

УДК 532.013.4:536.24:629.7

© 2006 г. В. И. ПОЛЕЖАЕВ

КОНВЕКЦИЯ И ПРОЦЕССЫ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

Обсуждается моделирование пространственных конвективных течений и процессов тепло- и массообмена в космическом полете, основанное на моделях гидромеханики и методах их численной реализации. Рассматривается роль методов механики в науках о физических процессах в условиях микрогравитации (Microgravity Sciences) и роль журнала Известия РАН. МЖГ в развитии этого направления. Приводятся результаты современных исследований некоторых задач.

Ключевые слова: конвекция, тепломассоперенос, космический полет, вибрации, микрогравитация.

Первый номер журнала МЖГ вышел спустя пять лет после первого пилотируемого космического полета Ю.А.Гагарина. Это было время развития в СССР космической техники и космических исследований и формирования новых разделов механики, в том числе механики невесомости и гравитационно-чувствительных систем. В современном понимании этот раздел имеет дело с сопряженными задачами механики космического полета и гидромеханики, имеющей разнообразные приложения. В его становлении значительная заслуга принадлежит первому главному редактору МЖГ академику Г.И. Петрову (1912–1987), который распознал и поддержал ростки нового направления, развивающегося на фоне достижений аэрогазодинамики. История становления этого направления как нельзя лучше иллюстрирует развитие теоретических и экспериментальных методов механики, ее связей внутри самой механики, а также взаимоотношений с приложениями. Монографии [1, 2] дают некоторое представление о постановках задач, связанных с исследованиями рабочих процессов в элементах космической техники в то время.

По мере развития долговременных космических станций и пилотируемых полетов возникли вопросы, связанные с так называемой “полезной нагрузкой” космического аппарата (КА), и класс задач существенно расширился. В связи с этим появился интерес к явлениям, обусловленным конвекцией. Этому разделу гидромеханики, изучающему движение и процессы переноса под действием массовых или поверхностных сил, широко распространенных в природе и технике, в журнале МЖГ уделено значительное внимание. За истекшие годы в нем опубликован ряд пионерских работ, открывших новые подходы к исследованию или давших ключ к объяснению наблюдаемых явлений.

В условиях космического полета массовые силы естественного происхождения значительно слабее в сравнении с земной силой тяжести. Их специфика не была изучена и недооценивалась. Вместе с тем в этих условиях увеличивается влияние негравитационных механизмов конвекции, маскирующихся на Земле, а также пространственных эффектов, что до недавнего времени создавало трудности при построении адекватных моделей. Поэтому, несмотря на то, что в течение упомянутого времени мотивация и цели практического освоения условий невесомости внутри космического аппарата, как технологической среды, изменялись [3, 4], роль моделей и методов механики в развитии этого направления непрерывно возрастала.

В статье обсуждаются подходы к моделированию в космическом полете конвективных течений жидкости, газа и некоторые общие закономерности конвекции, тепло- и массообмена в этих условиях. Обсуждаются задачи нового этапа экспериментов на Международной Космической Станции. Класс рассматриваемых задач ограничивается процессами конвекции, тепло- и массообмена в замкнутых областях под действием массовых сил.

1. Немного истории. Работы, относящиеся к исследованию тепловой гравитационной конвекции и термоакустических течений на основе уравнений Навье – Стокса (приближение Буссинеска [5, 6], уравнения Навье – Стокса сжимаемого газа [7, 8]) появились в журнале “Изв. АН СССР. МЖГ” во второй половине 60-х годов. Это были одни из первых публикаций в мировой литературе [9]. Важную роль сыграла работа [10], в которой сформулированы осредненные уравнения конвекции при наличии высокочастотных вибраций. Вскоре появились и первые работы, относящиеся к термокапиллярной конвекции ([11], см. также библиографию в [2]). В 70-х годах усиливается внимание к вопросам теплоотдачи и температурного расслоения под действием ослабленной конвекции в топливных баках космических аппаратов; установлены связи между этими характеристиками, найден эффект максимума температурного расслоения в замкнутой области при заданном потоке тепла [12]. При больших объемах баков для хранения топлива даже в невесомости возможны переходные и турбулентные режимы, что особенно стимулировало исследования устойчивости конвективных течений наряду с численным моделированием взаимодействия различных типов тепловой гравитационной (боковой и донный подогрев) и термокапиллярной конвекции, которые получили развитие в ряде работ, публиковавшихся в МЖГ [13–15]. Исследование конвективных взаимодействий оказалось важным в дальнейшем для управления технологическими процессами.

В течение многих лет журнал МЖГ способствовал развитию “гидродинамических моделей” технологических процессов, которые позволяют определить характеристики “гидродинамических критериев качества” [16]. К ним относится, в частности, концентрационное расслоение, вызывающее неоднородность монокристаллов, выращиваемых из расплава в земных условиях. В 80-е годы велись активные исследования по освоению невесомости как механического состояния, открывающего перспективу многих технологических приложений, в частности повышения однородности монокристаллов [17]. В становлении и развитии этого направления в СССР значительная заслуга принадлежит академику В.С. Авдуевскому¹. В связи с этими и другими приложениями отметим развитие моделей массообмена на основе уравнений сжимаемого газа с фильтрацией акустики [18], вибрационной конвекции (осредненные течения, обусловленные непоступательными вибрациями [19]), численное и экспериментальное моделирование низкочастотной конвекции при наличии качаний [20], обобщение исследований конвекции под действием поступательных и непоступательных вибраций с учетом различных осложняющих факторов [21] и др.

Однако потребовались значительные усилия, чтобы достижения в области конвективных процессов “работали” в условиях реального космического полета. Этот вопрос был поставлен в [22], где приведены расчеты низкочастотных микроускорений в космическом полете и обобщены результаты параметрических исследований воздействия микроускорений на концентрационную неоднородность, обнаруженную в космических экспериментах.

Важными событиями для выработки стратегии отечественных исследований в этой области были сессия Отделения проблем машиностроения, механики и процессов управления РАН, проведенная в Институте проблем механики РАН под председа-

¹ См. Полежаев В.И. Гидромеханика и процессы тепломассообмена в условиях микрогравитации: история, этапы развития и современные направления фундаментальных и прикладных исследований // Пре-принт ИПМех РАН. 2005. № 779. С. 62.

ством главного редактора МЖГ академика Г.Г.Черного (1993) и выпуск специального номера журнала МЖГ, № 5, 1994, в котором собраны работы по расчету и измерению микроускорений, моделям конвекции, техническим и технологическим приложениям. Эта тематика продолжена в специальном выпуске МЖГ №3, 1997, приуроченном к 20-летию семинара Института проблем механики РАН по численным методам в задачах тепло- и массообмена.

В 90-х годах повысился интерес к фундаментальным исследованиям в условиях микрогравитации, получившим развитие в связи с международной кооперацией работ на отечественных космических аппаратах – станции “Мир” и спутнике “Фотон”. Их результаты составили основу программы совместного VI российского и IX европейского симпозиума (Санкт-Петербург, 1997 г.), где остаточным микроускорениям и анализу гравитационной чувствительности посвящена отдельная секция. Результаты российских исследований на станции “Мир” обсуждались на VII Российском симпозиуме “Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем” (Москва, 2000 г.). Инициатива журнала МЖГ в организации тематических выпусков по исследованиям в условиях микрогравитации перешла в дальнейшем к журналу “Космические исследования” (далее КИ), первый тематический выпуск которого (КИ 2001. Т. 39, № 2) продолжил стратегию МЖГ, в последующих существенно расширены исследования микроускорений в реальном космическом полете. Вместе с тем эта тематика продолжает стимулировать развитие моделей и методов гидромеханики. Поэтому в МЖГ в последние годы публикуются статьи, связанные с развитием исследований пространственных эффектов конвекции, лабораторных экспериментов и моделей конвекции при вращательных вибрациях, моделированием конвекции вблизи критического состояния вещества [23–25] и др. Основу изложенного ниже составляют результаты автора и его сотрудников, полученные за период, прошедший после обзорной публикации [26].

2. Постановка задачи о конвекции и процессах тепло- и массообмена в условиях космического полета квазистатических микроускорений. Приближение Буссинеска. Общая схема моделирования с учетом квазистатических микроускорений в космическом полете приведена на фиг. 1, где космический аппарат рассматривается как твердое тело, в общем случае неравномерно вращающееся вокруг центра масс, с учетом градиента гравитационного поля и углового ускорения, зависящих от расстояния экспериментального объема от центра масс и его ориентации в системе координат КА, а также аэродинамического сопротивления.

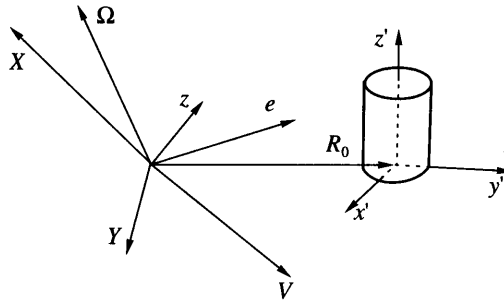
Исходная система уравнений тепловой конвекции вместе с уравнением переноса пассивной примеси в приближении Буссинеска в условиях космического полета в системе координат, жестко связанной с движущимся космическим аппаратом, записывается в следующем безразмерном виде

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U}\nabla)\mathbf{U} + \sqrt{\text{Ta}}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U}) = \Delta \mathbf{U} - \Delta p + \text{Gr} \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} + \frac{\sqrt{\text{Ta}}}{2} (\mathbf{r} \times \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt})$$

$$\nabla \mathbf{U} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{U}\nabla)T = \frac{1}{\text{Pr}} \Delta T, \quad \frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{U}\nabla)C = \frac{1}{\text{Sc}} \Delta C \quad (2.1)$$

$$\text{Gr} = |\mathbf{n}| \beta (T - T_0) \frac{L^3}{\nu^2}, \quad \text{Ta} = \frac{4\Omega_a^2 L^4}{\nu^2}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad \text{Sc} = \frac{\nu}{D}$$

Здесь ρ , ν , β , a , D – плотность, коэффициенты кинематической вязкости, объемного расширения, температуропроводности и диффузии, $\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\Omega}/\Omega_a$, \mathbf{r} – радиус вектор некоторой точки в объеме жидкости, Ω_a – средняя скорость вращения аппарата соответственно. За масштабы расстояния, времени, скорости, давления и угловой скорости приняты



Фиг. 1. Расчетная схема трехмерной конвекции в космическом полете

соответственно: L – характерный размер области, заполненной жидкостью, L^2/ν , ν/L , $\rho v^2/L^2$.

В системе (2.1) Ta , Pr , Sc – числа Тейлора, Прандтля и Шмидта соответственно, Gr – число Грасгофа, зависящее от ускорения \mathbf{n} , которое имеет вид:

$$\mathbf{n} = \mathbf{R}_0 \times \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} + (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_0) \times \boldsymbol{\Omega} + \Omega_E^2 [3(\mathbf{e} \cdot \mathbf{R}_0)\mathbf{e} - \mathbf{R}_0] + \mathbf{n}_a \quad (2.2)$$

где \mathbf{R}_0 – расстояние от объема с жидкостью до центра масс КА, Ω_E^2 – гравитационный параметр, \mathbf{e} – единичный вектор, направленный из центра масс КА к центру Земли. Первый член (2.2) – ускорение, обусловленное неравномерностью вращения КА, $\mathbf{R}_0 \times (d\boldsymbol{\Omega}/dt)$, второй – центробежное ускорение $(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}_0) \times \boldsymbol{\Omega}$; третий – ускорение, вызванное градиентом гравитации, $\Omega_E^2 [3(\mathbf{e}\mathbf{R}_0)\mathbf{e} - \mathbf{R}_0]$ и последний – ускорение, обусловленное аэродинамическим торможением.

Согласно (2.1), движение жидкости в объеме в условиях космического полета определяется силой Кориолиса $\sqrt{Ta}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U})$, силой плавучести $Gr\mathbf{n}/|\mathbf{n}|$ и силой, обусловленной угловым ускорением $(\mathbf{r} \times \dot{\boldsymbol{\omega}})\sqrt{Ta}/2$, отвечающей за возникновение так называемой “изотермической конвекции” [21]. В дальнейшем будут предполагаться условия прилипания на всех границах объема, заданный температурный и концентрационный режим границ, который будет поясняться при рассмотрении конкретной задачи.

Трехмерные задачи конвекции в такой постановке были решены впервые в кубическом объеме для случая полета станции “Салют-6” в режиме гравитационной стабилизации [22]. Расчеты с учетом составляющей $\mathbf{r} \times \dot{\boldsymbol{\omega}}$ на этом этапе не проводились. В дальнейшем получило развитие использование квазистатической составляющей микроускорений, рассчитанной с учетом данных измерений движения КА (см. [27], а также упоминавшиеся специальные выпуски МЖГ и КИ). Для реального космического полета трехмерные задачи тепловой конвекции с учетом данных о квазистатической компоненте в полете станции “Мир” решались в кубе [28] и в цилиндрической области [29]. В [30] в полной постановке (2.1) рассмотрен перенос тепловой конвекцией пассивной примеси в цилиндрической ампуле для реальных условий полета КА “Фотон”².

² В [31] представлен подход, в котором в отличие от рассматриваемого здесь, основное внимание уделяется параметрическим исследованиям, а не учету реальных данных. Отметим, что угловые ускорения в формулировке модели [31] отсутствуют.

Прогресс вычислительной техники и численных методов дал возможность (для двумерных случаев – в конце 80-х годов) реализации прямого численного моделирования переходных и турбулентных режимов, что имело решающее значение для развития космического материаловедения. Отметим приоритет российских работ, впервые опубликованных в МЖГ. Для прямого численного моделирования трехмерных уравнений на основе приближения Буссинеска в цилиндрической геометрии до середины 90-х годов применялись спектрально-разностный метод и метод контрольных объемов в формулировке “скорость-давление” [32]. Последующий этап связан с применением схем на основе метода конечных разностей. Однако многие конвективные процессы недостаточно изучены и на двумерном уровне, поэтому начиная с 90-х годов разрабатывается компьютерная лаборатория в условиях микрогравитации [33]. Она включает большую часть технологически важных процессов конвективного тепло- и массообмена в диапазоне режимов космического полета, в том числе сопряжение моделей конвекции с реальным полем микроускорений в полете КА, и ориентирована не только на исследование, но и обучение [34].

3. Пространственная модель конвекции сжимаемого газа в условиях космического полета. Разработка модели на основе трехмерных уравнений конвекции сжимаемого газа или жидкости в условиях космического полета вызвана задачей интерпретации экспериментов со средой вблизи критического состояния, где обнаружено существенное влияние конвекции [35]. Учет микроускорений ведется при тех же предположениях, что и в системе (2.1), которая заменяется полной моделью сжимаемого вязкого теплопроводного газа, записываемой в следующем безразмерном виде:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho(\mathbf{U}\nabla)\mathbf{U} + \frac{\sqrt{Ta}}{Re} \rho(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U}) = -\frac{1}{\gamma} \nabla P + \frac{1}{Re} \left(2\nabla(\eta \mathbf{D}) - \nabla \left(\left(\frac{2}{3} \eta - \zeta \right) \nabla \mathbf{U} \right) \right) + \frac{\sqrt{Ta}}{2Re} \rho(\mathbf{r} \times \dot{\boldsymbol{\omega}}) + \rho C_F \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U}) = 0 \tag{3.2}$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho(\mathbf{U}\nabla)T = -(\gamma - 1)T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \nabla \mathbf{U} + \frac{\gamma}{RePr} \nabla(\lambda \nabla T) \tag{3.3}$$

Для замыкания этой системы использованы уравнения состояния для совершенного газа и газа Ван-дер-Ваальса (VDW)

$$P = \rho T, \quad P = \rho T / (1 - a\rho) - b\rho^2 \quad (a = 1/3, b = 9/8)$$

Аналитический вид и простота уравнения состояния Ван-дер-Ваальса делает его незаменимым для первого этапа моделирования. Вместе с тем область применимости последнего является самостоятельным предметом исследования.

Для перевода системы в безразмерную форму применены масштабные множители: L для расстояния, T_c для температуры (критическая температура), $R_c T_c$ для давления (ρ_c – критическая плотность), $(\gamma R T_c)^{1/2}$ для скорости, $L/(\gamma R T_c)^{1/2}$ для времени. В уравнениях содержатся безразмерные параметры: $\gamma = c_p/c_v$ для идеального газа, $Re = \rho_c (\gamma R T_c)^{1/2} L / \eta$ – число Рейнольдса, $C_F = gL/(\gamma R T_c)$ – критерий гидростатической сжимаемости, $Gr = Re^2 C_F (T_1 - T_2) / T_c$ – число Грасгофа, $Gr_r^* = f(\epsilon) Gr (1 - Ga/G)$ – “реальное” число Грасгофа, Ga – адиабатический, G – заданный градиент температур.

По сравнению с приближением Буссинеска (2.1) в системе (3.1)–(3.3) имеются три новых безразмерных параметра: критерий гидростатической сжимаемости $C_F = |\mathbf{n}|L/\gamma RT$, отношение теплоемкостей γ , а также перепад температур T_2/T_1 , комбинация которых дает критерий Шварцшильда $K = (\gamma - 1)C_F/((T_2/T_1) - 1)$, представляющий отношение адиабатического градиента к заданному. Этот критерий определяет влияние на конвекцию устойчивой стратификации, обусловленной гидростатической сжимаемостью. В отличие от конвекции в совершенном газе, для околокритической конвекции в газе Ван-дер-Ваальса существенную роль играет параметр $\epsilon = (T - T_c)/T_c$, который характеризует удаление от критической точки. Задача о возникновении конвекции типа Рэлея – Бенара для данного ϵ сводится в этом случае к отысканию функции $Gr = f(K)$ на плоскости (Gr, K) .

При уменьшении ϵ увеличивается сжимаемость и уменьшается температуропроводность, что приводит к резкому росту числа Рэлея. Еще быстрее растет вибрационное число Рэлея, пропорциональное квадрату коэффициента сжимаемости. Поэтому числа Рэлея в условиях полета на станции Мир, несмотря на уменьшение силы тяжести, имели порядок 10^4 . Вместе с тем при $\epsilon \ll 1$ величина K , ввиду роста в земных условиях параметра гидростатической сжимаемости, приближается к единице, а в космическом полете она пренебрежимо мала.

Первые численные решения задачи о трехмерной конвекции в замкнутой области в условиях космического полета на основе этой модели получены лишь недавно [36]. При решении нестационарных задач в полной постановке начальные условия заданы в виде неподвижного однородного по температуре, давлению и плотности газа, имеющего температуру T_0 . Граничные условия для температуры одной из границ T_1 , другой – $T_2 = T_0$, остальные границы теплоизолированы. В первый момент одна из стенок нагревается до температуры T_1 , что приводит к возникновению в области термоакустического течения, затухающего со временем. Разные аспекты такой модели конвекции, но при постоянной силе тяжести рассмотрены в [25, 37–38].

Система (3.1)–(3.3) для лабораторных масштабов, в средах вдали от критической точки в некотором смысле “избыточна”. Однако ее применение в условиях микрогравитации, как эталонной, представляется целесообразным. С одной стороны, это позволяет установить границы применимости промежуточных моделей. С другой стороны, самостоятельный интерес имеет исследование закономерностей конвекции вблизи критического состояния вещества.

За последние 5–7 лет в упоминавшихся работах численно реализованы модели с акустической фильтрацией и на основе полных уравнений Навье–Стокса сжимаемого газа с двухмасштабным представлением давления. Последняя эффективна при расчете медленных течений с большим шагом интегрирования по времени. В случае применения параллельных вычислительных систем с распределенной памятью используется явный метод конечных разностей для решения дифференциальных уравнений в сочетании с методом расщепления. При этом вся область разбита на фиксированное число подобластей, каждая из которых связана с одним процессором многопроцессорной системы с распределенной оперативной памятью [36].

Работы по небуссинесковским моделям, наиболее общей из которых является модель (3.1)–(3.3), публиковались на страницах МЖГ, начиная с 60-х годов. За это время появилась “иерархия” таких моделей. Это связано с тем, что область применения приближения Буссинеска при уменьшении силы тяжести имеет ограничение в силу соотношения между порядком скорости, обусловленной плавучестью и силой расширения (сжатия) в связи с сжимаемостью среды. В [39] предложена модель “микрoконвекции”, свободная от этого ограничения³. К другим вариантам небуссинесковских моделей относятся мо-

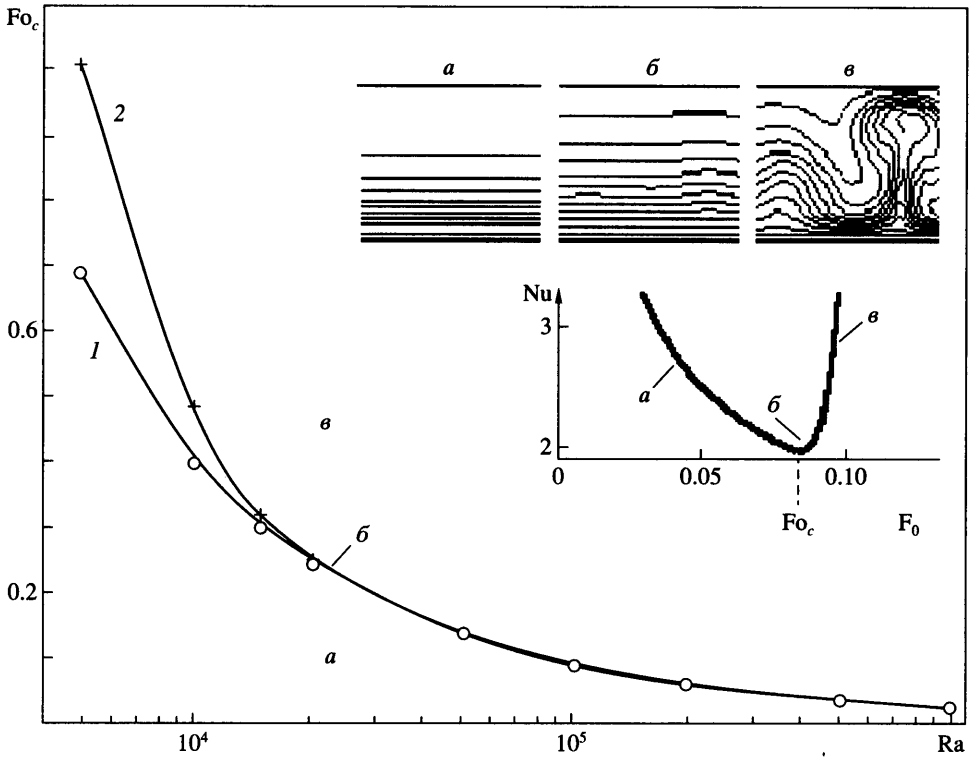
³ Название, по-видимому, не совсем удачно, так как содержит ключевое слово, относящееся к понятию “микрoструктура”, имеющему иной смысл.

дель “изотермически несжимаемой жидкости” [40], а также обобщения модели Буссинеска на случаи непоступательных вибраций при воздействии на конвекцию акустики и др. [21, 41]. Эти модели не содержат термоакустических течений, возникающих в результате нагрева сжимаемого газа. Последние представляют интерес в невесомости как один из негравитационных механизмов течения, но все еще мало изучены. В [38] представлены аналитические решения трехмерных линейных задач этого типа. Ввиду малого временного масштаба акустических возмущений, в ряде работ развиты модели с фильтрацией термоакустических возмущений в совершенном [18, 42] и несовершенном [25, 37, 38] газах. Отметим, что в [41] термоакустической конвекцией авторы называют взаимодействие тепловой гравитационной конвекции и заданных акустических возмущений, которое имеет иную природу. В [43] численно исследованы ветвления в задаче о конвекции на основе полной системы совершенного газа, что интересно и для конвекции вблизи критической точки.

4. Общие закономерности конвективного тепло- и массообмена в невесомости и физические основы гравитационной чувствительности. В космическом полете совокупность центробежных сил вращения, градиента гравитационного поля, а также аэродинамического торможения и др. вызывает архимедову силу плавучести $\beta(T - T_0)\rho$, где ρ – эффективное микроускорение (2.1). Это соответствует случаю $g/g_0 \ll 1$ в задаче о тепловой гравитационной конвекции при уменьшенной силе тяжести (“low gravity”), которая рассматривается как некоторое приближение. Однако сила $\mathbf{g} \times \boldsymbol{\omega}$, вызываемая ускоренным вращением, существенно отличается от последней тем, что может вызывать конвекцию и в изотермических условиях. Обе этих силы могут быть причиной неоднородности распределения температуры (концентрации примеси) или вызывать перемешивание. Ниже дан сжатый обзор некоторых более изученных общих свойств течений первого типа и отмечены некоторые особенности течений второго типа.

Время начала влияния конвекции на перенос тепла и характерные режимы во времени. Так как внешние силы в условиях космического полета нестационарны, а характерные времена всех видов конвекции в общем случае различны, то существенное значение приобретает время начала влияния конвекции на поле температур (концентрации примесей), зависящее от тепловых граничных условий. При этом во многих задачах гидромеханики представляет интерес определение границ характерных режимов во времени, предшествующих установлению стационарного (квазистационарного) состояния. В случае заданного потока тепла границы характерных режимов (перенос тепла теплопроводностью, промежуточный, квазистационарный) при внезапно приложенном боковом потоке тепла получены еще в 70-х годах [12]. Рассматривались различия структур и характерных времен элементарных механизмов конвекции в случаях подвода тепла к боковой, свободной поверхности и дну [14]. В [44] даны оценки для более сложных физических систем в связи с отбором экспериментов для установок кратковременной невесомости.

Более детальный анализ начальных режимов во времени выявляет закономерности, интересные и для земных приложений. В качестве примера на фиг. 2 показаны режимы, связанные с началом влияния тепловой гравитационной конвекции на поле температур при подогреве жидкости снизу [45]. Вначале происходит прогрев за счет теплопроводности, при котором изотермы параллельны границе (режим *a*). После достижения “критических условий”, определяемых глубиной прогретого слоя, возникает конвекция, которую легко видеть по искривлению изотерм, но ее влияние на теплообмен вначале мало. В качестве времени начала влияния на теплоотдачу, вызываемую конвекцией, целесообразно взять значение Fo в точке *b*, при котором появляется перегиб на кривой $Nu(Fo)$ (фиг. 2). Структура изотерм при этом имеет характерный вид термиков, которые в дальнейшем распространяются на весь объем (режим *в*), после чего происходит переход к валиковой структуре, соответствующей стационарному режиму.

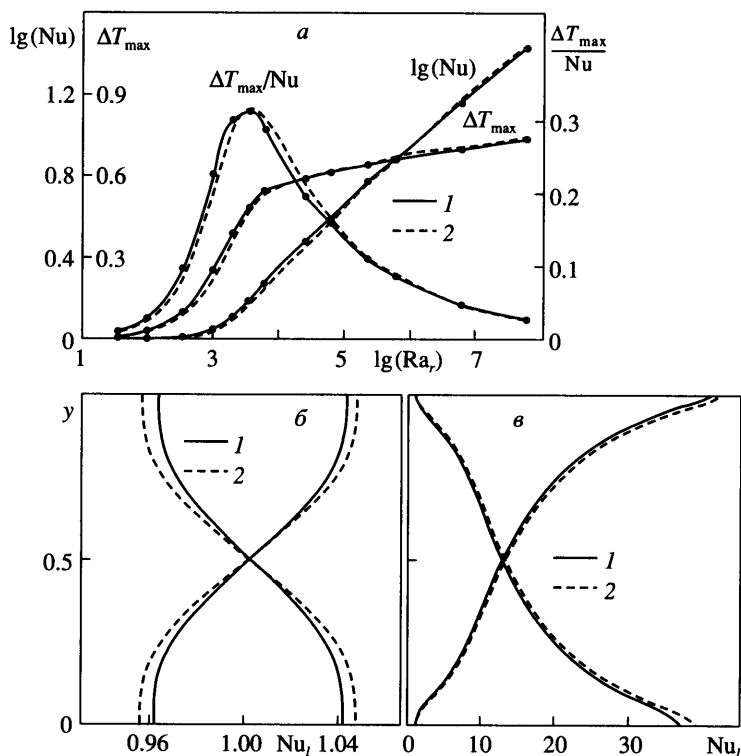


Фиг. 2. Влияние нестационарной конвекции на теплообмен: *а* – режим теплопроводности, *б* – начало влияния конвекции на теплообмен, *в* – развитие конвекции в виде “термиков”; *1* – численные расчеты, *2* – аппроксимация степенной зависимостью

При наличии свободной поверхности возможно появление термокапиллярной конвекции, причем особый интерес представляют реализованные экспериментально случаи [46], когда термокапиллярная конвекция возникает раньше, чем тепловая гравитационная, что соответствует “условиям невесомости” на Земле. В [34] такие режимы реализованы численно. В [31] рассматриваются другие модельные задачи, например о конвекции под воздействием мгновенно приложенных микроускорений.

В околокритической среде начальный режим усложняется: после внезапного подвода тепла к границе вначале проявляется эффект адиабатического сжатия, приводящий к быстрому выравниванию температур еще до начала существенного влияния тепловой гравитационной конвекции. Впервые этот эффект обнаружен в космических экспериментах [47]. На основе существующих представлений можно ожидать качественных различий в случае конвекции при боковом и донном потоках тепла. Сравнение тепловых потоков, иллюстрирующее эти процессы и развитие конвективных течений при боковом подводе тепла, показывает [38], что наиболее интересные постановки нестационарных задач и результаты в околокритической среде (где наряду с конвективным временем играет роль время проявления работы сил сжатия) еще впереди.

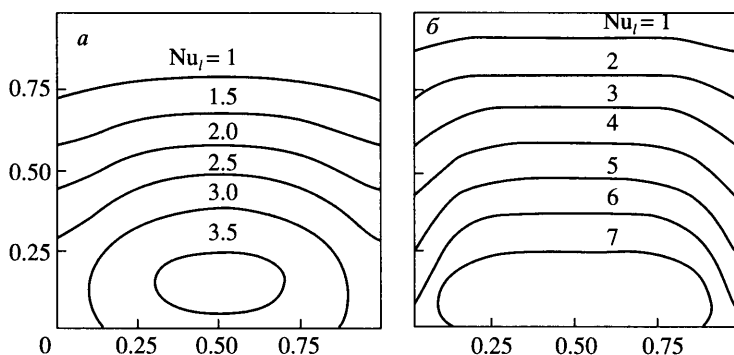
Особенности теплообмена и температурного расслоения. Характерные режимы по числу Релея в стационарном случае предсказаны теоретически в [48]. Их границы установлены в экспериментах в вертикальном слое воздуха при изотермических боковых границах и теплоизолированных основаниях [49] и уточнялись в численных расчетах



Фиг. 3. Теплообмен и температурное расслоение в замкнутой области для совершенного (1) и ван-дер-ваальсовского (2) газов. Зависимости среднего числа Нуссельта Nu , вертикальной разности температур ΔT_{max} , и отношения $\Delta T_{max}/Nu$ от числа Рейля (а), локальные числа Нуссельта на нагретой (Nu_1) и холодной (Nu_2) стенках при $Pr = 30$, $Gr = 10^4$ (б) и $Gr = 6.06 \cdot 10^2$ (в)

как на основе уравнений Навье – Стокса в приближении Буссинеска, так и сжимаемого газа [8, 12, 49, 50]. Для случая линейного распределения температур на двух границах области аналогичные расчеты выполнены в [5, 49]. Среднее число Нуссельта в задаче о тепловой гравитационной конвекции в замкнутой области, при заданной разности температур на боковых границах в стационарном случае увеличивается с ростом числа Рейля (фиг. 3, а). Режиму пограничного слоя в логарифмических координатах соответствует линейная зависимость Nu (Ra). Условиям микрогравитации на фиг. 3, а соответствуют промежуточный и теплопроводностный режимы, которые отличаются от режима пограничного слоя особенностями локального теплообмена и температурного расслоения. В этих режимах локальный поток тепла (фиг. 3, б) может быть меньше теплопроводностного, несмотря на то, что конвекция в среднем тепло всегда отводит тепло от стенки, т.е. $Nu > 1$ [12, 51]. Этот эффект, приводящий к локальному перегреву, существенно уменьшается при развитой конвекции (фиг. 3, в). При этом в трехмерном случае на нагретой стенке имеется зона, в которой локальное число Нуссельта меньше (на холодной стенке больше) единицы. В режиме развитой конвекции эта зона уменьшается, вплоть до полного исчезновения [52] (фиг. 4).

Несмотря на увеличение интенсивности конвекции и теплоотдачи, вертикальная разность температур при увеличении числа Рейля (фиг. 3, а) не уменьшается. Однако в случае задания на границе потока тепла, в отличие от случая с заданными температурами

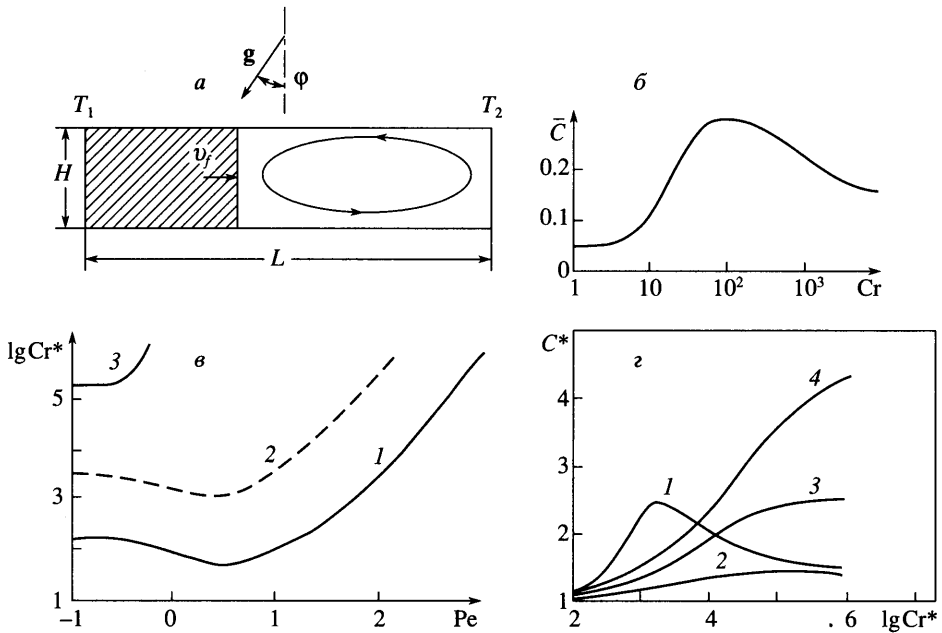


Фиг. 4. Пространственные эффекты локального перегрева: изолинии локального числа Nu_l на нагретой стенке при $Ra = 10^4$ (а) 10^5 (б), $Pr = 0.71$

боковых поверхностей, вертикальная разность температур, отнесенная к потоку тепла, проходит через максимум и уменьшается при росте числа Релея (фиг. 3, а). Эта особенность установлена в задачах с заданным потоком тепла для замкнутых объемов разной геометрии (плоская, цилиндрическая, сферическая). Зоны локального перегрева (переохлаждения) найдены также в случае возникновения конвекции за порогом устойчивости гидростатического равновесия при подогреве горизонтального слоя снизу [51]. Отметим, что до этого, даже в авторитетных научных и учебных трудах [48, 53], преобладали представления о том, что наличие конвекции всегда выравнивает температуру жидкости. Это оказывается неверным в режиме слабой конвекции. Физический смысл этого максимума заключается в том, что в режиме теплопроводности конвективная добавка к температурной (концентрационной) разности за счет конвекций равна нулю в связи с отсутствием течения, а при больших числах Релея, преобладающих в земных условиях, она стремится к нулю в результате сильного перемешивания. Поэтому наибольшее расслоение создается слабой конвекцией в промежуточном режиме.

Увеличение температурного расслоения было найдено также при наличии других воздействий, приводящих к ослаблению конвекции (градиент гравитационного поля, устойчивая стратификация и др.). В некоторых случаях получены аналитические решения [22]. Значительно позже найдено аналитическое решение [54] в задаче о конвекции в плоском наклонном слое при заданном потоке тепла, из которого следуют упоминавшиеся эффекты максимумов температурного расслоения. Влияние тепловых граничных условий, существенное при ламинарной конвекции в замкнутых областях, рассматривалось в ряде работ (см. обзор в [9]), однако упомянутые эффекты не были обнаружены. В недавнее время установлено, что локальные эффекты имеют место и в небуссиновском приближении, вблизи критического состояния. Интегральные и локальные зависимости теплообмена и температурного расслоения в замкнутой области, при боковом подогреве для конвекции вблизи критической точки сохраняют подобие при одних и тех же числах Релея (Грасгофа), определенных по реальным теплофизическим свойствам (закон калибровки) (фиг. 3, а, б). Это справедливо, начиная с того момента времени, когда перестает оказывать влияние эффект адиабатического сжатия [37, 38].

Установлено, что свойствами достигать максимума в зависимости от параметра, характеризующего интенсивность конвекции (Ra , Re , Mn), обладают все типы (гравитационной и негравитационной) конвекции [22]. Слабые течения встречаются в проницаемой пористой теплоизоляции [51] и широко распространены в геодинамике [55], где они действуют на протяжении весьма длительных “геологических” времен. Таким образом,

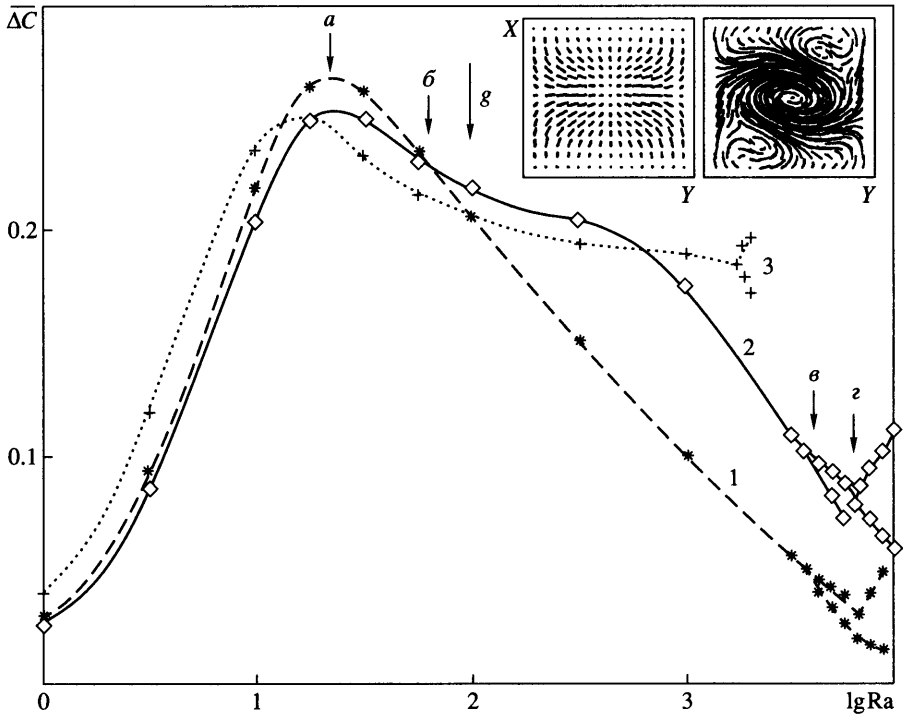


Фиг. 5. Поперечные концентрационные неоднородности в полупроводнике, обусловленные конвекцией в модели направленной кристаллизации с движущимся фронтом $C^* = C_{\max}/C_{\min}$, $\bar{\Delta C} = \Delta C/C_2 - C_1$: *a* – схема расчета в общем случае при движении фронта и наклоне массовой силы под углом φ , *б* – зависимость поперечного концентрационного расслоения от числа Грасгофа при фиксированном фронте и вертикальном направлении массовой силы ($\varphi = 0$), *в* – обобщенная диаграмма изолиний концентрационной неоднородности *1* – $\bar{\Delta C} > 20\%$, *2* – $\bar{\Delta C}_{\max}$, *3* – $\bar{\Delta C} < 20\%$, *z* – перепад концентраций на фронте при коэффициенте распределения примеси $k_0 = 0.1, 2, 5.5, 17$ (*1-4*)

область современных приложений закономерностей ослабленной тепловой гравитационной конвекции довольно широка.

Концентрационные неоднородности. В задачах космического материаловедения возлагались надежды на улучшение в условиях невесомости поперечной концентрационной однородности распределения легирующей примеси при направленной кристаллизации [17]. Однако результаты моделирования в простейших случаях показывают, что это не всегда достижимо, так как в зависимости поперечной разности концентраций от числа Грасгофа (Релея) имеется максимум [16, 22]. Зависимость безразмерной концентрационной неоднородности $\bar{\Delta C} = \Delta C/(C_1 - C_2)$ от числа Грасгофа ($Gr = g\beta(T_2 - T_1)H^4/Lv^2$, $L/H = 4$, $Pr = 0,04$, $Sc = 10$) при поперечном действии вектора силы тяжести позволяет по исходной концентрационной неоднородности (слева или справа от максимума) дать качественное заключение о возможности улучшения результата по однородности при уменьшении силы тяжести в условиях микрогравитации (фиг. 5, б). Позднее подобные зависимости стали публиковаться на Западе; литература по этому вопросу в настоящее время обширна [17, 22, 56, 57]. Устранить такого типа неоднородность можно, например, путем медленного изменения ориентации слоя [22, 33].

В свое время без внимания остались результаты моделирования более близкого к реальным условиям случая, когда массовая сила наклонена под некоторым углом φ , а



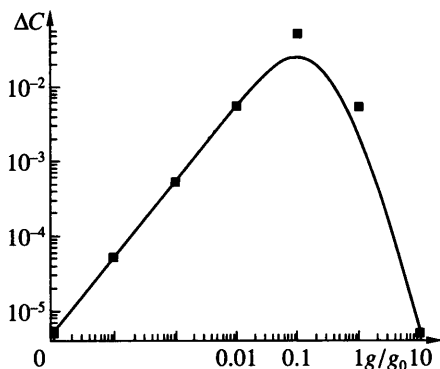
Фиг. 6. Трехмерные эффекты концентрационного расслоения в горизонтальном параллелепипеде с боковым подогревом и картины течения для симметричного (*a*, $Ra = 10^3$) и несимметричного (*b*, $Ra = 10^{3.75}$) режимов: осреднение по площади грани (1), по центральной линии (2), двумерный случай (3)

фронт кристаллизации, на котором происходит перераспределение примеси с коэффициентом κ , движется со скоростью v_f (фиг. 5, *a*). Тогда максимумы концентрационной неоднородности при разной скорости движения фронта будут сосредоточены на диаграмме Gr^* , Pe на линии 2 (фиг 5, *в*)

$$Gr^* = \frac{g\beta(T_2 - T_1)H^4 \cos \varphi}{LvD}, \quad Pe = \frac{v_f H}{D}$$

Аномально высокий эффект концентрационной неоднородности, когда C_{max}/C_{min} составляет несколько единиц, может быть достигнут в одной из точек этой линии (фиг. 5, *з*) [22]. В соответствии с определением, на этой обобщенной диаграмме учтена и ориентация слоя. Таким образом, силы плавучести, обусловленные квазистатической компонентой, в сочетании с совокупностью “внутренних” явлений (изменение объема, занятого расплавом, захват или оттеснение примеси на фронте кристаллизации, отношение вязкости и диффузии и др.) могут быть одной из причин высокой поперечной концентрационной неоднородности.

Для решения фундаментального вопроса о том, когда следует опасаться макронеоднородности, обусловленной слабой конвекцией, а в каком случае опасна микронеоднородность, обусловленная конвективной неустойчивостью и колебаниями, двумерной модели недостаточно. Трехмерные расчеты показывают появление колебаний и наличие второго максимума в концентрационной неоднородности, существенно меньшего, чем первый (фиг. 6). Двумерная модель хорошо предсказывает поперечную концентра-

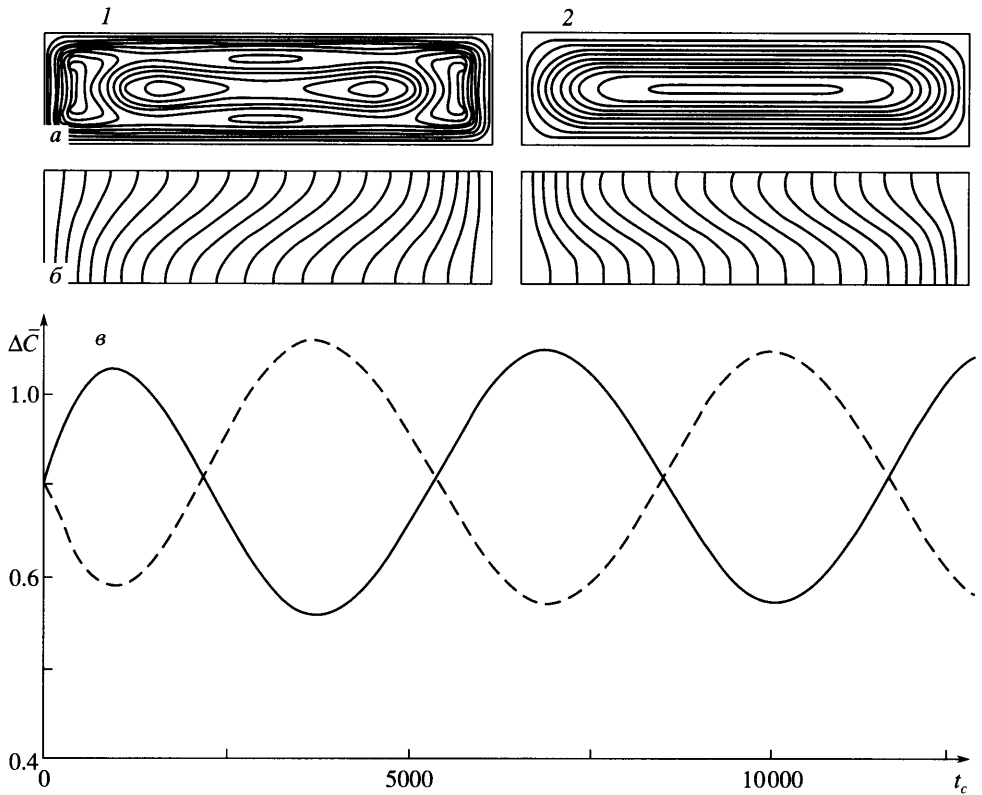


Фиг. 7. Зависимость поперечных концентрационных неоднородностей от амплитуды в цилиндрической области, обусловленных высокочастотными поступательными вибрациями, поперечными оси

ционную неоднородность, обусловленную плавучестью, но не дает описания колебательных эффектов, сопровождающихся потерей симметрии течения, что имеет существенно трехмерный характер (фиг. 6) [24]. Определение условий возникновения колебаний за счет конвективной неустойчивости было целью известного теста GAMM [58], за основу которого взята постановка [16] с параметрами, соответствующими фиг. 5, б. В этом тесте задача решалась на двумерном уровне, но теперь ясно, что это недостаточно.

Концентрационные неоднородности, обусловленные вибрациями. К концентрационной неоднородности должно приводить и конвективное течение, создаваемое вибрациями. Ее величина может быть различной при действии поступательных и непоступательных вибраций, а также вибраций высокой и низкой частоты. При низкочастотных поступательных вибрациях на основе двумерных моделей в [22] установлен максимум зависимости концентрационной неоднородности от амплитуды и частоты. При высокочастотных вибрациях возможен максимум в зависимости от амплитуды, вызываемый осредненными конвективными течениями. На фиг. 7 показан пример расчета на основе трехмерной модели в цилиндре [34] поперечных концентрационных неоднородностей при наличии осредненной конвекции, обусловленной вибрациями, поперечными к оси цилиндра. Здесь максимум $\overline{\Delta C} \sim 10^{-2}$ приходится на амплитуды, соответствующие микроускорениям $g/g_0 \sim 0.1$. Величина этого максимума намного меньше, чем в случае низкочастотных микроускорений, что соответствует выводам [22]. Эффект максимума концентрационной неоднородности должен проявляться и под действием непоступательных высокочастотных вибраций, однако в этом случае данные отсутствуют.

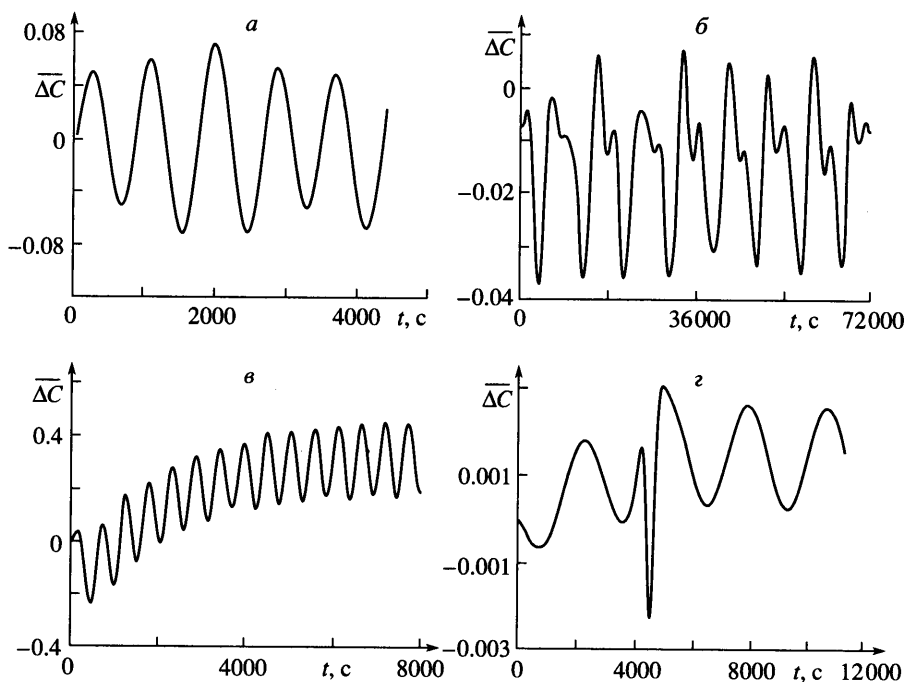
В образовании концентрационных неоднородностей, обусловленных низкочастотными непоступательными вибрациями, вызванными угловым ускорением, существенны не только амплитуда и частота, но и расстояния от центра вращения. Поэтому столь же общие результаты, как при действии плавучести, здесь ограничены. В качестве примера рассмотрим результаты двумерного расчета изотермического течения и распределения легирующей примеси, вызванного низкочастотными качаниями, при расстояниях объема от центра качания ($x = 127$ см, $y = 6$ см, $z = 3$ см), характерных для спутника Фотон при тех же параметрах, что и на фиг. 5 ($Sc = 10$, $L/H = 4$) при амплитуде качаний, соответствующей $g/g_0 \sim 10^{-2}$ с частотой $\omega = 0.001$ Гц. Это превышает их реальные значения в штатном полете, но значительно меньше встречающихся в литературе ([1, 19–21, 59]). На мгновенных картинах изолиний функции тока, поля концентрации и изменение кон-



Фиг. 8. Структуры течения и концентрационные неоднородности в изотермическом расплаве полупроводника, при наличии углового ускорения, обусловленного низкочастотными качаниями: *a* – мгновенные структуры течения, *б* – изолинии поля концентрации, *в* – изменение концентрации во времени на двух противоположных стенках в центре

центрации на границе для одного периода качаний видны периодически образующиеся вторичные структуры, характерные для этого типа течения (фиг. 8). Характер неоднородности мгновенного поля концентрации для частот этого порядка зависит от смены направления течения. В этом она существенно отличается от той, которая вызывается действием плавучести, причем поперечная неоднородность может превышать значение, обусловленное плавучестью. В зависимости от частоты качаний имеется максимум поперечной концентрационной неоднородности, приходящийся на сверхнизкие частоты качаний, имеющие для данного примера порядок 10^{-3} Гц. Для интерпретации космических экспериментов представляет интерес учет течений этого типа при моделировании процессов на фронте кристаллизации.

5. Особенности конвекции, тепло- и массообмена в реальных условиях космического полета. В первых экспериментах по кристаллизации германия, легированного кремнием и сурьмой, выполненных в совместном полете космических кораблей “Союз-Аполлон”, обнаружена аномальная поперечная неоднородность, которая оказалась больше, чем на земле. Поиск возможных причин продолжается с тех пор и еще не завершен [17]. Для продвижения в решении этого вопроса полезно сопоставление концентрационных неоднородностей на различных космических аппаратах с учетом их фактического дви-



Фиг. 9. Временные эволюции концентрационных неоднородностей для транспортно-го корабля Спейс-Шаттл (а), МКС (б), спутника "Фотон" (в); орбитального комплекса Мир (з)

жения, включая режимы полета с ускоренным вращением. В [60] такое сопоставление дано в рамках двумерного приближения в упрощенной постановке: конвективный массообмен в замкнутой квадратной области с фиксированными значениями концентраций на двух границах при отсутствии потоков тепла и массы на двух других. В таком приближении решены двумерные задачи с использованием микроускорений в плоскостях (x, y) , (y, z) , (z, x) и определены концентрационные неоднородности за счет конвекции, обусловленной всей совокупностью квазистатических микроускорений с учетом специфики конструкции и динамики полета КА. Расчеты проведены для четырех космических аппаратов (орбитальная станция "Мир", спутник "Фотон", МКС и орбитальный корабль Спейс-Шаттл). Различие концентрационных неоднородностей оказывается существенным (фиг. 9) и тем больше, чем интенсивнее вращательное движение КА относительно центра масс, которое является наибольшим для неуправляемого движения беспилотного спутника "Фотон" и наименьшим – для пилотируемой станции Мир [60].

В этом примере влияние углового ускорения (которое в рассмотренных на фиг. 9 случаях должно быть наибольшим для КА "Фотон") меньше, чем влияние центробежных сил вращения. Это связано с низкой амплитудой и частотой реальных угловых ускорений в штатном полете КА. В случае реального штатного полета КА "Фотон" проявляется, но менее выражен упоминавшийся выше "реверс" концентрационных неоднородностей. Вместе с тем значения концентрационных неоднородностей в штатных условиях полета оказываются меньше, чем те, которые можно было бы получить исходя из их максимальных значений при параметрических расчетах. Трехмерные расчеты при учете квазистатической компоненты в реальном случае полета КА "Фотон" [30] подтверждают вывод о том, что поперечные концентрационные неоднородности при учете ре-

альных условий штатного полета меньше, чем максимально возможные в двумерном случае. Для выяснения истинных причин неоднородностей в реальных условиях необходимы параметрические расчеты, выявляющие вклад каждого из составляющих в каждом конкретном случае (например в случае МКС более важную роль играет градиент гравитационного поля).

Наиболее вероятной причиной аномально высокой концентрационной неоднородности является взаимодействие “внутренних факторов” (изменение объема, занятого расплавом при движении фронта с изменением концентрации на границе), а также существенным влиянием микроускорений в нештатных условиях полета в отличие от штатных (“внешние факторы”), так как в упомянутом эксперименте на КА “Союз-Аполлон” плавка велась в момент сложной динамики после стыковки космических аппаратов. В [61] делается попытка дать объяснение этому эффекту на основе более полной модели кристаллизации, с учетом формы и движения фронта (задача Стефана), но при этом микроускорения считаются постоянными, т.е. не учитываются реальные условия полета. Поэтому результаты [61] также не могут дать полного объяснения причин аномальных концентрационных неоднородностей.

Таким образом, результаты анализа технологических экспериментов в реальных условиях полета не отрицают возможность получения высокооднородных монокристаллов. Однако для достижения этой цели требуется тщательный учет и контроль как реальных факторов полета, так и “внутренних факторов”⁴. Это приводит к новой формулировке космического эксперимента, в котором осуществляется измерение конвекции в замкнутом объеме с контролируруемыми тепловыми граничными условиями и в контролируемых условиях полета [22]. Такой эксперимент реализован на станции “Мир” в термостате, заполненном воздухом (прибор Дакон [62]). В земных условиях выполнена экспериментальная отработка (кубическая и цилиндрическая области с качанием и цилиндрическая область при наличии тепловой гравитационной конвекции) и математическое моделирование [20, 29, 59]. Прибор, измеряющий конвекцию, может выполнять и функции “датчика конвекции” или индикатора микроускорений, что весьма важно в связи со сложностью и изменчивостью условий реального космического полета и различной реакцией на эти условия жидких и газовых сред. Теоретическое обоснование такого датчика предпринято в [63]. Примерно в то же время эксперимент с конвекцией на воде был выполнен в полете космического челнока “Спейс-Шаттл” [64]. В упомянутой работе без ссылок на эксперименты с конвекцией в газовой среде, в которых этот принцип предложен раньше и обоснован теоретически [62, 63], провозглашается “новый” принцип измерения микроускорений. Математическое моделирование конвекции в условиях, соответствующих [64], выполненное в [34], показывает существенное временное запаздывание такого прибора, что затрудняет его использование как индикатора микроускорений.

Концентрационные неоднородности в расплавах полупроводников – типичный, но далеко не единственный пример высокой гравитационной чувствительности, обнаруженной в реальных условиях космического полета. В ходе исследования околокритических явлений, проведенных на станции “Мир”, также установлены аномальные эффекты теплопереноса [47], которые можно объяснить лишь наличием конвекции. При лабораторном моделировании на земле были воспроизведены внешние условия. При этом рассмотрены те из них, которые приводят к вибрационному механизму конвекции Реллея-Бенара [35, 65]. Такой опыт интерпретации космических экспериментов свидетельствует о необходимости не только математического, но и физического лабораторного

⁴ Типичным примером является попытка интерпретации экспериментов по методу бестигельной зонной плавки, где поверхностные силы должны были бы преобладать над внешними. Однако наблюдаемые “эффекты грани” объясняются авторами лишь “внешними” факторами (КИ. 2004. Т. 42. № 2).

моделирования в земных условиях при учете воздействия внешних сил, что еще не является сложившейся традицией в технологической области.

6. Некоторые задачи современных исследований. Исследования в условиях космического полета заняли свое место в фундаментальных и прикладных разделах многих научных направлений. Ниже отмечены некоторые из них, где механика играет наибольшую роль и может получить дальнейшее развитие.

Первые эксперименты по измерению конвекции в космическом полете, выполненные более 30 лет тому назад, ставили задачу демонстрации негравитационного механизма – термокапиллярной конвекции при полете в космосе [66]. Задача измерения тепловой конвекции, обусловленной микроускорениями в орбитальном полете и ее разновидностей, не ставилась. В настоящее время предложения по постановке таких экспериментов исходят от ряда групп [62, 67, 68]. В двух последних предлагаются также методы визуализации. Наиболее продвинуты температурные измерения в газовой среде, где имеется опыт наземной отработки, сопоставления данных измерений и моделирования в реальных условиях полета [20, 29, 62].

Развитие и применение моделей конвекции в условиях космического полета создает необходимость проверки их полноты и границ применимости. Такая цель приводит к постановке “глобального теста”, который состоит из четырех самостоятельных разделов:

1) расчет, измерение микроускорений и их сопоставления, 2) измерения характеристик того или иного гравитационно-чувствительного процесса, 3) моделирование такого процесса в реальных условиях микрогравитации, в том числе “внутренние” тесты математических моделей, 4) сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

Такая специализация теста обусловлена тем, что расчеты квазистатической компоненты и методы прямого измерения на МКС микроускорений различными приборами (“внешние факторы”), а также моделирование гравитационно-чувствительных процессов (“внутренние факторы”) нуждаются в своих собственных проверках. Цель первого этапа – сопоставление данных теоретических моделей и измерений, а также подготовка данных микроускорений для использования в математических моделях. Данные измерений микроускорений (американским акселерометром) на МКС с последующей фильтрацией высокочастотной составляющей и сопоставление с данными расчета квазистатической составляющей дают удовлетворительное согласование для применения в гидродинамических моделях [27]. Наряду с измерениями конвекции и ее математическим моделированием это составляет основу для реализации следующих разделов упомянутого теста. В рамках такого теста возможна проверка реализуемости в космическом полете и упоминавшихся моделей вращательно-вибрационной конвекции.

Обоснованию исследования вблизи критического состояния вещества и обсуждению новых результатов уделялось много внимания [4, 47]. Задача измерения конвекции при этом не ставилась. В отечественном проекте КРИТ, предложенном к реализации на МКС [36], эта задача является одной из главных. При этом прогресс в моделировании трехмерной околоскритической конвекции позволяет дать интерпретацию экспериментальным исследованиям динамики трехмерных структур в разных средах в условиях естественного динамического фона и искусственных вибрационных воздействий разного вида. Предполагается развитие идеи конвективного датчика в околоскритической среде в космическом полете. Решение таких трудных задач будет стимулировать развитие моделей и математического аппарата конвекции сжимаемого газа.

Условия микрогравитации составляют в некотором смысле “ресурсы” космического аппарата. При этом возникает вопрос о его сертификации, т.е. о требованиях к его амплитудно-частотным характеристикам. Этот вопрос особенно важен в случае высокой гравитационной чувствительности объекта. Конкретный вид предельной амплитудно-частотной характеристики МКС имеет эмпирический характер и зависит от многих факторов, определяющих данный процесс [31]. Для случая концентрационной неодно-

родности в расплавах полупроводников расчеты распределения примеси, обусловленного слабой конвекцией, показывают, что для поступательных вибраций высокой частоты (>1 Гц) требования [31] достаточны, но в области низких частот (<0.1 Гц) недостаточны [30, 34]. Ограничения на характеристики углового ускорения в настоящее время отсутствуют. Поэтому изучение степени гравитационной чувствительности и требований к микрогравитационной среде на основе методов моделирования представляет одну из важных практических задач механики невесомости.

В нестационарных режимах имеются альтернативные невесомости пути исследования поверхностных механизмов конвекции [46], изучение которых является обещающим направлением экспериментального исследования негравитационных механизмов конвекции в земных условиях, резервы которого пока еще мало используются. Другое направление – изучение наземных альтернатив для устранения полосчатой неоднородности, обусловленной конвективной неустойчивостью, что было одним из достижений космического материаловедения [3, 4], стимулировавших изучение критических условий появления колебаний. В этом отношении наибольший прогресс достигнут в методе выращивания кристаллов методом вытягивания из расплава (метод Чохральского), где имеются конвективные взаимодействия течений гравитационного и негравитационного видов (вращение, термокапиллярная и тепловая гравитационная конвекция). К настоящему времени исследованы лишь некоторые динамические и тепловые управляющие воздействия. Для отдельных материалов (например, полуизолирующего арсенида галлия) уменьшение силы тяжести до $g/g_0 \sim 10^{-2}$ может привести к устранению конвективных неустойчивостей, однако такого эффекта можно добиться и с помощью других, альтернативных невесомости низкоэнергетических управляющих воздействий. Но действие невесомости в некотором смысле универсально, поэтому должна существовать область ее эффективного применения [32]. Это направление в последнее время начало активно разрабатываться [69].

Заключение. Общая задача об исследовании гравитационно-чувствительных процессов внутри космического аппарата выдвинута К.Э. Циолковским как одна из основных задач, связанных с выходом человека во внесземное пространство и освоением новой среды обитания. В публикациях журнала МЖГ исследование конвекции и процессов тепло- и массообмена под действием массовых и поверхностных сил в орбитальном полете, как одной из составляющих этой задачи, получили существенное развитие.

Конвекция и процессы тепло- и массообмена внутри космического корабля отличаются большим разнообразием и изменчивостью. Многие из них подавляются в земных условиях действием силы тяжести, а в результирующей картине процессов переноса в полете участвуют несколько малых по величине, но равноправных сил. По этой причине оказались несостоятельными предположения о преимущественно теплопроводностно-диффузионном переносе. Исследование таких процессов требует учета всех действующих факторов и приводит к постановке связанных задач гидродинамики и теоретической механики, отличающихся как от традиционных задач механики космического полета, так и от задач тепло- и массообмена в земных условиях.

В экспериментах в условиях космического полета на орбитальных станциях, начатых в 70-х годах, обнаружены новые, не до конца понятые явления, обусловленные высокой гравитационной чувствительностью, что стимулировало исследования и публикации новых результатов. Разработка и численная реализация моделей конвекции на основе общих уравнений гидромеханики (уравнения Навье–Стокса) дали качественное объяснение ряду новых закономерностей локальных эффектов теплообмена и температурного (концентрационного) расслоения. Задача изучения негравитационных конвективных процессов привела к интенсивному развитию механики вибрационных течений.

К настоящему времени в моделировании конвекции и процессов тепло- и массообмена в приближении Буссинеска и сжимаемого газа преодолен трехмерный барьер. Это позволяет поднять решение сопряженных задач гидродинамики и теоретической меха-

ники до уровня рабочего инструмента для анализа и предсказания результатов. Вместе с тем для практических целей все еще недостаточно изучены элементарные процессы конвекции, обусловленные особенностями движения в космическом полете, в том числе низкочастотные вращательные движения с ускорением, взаимодействие объемных и поверхностных механизмов конвекции. Это делает актуальным их более детальное теоретическое и экспериментальное исследование в лабораторных условиях и с помощью новых компьютерных средств.

Выполненные работы составляют основу исследований сред с высокой гравитационной чувствительностью, постановки экспериментов по проверке моделей механики сплошных сред вблизи критического состояния вещества, технологических экспериментов в космосе, их наземных альтернатив, обоснования требований к микроускорениям. Новые возможности появляются в оптимизации процессов конвективного тепло- и массообмена в технических и медико-биологических системах внутри космического аппарата в широком круге условий полета, включая средства их имитации в условиях полета и на земле.

Работа частично поддержана грантами РФФИ (№№ 06-01-00281, 04-01-39021, 05-08-18110), а также программой № 17 Президиума РАН.

Автор выражает благодарность С.А. Никитину, О.А. Бессонову, Н.В. Никитину, Е.Б.Соболевой, В.П. Яремчуку за сотрудничество в решении задач конвекции, Г.Ф. Путин, А.И. Иванову, А.В. Зюзгину, В.М. Емельянову за сотрудничество в космических экспериментах, В.В. Сазонову за подготовку данных по микроускорениям, М.Н. Мякшиной за проведение расчетов и А.О. Руденко за помощь в подготовке графического материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Повицкий А.С., Любин Л.Я.* Основы динамики и тепломассообмена в жидкостях и газах при невесомости. М.: Машиностроение, 1972. 252 с.
2. *Бабский В.Г., Копачевский Н.Д., Мышкис А.Д. и др.* Гидромеханика невесомости / Под ред. Мышкиса А.Д. М.: Физматлит, 1976. 504 с.
3. Гидромеханика, тепло- и массообмен в невесомости / Под ред. Авдеевского В.С., Полежаева В.И. М.: Наука, 1982. 253 с.
4. Fluid Science and Material Science in Space / Ed. Walter H.U. Berlin : Springer-Verlag, 1987. 743 p.
5. *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Тарунин Е.Л.* Численное исследование конвективного движения в замкнутой полости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1966. № 5. С. 56–62.
6. *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Тарунин Е.Л.* Численное исследование конвекции жидкости, подогреваемой снизу // Изв. АН СССР. МЖГ. 1966. № 6. С. 93–99.
7. *Полежаев В.И.* Численное решение системы одномерных нестационарных уравнений Навье – Стокса для сжимаемого газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1966. № 6. С. 34–43.
8. *Полежаев В.И.* Численное решение системы двумерных нестационарных уравнений Навье – Стокса для сжимаемого газа в замкнутой области // Изв. АН СССР. МЖГ. 1967. № 2. С. 103–111.
9. *Sen A.K.* Modelling flows in rectangular enclosures and cavities // Encyclopedia of Fluid Mech. V. 1. Houston.: Gulf publ. Corp., 1986. P. 896–930.
10. *Зеньковская С.М., Симоненко И.Б.* О влиянии вибраций высокой частоты на возникновение конвекции // Изв. АН СССР. МЖГ. 1966. № 5. С. 51–55.
11. *Бабский В.Г., Скловская И.Л.* Гидродинамика в слабых силовых полях. Возникновение стационарной термокапиллярной конвекции в условиях невесомости // Изв. АН СССР, МЖГ. 1969. № 3. С. 92–99.
12. *Полежаев В.И.* Нестационарная ламинарная тепловая конвекция в замкнутой области при заданном потоке тепла // Изв. АН СССР. МЖГ. № 4. 1970. С. 108–117.
13. *Кирдяшкин А.Г., Леонтьев А.И., Мухина Н.В.* Устойчивость ламинарного течения жидкости в вертикальных слоях при естественной конвекции // Изв. АН СССР. МЖГ. 1971. № 5. С. 170–174.

14. Полежаев В.И. Конвективное взаимодействие в цилиндрическом сосуде, частично заполненном жидкостью при подводе тепла к боковой и свободной поверхностям и дну // Изв. АН СССР. МЖГ. 1972. № 4. С. 77–88.
15. Черкасов С.Г. Естественная конвекция и температурная стратификация в криогенном топливном баке в условиях микрогравитации // Изв. АН. МЖГ. 1994. № 5. С. 142–149.
16. Полежаев В.И., Федюшкин А.И. Гидродинамические эффекты концентрационного расщепления в замкнутых объемах // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 3. С. 11–18.
17. Земсков В.С. Новые научные представления о процессах, сопровождающих направленную кристаллизацию расплавов: итог экспериментов по выращиванию полупроводников на космических аппаратах // Сб. трудов VII Рос. симп. “Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем”. М.: ИПМех РАН, 2001. С. 34–51.
18. Никулин Д.А., Потехин Г.С., Стрелец М.Х. Приближенная система уравнений для описания нестационарной концентрационной естественной конвекции в бинарных газовых смесях // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 5. С. 57–59.
19. Козлов В.Г. О вибрационной тепловой конвекции в полости, совершающей высокочастотные вращательные качания // Изв. РАН. МЖГ. 1988. № 3. С. 138–144.
20. Богатырев Г.П., Ермаков М.К., Иванов А.И., Никитин С.А. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование тепловой конвекции в наземной модели конвективного датчика // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 5. С. 67–75.
21. Gershuni G.Z., Lyubimov D.V. Thermal Vibrational Convection. N. Y.: Wiley & Sons, 1998. 356 p.
22. Полежаев В.И., Белло М.С., Верезуб Н.А. и др. Конвективные процессы в невесомости. М.: Наука, 1991. 240 с.
23. Козлов В.Г. Вибрационная тепловая конвекция во вращающихся полостях // Изв. РАН. МЖГ. 2004. № 1. С. 5–14.
24. Бессонов О.А., Брайловская В.А., Полежаев В.И. Пространственные эффекты конвекции в расплавах: Концентрационные неоднородности, возникновение несимметрии и колебания // Изв. РАН. МЖГ. 1997. № 3. С. 74–82.
25. Полежаев В.И., Соболева Е.Б. Конвекция Рэлея-Бенара в околоскритической жидкости вблизи порога устойчивости // Изв. РАН. МЖГ. 2005. № 2. С. 48–61.
26. Полежаев В.И. Режимы микроускорений, гравитационная чувствительность и методы анализа технологических экспериментов в условиях невесомости, Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 5. С. 22–36.
27. Бабкин Е.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И. и др. Определение квазистатической компоненты микроускорения, возникающего на борту Международной Космической Станции // Космич. исслед. 2004. Т. 42. № 2. С. 162–171.
28. Сазонов В.В., Юфрегов В.С. Тепловая конвекция, вызванная квазистатической компонентой поля микроускорений орбитальной станции “Мир” // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 3. С. 39–45.
29. Бессонов О.А., Полежаев В.И. Математическое моделирование конвекции в датчике “Дакон” в условиях реального космического полета // Космич. исслед. 2001. Т. 32. № 2. С. 170–178.
30. Никитин Н.В., Полежаев В.И., Яремчук В.П. Трехмерные конвективные течения, тепло и массообмен в цилиндрической области в условиях микрогравитации // Тр. Третьей Рос. национальной конф. по теплообмену. Т. 3. Свободная конвекция. Теплообмен при химических превращениях. М.: Изд-во МЭИ. 2002. С. 124–127.
31. Savino R., Monti R. Fluid dynamics experiment sensitivity to accelerations prevailing on microgravity platforms // Phys. Fluids in microgravity (ed) R. Monty, London & N. Y.: Taylor & Francis. 2001. P. 515–559.
32. Никитин Н.В., Никитин С.А., Полежаев В.И. Конвективные неустойчивости в гидродинамической модели роста кристаллов методом Чохральского // Успехи механики. 2003. Т. 2. № 4. С. 63–105.
33. Ермаков М.К., Никитин С.А., Полежаев В.И. Система и компьютерная лаборатория для моделирования процессов конвективного тепло- и массообмена // Изв. РАН. МЖГ. 1997. № 3, 22–38.
34. Яремчук В.П. Численное моделирование пространственных конвективных процессов в реальных условиях космического полета: Автореф. дис. ... к. ф-м.н, М., 2004 16 с.

35. *Эюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И., Путин Г.Ф., Соболева Е.Б.* Конвективные движения околокритической жидкости в условиях реальной невесомости // *Космич. исслед.* 2001. Т. 39. № 2. С. 188–200.
36. *Polezhaev V.I., Gorbunov A.A., Nikitin S.A., Soboleva E.B.* Hydrostatic compressibility phenomena: new opportunities for near critical research in microgravity // *Proceedings of the Interdisciplinary Transport Phenomena In Microgravity and Space Sciences Conference IV.* N. Y.: Engineering Conf. Intern., 2005. P. 9–11–9.22
37. *Полежаев В.И., Соболева Е.Б.* Тепловая гравитационная конвекция околокритической жидкости в замкнутой области с боковым подогревом // *Изв. РАН. МЖГ.* 2001. № 3. С. 143–154.
38. *Polezhaev V.I., Gorbunov A.A., Soboleva E.B.* Unsteady near critical flows in microgravity environment // *Transport phenomena in microgravity 2004.* N. Y.: Ann. N. Y. Acad. Sci. 2004. V. 1027. P. 286–302.
39. *Пухначев В.В.* Микроконвекция в вертикальном слое // *Изв. РАН. МЖГ.* 1994. № 5. С. 76–85.
40. *Надолин К.А.* О приближении Буссинеска в задаче Рэлея-Бенара // *Изв. РАН. МЖГ.* 1995. № 3. С. 43–49.
41. *Любимов Д.В., Шкляев С.В.* Об устойчивости адвективного термоакустического течения // *Изв. РАН. МЖГ.* 2000. № 3. С. 10–21.
42. *Chenoweth D.R., Paolucci S.* Natural convection in an enclosed vertical air layer with large horizontal temperature differences // *J. Fluid Mech.* 1986. V. 169. P. 173–210.
43. *Русаков С.В.* Особенности ветвления конвективных течений газа при подогреве снизу в широком диапазоне перепадов температур // *Изв. РАН. МЖГ.* 1993. № 3. С. 163–166.
44. *Rosenberger F.* Short-duration Low-gravity Experiments – Time Scales, Challenges and Results // *Microgravity Sci. technol.* VI/3. 1993. P. 142–148.
45. *Полежаев В.И., Яремчук В.П.* Численное моделирование двумерной нестационарной конвекции в горизонтальном слое конечной длины, подогреваемом снизу // *Изв. РАН. МЖГ.* 2001. № 4. С. 34–45.
46. *Кирдяшкин А.Г.* Термокапиллярные периодические течения. Препринт № 8. Новосибирск.: Ин-т геологии и геофизики АН СССР. 1985. 36 с.
47. *Beysens D., Garrabos Y.* Critical and supercritical fluids and related phenomena // *Physics of Fluids in Microgravity* / Ed. Monti R. Taylor & Francis. 2001. P. 223–262.
48. *Batchelor G.K.* Heat transfer by free convection across a closed cavity between vertical boundaries at different temperatures // *Quart. Appl. Math.* 1954. V 12. № 3. P. 209–233.
49. *Eckert E.R., Carlson W.O.* Natural convection in an air layer enclosed between two vertical plates with different temperatures // *Intern. J. Heat and Mass Transfer.* 1960. V. 2. № 1/2. P. 106–120.
50. *Gilly B., Roux B., Vontoux P.* Influence of Thermal Wall Conditions on the Natural Convection in Heated Cavities // *Numerical Methods in Heat Transfer.* V. II, 1983. John Wiley & Sons, P. 205–225.
51. *Авдеевский В.С., Полежаев В.И.* Некоторые особенности конвекции жидкостей и газов // *Избранные проблемы прикладной механики.* М.: ВИНТИ, 1974. С. 11–20.
52. *Бессонов О.А., Брайловская В.А., Полежаев В.И.* Тест для численного решения трехмерной задачи о естественной конвекции в кубической полости // *Математ. моделирование.* 1999. Т. 11. № 12. С. 52–58.
53. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
54. *Sundstrom L.-G., Kimura S.* On laminar free convection in inclined rectangular enclosures // *J. Fluid Mech.* 1996. V. 313. P. 343–366.
55. *Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г.* Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1994. 299 с.
56. *Alexander J.I.D.* Low gravity experiment sensitivity of residual acceleration: A review // *Microgravity sci. technol.* 1990. V. 3. P. 52–69.
57. *Benz K.W., Dold P.* Crystal growth under microgravity: present results and future prospects toward the International Space Station // *J. Crystal growth.* V. 237–239. 2002. P. 1638–1645.
58. Numerical simulation of oscillatory convection in low-Pr fluids: Notes on Numerical Fluid Mechanics. V. 27 / Ed. Roux B., Braunschweig: Vieweg, 1990. 364 p.
59. *Бабушкин И.А., Иванов А.И., Путин Г.Ф., Тронин Д.Б.* Экспериментальное исследование влияния качаний на конвективные течения в цилиндрической полости // *Вибрационные эффекты в гидродинамике.* Пермь: Изд. ПГУ, 2001. С. 7–16.

60. Никитин С.А., Полежаев В.И., Сазонов В.В. О влиянии микроускорений на распределение примеси в расплаве полупроводника в космическом полете // Космич. исслед. 2003. Т. 41. № 5. С. 533–548.
61. Гончаров В.А., Савостиков А.А., Земсков В.С., Раухман М.П., Шалимов В.П. Исследование влияния малых сил на радиальную неоднородность кристаллов полупроводников // 6-я междунар. конф. “Рост монокристаллов и тепломассоперенос”. Обнинск, 2005. Т. 4. С. 793–802.
62. Бабушкин И.А., Богатырев Г.П., Глухов А.Ф., Путин Г.Ф. и др. Изучение конвекции и низкочастотной микрогравитации на орбитальном комплексе МИР при помощи датчика “ДАКОН” // Космич. исслед. 2001. Т. 32. № 2. С. 161–169.
63. Никитин С.А., Полежаев В.И., Сазонов В.В. Об измерении квазистатической компоненты микроускорений на борту ИСЗ с помощью датчика конвекции // Космич. исслед. 2001. Т. 39. № 2. С. 179–187.
64. Naumann R.J., Haulenbeek G., Kawamura H., Matsunaga K. A New Concept for Measuring Quasi-steady Microgravity Accelerations // Proc. First Internat. Symp. on Microgravity Research & Applications in Physical Sciences and Biotechnology // ESA SP-454. 2001. С. 835–843.
65. Zuzgin A.V., Puytin G.F., Ivanova N.G. et al. The heat convection of near critical fluid in the controlled microacceleration field under zero-gravity condition // Adv. Space Research. 2003. V. 32. № 2. P. 205–210.
66. Bannister T.C., Grodzka P.G. Heat Flow and Convection Demonstration Experiments aboard Apollo 14 // Science. 1972. V. 176. № 4034. P. 506–508.
67. Буденкова О.А., Юферева В.С. Численное моделирование эксперимента по изучению конвекции, вызванной квазистатической компонентой поля микроускорений методом голографической интерферометрии реального времени // Сб. трудов VII Рос. симп. “Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем”. М.: ИПМех РАН, 2000. С. 291–303.
68. Костарев К.С., Пшеничников А.Ф. Гравитационная конвекция жидкой смеси в горизонтальном цилиндрическом зазоре при умеренных числах Грасгофа // Космич. исслед. 2004. Т. 42. № 2. С. 115–122.
69. Lan C.W., Yeh B.C. Three dimensional analysis of flow and segregation in vertical bridgeman crystal growth under a transversal magnetic field with ampoule rotation // J. Crystal Growth. V. 266. 2004. P. 200–206.

Москва

Поступила в редакцию
29.XI.2005