

УДК 532.5.011:536.24:534.1

© 2007 г. А.В. ЗЮЗГИН, Г.Ф. ПУТИН, А.Ф. ХАРИСОВ

НАЗЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОВИБРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В РЕАЛЬНОЙ НЕВЕСОМОСТИ

В результате наземного моделирования получены термовибрационные конвективные режимы, подобные обнаруженным в ходе космических экспериментов. В широком диапазоне параметров задачи изучена эволюция структуры течений и их пространственно-временные характеристики. Определено влияние квазистатической компоненты микроускорений на структуру виброконвективных движений. Представленные результаты хорошо согласуются с данными орбитальных опытов и позволяют расширить представление о термовибрационных эффектах в условиях реальной невесомости, а также разрешают противоречия, возникшие в ходе анализа данных космических экспериментов.

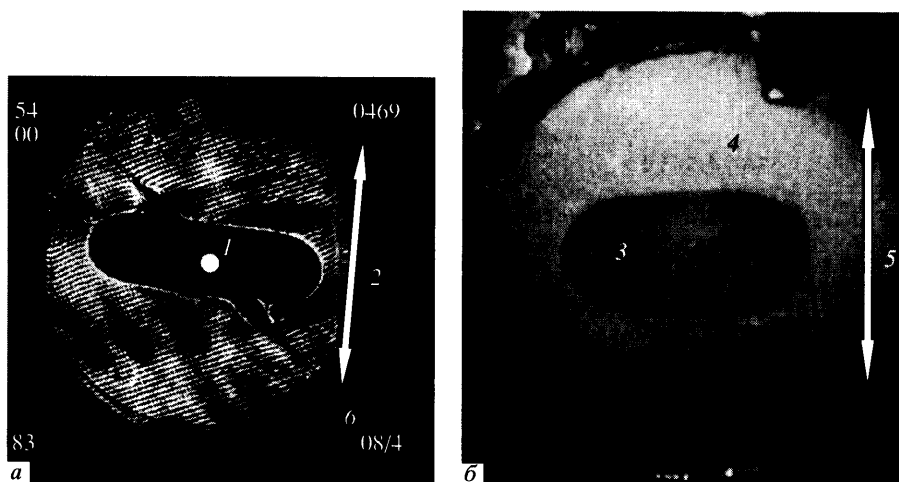
Ключевые слова: тепломассообмен, термовибрационная конвекция, реальная невесомость, микрогравитация, микроускорения, лабораторный эксперимент.

Эксперименты по изучению влияния микрогравитации на процессы тепло- и массопереноса от точечного источника тепла в сверхкритической жидкости проведены в 1995–2000 гг. на орбитальном комплексе “МИР”. Обнаружены термовибрационные и термоинерционные конвективные движения, возникающие в условиях реальной невесомости и в поле контролируемых микроускорений инерционной природы [1–3]. Серии опытов проводились в различное время, но на схожем оборудовании (“Alice-1” и комплексе “Дакон” – “Alice-2” [4–6] с электродинамическим вибратором ЭДВ-А) в подобной микрогравитационной обстановке.

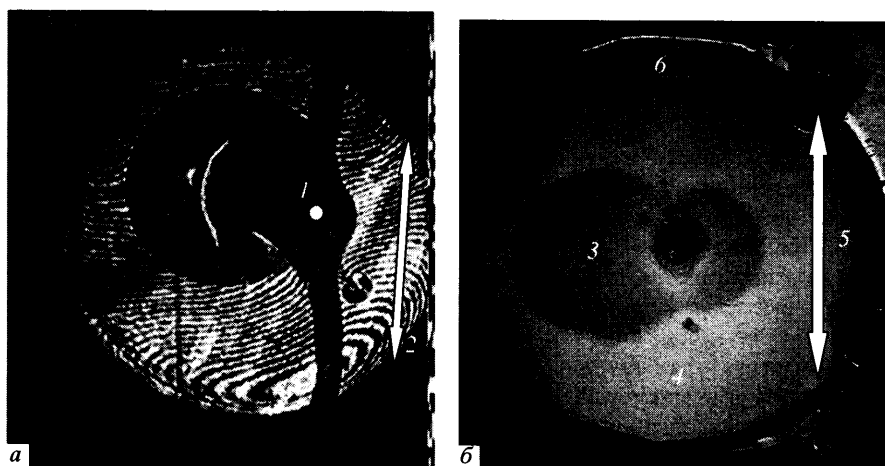
При низкочастотной модуляции микроускорений, когда конвективная система успевает откликнуться на каждое изменение силового поля, были зарегистрированы интенсивные крупномасштабные конвективные движения термоинерционной природы. В случае высокочастотного воздействия на систему наблюдались осредненные конвективные течения термовибрационного механизма генерации. Однако структуры таких потоков, обнаруженные в разных опытах, существенно различались. Например, на фиг. 1, *a* проиллюстрирована структура тепломассопереноса в контролируемом высокочастотном микрогравитационном поле, а на фиг. 2, *a* – в реальной невесомости.

Различия в структурах течений могут 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 (фиг. 1, *a*) вызвано виброконвективными искажениями. В других реализациях высокочастотная компонента фоновых микроускорений орбитального комплекса возникала после подачи теплового импульса. В этом случае первоначально симметричное распространение тепловой неоднородности затем искажалось (фиг. 2, *a*) виброконвективным теплопереносом.

Оценка величины относительного вибрационного ускорения $b\omega^2/g_E$, проведенная по показаниям встроенных микроакселерометров прибора Alice, дает значения 10^{-1} в первом случае и 10^{-3} во втором. Здесь b и ω – амплитуда и циклическая частота вибраций, а



Фиг. 1. Структура тепломассопереноса (а) в контролируемом высокочастотном микрогравитационном поле (космический эксперимент, Alice-2): 1 – место расположения нагревателя, 2 – ориентация максимальной компоненты высокочастотных микроускорений; захват изображения произведен с помощью интерферометра, работающего в режиме теневого прибора через 35 с после начала теплового импульса; фотографическое изображение (вид сверху) лабораторной ячейки (б): 3 – область, охваченная конвекцией, 4 – область осевшей на дно камеры в неподвижной жидкости алюминиевая пудры, 5 – ориентация оси вибраций; захват изображения через 140 с, $Rav = 9.0 \cdot 10^4$, $\Theta = 54^\circ C$



Фиг. 2. Структура тепломассопереноса (а) в фоновом режиме микроускорений (космический эксперимент, Alice-1): 1 – место расположения нагревателя, 2 – ориентация максимальной компоненты высокочастотных микроускорений; захват изображения проведен через 23 с; изображение (вид сверху) (б) конвективной камеры (лабораторный эксперимент, вибрации наклонного слоя жидкости): 3 – область, охваченная конвекцией, 4 – область осевшей на дно камеры в неподвижной жидкости алюминиевой пудры, 5 – ориентация оси вибраций, 6 – направление g_{Ex} ; захват изображения через 100 с; $Rav = 1.1 \cdot 10^5$, $\Theta = 54^\circ C$

g_E – ускорение гравитационного поля Земли. Поскольку интенсивность вибрационного воздействия на конвективную систему много меньше в фоновом режиме микроускорений, квазистатическая компонента микрогравитационного поля $g \sim 10^{-6} g_E$ [7] может оказывать влияние на структуру конвективного движения. Однако такие предположения о причинах различия структур виброконвективных течений нуждаются в экспериментальной проверке.

Для повышения микрогравитационной чувствительности конвективной системы в качестве рабочей среды использовалась сверхкритическая жидкость. Тогда процессы тепло- и массопереноса могут возникать вследствие сжимаемости [8], а не только под действием термоинерционного или термовибрационного механизмов генерации конвекции. В самом общем случае управляющий параметр, определяющий возникновение конвективной неустойчивости, представляет собой сумму чисел Рэлея и Шварцшильда. Количественная оценка вклада различных механизмов теплообмена в возбуждение крупномасштабного движения околокритической среды применительно к условиям орбитальных экспериментов с оборудованием Alice-1,2 проведена в [9]. Анализ величин параметров, определяющих влияние сжимаемости среды, гидростатический эффект, развитие нестационарной конвекции и внутренних гравитационных волн, показал, что основное влияние на процессы теплообмена в данном случае оказывала тепловая конвекция. Актуальность лабораторного моделирования с использованием заведомо несжимаемой рабочей жидкости обусловлена тем, что вывод об основной роли вибрационного и инерционного механизмов возбуждения термоконвекции в обсуждаемых орбитальных опытах можно принять только после экспериментальной проверки.

В данной работе проводится лабораторное моделирование процессов теплообмена от точечного источника, находящегося в несжимаемой жидкости, в поле быстроменяющихся и квазистатических ускорений.

2. Описание лабораторной установки и методик наблюдения и измерений. 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 другие [1, 3, 9]. Тогда в лабораторных условиях влияние высокочастотных микроускорений можно моделировать поступательными, линейно поляризованными вибрациями.

Для наземного моделирования процессов тепло- и массопереноса в условиях реальной невесомости необходимо обеспечить термовибрационным течениям интенсивность большую, чем у тепловой конвекции, неизбежной в поле тяжести Земли. Поэтому нужно использовать конвективную систему с низкой гравитационной чувствительностью.

Действие термогравитационного механизма конвекции определяется величиной критерия подобия Рэлея Ra , а термовибрационного – его вибрационным аналогом Rav (для случая поступательных осцилляций)

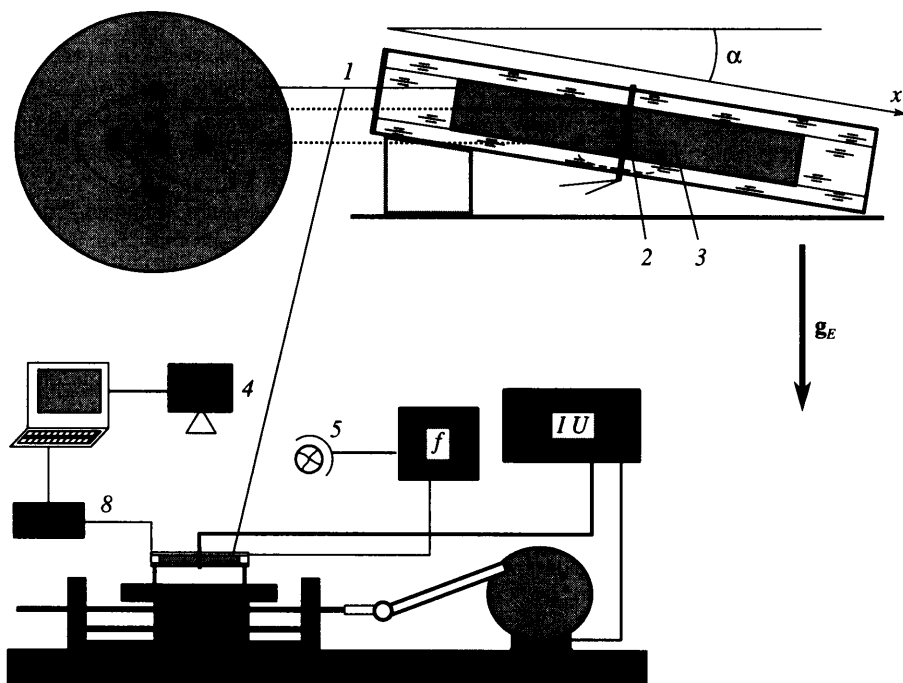
$$Ra = \frac{g_E \beta \Theta h^3}{\nu \chi}, \quad Rav = \frac{(b \omega \beta \Theta r)^2}{2 \nu \chi}$$

где h, r, Θ, χ, ν и β – характерные размеры конвективных систем, разность температур и коэффициенты температуропроводности, кинематической вязкости и теплового расширения соответственно.

Отношение этих параметров

$$\frac{Rav}{Ra} = \frac{b^2 \omega^2 \beta \Theta r^2}{2 g_E h^3}$$

показывает, что для увеличения интенсивности вибрационных эффектов в поле тяжести Земли при продольных осцилляциях необходимо выбирать тонкие (h мало) протя-



Фиг. 3. Горизонтальное сечение слоя жидкости (слева направо), схема конвективной ячейки (вертикальное сечение) и (сверху вниз) блок-схема экспериментальной установки: 1 – конвективная камера, 2 – цилиндрический керамический нагреватель, 3 – рабочая жидкость, 4 – цифровая видеокамера, 5 – система стробоскопического освещения и измерения частоты вибраций, 6, 7 – дифференциальные термодатчики, 8 – плата сбора данных

женные (r велико) горизонтальные слои жидкости с большим значением β . Для достижения высокой вибрационной скорости $b\omega$ при конечных значениях циклической частоты колебаний ω нужно применять механический вибростенд с большой амплитудой вибраций b . Из условия, обсужденного во введении, следует, что рабочая среда должна удовлетворять приближению несжимаемой жидкости. Поэтому в качестве рабочей жидкости использовался этиловый спирт при нормальных условиях.

На фиг. 3 слева направо, сверху вниз изображены горизонтальное сечение слоя жидкости, схема конвективной ячейки (вертикальное сечение) и блок-схема экспериментальной установки. Конвективная камера 1 (фиг. 3) имеет конфигурацию цилиндрического горизонтального слоя с высотой $h = 0.4$ см и диаметром $2r = 7.5$ см. Стенки полости изготовлены из органического стекла. В центре кюветы вертикально располагается электрический нагреватель цилиндрической формы 2 представляющий собой керамическую трубку с внешним диаметром 0.18 см. Через два канала нагревателя пропущена нихромовая проволока толщиной 0.04 см. В качестве источника питания используется система с обратной связью “Термодат-13”. На нагревателе находится измерительный спай дифференциальной медь-константановой термопары, а опорный термоэлектрод размещается в толще плексигласового кольца, сбоку охватывающего рабочую полость. Сигнал термопары, пропорциональный разности температур Θ между нагревателем и боковой границей слоя, поступает на измерительный вход устройства “Термодат-13”. Такая система, подавая не чаще, чем один раз в 0.1 с, импульсы тока на нагреватель,

поддерживает заданную Θ с точностью 4%. В серии тестовых опытов вместо нагревателя применялся холодильник с внешним диаметром 0.5 см, выполненный из двух латунных коаксиальных цилиндров, соединенных каналами вблизи запаянного торца. По внутренней трубке поступала, а по внешней отводилась термостатированная с точностью 0.1°C жидкость от цифрового струйного криотермостата. В области значений Θ , недостаточных для развития рэлеевской конвекции, обусловленной контактом охлажденной жидкости с более теплой нижней границей полости, воспроизводились эффекты, подобные описанным ниже. Во всех реализациях длительность опыта не превышала 180 с, так как за это время конвективный поток от нагревателя или холодильника достигает боковой стенки полости. Начальная температура, равная лабораторной, выбирается из диапазона 5–20°C.

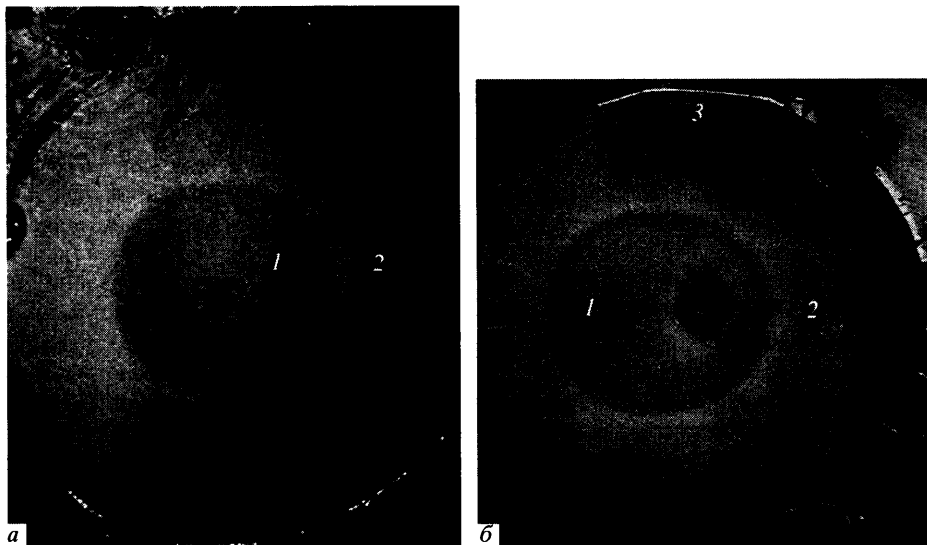
Конвективная ячейка крепится к вибростолу, выполненному на основе кривошипно-шатунного механизма. Вибрационная платформа может сообщать кювете поступательные, линейнополяризованные вибрации частотой от 0.5 до 20 Гц с амплитудами 0.5–8.0 см. Для визуализации структур конвективных течений в рабочую жидкость 3 примешиваются светорассеивающие частицы алюминиевой пудры. Концентрация твердой примеси такова, что не оказывает влияния на структуру потоков [10]. Цифровая видеокамера 4 и стробоскопическое освещение 5, синхронизированное с вибростендом, применяются для регистрации структур конвективных течений. Влияние адвективных движений малой интенсивности, неизбежно возникающих в конвективной системе такой конфигурации [11], выходит за пределы чувствительности методик регистрации данных.

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

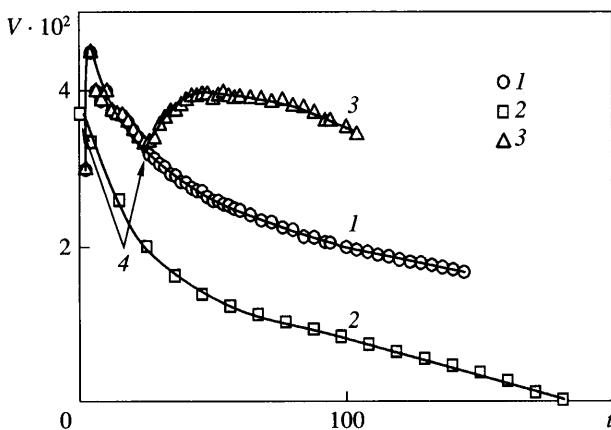
Тепловые измерения проводятся с помощью двух дифференциальных термопар 6, 7, спаи которых выставлены в слой жидкости крестообразно относительно нагревателя. Такое расположение датчиков позволяет регистрировать искажение симметрии конвективного теплового потока от нагревателя. Сигналы термопар поступают на плату сбора данных 8 и регистрируются компьютером.

Квазистатическая компонента микроускорений моделируется отклонением конвективной камеры от горизонтальной ориентации на угол $\alpha = 2^\circ$. Тогда проекция вектора g_E на продольное направление слоя жидкости x имеет значение $g_{Ex}/g_E = 10^{-2}$. Относительное вибрационное ускорение платформы достигает величины 10. Различие между g_{Ex}/g_E и $b\omega^2/g_E$ имеет тот же порядок, что и в обсуждаемых космических экспериментах.

3. Результаты. Статическое поле тяжести. В случае отсутствия вибраций и горизонтального расположения слоя жидкости при нагреве источника тепла возникает естественная термогравитационная конвекция. Жидкость поднимается вверх около нагревателя и растекается вдоль верхней границы полости. Возвратный конвективный поток формируется в придонных областях кюветы. Область, охваченная конвекцией, имеет центрально-симметричную форму относительно источника нагрева (фиг. 4, а). Сигналы дифференциальных термопар 6 и 7 (фиг. 3) не превышают уровень шума (0.3°C), что также свидетельствует о симметричном теплотоке. Зависимость скорости распространения конвективного фронта V от времени t представлена на фиг. 5 (I).

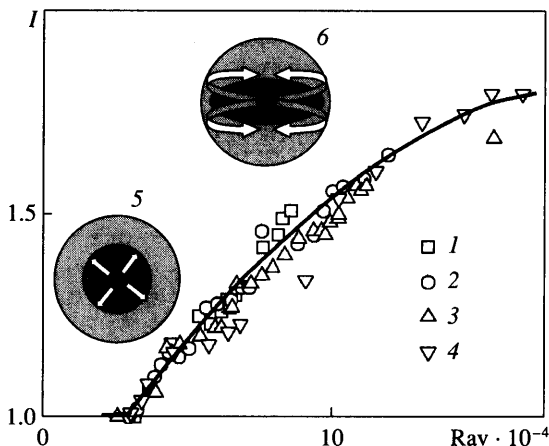


Фиг. 4. Фотографическое изображение (вид сверху) конвективной камеры (лабораторный эксперимент, *a* – статический случай *б* – наклон): 1 – область, охваченная конвекцией, 2 – область осевшей на дно камеры в неподвижной жидкости алюминиевой пудры, 3 – ориентация g_{Ex} ; захват изображений проведен через 100 с после начала нагрева; $\Theta = 54^\circ\text{C}$



Фиг. 5. Зависимость V (см/с) от времени t (с): 1 – статический случай, 2 – вибрации, 3 – вибрации наклонной полости, 4 – время включения вибраций

Если рабочая ячейка отклоняется ($\alpha = 2^\circ$) от горизонтальной ориентации, то после включения нагрева наблюдается медленное смещение области охваченной конвекцией в сторону верхнего края полости как результат влияния g_{Ex} компоненты ускорения, ориентированной вдоль слоя жидкости (фиг. 4, б). Форма конвективного пятна и скорость V практически не изменяются. Однако симметрия относительно нагревателя разрушается и сигнал термопары 7 достигает значения 3.2°C через 100 с после включения нагрева, что на порядок превышает показания термопары 6, оставшиеся на уровне шума.

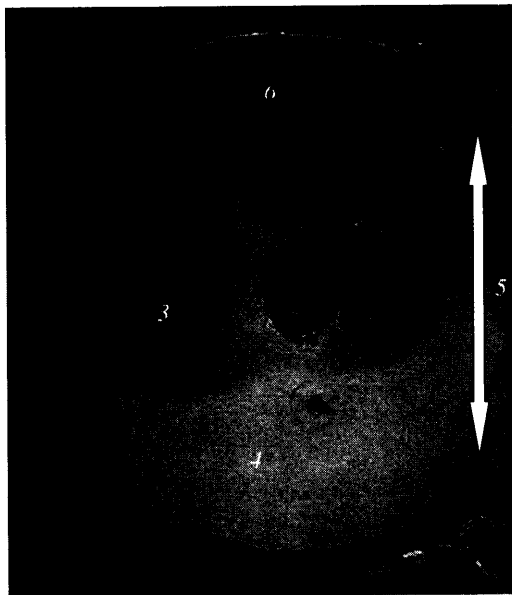


Фиг. 6. Карта режимов движения в плоскости параметров $I(Rav)$: 1–4 – $b = 3.0; 3.5, 4.0; 4.5$ см; 5, 6 – схемы структур движения жидкости; лабораторный эксперимент, вибрации

Эти результаты хорошо соотносятся с данными орбитальных экспериментов при фоновом (неконтролируемом) режиме микроускорений [1, 9]. Например, зависимость $V(t)$ (1) на фиг. 5 и максимальное значение скорости V находятся в качественном и количественном согласии с результатами космических опытов, 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 околокритическая конвективная система находилась в поле квазистатической компоненты микроускорений, обуславливавшей такой дрейф тепловой неоднородности.

Высокочастотные вибрации. В этом случае нагреватель включается после того, как рабочей ячейке придаются высокочастотные осцилляции. Вибрации оказывают существенное влияние на структуру и скорость конвективных потоков. Область, охваченная конвекцией, имеет эллиптическую форму, вытянутую в направлении, перпендикулярном вектору поляризации колебаний (фиг. 1, б). Зависимость $V(t)$ (2) на фиг. 5 находится в хорошем качественном и количественном согласии с результатами орбитальных экспериментов в поле контролируемых высокочастотных микроускорений [3]. Карта режимов конвекции изображена на фиг. 6 в плоскости параметров I и Rav . В области значений $Rav < 3.2 \cdot 10^4$ форма области, охваченной конвекцией, имеет центрально-симметричную относительно нагревателя форму, не отличающуюся от показанной на фиг. 4, а. Такое движение жидкости вызвано термогравитационным механизмом конвекции. Однако, когда величина Rav превышает значение $(3.2 \pm 0.3) \cdot 10^4$, структуру движения определяет термовибрационный механизм конвекции, что хорошо согласуется с результатами орбитальных опытов ($Rav \sim 10^4$) и математического моделирования [12]. Наблюдается хорошее соответствие и по структурам течений (фиг. 1).

Высокочастотные вибрации наклонного слоя жидкости. В данном случае для моделирования условий орбитального эксперимента [1, 9] вибрации включаются через 30 с после начала нагрева. Угол отклонения слоя жидкости от горизонтального направления составляет $\alpha = 2^\circ$. В результате конвективная зона, первоначально имевшая форму окружности (фиг. 4, а), в дальнейшем изменяется, как показано на фиг. 2, б. Искажения усиливаются по мере роста вибрационного воздействия (фиг. 7). Отметим, что отрица-



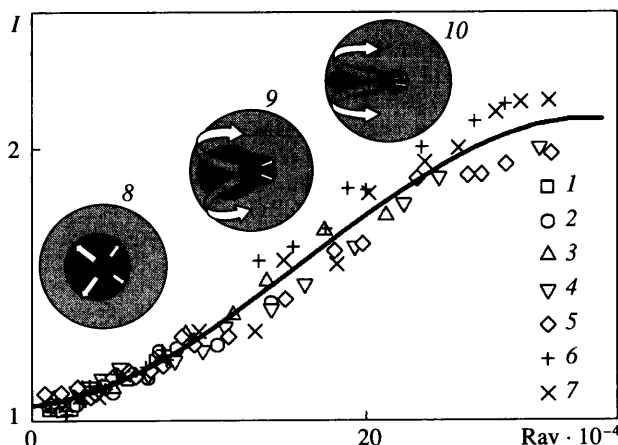
Фиг. 7. Фотографическое изображение (вид сверху) конвективной камеры (лабораторный эксперимент, вибрации наклонного слоя жидкости): обозначения как на фиг. 2 б; захват изображения через 100 с; $Rav = 2.3 \cdot 10^5$; $\Theta = 54^\circ\text{C}$

тельная кривизна фронта конвективной области вблизи нагревателя обусловлена возвратными потоками первоначально покоившейся жидкости, в которой визуализирующие частички успели осесть на дно камеры. Тепловой поток имеет несимметричную относительно нагревателя форму и сигнал дифференциальной термопары 7 достигает значения 4.6°C через 100 с после начала нагрева для случая, изображенного на фиг. 7. Сигнал термопары 6 опять не превышает уровня шума измерительного тракта.

Изменение скорости V со временем показано на фиг. 5 (3) и по величине и виду зависимости хорошо согласуется с данными космических экспериментов [1, 9].

Рассмотрим карту режимов конвекции, представленную на фиг. 8 в плоскости параметров I и Rav . Экстраполируя кривую зависимости $I(Rav)$ до пересечения с осью $I = 1$, получаем значение параметра $Rav = (3.0 \pm 0.3) \cdot 10^4$, при котором влияние вибраций на конвективные процессы становится существенным. И в этом случае имеется количественное согласие с данными орбитальных опытов ($Rav \sim 10^4$) и качественное – по структурам потоков (фиг. 2). Термовибрационный механизм конвекции оказывает сильное влияние на структуру движения жидкости. Максимальная интенсификация тепло- и массопереноса возникает в направлении, противоположном ориентации g_{Ex} и перпендикулярном оси вибраций. Интересно отметить, что в рассматриваемом случае влияние вибраций интенсифицирует тепло-массоперенос.

Заключение. Выполнено лабораторное моделирование термовибрационной конвекции несжимаемой жидкости от точечного источника тепла в условиях статического и быстро меняющегося ускорений. Полученные результаты имеют хорошее качественное и количественное согласие с данными космических экспериментов по обнаружению конвективных процессов в сверхкритической жидкости в условиях орбитального полета и с результатами численного моделирования тепловой конвекции в околокритической среде.



Фиг. 8. Карта режимов движения в плоскости параметров $I(Rav)$: 1–7 – $b = 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0$ см; 8–10 – схемы структур движения жидкости; лабораторный эксперимент, вибрации наклонного слоя

При наземном моделировании обнаружены режимы виброконвективных течений, подобные наблюдавшимся в орбитальных экспериментах. Показано, что квазистатические микроускорения могут существенно интенсифицировать виброконвективный тепло- и массоперенос в микрогравитационной обстановке, свойственной полету крупного орбитального комплекса.

Работа поддержана грантом “Урал 2004” № 04-02-96038 РФФИ и администрации Пермского края. Частично выполнялась на средства гранта РФФИ № 06-08-00754-а и Программы развития высшей школы министерства образования РФ. Часть экспериментального оборудования предоставлена НОЦ “Неравновесные переходы в сплошных средах”, грант No PE-009-0 CRDF.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И., Путин Г.Ф., Соболева Е.Б. Конвективные движения околокритических жидкостей в условиях реальной невесомости // Космич. исслед. 2001. Т. 39. № 2. С. 188–200.
2. Полежаев В.И., Емельянов В.М., Иванов А.И., Калмыков А.В., Бейсанс Д., Гаррабос И. Экспериментальное исследование влияния вибраций на процессы переноса в сверхкритической жидкости в условиях микрогравитации // Космич. исслед. 2001. Т. 39. № 2. С. 201–206.
3. Zyuuzgin A.V., Putin G.F., Ivanova N.G., Chudinov A.V., Ivanov A.I., Kalmykov A.V., Polezhaev V.I., Emelianov V.M. The heat convection of near critical fluid in the controlled microacceleration field under zero-gravity condition // Adv. Space Res. 2003. V. 32. № 2. P. 205–210.
4. Laherrere J.M., Koutsikides P. ALICE, an instrument for the analysis of fluids close to the critical point in microgravity // Acta Astron. 1993. V. 29. № 10/11. P. 861–870.
5. Putin G.F., Babushkin I.A., Bogatyrev G.P., Glukhov A.F., Zilberman E.A., Ivanov A.I., Maksimova M.M., Polezhaev V.I., Bessonov O.A., Nikitin S.A., Sazonov V.V. On the measurement of low-frequency microaccelerations on board of an orbital station by the convection sensor “Dacon” // Adv. Space Res. 2003. V. 32. № 2. P. 199–204.
6. Marcout R., Zwilling J., Laherrere J. et al. ALICE 2 – an advanced facility for the analysis of fluids close to their critical point in microgravity // IAF-94-J-2, 45th Congr. Intern. Astronaut. Federation, Jerusalem, Israel, 12, 1994.

7. Беляев М.Ю., Зыков С.Г., Рябуха С.Б., Сазонов В.В., Сарычев В.А., Стажков В.М. Математическое моделирование и измерение микроускорений на орбитальной станции "Мир" // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 5. С. 5–14.
8. Гитерман М.Ш., Штейнберг В.А. Критерии возникновения свободной конвекции в сжимаемой, вязкой и теплопроводной жидкости // ПММ. 1970. Т. 34. Вып. 2. С. 325–331.
9. Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И., Путин Г.Ф. О конвекции околокритической жидкости в условиях реальной невесомости на орбитальной станции "Мир" // Вибрационные эффекты в гидродинамике. Пермь, 2000. Вып. 2. С. 100–121.
10. Брацун Д.А., Зюзгин А.В., Путин Г.Ф. Об устойчивости конвективного движения в запыленной среде // Тр. 5-го Междунар. семинара по устойчивости течений гомогенных и гетерогенных жидкостей. Новосибирск. 1998. С. 28–36.
11. Зорин С.В., Путин Г.Ф. Лабораторное моделирование процесса развития термоконвекции // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24. № 4. С. 351–358.
12. Polezhaev V.I., Gorbunov A.A., Emelianov V.M., Soboleva E.B., Sazonov V.V., Levto V.L., Romanov V.V., Putin G.F., Ivanov A.I., Zyuzgin A.V. Convection and heat transfer in near-critical fluid: study on MIR and project of the experiment CRIT on ISS // American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA 2003–1305. Reno. 2003. NV. 11 p.

Пермь

Поступила в редакцию
24.XI.2005