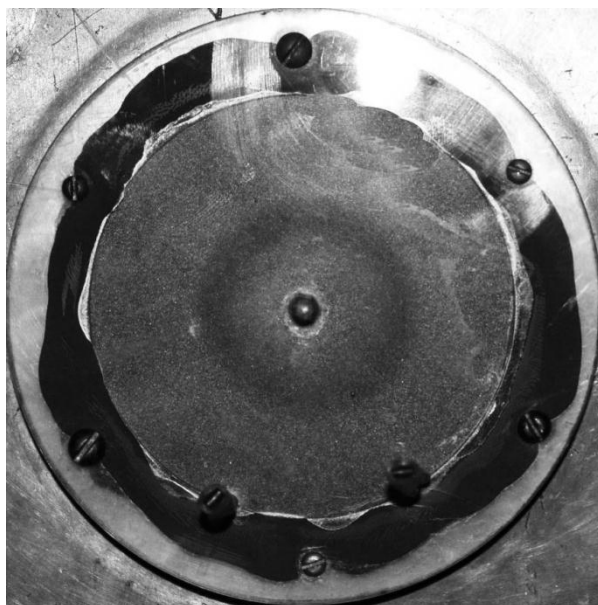


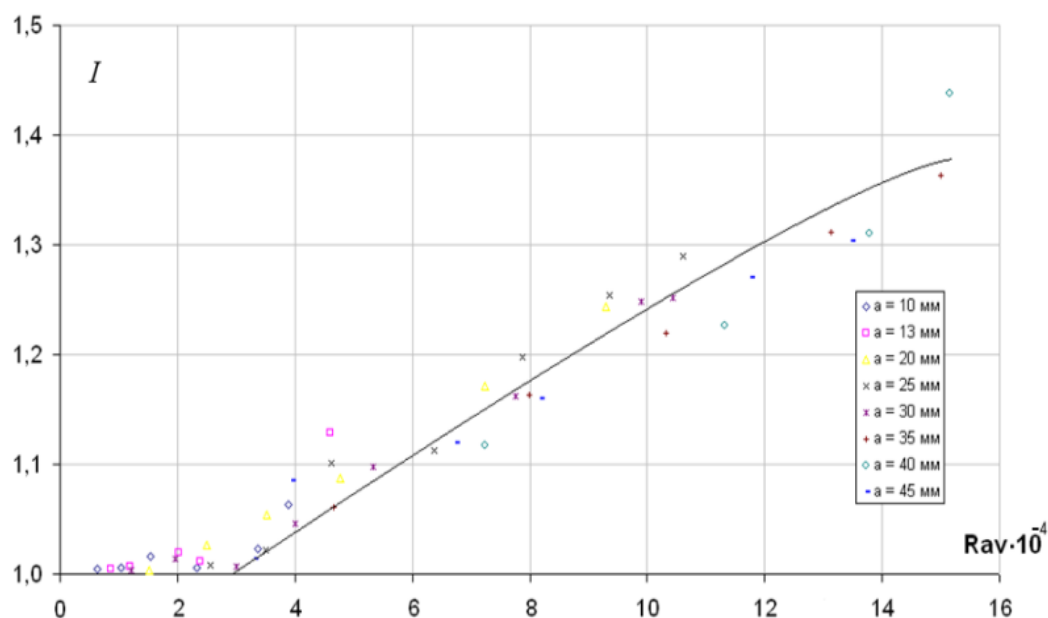
Рис. 52. Карта режимов движения в наклонном слое жидкости. На выносках схематически изображены режимы течений. Стрелочки указывают направление движения жидкости

при котором влияние вибраций на конвективные процессы становится существенным. И в этом случае имеется количественное согласие с данными орбитальных опытов ( $Ra_v \sim 10^4$ ) и качественное – по структурам потоков (см. рис. 42 «б»). Термовибрационный механизм конвекции оказывает сильное влияние на структуру движения жидкости. Максимальная интенсификация тепло- и массопереноса возникает в направлении, противоположном ориентации  $g_{0x}$  и перпендикулярном оси вибраций.

Рассмотрим теперь опыты с источником холода. В них цилиндрический нагреватель заменялся охладителем такой же формы. В случае горизонтального расположения покоящегося слоя при включении охлаждения возникала естественная термогравитационная конвекция. Жидкость опускалась вниз около охладителя и растекалась вдоль нижней границы полости. Возвратный конвективный поток формировался в поверхностных областях кюветы. Фронт конвективного пятна распространялся симметрично относительно нагревателя (см. фрагмент «а» рис. 53). Интересно отметить, что вышеописанные закономерности, полученные в опытах с источником нагрева и вибрациями горизонтального или наклонного слоев, качественно и количественно воспроизводятся в опытах с охладителем. В качестве иллюстрации на фрагменте «б» рис. 53 приведена карта



*a*



*б*

Рис. 53. “а” – фотографическое изображение (вид сверху) конвективной камеры (статический случай с источником холода), область, охваченная конвекцией в центре, захват изображения проведен через 100 с после начала охлаждения; “б” – зависимость  $I(Ra_v)$  при вибрациях горизонтального слоя жидкости, опыты с охладителем, в рамке указаны амплитуды вибростенда

режимов конвекции (ср. с рис. 50). Критическое значение вибрационного аналога числа Рэлея, полученное из графика зависимости  $I(Ra_v)$  по описанной выше методике, имеет значение  $Ra_v^* = (3.2 \pm 0.2) \cdot 10^4$ . Данное значение количественно согласуется с результатом, полученным в опытах с нагревом.

Отметим, что полное согласие в эволюции системы и зависимостях параметров подтверждает, что обсуждаемые эффекты имеют конвективную и виброконвективную природу.

Таким образом, выполнено лабораторное моделирование термовибрационной конвекции несжимаемой жидкости от точечного источника тепла в условиях статического и быстроменяющегося ускорений. Полученные результаты имеют качественное и количественное согласие с данными космических экспериментов по обнаружению конвективных процессов в сверхкритической жидкости в условиях орбитального полета, а также с результатами численного моделирования тепловой конвекции в околокритической среде<sup>145,146,147</sup>.

При наземном моделировании получены режимы виброконвективных течений, подобные наблюдавшимся в орбитальных экспериментах. Изучена эволюция конвективных структур и пространственно-временных характеристик движения в широком диапазоне значений параметров задачи. Определен управляющий параметр и его критическое значение. Показано, что квазистатические микроускорения могут интенсифицировать виброконвективный тепло- и массоперенос и оказывать на него ориентирующее влияние в микрогравитационной обстановке, свойственной полету крупного орбитального комплекса.

Результаты, полученные в ходе наземного моделирования, позволяют дополнить и расширить представления о термовибрационных эффектах в условиях реальной невесомости и устранить противоречие, возникшее при анализе конвективных структур, полученных в космических экспериментах.

## **Контрольные вопросы к главе 2**

1. Как в наземных опытах моделировался теплопроводный режим теплопередачи?
2. Как моделировалась квазистатическая компонента микрогравитационной обстановки орбитального полета?
3. Есть ли различия в поведении конвективной системы при замене источника тепла на источник холода?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной книге описаны приоритетные космические эксперименты по обнаружению и описанию термовибрационных и термоинерционных конвективных процессов в жидкостях, рассмотрено влияние на них остаточной микрогравитационной обстановки орбитального полета крупного комплекса. Проведен анализ результатов космических опытов с использованием французской аппаратуры «ALICE-1» и «ALICE-2», находившейся на орбитальной станции «Мир», по изучению тепломассообмена в неизотермической жидкости, находящейся в окрестности термодинамической критической точки в условиях фоновой микрогравитационной обстановки и вынужденных вибрационных воздействий высокой и низкой частоты. Показано, что переменные инерционные и остаточные квазистатические микроускорения могут вызывать заметные движения термовибрационного и термогравитационного типов.

Описаны кюветы, вибростенды и методики для наземного моделирования влияния микрогравитационной обстановки орбитального полета (реальной невесомости) на конвективные процессы в неоднородно нагретой жидкости и обсуждены сходные структуры конвективных потоков в наземных и орбитальных опытах. Следовательно, успешно выполнено лабораторное моделирование термо- и виброконвективных процессов применительно к условиям орбитального полета, в результате которого воспроизведены основные эффекты, наблюдавшиеся в космических опытах.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю огромную благодарность космонавтам С.В. Авдееву, В.М. Афанасьеву и Г.И. Падалке за качественное проведение орбитальных опытов, профессорам В.И. Полежаеву (ИПМех) и Г.Ф. Путину (ПГУ) за постановку задачи и многочисленные обсуждения результатов, сотруднику ИПМех В.М. Емельянову за всемерную помощь, сотрудникам ЦНИИмаш В.Л. Левтову и В.В. Романову за то, что обеспечивали использование электродинамического вибратора ЭДВ-А в комплекте «ALICE-2» – «Дакон», профессору В.В. Сазонову (ИПМат РАН), который исследовал микрогравитационную обстановку во время опытов и предоставлял данные для восстановления квазистатического ускорения по телеметрической информации, сотрудникам РКК «Энергия» и ЦНИИмаш А.И. Иванову, А.В. Калмыкову, М.М. Максимовой, что обеспечивали проведение орбитальных экспериментов, и моим замечательным студентам – дипломникам физического факультета ПГУ А.В. Иванову, Н.Г. Ивановой, И.А. Климовой, С.М. Кузнецову, А.Э. Луневу, П.А. Мельникову, А.Г. Осокину, К.В. Половинкину, С.И. Частухину, А.В. Чудинову, А.Ф. Харисову и М.С. Хисматуллину за помощь и сотрудничество, ценность которых сложно переоценить.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циолковский К.Э. Промышленное освоение космоса. Сборник научных статей. М.: Машиностроение, 1989. 279 с.
- 2 Проблемы космического производства / Авдудевский В.С. и др. М.: Машиностроение. 1980. 221 с.
- 3 Авдудевский В.С., Ишлинский А.Ю., Полежаев В.И. Гидромеханика и тепло-массообмен при получении материалов // Вестник АН СССР. 1987. № 6. С. 3–17.
4. Иванов А.И. Основные итоги экспериментов в области космического материаловедения и физики жидкости, выполненные на орбитальном комплексе «Мир», и перспективы дальнейших исследований на МКС // Сб. трудов VII Российского симпозиума «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем». М., 2000. С. 67–90.
5. Полежаев В.И. Процессы конвективного тепло- и массообмена в условиях микрогравитации. Итоги и перспективы фундаментальных и прикладных исследований // Сб. трудов VII Российского симпозиума «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем». М., 2000. С. 52–66.
6. Перспективы создания вакуумных и гравитационно-чувствительных технологий, использующих условия космического полета на околоземных орбитах. Исследование гравитационно-чувствительных явлений на борту отечественных космических аппаратов / Елкин К.С., Иванов А.И., Незнамова Л.О., Прудкогляд В.О. М.: ЗАО НИИ «ЭНЦИТЕХ», 2013. 306 с.
7. Мильдивский М.Г. Выращивание кристаллов полупроводников в космосе: результаты, проблемы, перспективы / Мильдивский М.Г., Вerezуб Н.А., Картавых А.В. и др. // Кристаллография. 1997. Т. 42, вып. 5. С. 913–923.
8. Duffar Th., Benz K.W., Brinkman A. 25 Years of crystal growth experiments under microgravity conditions // Proceedings of First International Symposium on Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology. 2000. Sorrento, Vol. 1. P. 403–406.
9. Земсков В.М., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Гравитационная чувствительность расплавов при выращивании кристаллов InSb:Te методами Бриджмена

и плавающей зоны в условиях микрогравитации // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 4. С. 351–358.

10. Земсков В.М., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Гравитационная чувствительность растворов-расплавов при кристаллизации двухфазных InSb–InBi сплавов в космических условиях // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 4. С. 359–364.

11. Полежаев В.И. Режимы микроускорений, гравитационная чувствительность и методы анализа технологических экспериментов в условиях невесомости // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1994. № 5. С. 22–45.

12. Микроускорения на орбитальной станции Мир и оперативный анализ гравитационной чувствительности конвективных процессов тепло-массопереноса / Сазонов В.В., Комаров М.М., Полежаев В.И. и др. // Космические исследования. 1999. Т. 37, вып.1. С. 86–101.

13. Савичев В.В., Ветошкин А.М., Корольков А.В. О влиянии эволюции вектора остаточных ускорений на гидродинамические системы // Сб. трудов VII Российского симпозиума «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем». М., 2000. С. 304–311.

14. Monti R., Savino R. The fluid dynamic disturbances due to the microgravity environment prevailing on the international space station // Proceedings of First International Symposium on Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology. Sorrento, 2000. Vol. 2. P. 813–822.

15. Определение микроускорений на орбитальных комплексах «Салют-6» и «Салют-7» / Сарычев В.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В., Тянь Т.Н. // Космические исследования. 1986. Т. 24, вып. 3. С. 337–344.

16. Сазонов В.В., Ермаков М.К., Иванов А.И. Измерение микроускорений на орбитальной станции «Мир» во время экспериментов на установке «ALICE» // Космические исследования. 1998. Т. 36, вып. 2. С. 156.

17. Симаков С.В., Кундик И.А. Оценка влияния основных источников возмущений на микрогравитационную обстановку в модулях ОС Мир по данным аппаратуры SAMS и MASU // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 2. С. 116–128.

18. Рябуха С.Б., Киселев С.В. Некоторые особенности вибрационных возмущений на борту орбитального комплекса Мир // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 2. С. 129–135.

19. Математическое моделирование и измерение микроускорений на орбитальной станции «Мир» / Беляев М.Ю., Зыков С.Г., Рябуха С.Б. и др. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1994. № 5. С. 5–14.
20. Определение квазистатической составляющей микроускорения на станции Мир / Сазонов В.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И. и др. // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 2. С. 136–147.
21. Режим гравитационной ориентации для Международной космической станции / Ветлов В.И., Новичкова С.М., Сазонов В.В. и др. // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 2. С. 408–416.
22. Результаты измерений ускорений на технологических установках на борту спутника «Фотон» / Бармин И.В., Волков М.В., Егоров А.В. и др. // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 2. С. 380–390.
23. Анализ низкочастотных ускорений на борту спутника «Фотон-11» / Сазонов В.В., Абрашкин В.И., Казакова А.Е. и др. // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 4. С. 391–407.
24. Sickinger P., Hamacher H. Microgravity conditions on ISS - acceleration measurements with QSAM // Proceedings of First International Symposium on Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology. Sorrento, 2000. Vol. 2. P. 895–896.
25. Яремчук В.П. Численное моделирование пространственных конвективных процессов в условиях космического полета: дис... канд. физ.-мат. наук. М.: ИПМех РАН, 2004. 161 с.
26. Яремчук В.П. Численное моделирование пространственных конвективных процессов в условиях космического полета. М., ИПМех РАН, 2004. 161 С.
27. Гидромеханика невесомости / Бабский В.Г., Копачевский Н.Д., Мышкис А.Д. и др.; под ред. А.Д. Мышкиса. М.: Наука, 1976. 504 с.
28. Experiments in the far and near critical fluid aboard «MIR» station with the use of «ALICE-1» instrument / Avdeev S.V., Ivanov A.V., Kalmikov A.V. et al. // Proceedings of Joint Xth European and VIth Russian Symposium on Physical Sciences in Microgravity. St. Petersburg, 1997. Vol. 1. P. 333–340.
29. Experiments on the far and near critical fluid aboard «MIR» station with the use of «ALICE-1» instrument / Avdeev S.V., Ivanov A.V., Kalmikov A.V. et al. // Abstracts of Joint Xth European and VIth Russian Symposium on Physical Sciences in Microgravity. St. Petersburg, 1997. 165 p.

30. О конвекции околокритической жидкости в условиях микроускорений при орбитальном полете станции «Мир» / Авдеев С.В., Горбунов А.А., Емельянов В.М. и др. // Тезисы докладов 12 Международной зимней школы по механике сплошных сред. Пермь, 1999. С. 60.

31. Исследование околокритической жидкости в условиях микрогравитации: эксперименты на станции «Мир» и численное моделирование / Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Тезисы 1 Российской конференции по космическому материаловедению. Калуга, 1999. С. 49.

32. Влияние вибраций на тепломассоперенос в околокритической жидкости в условиях невесомости (постановка и предварительные результаты эксперимента «Алис-2-Вибро». Станция «Мир». 1999 год) / Полежаев В.И., Емельянов В.М., Путин Г.Ф. и др. // Тезисы 1 Российской конференции по космическому материаловедению. Калуга, 1999. С. 51.

33. Экспериментальное исследование влияния вибраций на процессы тепло- и массопереноса в околокритической среде: описание и предварительные результаты анализа данных эксперимента «ALICE-2-Вибро» на орбитальном комплексе «Мир» / Авдеев С.В., Падалка Г.И., Афанасьев В.М. и др. // Материалы VII Российского симпозиума «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем». М., 2000. С. 19.

34. Исследование околокритической жидкости в условиях микрогравитации: эксперименты на станции «Мир» и численное моделирование / Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2000. Вып. 19. С. 56–63.

35. Experimental study of transport phenomena in nearcritical fluid affected by vibration: the description and preliminary results of space experiment onboard Mir station (february-march 1999) / Avdeev S., Padalka G., Afanasiev V. et al. // Materials of International School «Nonlinear Problems of Theory Hydrodynamic Stability and Turbulence». Moscow, 2000. P. 15–16.

36. The heat convection of near critical fluids in the condition of microgravity / Zyuzgin A.V., Ivanov A.I., Polezhaev V.I. et al. // Materials of International School «Nonlinear Problems of Theory Hydrodynamic Stability and Turbulence». Moscow, 2000. P. 99–100.

37. О конвекции околокритической жидкости в условиях реальной невесомости на орбитальной станции «Мир» / Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. науч. тр. Пермь, 2000. Вып. 2. С. 100–121.

38. Study of Near-Critical Fluid on «Mir» Using the ALICE-1 Instrument / Polezhaev V.I., Emelianov V.M., Gorbunov A.A. et al. // Proceedings of International Symposium «International Scientific Cooperation onboard Mir». Lyon. 2001. 309–316 p.

39. Конвективные движения в околокритической жидкости в условиях реальной невесомости / Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 2. С. 188–201.

40. Тепловая конвекция сверхкритической жидкости в условиях реальной невесомости / Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Материалы Международной школы «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости». М.: МГУ, 2002. С. 143–157.

41. Convection and heat transfer in near-critical fluid: study on MIR and project of the experiment CRIT on ISS / Polezhaev V.I., Gorbunov A.A., Emelianov V.M. et al. // Abstracts of 41st AIAA Aerospace Science meeting and exhibit. Reno. 2003. 1 p.

42. Convection and heat transfer in near-critical fluid: study on MIR and project of the experiment CRIT on ISS / Polezhaev V.I., Gorbunov A.A., Emelianov V.M. et al. // AIAA. 2003. Vol. 2003-1305. 11 P.

43. Convection of the supercritical fluid in field of controlled and uncontrolled microacceleration / Zyuzgin A.V., Putin G.F., Ivanov A.I. et al. // Abstract of 34th COSPAR Scientific Assembly the Second World Space Congress. Houston. 2002. 1 P.

44. Исследование тепловой конвекции в условиях микрогравитации на космических аппаратах / Путин Г.Ф., Бабушкин И.А., Богатырев Г.П. и др. // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований за 2001. Аннотационные отчеты. Сборник статей. Пермь: Пермский научный центр УрО РАН, 2002. С. 56–58.

45. Исследование тепловой конвекции в условиях микрогравитации на космических аппаратах / Путин Г.Ф., Бабушкин И.А., Богатырев Г.П. и др. // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований за 2002. Аннотационные отчеты. Сборник статей. Пермь: Пермский научный центр УрО РАН, 2003. С. 125–128.

46. О тепловой конвекции в условиях контролируемых микроускорений / Зюзгин А.В., Путин Г.Ф., Щербакова Н.Г. и др. // Тезисы докладов 13-ой Зимней школы по механике сплошных сред. Пермь, 2003. С. 182.

47. 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 / Полежаев В.И., Горбунов А.А., Емельянов В.М. и др. // Аннотации докладов научно-исследовательского семинара «Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы». М.: ИПМех РАН, 2002. С. 16–18.

48. The heat convection of nearcritical fluid in the controlled microacceleration field under zero-gravity condition / Zyuzgin A.V., Putin G.F., Ivanova N.G. et al. // *Advances in Space Research*. 2003. Vol. 32, iss. 2. P. 205–210.

49. Исследование конвекции околокритической жидкости. Проект «Крит» на Российском сегменте международной космической станции / Горбунов А.А., Емельянов В.М., Леднев А.К. и др. // Тезисы докладов II Российской конференции по космическому материаловедению. Калуга, 2003. С. 33.

50. О тепловой конвекции околокритической жидкости в условиях микрогравитации / Зюзгин А.В., Путин Г.Ф., Щербакова Н.Г. и др. // Тезисы докладов II Российской конференции по космическому материаловедению. Калуга, 2003. С. 65.

51. The thermovibrational convection in the microgravity condition. Ground-based modelling / Zyuzgin A.V., Putin G.F., Harisov A.F. // *Abstract of 35th Committee on Space Research (COSPAR) Scientific Assembly*. Paris, 2004. ID-NR: COSPAR04-A-04167. 1 p.

52. Convection and heat transfer experiments in supercritical fluid under microgravity: From MIR to ISS / Emelianov V.M., Lednev A.K., Polezhaev V.I. et al. // *Abstracts of 2nd International Symposium on Physical Sciences in Space held jointly with Spacebound 2004*. Toronto, 2004. 2 p.

53. Convection and heat transfer experiments in supercritical fluid under microgravity: From MIR to ISS / Emelianov V.M., Lednev A.K., Polezhaev V.I. et al. // *Microgravity Science and Technology Journal*. Vol. 16, iss. 1(2005). 2005. P. 164–169.

54. Зюзгин А.В. Экспериментальное изучение процессов тепломассопереноса в околокритической жидкости, в условиях реальной невесомости на борту орбитального комплекса «Мир» // Издание администрации Пермской области и Пермского научного центра УРО РАН, 2004. С. 78–79.

55. О применении конвективных датчиков с газообразной околокритической средой для обнаружения и измерения микроускорений в реальной невесомости / Бабушкин И.А., Глухов А.Ф., Емельянов В.М. и др. // Сборник тезисов докладов Пятого международного аэрокосмического конгресса IAC'06. Москва, 2006. С. 292–293.

56. Вибрационные эксперименты с конвективным датчиком «Дакон» на орбитальной станции «Мир» / Бабушкин И.А., Глухов А.Ф., Емельянов В.М. и др. // Сборник тезисов докладов Пятого международного аэрокосмического конгресса IAC'06. Москва, 2006. С. 296–297.

57. Влияние вращения орбитального комплекса на теплообмен от точечного источника тепла в сверхкритической жидкости / Зюзгин А.В., Иванов Н.А., Кузнецов С.М. и др. // НОЦ «Неравновесные переходы в сплошных средах». Итоги работы за 2005 год. 2006. С. 51–54.

58. Тепловая конвекция в условиях микрогравитации. Эксперименты на ОК «Мир» и наземное моделирование / Зюзгин А.В., Кузнецов С.М., Мельников П.А. и др. // Тезисы докладов Пятого международного аэрокосмического конгресса. Москва, 2006. С. 295–296.

59. 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 / Polezhaev V.I., Emelyanov V.M., Gorbunov A.A. et al. // Journal of the Japan Society of Microgravity Application. 2008. Vol. 25, iss. 3. P. 285–290.

60. Конвективные датчики с газообразной и околокритической средой для обнаружения и измерения микроускорений в реальной невесомости: Эксперименты на станции МИР и проекты на МКС / Бабушкин И.А., Глухов А.Ф., Зюзгин А.В. и др. // Материалы Пятого аэрокосмического конгресса. М., 2008. С. 719–726.

61. Эксперимент «Крит» и его подготовка на МКС. Результаты моделирования и анализ экспериментов на станции «Мир» / Емельянов В.М., Горбунов А.А., Леднев А.К. и др. // Аннотации докладов научно-исследовательского семинара «Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы» М.: ИПМех РАН, 2009. препринт. С. 41–46.

62. 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.

63. Конвективные процессы в невесомости / Полежаев В.И., Белло М.С., Вережуб Н.А. и др. М.: Наука, 1991. 240 с.

64. Программа экспериментов на установке для исследования гидродинамических явлений в условиях невесомости / Бармин И.В., Полежаев В.И., Путин Г.Ф. и др. // Известия АН СССР. Серия физическая. 1985. Т. 49, вып. 4. С. 698–707.

65. Экспериментальное и теоретическое исследование тепловой конвекции в наземной модели конвективного датчика / Богатырев Г.П., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1994. Вып. 5. С. 67–75.

66. A system for analysis and measurement of convection aboard space station: objectives, mathematical and ground-based modeling / Bogatyryov G.P., Putin G.F., Polezhaev V.I. et al. // AIAA. 1995. Vol. 95-0890. 10 p.

67. A System for measurement of convection aboard space station / Bogatyrev G.P., Putin G.F., Ivanov A.I. et al. // Proceedings of Third Microgravity Fluid Physics Conference. Cleveland. NASA Lewis Research Center. 1996. P. 813–818.

68. On measurement of low-frequency microaccelerations onboard orbital station «MIR» with the use of thermal convection sensor «DACON» / Sazonov V.V., Putin G.F., Babushkin I.A. et al. // AIAA. 2000. Vol. 2000-0569. 10 p.

69. Измерение низкочастотных микроускорений на борту ИЗС с помощью датчика конвекции / Бабушкин И.А., Путин Г.Ф., Иванов А.И. и др. // Сб. трудов VII Российского симпозиума «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем. М., 2000. С. 123–136.

70. On Measurement of low-frequency microaccelerations onboard orbital station «MIR» with the use of thermal convection sensor «DACON» / Avdeev S., Ivanov A., Sazonov V. et al. // Proceedings of International Symposium «International Scientific Cooperation onboard Mir». Lyon. 2001. P. 465–470.

71. Numerical and experimental study of thermal convection under quasi-static component of microgravity field / Yuferev V.S., Konstantinov V.B., Budenkova V.N. // Proceedings of First International Symposium on Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology. Sorrento, 2000. Vol. 1. P. 167–174.

72. Буденкова О.Н. Численное моделирование эксперимента по изучению конвекции, вызванной квазистатической компонентой поля микроускорений, методом голографической интерферометрии реального времени / Буденкова О.Н., Юферов В.С. // Сб. трудов VII Российского симпозиума «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем». М., 2000. С. 291–303.

73. Наземное моделирование тепловой конвекции в условиях, приближенных к невесомости / Косвинцев С.Р., Путин Г.Ф., Сорокин М.П. и др. // Численное и экспериментальное моделирование гидродинамических явлений в невесомости: сб. науч. тр. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1988. С. 56–62.

74. Лабораторное и математическое моделирование тепловой конвекции в условиях, близких к невесомости / Богатырев Г.П., Путин Г.Ф., Сорокин М.П. и др. // Гидромеханика и тепломассообмен при получении материалов. М.: Наука, 1990. С. 282–286.

75. Gershuni G.Z. Thermal vibrational convection / Gershuni G.Z., Lyubimov D.V. England: John Wiley & Sons, 1997. 358 p.

76. Любимова Т.П. Некоторые задачи гидродинамики и теплообмена в условиях микрогравитации: дисс. д.ф.-м.н. ПермГУ. 1995. 446 с.

77. Повицкий А.С. Основы динамики и тепломассообмена жидкостей и газов при невесомости / Повицкий А.С., Любин Л.Я. М.: Машиностроение, 1972. 252 с.

78. Ivanova A., Kozlov V., Lyubimov D. et al. Convective processes in a fluid subjected to static gravity and non-translational oscillations / Ivanova A., Kozlov V., Lyubimov D. et al. // Abstracts of Ninth European Symposium «Gravity-Dependent Phenomena in Physical Sciences». Berlin, 1995. 291 p.

79. Любимов Д.В. Средние течения при высокочастотных качаниях эллиптического цилиндра / Любимов Д.В., Любимова Т.П., Никитина А.А. // Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. науч. тр. Пермь: ПермГУ, 1998. С. 195–203.

80. Экспериментальное исследование влияния качаний на конвективные течения в цилиндрической полости / Бабушкин И.А., Иванов А.И., Путин Г.Ф. и др. // Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. науч. тр. Пермь: ПермГУ, 2001. Вып. 2. С. 7–16.

81. Любимова Т.П. Средние течения неоднородно нагретой жидкости в эллиптическом цилиндре, совершающем вращательные вибрации / Любимова Т.П., Никитина А.А. // Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. науч. тр. Пермь: ПермГУ, 2001. Вып. 2. С. 189–201.
82. Повицкий А.С. Основы динамики и тепломассообмена жидкостей и газов при невесомости / Повицкий А.С., Любин Л.Я. М.: Машиностроение, 1972. 252 с.
83. Convective processes in a fluid subjected to static gravity and non-translational oscillations / Ivanova A., Kozlov V., Lyubimov D. et al. // Abstracts of Ninth European Symposium «Gravity-Dependent Phenomena in Physical Sciences». Berlin, 1995. P. 291.
84. Любимов Д.В. Средние течения при высокочастотных качаниях эллиптического цилиндра / Любимов Д.В., Любимова Т.П., Никитина А.А. // Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. науч. тр. Пермь: ПермГУ, 1998. С. 195–203.
85. Экспериментальное исследование влияния качаний на конвективные течения в цилиндрической полости / Бабушкин И.А., Иванов А.И., Путин Г.Ф. и др. // Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. науч. тр. Пермь: ПермГУ, 2001. Вып. 2. С. 7–16.
86. Любимова Т.П. Средние течения неоднородно нагретой жидкости в эллиптическом цилиндре, совершающем вращательные вибрации / Любимова Т.П., Никитина А.А. // Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. науч. тр. Пермь: ПермГУ, 2001. Вып. 2. С. 189–201.
87. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Шарифулин А. Н. Вибрационная тепловая конвекция в цилиндрической полости // Численные методы механики сплошной среды. – 1983. – Т. 14. – №. 4. – С. 21-33.
88. Sharifulin A. Bifurcations of Free Thermal Vibrational Convection in Cylindrical Fluid Layer in Micro-Gravity: Numerical and Analytical Research // <https://arxiv.org/abs/0712.3281>
89. Конвективные процессы в невесомости / Полежаев В.И., Белло М.С., Вerezub H.A. и др. М.: Наука, 1991. 240 с.
90. Земсков В.С. Исследование кристаллов твердых растворов германий-кремний-сурьма, полученных в эксперименте «Универсальная печь» программы «Союз-Аполлон» // Физика твердого тела. 1978. Т. 21, вып. 4. С. 978–1000.

91. Experiments on directional crystallization of indium antimonide on photon automatic satellites / Zemskov V.S., Barmin I.V., Senchenkov A.S. et al. // Proceedings of AIAA/IKI Microgravity Science Symposium. Moscow, 1991. P. 124–129.
92. Danilevsky A.H. The effect of the orbital attitude on the  $\mu\text{g}$ -growth of InP crystals / Danilevsky A.H., Boschert St., Benz K.W. // Microgravity Science and Technology. 1997. Vol. 10, iss. 2. P. 106–112.
93. Effect of residual acceleration during microgravity directional solidification of mercury cadmium telluride on the USMP-2 mission / Gillies D.C., Lebozky S.L., Szofran F.R. et al. // Journal of Crystal Growth. 1997. Vol. 174. P. 101.
94. Danilevsky A.H. The effect of the orbital attitude on the  $\mu\text{g}$ -growth of InP crystals / Danilevsky A.H., Boschert St., Benz K.W. // Microgravity Science and Technology. 1997. Vol. 10, iss. 2. P. 106–112.
95. Bannister T.C. Heat flow and convection demonstration experiments aboard Appolo 14 / Bannister T.C., Grodzka P.G. // Science. 1972. Vol. 176, iss. 4034. P. 506–508.
96. Preliminary results from IML-2 experiments on influence of g-jitter on diffusion / Azuma H., Ohnishi M. et al. // Abstracts of Ninth European Symposium «Gravity-Dependent Phenomena in Physical Sciences». Berlin, 1995. P. 347–348.
97. Thermal diffusion experiment «Chuck» – payload of stable / Ramachandran N, Baugher C.R., Rogers J. et al. // Proceedings of Third Microgravity Fluid Physics Conference. Cleveland. NASA Lewis Research Center. 1996. P. 213–224.
98. Программа экспериментов на установке для исследования гидродинамических явлений в условиях невесомости / Бармин И.В., Полежаев В.И., Путин Г.Ф. и др. // Известия АН СССР. Серия физическая. 1985. Т. 49, вып. 4. С. 698–707.
99. Наземное моделирование тепловой конвекции в условиях, приближенных к невесомости / Косвинцев С.Р., Путин Г.Ф., Сорокин М.П. и др. // Численное и экспериментальное моделирование гидродинамических явлений в невесомости: сб. науч. тр. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1988. С. 56–62.
100. Лабораторное и математическое моделирование тепловой конвекции в условиях, близких к невесомости / Богатырев Г.П., Путин Г.Ф., Сорокин М.П. и др. // Гидромеханика и теплообмен при получении материалов. М.: Наука, 1990. С. 282–286.

101. Заварыкин М.П. О термоконвективной неустойчивости в вибрационном поле / Заварыкин М.П., Зорин С.В., Путин Г.Ф. // Доклады АН СССР. 1988. Т. 299, вып. 2. С. 309–312.
102. Заварыкин М.П. Экспериментальное исследование вибрационной конвекции / Заварыкин М.П., Зорин С.В., Путин Г.Ф. // Доклады АН СССР. 1985. Т. 281, вып. 4. С. 815–816.
103. Заварыкин М.П. Экспериментальное исследование параметрической тепловой конвекции / Заварыкин М.П., Зюзгин А.В. Путин Г.Ф. // Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. науч. тр. Пермь: ПермГУ, 2000. Вып. 2. С. 80–99.
104. Thermal cycle around the critical point of carbon dioxide under reduced gravity / Guenoun P., Khalil B., Beysens D. et al. // Physical review E. 1993. Vol. 47, iss. 3. P. 1531–1540.
105. Polezhaev V.I. Near critical fluids in microgravity: concept of research and new results of convection modeling / Polezhaev V.I., Emelianov V.M., Gorbunov A.A. // Proceedings of Joint 1st Pan Pacific Basin Workshop and 4th Japan China Workshop on Microgravity Science. Tokyo, 1998. 7 p.
106. Relaxation of a supercritical fluid after a heat pulse in the absence of gravity effects: Theory and experiments / Garrabos Y., Bonetti M., Beysens D. et al. // Physical review E. 1998. Vol. 57, iss. 5. P. 5665–5681.
107. Experiments in the far and near critical fluid aboard «MIR» station with the use of «ALICE-1» instrument / Avdeev S.V., Ivanov A.V., Kalmikov A.V. et al. // Proceedings of Joint Xth European and VIth Russian Symposium on Physical Sciences in Microgravity. St. Peterburg, 1997. Vol. 1. P. 333–340.
108. Near critical fluids in space / Beysens D., Bonetti M., Frohlich T. et al. // Proceedings of XXII Meeting of Statistical physics. Ensenada, 1992. 31 p.
109. Исследование околокритической жидкости в условиях микрогравитации: эксперименты на станции «Мир» и численное моделирование / Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2000. Вып. 19. С. 56–63.
110. Конвективные движения в околокритической жидкости в условиях реальной невесомости / Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 2. С. 188–201.
111. Study of Near-Critical Fluid on «Mir» Using the ALICE-1 Instrument / Polezhaev V.I., Emelianov V.M., Gorbunov A.A. et al. // Proceedings of International

Symposium «International Scientific Cooperation onboard Mir». Lyon, 2001. P. 309–316.

112. О конвекции околокритической жидкости в условиях реальной невесомости на орбитальной станции «Мир» / Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. науч. тр. 2000. Вып. 2. С. 100–121.

113. Convection of the supercritical fluid in field of controlled and uncontrolled microacceleration / Zyuzgin A.V., Putin G.F., Ivanov A.I. et al. // Abstract of 34th COSPAR Scientific Assembly the Second World Space Congress. 2002. 1 P.

114. Putin G.F., Glukhov A.F., Babushkin I.A. et al. Experiment «Dacon» for measurement and analysis of thermal convection onboard orbital station «Mir» / Putin G.F., Glukhov A.F., Babushkin I.A. et al. AIAA. 2000. Vol. 2000 – 0569. 7 P.

115. Экспериментальное исследование тепловой конвекции на орбитальном комплексе «Мир» с помощью прибора «Дакон» / Бабушкин И.А., Путин Г.Ф., Авдеев С.В. и др. // Сб. трудов VII Российского симпозиума «Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем». М., 2000. С. 99–122.

116. Изучение тепловой конвекции и низкочастотных микроускорений на орбитальном комплексе «Мир» с помощью датчика «Дакон» / Бабушкин И.А., Богатырев Г.П., Глухов А.Ф. и др. // Космические исследования. 2001. Т. 32, вып. 2. С. 150–158.

117. Никитин С.А. Об измерении квазистатической компоненты микроускорения на борту ИСЗ с помощью датчика конвекции / Никитин С.А., Полежаев В.И., Сазонов В.В. // Космические исследования. 2001. Т. 32, вып. 2. С. 179–187.

118. Бессонов О.А. Математическое моделирование конвекции в датчике «Дакон» в условиях реального космического полета / Бессонов О.А., Полежаев В.И. // Космические исследования. 2001. Т. 32, вып. 2. С. 170–178.

119. V. Shevtsova, T. Lyubimova, Z. Saghir et al. Mialdun IVIDIL: on-board g-jitters and diffusion controlled phenomena International Symposium on Physical Sciences in Space, Journal of Physics: Conference Series 327 (2011) 012031 DOI:10.1088/1742-6596/327/1/012031

120. Научные эксперименты на борту РС МКС. Сайт ЦНИИмаш. Координационный научно-технический совет (КНТС). URL:

<https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/> (дата обращения 24.09.2022)

121. Гитерман М.Ш. Критерии возникновения свободной конвекции в сжимаемой, вязкой и теплопроводной жидкости / Гитерман М.Ш., Штейнберг В.А. // Прикладная математика и механика. 1970. Вып. 2. С. 325–331.

122. Штейнберг В.А. Конвекция сжимаемой жидкости и ее особенности вблизи критической точки: дис... канд. физ.-мат. наук. М.: ВНИИФТРИ. 1971. 129 с.

123. Гершуни Г.З. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. М.: Наука, 1972. 392 с.

124. Beysens D., Bonetti M., Frohlich T. et al. Near critical fluids in space / Beysens D., Bonetti M., Frohlich T. et al. // Proceedings of XXII Meeting of Statistical physics. Ensenada, 1992. 31 p.

125. Экспериментальное исследование влияния вибраций на процессы переноса в сверхкритической жидкости в условиях микрогравитации / Полежаев В.И., Емельянов В.М., Иванов А.И. и др. // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 2. С. 201–206.

126. Laherrere J.M. ALICE an instrument for the analysis of fluids close to their point in microgravity / Laherrere J.M., Koutsikides P. // Acta Astronautica, 1993. Vol. 29, iss. 10/11. P. 861–870.

127. ALICE 2 – an Advanced facility for the analysis of fluids close to their critical point in microgravity / Marcout R., Zwilling J., Laherrere J. et al. // 45th Congress of the International Astronautical Federation. Jerusalem. 1994. IAF-94-J-2.

128. Программа экспериментов на установке для исследования гидродинамических явлений в условиях невесомости / Бармин И.В., Полежаев В.И., Путин Г.Ф. и др. // Известия АН СССР. Серия физическая. 1985. Т. 49, вып. 4. С. 698–707.

129. Лабораторное моделирование тепловой конвекции в условиях, близких к невесомости / Богатырев Г.П., Путин Г.Ф., Сорокин М.П. и др. // Гидромеханика и тепломассообмен при получении материалов. М: Наука, 1980. С. 282–286.

130. Сазонов В.В. Измерение микроускорений на орбитальной станции «Мир» во время экспериментов на установке «ALICE» / Сазонов В.В., Ермаков М.К., Иванов А.И. // Космические исследования. 1998. Т. 36, вып. 2. С. 156.

131. Polezhaev V.I. Near critical fluids in microgravity: concept of research and new results of convection modeling / Polezhaev V.I., Emelianov V.M., Gorbunov A.A. // Proceedings of Joint 1st Pan Pacific Basin Workshop and 4th Japan China Workshop on Microgravity Science. Tokyo, 1998. 7 p.

132. Сазонов В.В. Измерение микроускорений на орбитальной станции «Мир» во время экспериментов на установке «ALICE» / Сазонов В.В., Ермаков М.К., Иванов А.И. // Космические исследования. 1998. Т. 36, вып. 2. С. 156.

133. Сазонов В.В. Зависимость компонентов вектора квазистатического ускорения от времени. Частное сообщение.

134. The heat convection of nearcritical fluid in the controlled microacceleration field under zero-gravity condition / Zyuzgin A.V., Putin G.F., Ivanova N.G. et al. // Advances in Space Research. 2003. Vol. 32, iss. 2. P. 205–210.

135. Zyuzgin A.V. The thermovibrational convection in the microgravity condition. Ground-based modelling / Zyuzgin A.V., Putin G.F., Harisov A.F. // Abstract of 35th Committee on Space Research (COSPAR) Scientific Assembly. Paris, 2004. 1 p.

136. Zyuzgin A.V. Ground-based modeling of thermo-vibrational convection in microgravity conditions / Zyuzgin A.V., Putin G.F., Harisov A.F. // Abstracts of International Conference on Advanced Problem in Thermal Convection. Perm, 2003. 271 p.

137. Зюзгин А.В. Наземное моделирование термовибрационной конвекции в реальной невесомости / Зюзгин А.В., Путин Г.Ф., Харисов А.Ф. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2007. Вып. 3. С. 21–30.

138. On the measurement of low-frequency microaccelerations on board of an orbital station by the convection sensor «Dacon» / Putin G.F., Babushkin I.A., Bogatyrev G.P. et al. // Advances in Space Research. 2003. Vol. 32, iss. 2. P. 199–204.

139. Штейнберг В.А. Конвекция в сжимаемой жидкости и ее особенности вблизи критической точки: дис... канд. физ.-мат. наук. М.: ВНИИФТРИ. 1971. 129с.

140. Зорин С.В. Экспериментальное исследование формы фазовых включений в вибрационном поле / Зорин С.В., Иванова А.А., Козлов В.Г. Экспериментальное // Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. науч. тр. 1998. Вып. 1. С. 109–119.

141. Зюзгин А.В. Наземное моделирование термовибрационной конвекции в реальной невесомости / Зюзгин А.В., Путин Г.Ф., Харисов А.Ф. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2007. Вып. 3. С. 21–30.

142. Зорин С.В. Лабораторное моделирование процесса развития термоконвекции / Зорин С.В., Путин Г.Ф. // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24, вып. 4. С. 351–358.

143. Kozlov V.G. Experimental investigation of vibrational convection in pseudoliquid layer // Proceeding 1st International Symposium on Hydromechanics and Heat/Mass Transfer in Microgravity. Perm. Moscow. 1991. Amsterdam: Gordon and Breach, 1992. P. 57–61.

144. Гидромеханика невесомости / под ред. Мышкиса А.Д. М.: Наука. 1976. 504 с.

145. Convection and heat transfer in near-critical fluid: study on MIR and project of the experiment CRIT on ISS / Polezhaev V.I., Gorbunov A.A., Emelianov V.M. et al. // AIAA. 2003. Vol. 2003-1305. 11 p.

146. Конвективные движения в околокритической жидкости в условиях реальной невесомости / Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Космические исследования. 2001. Т. 39, вып. 2. С. 188–201.

147. An experimental study of the effect of vibrations on supercritical fluid transfer processes under microgravity conditions / Polezhaev V. I., Emelianov V. M., Ivanov A. I. et al. // Cosmic Research. Vol. 39, iss. 2. 2001. P. 187–191.

*Учебное издание*

**Зюзгин Алексей Викторович**  
д-р физ.-мат. наук  
профессор кафедры общей физики ПГНИУ  
профессор кафедры информатики и вычислительной техники ПГГПУ

## **Гидромеханика реальной невесомости**

Учебное пособие

Редактор *А. С. Беляева*  
Корректор *С. А. Семицветова*  
Компьютерная верстка: *А. В. Зюзгин*

На обложке: иллюстрация «Орбитальный натюрморт» С. А. Зюзгиной,  
бум., акв., темпера, 2023.

---

Объем данных 4,42 Мб  
Подписано к использованию 26.05.2023

---

Размещено в открытом доступе  
на сайте [www.psu.ru](http://www.psu.ru)  
в разделе НАУКА / Электронные публикации  
и в электронной мультимедийной библиотеке ELiS

Управление издательской деятельности  
Пермского государственного  
национального исследовательского университета  
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15