

УДК 532.013.4:531.51:629.7

© 1994 г. В. И. ПОЛЕЖАЕВ

РЕЖИМЫ МИКРОУСКОРЕНИЙ, ГРАВИТАЦИОННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ

Дан обзор состояния измерений и расчетов пространственно-временного изменения микроускорений на борту орбитальных станций и новых методов анализа технологических экспериментов на основе моделей конвективного тепло- и массообмена. Рассматриваются исследования гравитационной чувствительности конвективных процессов и явлений макро- и микронеоднородности, вызываемых различными видами конвекции. Обсуждается проблема связи между вычислительной системой на основе нестационарных уравнений Навье — Стокса и акселерометром для тестов и оценки микроускорений.

Исследования гравитационно-чувствительных процессов и систем в условиях невесомости были начаты около 20 лет тому назад, после создания пилотируемых орбитальных станций, в связи с программами технологических экспериментов, имевших целью использование условий невесомости для получения материалов. Эта проблема поставила перед механикой ряд новых задач, требующих развития как ее теоретического аппарата, так и методов лабораторного моделирования, а также более глубокого проникновения методов механики в технологию получения материалов для анализа и интерпретации технологических экспериментов.

В течение более чем 20 лет выполнено множество технологических экспериментов в невесомости. Результаты их вплоть до настоящего времени недостаточно проанализированы, так как постановка и обоснование большинства экспериментов имели преимущественно качественный характер, количественный инструмент для их анализа был недостаточно разработан, а многие данные о микроускорениях, граничных условиях и физических свойствах жидких (газовых) сред, не были определены.

В ряде экспериментов по выращиванию кристаллов обнаружены неожиданные явления, например наличие макро- и микронеоднородностей распределения примесей. Это обусловлено, помимо прочего, сложностью условий микрогравитации, характеризующихся не только низким средним уровнем микроускорений, но и весьма высокими относительными колебаниями микроускорений гравитационной и негравитационной природы, имеющих существенное пространственное распределение и широкий диапазон амплитуд и частот. Поэтому, учитывая весьма высокую зависимость (гравитационную чувствительность) большинства физико-химических процессов и систем от гравитационных и негравитационных возмущений в условиях микрогравитации, необходимо развить специальные методы анализа процессов гидромеханики и получения материалов в этих условиях.

В данной статье дан обзор полученных преимущественно в последние 2—3 года (после публикации монографии [1] и статьи [2], посвященных этой тематике) результатов измерений и расчетов пространственно-временного изменения микроускорений и исследований гравитационной чувствительности процессов конвективного тепло- и массообмена. Дан обзор новых методов анализа экс-

периментов в условиях микрогравитации, разработанных в лаборатории математического и физического моделирования в гидромеханике Института проблем механики РАН.

Основное внимание уделено оперативному использованию информации о пространственно-временном изменении микроускорений, разработке моделей и проблеме их применения для анализа экспериментов по росту кристаллов. Обсуждаются применение вычислительной системы на основе уравнений Навье — Стокса для оперативного анализа конвективных процессов в невесомости и возможность оценки микроускорений на основе температурных измерений в нагреваемом объеме жидкости (датчик конвекции).

1. Режимы микроускорений. Теоретические модели и измерения. *Определение микроускорений.* Микроускорение n в точке, находящейся на расстоянии ρ от центра масс искусственного спутника (масса спутника m), в орбитальном космическом полете может быть записано в виде [3]

$$n = \rho \times \dot{\omega} + (\omega \times \rho) \times \omega + \frac{\mu}{R^3} \left[\frac{3(R\rho)}{R^2} R - \rho \right] - \frac{F}{m}$$

где ω — абсолютная угловая скорость спутника как твердого тела, μ — гравитационный параметр Земли, R — вектор геоцентрического расстояния (центра масс спутника), F — вектор равнодействующей негравитационных сил, действующих на спутник.

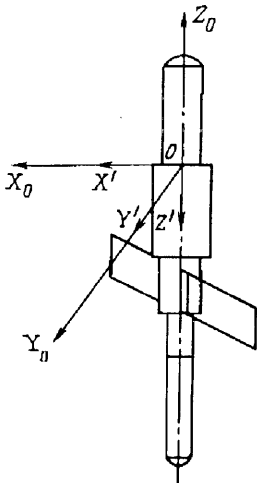
Первые два члена обусловлены движением спутника относительно центра масс, третий — неоднородностью гравитационного поля Земли (градиент гравитации), последний — действием различных негравитационных сил, таких, как аэродинамическое торможение, управляющие возмущения, движение тел внутри спутника и др.

Классический предельный режим нулевого микроускорения, или режим невесомости, $n = 0$, означает равновесие между множеством упомянутых сил, имеющих сложное изменение в пространстве и во времени, которое точно не реализуется в орбитальном полете космических станций. Однако этому режиму могут соответствовать, например, направленная кристаллизация при малом диаметре кристалла (меньше 0,01 м), жидкостная эпитакия ввиду малого размера контейнера или рост кристалла из паровой (газовой) фазы.

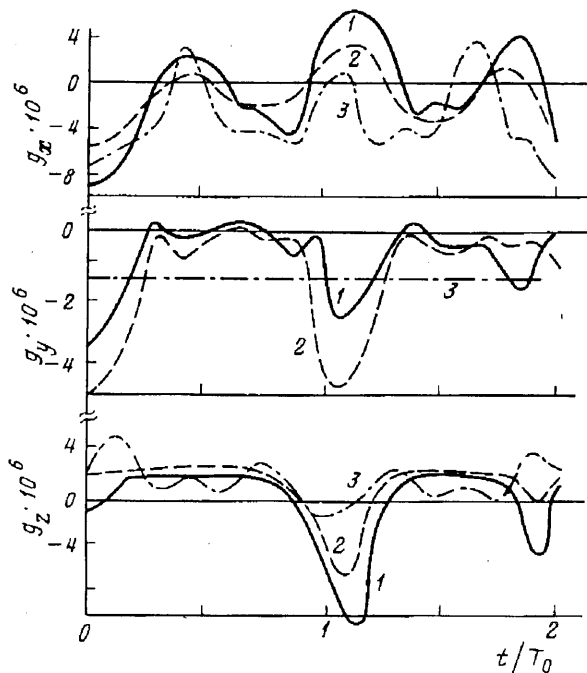
Более реален режим постоянного слабого силового поля $n/g_0 \ll 1$, где g_0 — ускорение силы тяжести Земли. В ряде предшествующих работ (см. библиографию в [1, 2]) предполагалось $n/g_0 = 10^{-3} - 10^{-6}$. Этого приближения, рассматриваемого в качестве некоторого среднего значения микроускорения, недостаточно во многих практически важных случаях, например при выращивании совершенных кристаллов полупроводников большого диаметра.

Таким образом, хотя главным отличием условий микрогравитации от земных условий является малая средняя величина микроускорения, однако при этом вместо силы тяжести имеется равновесие между несколькими малыми силами, что приводит в общем случае орбитального полета к пространственно-временному изменению микроускорений $n/g_0 = f(x, y, z, t)$, учет которого в настоящее время представляется важнейшим направлением в механике гравитационно-чувствительных систем. При этом наряду с элементарными составляющими пространственно-временного изменения микроускорений (вращения, вибрации) нужно использовать модели, более полно отражающие особенности реального полета, а также данные натурных измерений.

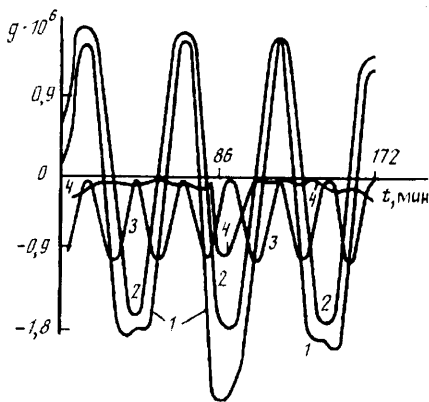
Теоретические модели и измерения. Прямое численное моделирование микроускорений в идеализированной модели полета в предположении движения станции в плоскости орбиты было выполнено в [4]. Использовались общие уравнения движения искусственного спутника относительно центра масс [5]. Определялись только низкочастотные колебания станции. Различными авторами показано (см. библиографию в [1, 2]), что эти колебания приводят к эффектам



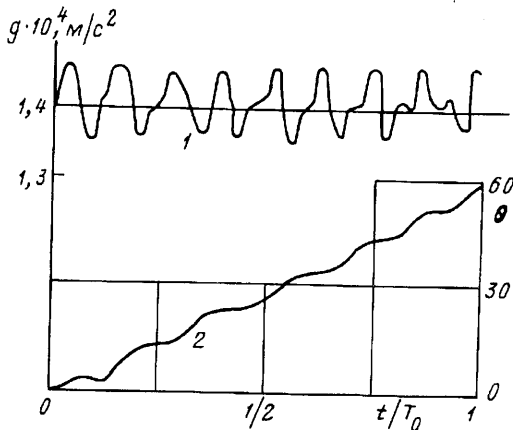
Фиг. 1



Фиг. 2

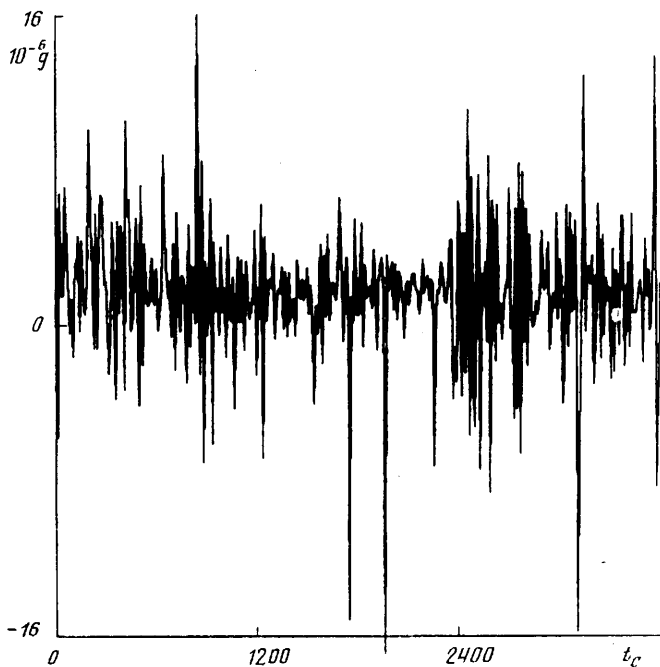


Фиг. 3



Фиг. 4

макронеоднородности кристаллов, выращиваемых в невесомости. При этом в [4, 5] рассматривались случаи как стабилизированного, так и нестабилизированного полета. На фиг. 1—4 показаны некоторые результаты расчетов, выполненных в [4]. Расчетная схема космического комплекса «Салют — Союз — Прогресс» в гравитационно-стабилизированном полете дана на фиг. 1, где X_0, Y_0, Z_0 — орбитальная и X', Y', Z' — связанная системы координат. Результаты расчета изменений во времени отдельных составляющих микроускорений $\bar{g} = g/g_0$ в гравитационно-стабилизированном и нестабилизированном режимах полета приведены на фиг. 2—4. На фиг. 2 представлены результаты расчета микроускорений по трем осям связанной системы координат для станции «Салют» 1, а также станции «Спейс — Шаттл» 2 для высоты орбиты 200 км, эксцентриситета $e = 0,001$ и начальной угловой скорости $\omega_0 = 0,001$ 1/с.



Фиг. 5

На фиг. 3 представлены результаты расчета микроускорений по оси X' для станции «Салют» при $H = 200$ км, $e = 0,001$, $\omega = 0,001$ 1/с, где 1 — суммарная величина микроускорений, 2 — вращательная, 3 — осециллирующая составляющие, 4 — составляющая аэродинамического торможения микроускорения. На фиг. 4 представлены результаты расчета микроускорения g (1) и угла ориентации θ (2) для случая нестабилизированного полета станции «Салют» при $H = 250$ км, $e = 0,001$, $\omega_0 = 0,001$ 1/с. Использование метода [4] позволяет выполнить анализ и выбор конструкции станции, траектории полета, динамики полета в предположениях, на которых основан этот метод (отсутствие возмущений от работы систем КА и экипажа, жесткая конструкция орбитального комплекса, движение в плоскости орбиты и т. д.).

Более близкими к реальным условиям являются методы расчета низкочастотных составляющих микроускорений, использующие результаты измерений с помощью датчика угловых скоростей станции [3]. Упрощенный вариант аналогичной методики при заданных значениях угловых скоростей применялся в [6, 7].

Анализ акселерометрических измерений высокочастотных микроускорений выполнен в [8, 9]. В последнее время опубликованы измерения как низкочастотных, так и высокочастотных составляющих микроускорений [10—12].

Изучение гравитационной чувствительности процессов в реальных условиях космического полета требует данных измерений, пригодных для использования с помощью компьютерных систем (см. ниже разд. 3). На фиг. 5 приведен пример данных, полученных с помощью системы «SAMS» (Space Acceleration Measurement System) в полете американского корабля «Спейс — Шаттл» по одной из осей [11]. Цифровые данные в течение 1ч, представленные на дискете, осреднены по участкам длительностью 10 с. При этом для исключения ненулевого показания прибора в начальный момент времени во все данные внесена поправка, соответствующая средней величине.

2. Модели и уравнения для процессов гидромеханики и тепломассообмена в условиях микрогравитации. В движущейся системе координат xyz , связанной

с заданным объемом, нестационарные уравнения Навье — Стокса для конвекции в приближении Буссинеска записываются в виде

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} - 2(\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}) = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \mathbf{v} + (\beta_T T + \beta_x C)(\mathbf{g}(t) - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{r} \times \boldsymbol{\omega}) - \mathbf{r} \times \boldsymbol{\omega}) \quad (2.1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)T = a\Delta T, \quad \frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)C = D\Delta C$$

Здесь $\mathbf{g}(t)$ — составляющие микроускорений, не зависящие от вращательных движений станции, r — радиус-вектор между заданной точкой и осью вращения. Для решения задачи о пространственном конвективном течении в жидкости в реальных условиях полета КА, регистрируемых приборами, необходимы данные измерений микроускорений с помощью акселерометров и зависимости $\boldsymbol{\omega}(t)$.

Система (2.1) использовалась для изучения влияния сил Кориолиса на тепловую конвекцию в параллелепипеде с расплавом полупроводника в условиях невесомости [13] и на центрифуге [14], а также тепловой конвекции во вращающейся квадратной области [15]. В [16] рассчитывалась тепловая конвекция в квадратной области, совершающей колебания. В [15, 16] дано сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, полученными в земных условиях, однако аналогичные результаты по сопоставлению расчетов и измерений для реальных условий космического полета все еще отсутствуют.

В приближении эффективного микроускорения вращения и вибрации учитываются с помощью вектора $\mathbf{g}(t)$, т. е. в системе (2.1) полагается $\boldsymbol{\omega} = 0$, а вектор микроускорения $\mathbf{g}(t)$ в случае двух переменных представляется в виде

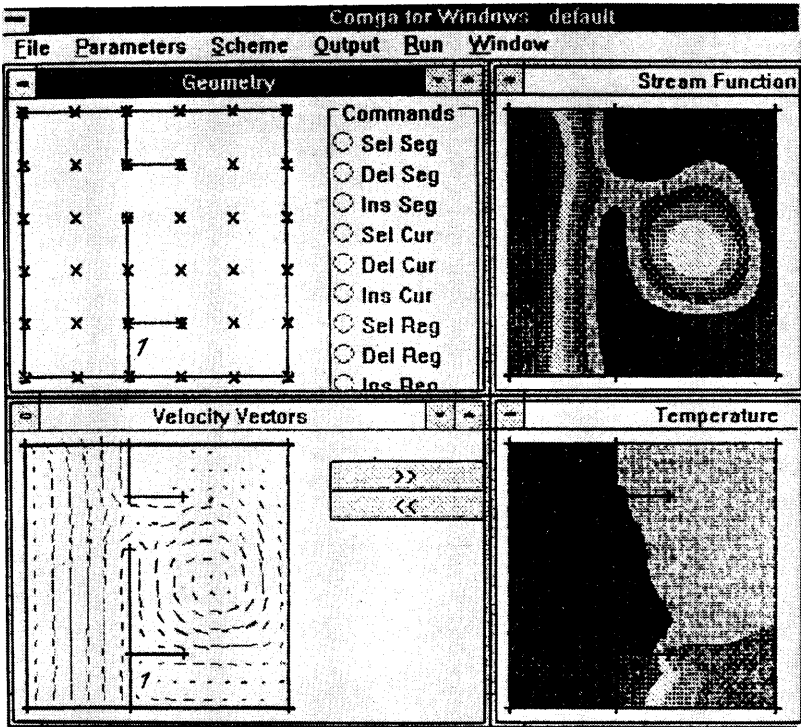
$$g_x(t) = g_{x0} + (g_s + g_t \sin(\Omega_1 t)) \sin(\Omega_2 t + \varphi_0)$$

$$g_y(t) = g_{y0} + (g_s + g_t \sin(\Omega_1 t)) \cos(\Omega_2 t + \varphi_0)$$

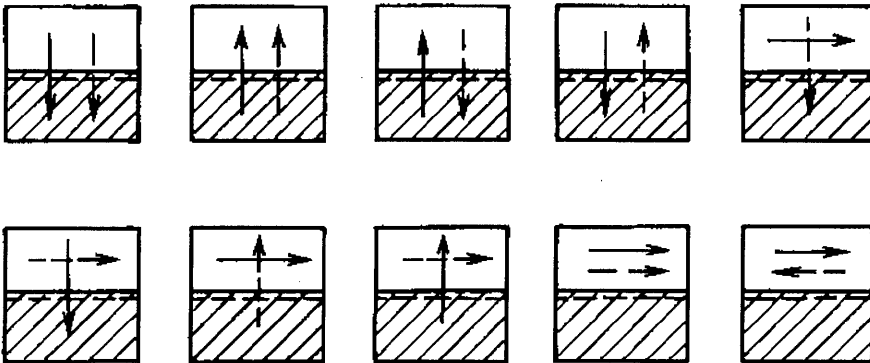
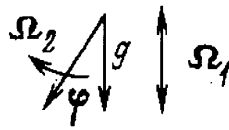
Здесь g_{x0}, g_{y0} — компоненты постоянной составляющей микроускорения, g_s, g_t — постоянная и переменная амплитуды микроускорения, обусловленные вращением, Ω_1, Ω_2 — частоты вибраций и вращений и φ_0 — начальный угол наклона массовой силы.

Такое представление эффективного микроускорения включает в себя большинство известных случаев пространственного и временного изменения микроускорения в условиях невесомости. Случай $g_x = 0, g_t = 0, g_{x0} = 0$ соответствует вибрации при нулевом среднем во времени значении микроускорения (см., например, [1, 4, 9, 17]), причем в некоторых из цитированных работ рассматривался и более общий случай, соответствующий ненулевому среднему значению микроускорения во времени, что оказывается весьма существенным. Частный случай вращения вектора микроускорения рассматривался в [2, 9, 18, 19]).

3. Новые методы и средства для анализа экспериментов в условиях микрогравитации. Двумерные модели. Для анализа и интерпретации процессов гидромеханики и тепломассообмена в условиях невесомости в случае двумерной геометрии разработана компьютерная система «COMGA» (аббревиатура CONvection in MicroGravity and Applications) на персональном компьютере, функциональное и программное обеспечение которой обобщает опыт работ последних 20 лет. Классификация и результаты работ по исследованию конвективных процессов в невесомости в упоминавшихся выше режимах пространственно-временного изменения микроускорений, выполненных в лаборатории математического и физического моделирования в гидромеханике Института проблем механики РАН, представлены в монографии [1], являющейся путеводителем к применению этой системы.



Фиг. 6



Фиг. 7

Различные версии системы и примеры рассмотрены в [20—22]. Их основу составляют двумерные нестационарные уравнения Навье — Стокса в приближении Буссинеска для термоконцентрационной конвекции в плоской или цилиндрической областях. Предусмотрены случаи изменения угла наклона, а также изменение микроускорения во времени. В зависимости от формулировки задачи в различных

версиях системы реализованы как общие уравнения, так и приближение эффективного микроускорения при записи уравнений в естественных переменных или в переменных вихрь — функция тока.

Основными особенностями системы являются: удобное для пользователя математическое обеспечение, «меню», предусматривающее выбор начальных и граничных условий, физических свойств, режима микроускорений и обширного класса конвективных процессов гравитационного и негравитационного типа в условиях невесомости. Предусмотрены также возможности использования нового поколения персональных компьютеров со специальными процессорами типа Intel i860.

Новая версия этой системы использует возможности диалога в графическом стандарте «Windows». При этом в процессе расчета нестационарного процесса возможно оперативно изменять как геометрию области, так и граничные условия, что создает возможности для управления процессами переноса в условиях микрогравитации. Фигура 6 иллюстрирует результат расчета с помощью системы «COMGA—WINDOWS» задачи тепловой гравитационной конвекции в сложной области при нагреве границы 1.

Компьютерная система «COMGA» как «база знаний» включает описание всех основных видов макроскопического движения в условиях микрогравитации в приближении Буссинеска. На фиг. 7 показана классификация возможных конвективных процессов в компьютерной системе «COMGA» при наличии потоков тепла и массы, действующих в различных направлениях по отношению друг к другу, а также к вектору микроускорения или свободной поверхности жидкости. Здесь пунктирные или сплошные линии со стрелками обозначают различные направления потоков тепла или массы. Пунктирные или сплошные линии на верхней границе области обозначают свободную или твердую поверхности. Сплошная линия со стрелкой сверху указывает на прямое или наклонное направление вектора микроускорения, а также возможности вращательного или вибрационного изменения микроускорения.

Трехмерные модели. Аналог указанных на фиг. 7 расчетных схем реализован и в трехмерном случае, однако ввиду значительного увеличения параметров и усложнения графической обработки соответствующая программа еще не приобрела такой же удобный вид, как система «COMGA». Решение уравнений Навье — Стокса в этом случае осуществляется в переменных скорость — давление. Примеры расчета даны в монографии [1] (см. также ниже разд. 5).

В трехмерном и в двумерном случаях разработаны отдельные версии программ на основе уравнений конвекции сжимаемого газа.

Анализ устойчивости. Важным дополнением к упомянутым выше методам анализа конвективных процессов в невесомости являются методы линейного и слабонелинейного анализа устойчивости конвективных течений в слое многокомпонентной жидкости, развитые в последнее время в лаборатории математического и физического моделирования в гидромеханике Института проблем механики РАН [23]. Результаты исследований, выполненных этими методами, ограничиваются приближением бесконечного слоя. Критические значения параметров, при которых образуются вторичные течения, находят из анализа спектра линеаризованных уравнений Буссинеска. В слабонелинейном приближении определены структуры вторичных режимов (пространственно-периодических течений) с использованием разложения по параметру закритичности, что особенно существенно в связи с трудностями прямого численного решения трехмерных нестационарных уравнений Навье — Стокса.

Сопряженные модели. Анализ гравитационной чувствительности реальных технологических процессов, в особенности выращивания кристаллов, требует учета сопряжения расплава с кристаллом, контейнером и (если он имеется) флюсом, а также расчета напряжений в кристалле. Разработан ряд таких моделей и соответствующих программных средств на основе двумерных (плоских и осесимметричных) уравнений [24], однако ввиду громоздкости они еще мало

применялись для анализа экспериментов в условиях микрогравитации, за исключением модели с движущимся плоским фронтом кристаллизации [1]. Имея целью демонстрацию влияния сложного пространственно-временного изменения микроускорений, рассмотрим ниже результаты изучения конвективных процессов в простейшем случае расплава в замкнутой плоской области с заданными граничными условиями.

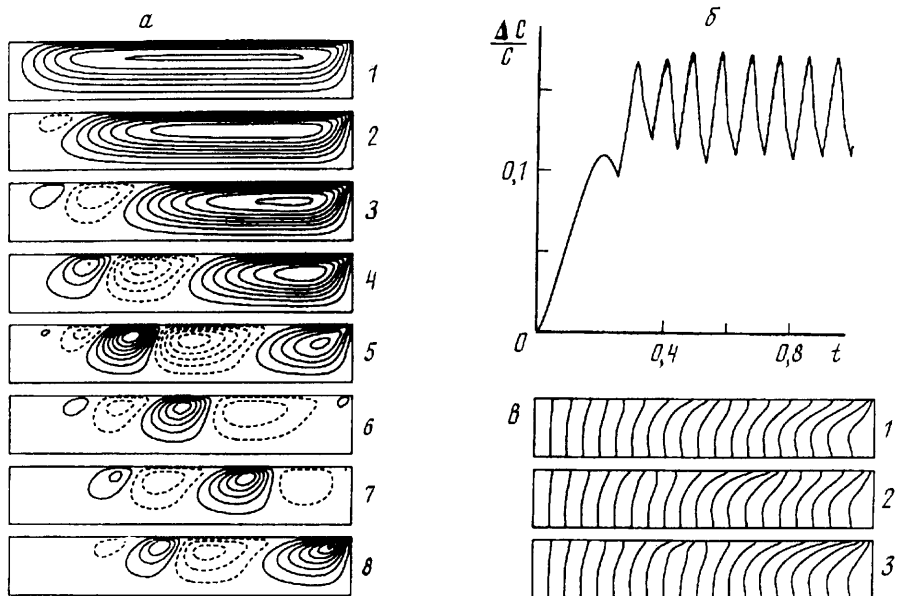
4. Гравитационная чувствительность и замечания к анализу экспериментов по росту кристаллов в условиях невесомости. Выполненные к настоящему времени технологические эксперименты в условиях невесомости не выявили убедительных преимуществ большинства технологий по сравнению с аналогичными земными технологиями в связи со следующими обстоятельствами. За время, прошедшее после постановки первых экспериментов и получения результатов, появились альтернативные земные аналоги управления гравитационно-чувствительными процессами, в которых устраняются нежелательные явления, вызываемые силой тяжести на Земле (динамические воздействия, изменение геометрии, теплового узла, применения магнитных полей и др.). В то же время в процессах получения материалов и разделения веществ в невесомости обнаружены многочисленные побочные эффекты, обусловленные влиянием пространственно-временного изменения микроускорений, а также капиллярными явлениями.

Достижения последних лет в разработке методов анализа гравитационно-чувствительных процессов и систем, а также расчета и измерения микроускорений позволяют в настоящее время продвинуться в понимании реальных возможностей, которые связаны с практическим использованием условий микрогравитации. Это требует, однако, специализации в рассмотрении технологических процессов и их характеристик, так как требования, предъявляемые к режимам микроускорений, весьма разнообразны в связи с разнообразием технологических процессов, предлагаемых для экспериментов в невесомости, и физических свойств рабочих веществ. Весьма важно, что эти требования зависят и от характеристик технологических процессов, которые предполагается улучшить в условиях невесомости (рост кристаллов из высоко- или низкотемпературных расплавов, рост эпитаксиальных слоев из расплавов или из газовой фазы, разделение веществ методом электрофореза, рост кристаллов белков, культивирование микроорганизмов и др.)

Из-за ограниченного объема статьи ниже будут даны лишь краткие замечания к анализу макро- и микронеоднородности распределения примесей в экспериментах по росту объемных монокристаллов из расплавов в условиях микрогравитации.

Макронеоднородности. Различные способы подавления гравитационной конвекции, к которым относится переход к условиям пониженной гравитации ($n/g_0 \ll 1$), а также изменение геометрии, пространственное изменение массовой силы, введение пористого наполнителя могут приводить к температурной (концентрационной) стратификации. При определенных числах Рэлея, соответствующих условиям микрогравитации, имеет место максимум температурной стратификации, который может вызываться различными способами подавления конвекции (см. подробную библиографию в [1, 2]).

Эффекты концентрационной макронеоднородности при росте кристаллов из расплава были обнаружены еще в первых экспериментах [25], однако их интерпретация потребовала ряда лет. В дальнейшем было установлено, преимущественно на двумерных (плоских и осесимметричных) моделях (обзоры [1, 2, 5, 26]), что остаточная гравитационная конвекция является одной из главных причин поперечной макронеоднородности объемных кристаллов, выращиваемых в условиях микрогравитации. Этот механизм макронеоднородности, вытекающий из анализа стационарных уравнений конвекции при малых числах Рэлея, в настоящее время на качественном уровне достаточно хорошо изучен и используется для оценок допустимого уровня микрогравитации многими авторами (см. сводную таблицу в статье [2], а также [27, 28]). Такие оценки приводят к весьма высоким требованиям к поддержанию



Фиг. 8

микроускорений для выращивания кристаллов полупроводников большого диаметра (до $g/g_0 = 10^{-8}$ при $D = 100$ мм).

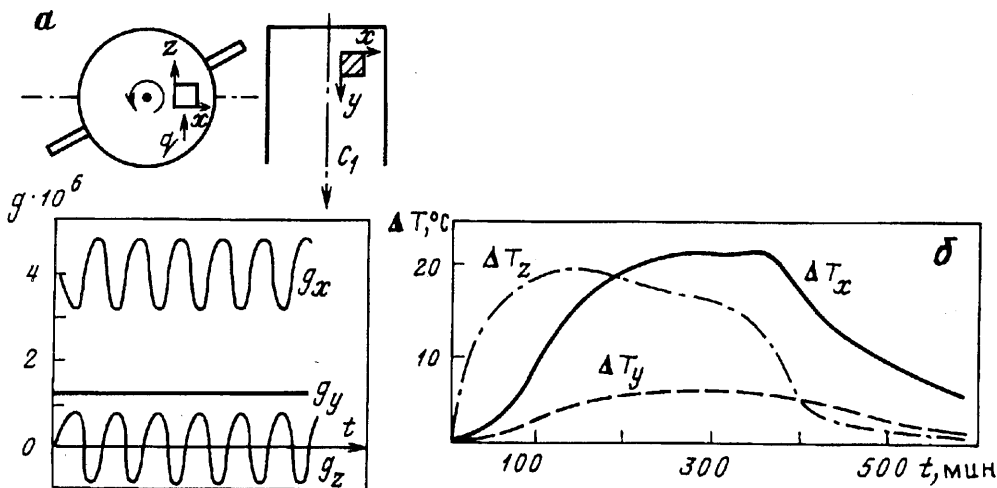
Вместе с тем поперечная макронеоднородность может быть устранена путем медленного вращения, параметры которого следует выбирать специально в зависимости от типа процесса, физических свойств, геометрии и др. [2, 13, 19].

Вплоть до настоящего времени отсутствует точное количественное согласование результатов измерения макронеоднородностей в условиях космического полета с результатами расчетов. Это связано как с неопределенностью условий микрогравитации в выполненных экспериментах, так и с тем, что на макронеоднородность при росте кристаллов существенное влияние оказывает ряд дополнительных факторов (пространственный характер полей течений и концентрационных полей, многокомпонентность расплава, коэффициент распределения примесей и др.). Поэтому анализ выполненных экспериментов еще продолжается, в частности последнему вопросу посвящены недавние работы [29, 30].

В общем случае пространственно-временного изменения микроускорений имеется еще ряд малоизученных механизмов, вызывающих макронеоднородности, к числу которых можно отнести резонанс макронеоднородностей при наличии вибраций [4]. Кроме того, макронеоднородности могут быть следствием негравитационных механизмов конвекции. В [2] дана сводка работ по параметрическим исследованиям концентрационных макронеоднородностей, вызываемых такими негравитационными механизмами, как вынужденная конвекция, конвекция под действием градиентов сил поверхностного натяжения, а также электромагнитных сил.

К другим малоизученным, но вероятным причинам макронеоднородностей относятся, например, совместное действие тепловой и концентрационной конвекции, изменение геометрии контейнера, занятого расплавом, или перегородки тепла по стенкам контейнера.

Поэтому получение однородных монокристаллов в условиях микрогравитации практически невозможно без детального предварительного анализа, направленного на выбор благоприятного диапазона режимных параметров, который в отличие от прежних лет теперь возможен с использованием разработанных методов.



Фиг. 9

Микронеоднородности. Неустойчивость термокапиллярного конвективного течения считается наиболее известной причиной полосчатой микронеоднородности распределения легирующих примесей в кристаллах в условиях микрогравитации подобно тому, как в земных условиях причиной этого вида неоднородностей считается тепловая гравитационная конвекция [31—33].

Численное исследование термокапиллярной конвективной неустойчивости на основе уравнений конвекции в трехмерном приближении выполнено в [34]. В расчетах [35], выполненных в осесимметричной постановке, получены колебательные режимы, согласующиеся при больших числах Pr с экспериментальными данными [31].

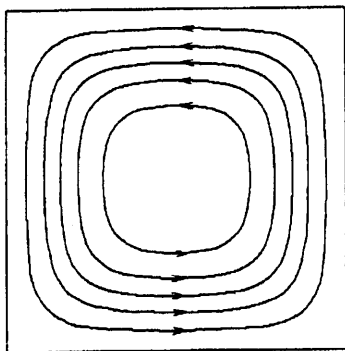
Однако остается неясным, является ли именно этот механизм или его аналог — капиллярно-концентрационная конвекция — ответственным за полосчатую неоднородность, наблюдающуюся в технологических экспериментах по кристаллизации расплавов полупроводников [36—39]. Неясно также влияние на него вибраций в условиях микрогравитации.

Вместе с тем этот механизм неустойчивости не единственный и, по-видимому, не самый опасный. Недавние теоретические исследования свидетельствуют, что неустойчивость и колебания полей скорости, температуры и концентрации могут наблюдаться при существенно меньших числах Марангони в случае взаимодействия термокапиллярной и капиллярно-концентрационной конвекции [1, 40]. На фиг. 8 представлен один из примеров расчета [40] структуры полей течения, концентрации, а также изменение во времени концентрации вблизи свободной поверхности расплава при совместном действии термокапиллярной и капиллярно-концентрационной конвекции (двойная диффузия Марангони) при значениях чисел $Pr = 0$, $Sc = 10$, $Mn = 10^2$, $Mn_c = 10^3$. Здесь на фиг. 8, а цифрам 1—8 соответствуют значения времени 0,04—0,32 с интервалом 0,04. На фиг. 8, в цифрам 1—3 соответствуют значения времени 0,24—0,32.

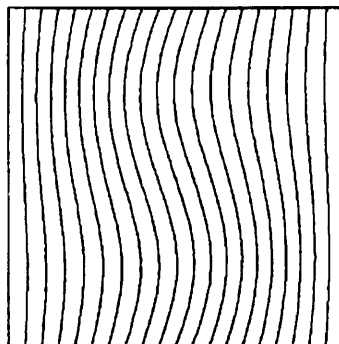
Возможно, что именно этот механизм колебаний может объяснить полученные в упомянутых работах эффекты полосчатой неоднородности в объемных монокристаллах, выращенных из расплавов в условиях микрогравитации.

Вместе с тем потенциальной причиной микронеоднородностей могут быть также неустойчивости собственно процесса кристаллизации в ампуле при отсутствии свободной поверхности расплава, предсказываемые теоретически в [41]. Реальный вклад неустойчивостей этого типа требует более детальных оценок.

Помимо этого в случае больших диаметров кристалла следует принимать во внимание и неустойчивость различных видов тепловой гравитационной и (или)



Фиг. 10



Фиг. 11

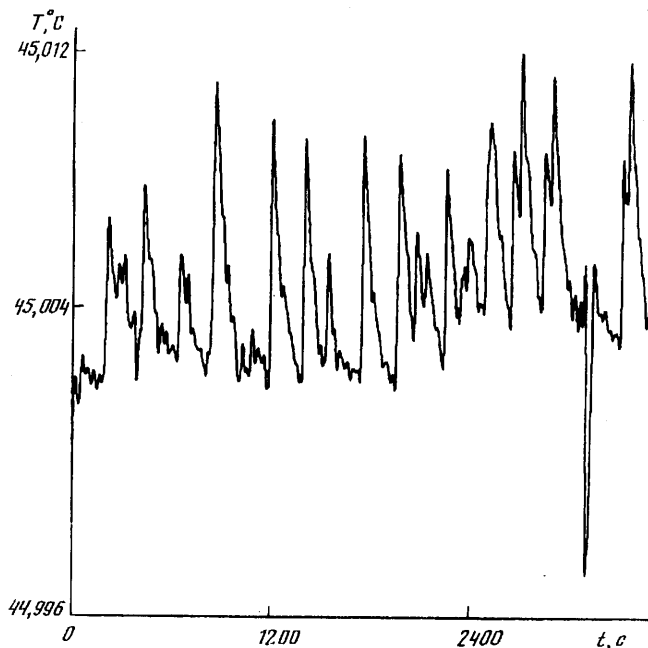
концентрационной конвекции. При этом должны проявляться и высокочастотные механизмы вибрационной конвекции. Результаты исследования их вклада в макро- и микронеоднородность распределения примеси при росте кристаллов, полученные на основе метода осреднения 42, 43, все еще невелики.

Таким образом, сложность условий микрогравитации, многопараметрический характер и разнообразие гравитационно-чувствительных процессов, которые могут приводить к ухудшению характеристик материалов, получаемых в этих условиях, делает актуальной более тесную количественную связь между данными измерений микроускорений и параметрами выполняемых экспериментов для оперативного управления ими.

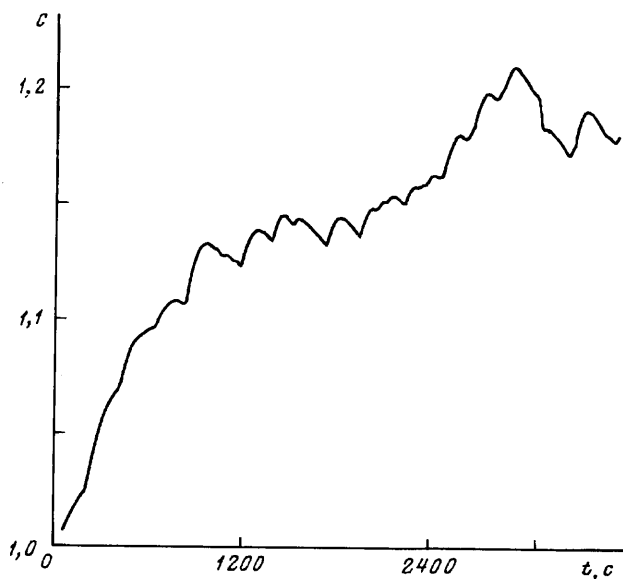
5. Примеры сопряжения данных о микроускорениях с компьютерной системой. Датчик конвекции. Низкочастотные составляющие микроускорений. На фиг. 9 показаны, следуя гл. 4 книги [1], результаты расчета задачи о трехмерной нестационарной тепловой гравитационной конвекции в кубе с подводом тепла к одной из границ (другие границы теплоизолированы). На фиг. 9, а показана схема ориентации объема и изменения низкочастотных составляющих микроускорений, рассчитанная по упрощенной модели микроускорений с учетом аэродинамического торможения и вращения станции с периодом около 20 мин. На фиг. 9, б приведены результаты расчета разностей температур вдоль всех трех осей, вызываемых пространственной тепловой конвекцией в этих условиях. Наибольшая из них, как видно из фиг. 9, а, соответствует той грани, по нормали к которой подводится тепло. Это согласуется с данными двумерных расчетов [1, 5]. Расчет выполнен для спирта при линейном размере $L = 0,10$ м и потоке тепла $Q = 180$ Вт/м². Низкочастотное пространственно-временное изменение микроускорения рассчитано для модели станции «Салют-7» с учетом аэродинамического торможения и вращения станции [1].

Эти результаты показывают весьма высокую гравитационную чувствительность, фиксировавшуюся прежде в более простых случаях, а также наличие некоторого «критического уровня микроускорений» для тепловой гравитационной конвекции и соответствующих ей технологических процессов в условиях невесомости.

Датчик конвекции. В качестве первого шага для осуществления весьма трудной задачи о количественной связи между данными измерений микроускорений и параметрами выполняемых экспериментов целесообразно осуществить связь между приборами, регистрирующими микроускорения (акселерометр, датчик угловых скоростей), вычислительной системой и измерительной ячейкой для тепловой гравитационной конвекции (замкнутый контейнер, заполненный жидкостью с заданным потоком тепла и измерением температур внутри объема) для тестов математической модели, определения «критического микроускорения для данного процесса» и в конечном итоге для проверки современных средств управления процессом тепловой конвекции в условиях микрогравитации.



Фиг. 12



Фиг. 13

Датчик микроускорений является прибором, измеряющим разность температур, возникающую в замкнутом объеме, что позволяет, используя вычислительную систему на основе уравнений Навье — Стокса, дать оценку уровня микроускорений, прежде всего низкочастотных, точнее, тех из них, которые являются «критическими» для данного процесса. Результаты численных расчетов температурной стратификации, обусловленной тепловой гравитационной конвекцией при наличии пространственно-временного изменения микроускорения для различных жидкостей, граничных условий и геометрии [1] показывают, что вызываемая конвекцией разность температур между стенками при частотах

колебаний микроускорения менее 0,01 Гц и $g/g_0 = 10^{-5} - 10^{-7}$ достигает 1 — 10°, что достаточно для проведения надежных измерений.

Один из этапов реализации и изучения наземного варианта датчика конвекции, а также тесты численной модели по экспериментальным данным излагаются в статье [16] этого выпуска.

Высокочастотные составляющие. Специальная версия вычислительной системы «СОМГА» позволяет в настоящее время вести расчеты с использованием и высокочастотных составляющих микроускорений, измеренных с помощью акселерометра в реальном полете. На фиг. 10—13 приведен пример расчета тепловой конвекции в двумерном приближении при использовании данных натуральных измерений аналогично приводившимся выше на фиг. 5, но по двум осям X , Y . На фиг. 10, 11 показаны структуры полей течения и концентрации в жидком объеме с размерами 2×2 см при разности температур 50°, перепаде концентраций 2 и физических свойствах, типичных для расплава полупроводника ($Pr = 0,014$, $Sc = 10$). На фиг. 12, 13 показаны соответственно изменения во времени температуры и концентрации в некоторой фиксированной точке с координатами $x = 1$ см, $y = 1,6$ см. Чувствительность поля концентрации к изменению микроускорений в реальных условиях в рассмотренном случае весьма велика, что связано с появлением осредненного конвективного течения.

Приведенные расчеты выполнены для двумерного случая, что связано с ограниченными возможностями персонального компьютера АТ 386, однако оценки показывают, что расчет пространственной задачи с использованием записей микроускорений по всем трем осям в реальном режиме времени с помощью упоминавшейся вычислительной системы возможен на основе конфигурации из 16 процессоров Intel i860 с векторно-параллельной обработкой данных.

В заключение автор благодарит сотрудников лаборатории математического и физического моделирования в гидродинамике М. К. Ермакова, С. А. Никитина, Д. С. Павловского за помощь в подготовке данной статьи и полезные обсуждения, а также сотрудников NASA G. Martin, R. Crouch, Ch. Baugher, N. Ramachandran за предоставление материалов по измерениям микроускорений в полете КА «Спейс — Шаттл».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полежаев В. И., Белло М. С., Верзуб и др. Конвективные процессы в невесомости. М.: Наука, 1991. 240 с.
2. Polezhaev V. I. Convective processes in microgravity//Proc. 1st Intern. Symp. on Hydromechanics and Heat/Mass Transf. in Microgravity. Perm; Moscow, 1991. Gordon and Breach, 1992. P. 15—24.
3. Сарычев В. А., Беляев М. Ю., Сазонов В. В., Тянь Т. Н. Определение микроускорений на орбитальных комплексах «Салют-6» и «Салют-7»: Препринт № 100. М.: Ин-т прикладной математики им. М. В. Келдыша АН СССР, 1984. 28 с.
4. Лебедев А. П., Полежаев В. И. Механика невесомости: микроускорения и гравитационная чувствительность процессов массообмена при получении материалов в космосе//Успехи механики. 1990. Т. 13, № 1. С. 3—52.
5. Белецкий В. В. Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле. М.: Изд-во МГУ, 1975. 308 с.
6. Hammacher H. Simulation of Weightlessness//Materials Sciences in Space/Ed. Feuerbacher B., Hammacher H., Naumann R. J., Berlin et al.: Springer, 1986. P. 31—52.
7. Blanchard R. C., Nicolson J. Y., Ritter J. R. STS-40 orbital acceleration research experiment flight results during a typical sleep period//Microgravity Sci. Technol. 1992. V. 2. P. 86—93.
8. Гришин С. Д., Дубовский В. Б., Лесков Л. Ф. и др. Измерение малых ускорений на орбитальной научной станции «Салют-6»//Космич. исслед. 1982. Т. 20. № 3. С. 479—481.
9. Alexander J. I. D. Low-gravity experiment sensitivity to residual acceleration: A review//Microgravity Sci. Technol. 1990. V. 3. P. 52—69.

10. *Stavrindis C., Stark H., Eilers D., Hornung E.* Microgravity quality provided by different flight opportunities//Microgravity Sci. Technol. 1991. V. 3. № 4. P. 191—203.
11. *Rogers M. J. B., Baugher C. R., Blanchard R. C. et al.* A comparison of low-gravity measurements on-board Columbia during STS-40//Microgravity Sci. Technol. 1993. V. 6. № 3. P. 207—216.
12. *Сарычев В. А., Сазонов В. В., Беляев М. Ю. и др.* Определение пассивного вращательного движения орбитальной станции «Мир» по измерениям напряженности геомагнитного поля: Препринт № 42. М.: ИПМат РАН, 1993. 24 с.
13. *Griaznov V. L., Ermakov M. K., Nikitin S. A. et al.* Space and temporal behavior and control of the residual convection in microgravity//Proc. 8th Europ. Symp. on Materials and Fluid Sci. in Microgravity. Brussels: Europ. Space Agency, 1992. V. 1. P. 217—220.
14. *Ramachandran N., Downey J. P., Curreri P. A., Jones J. C.* Numerical modeling of crystal growth on a centrifuge for unstable natural convection configurations//J. Crystal Growth. 1993. V. 126. P. 655—674.
15. *Hamady F. J., Lloyd J. R., Yang K. T., Yang H. Q.* A study of natural convection in a rotating enclosure//Natural Convection in Enclosures. ASME. 1992. HTD-V. 198. P. 9—17.
16. *Богатырев Г. П., Ермаков М. К., Иванов А. И. и др.* Экспериментальное и теоретическое исследование тепловой конвекции в наземной модели конвективного датчика//Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 5. С. 67—75.
17. *Ostrach S.* Low-gravity fluid flows//Ann. Rev. Fluid Mech. Palo Alto: Ann. Rev. Inc. 1982. V. 14. P. 313—345.
18. *Ермаков С. В., Феоничев А. И.* Конвекция при действии переменного ускорения массовых сил и микросегрегация примесей в кристаллах//Гидромеханика и тепломассообмен в невесомости. Новосибирск: СО АН СССР. 1988. С. 20—34.
19. *MeFadden G. B., Coriell S. R.* Solutal convection during directional solidification//AIAA/ASME/SIAM/APS 1st National Fluid Dynamics Congress. Cincinnati, 1988. Pt 3. P. 1572—1578.
20. *Грязнов В. Л., Ермаков М. К., Никитин С. А., Павловский Д. С.* Решение задач конвекции на персональном компьютере: Препринт № 481. М.: ИПМ АН СССР, 1990. 20 с.
21. *Ermakov M. K., Griaznov V. L., Nikitin S. A. et al.* A PC-based system for modelling of convection in enclosures on the basis of Navier-Stokes equations//Int. J. Numer. Methods in Fluids, 1992. V. 15. P. 975—984.
22. *Polezhaev V. I., Ermakov M. K., Griaznov V. L. et al.* Modelling of convective heat/mass transfer processes in microgravity//Heat Transfer in Microgravity/Ed. Avedisian C. T., Arpacı V. A.: The 1993 Winter Annual Meet. New Orleans. N. Y.: ASME, 1993. HTD-V. 269. P. 35—41.
23. *Павловский Д. С.* Вторичные течения в слое со свободной поверхностью//Изв. РАН МЖГ. 1994. № 5. С. 85—98.
24. *Griaznov V. L., Ermakov M. K., Zakharov B. G. et al.* Czochralski growth of gallium arsenide: technological experiments and numerical simulation//Fluid flow phenomena in crystal growth: Euromech colloquium. Aussois, France, 1992. № 284. P. 15.
25. *Иванов Л. И., Земсков В. С., Кубасов В. Н. и др.* Плавление, кристаллизация и фазообразование в невесомости. М.: Наука, 1979. 255 с.
26. *Monti R., Langbein D., Fasier J. J.* Influence of residual accelerations on fluid physics and materials science experiments//Fluid Sciences and Materials Science in Space/Ed. H. U. Walter, Berlin: Springer-Verlag, 1987. P. 637—680.
27. *Barmın I. V., Egorov A. V., Filatov L. G. et al.* CdTe crystal growth by THM with a rotating magnetic field//Proc. 8th Europ. Symp. on Materials and Fluid Sci. in Microgravity. Brussels: ESA SP-333, 1992. V. 1. P. 315—320.
28. *Гончаров В. А., Марков Е. В.* Термоконтвекция и механизмы переноса примеси в процессе роста кристаллов полупроводниковых соединений из расплава//Неорганические материалы. 1993. Т. 29. № 3. С. 339—343.
29. *Белокурова И. Н., Земсков В. С., Хавжу Д. М.* Анализ результатов исследования ликвации компонентов в легированных кристаллах германия, полученных методом направленной кристаллизации в невесомости и в земных условиях//Физика и химия обраб. материалов. 1990. № 6. С. 71—75.
30. *Ostrogorsky A. G., Muller G.* Model of the effective segregation coefficient, applied to low-convection solidification in microgravity//J. Crystal Growth. 1993. V. 128. P. 207—212.

31. Schwabe D. Surface-tension-driven flow in crystal growth melts//Crystals: Growth, Properties and Appl. Berlin et al.: Springer, 1988. V. 11. P. 76—112.
32. Müller G. Convection and inhomogeneities in crystal growth from the melt//Crystals: Growth, Prop. and Appl. Berlin et al.: Springer, 1988. V. 12. P. 1—133.
33. Favier J. J. Recent advances in Bridgman growth modelling and fluid flow//J. Crystal Growth. 1990. V. 99. Pt 1. № 1—4. P. 18—29.
34. Kuhlman H. C., Rath H. J. Three-dimensional instabilities of steady thermocapillary flow in cylindrical geometries//Fluid Flow Phenomena in Crystal Growth: Euromech Colloquium. Aussois, France, 1992. № 284. P. 36.
35. Griaznov V. L. Numerical investigations of oscillatory Marangoni convection in floating zone//Fluid Flow Phenomena in Crystal Growth: Euromech Colloquium, Aussois, France, 1992. № 284. P. 35.
36. Herrmann F. M., Baumgartl J., Feulner T., Müller G. The use of magnetic fields for damping unsteady Marangoni convection in GaAs floating zones under μG //Proc. 8th Europ. Symp. on Materials and Fluid Sci. in Microgravity. Brussels: ESA SP-333, 1992. V. 1. P. 57—60.
37. Groll A., Müller-Sebert W., Benz K. V., Nitsche R. Natural and thermocapillary convection in partially confined silicon melt zones//Microgravity Sci. Technol. 1991. V. 3. № 4. P. 204—215.
38. Wang Z. G., Li C. J., Wan S. K., Lin L. Y. Spatial distributions of impurities and defects in Te- and Si-doped GaAs growth in a reduced gravity environment//J. Crystal Growth. 1990. V. 103. P. 38—45.
39. Barmin I. V., Egorov A. V., Senchenkov A. S. Results of crystal growth experiments by FZM on zona facilities in microgravity//Proc. 8th. Europ. Symp. Materials and Fluid Sci. in Microgravity. Brussels: ESA SP-333, 1992. V. 2. P. 591—596.
40. Polezhaev V. I., Ermakov M. K. Thermosolutal Marangoni convection short-time regimes — proposal for Drop Tower experiments and real time computer simulation//Microgravity Sci. Technol. 1992. V. 3. P. 172—175.
41. Buyevich Yu. A., Mansurov V. V., Natalukha I. A. Instability and unsteady processes of the bulk continuous crystallization//Chem. Eng. Sci. 1991. V. 46. № 10. P. 2573—2578.
42. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Непомнящий А. А. Устойчивость конвективных течений. М.: Наука, 1989. 319 с.
43. Зеньковская С. М., Овчинникова С. Н. Термовибрационная конвекция в слое жидкости при невесомости или пониженной гравитации//ПМТФ. 1991. Т. 2 (186). С. 84—90.

Москва

Поступила в редакцию
1.II.1994