МЕХАНИКА

ЖИДКОСТИ И ГАЗА

№ 3 • 2000

УДК 532.51.013.4:536.24:629.7

© 2000 г. **В.В. САЗОНОВ, В.С. ЮФЕРЕВ**

ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ, ВЫЗВАННАЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТОЙ ПОЛЯ МИКРОУСКОРЕНИЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ "МИР"

Выполнено численное исследование трехмерной нестационарной тепловой конвекции, возникающей в кубической полости на борту станции "Мир" под действием квазистатической компоненты микроускорения, обусловленной градиентом напряженности гравитационного поля Земли и движением станции относительно центра масс. Расчеты проведены для двух реальных временных интервалов движения станции относительно центра масс с использованием фактических значений квазистатической компоненты.

Вследствие того что на искусственных спутниках Земли сохраняется заметный уровень остаточных микроускорений, воздействие их полей на жидкость может существенно повлиять на результаты экспериментов, проводимых в орбитальном полете. В частности, при проведении материаловедческих экспериментов в космосе необходимо учитывать не только величину, но и направление вектора микроускорения в месте расположения технологического оборудования.

Микроускорения обусловлены несколькими причинами: градиентом гравитационного поля Земли внутри спутника, движением спутника относительно центра масс, сопротивлением атмосферы, а также разного рода вибрациями. В большинстве работ, посвященных изучению тепловой конвекции в жидкости в условиях невесомости, предполагалось, что поле микроускорений в пределах исследуемого объема жидкости является пространственно однородным, хотя и зависящим от времени. Подобный подход называется иногда моделью эффективного ускорения [1]. С другой стороны, спутник в орбитальном полете совершает движение относительно центра масс, вследствие чего возникают составляющие микроускорений (вызванные угловым ускорением спутника и ускорением Кориолиса), которые в пределах полости с жидкостью являются существенно пространственно неоднородными. Например, вариации угловой скорости спутника будут вызывать движение жидкости даже при отсутствии в ней каких-либо градиентов плотности [2].

При изучении движения жидкости в условиях невесомости вращательными эффектами долгое время пренебрегали, полагая угловую скорость Ω и угловое ускорение $\dot{\Omega}$ спутника малыми: Ω, $\dot{\Omega}$ имеют порядки 10^{-3} $с^{-1}$ и $(10^{-7}–10^{-6})$ $с^{-2}$ соответственно. Однако кинематическая вязкость большинства жидкостей ν тоже достаточно мала – порядка (0,001–0,01) $см^2/с$. Поэтому при размерах полости в несколько сантиметров и более число Экмана $Ek < 1$ и вращательные эффекты должны учитываться. Влияние силы Кориолиса на тепловую конвекцию в условиях невесомости рассмотрено в [3], а воздействие на жидкость реального вращательного движения таких космических аппаратов, как транспортный корабль "Шаттл", связка "Мир"–"Шаттл" и "Фотон" было численно изучено в [2, 4, 5].

Вращение спутника и градиент гравитационного поля Земли дают основной вклад в квазистатическую компоненту поля микроускорений. Слагаемое квазистатической компоненты, обусловленное градиентом напряженности гравитационного поля, изменяется во времени как по величине, так и по направлению, но в пределах полости с жидкостью оно может считаться однородным. Движение жидкости под действием реального значения этого слагаемого изучалось в [6, 7]. В обоих статьях ориентация спутников в абсолютном пространстве предполагалась неизменной и по этой причине их угловая скорость считалась равной нулю. Однако в случае станции "Мир" такое допущение может оказаться слишком грубым, поскольку станция время от времени совершает развороты с достаточно большой угловой скоростью.

В данной работе тепловая конвекция, возникающая в полости с жидкостью на борту станции "Мир" под действием квазистатической компоненты микроускорения, изучается с учетом как градиента гравитационного поля, так и изменения угловой скорости станции.

1. Постановка задачи. Пусть полость с жидкостью жестко связана со станцией. В точке с радиусом-вектором $\mathbf{R}$ относительно центра масс станции на жидкость действует сила

$$\mathbf{F}(\mathbf{R}) = \rho\left\{(\mathbf{\Omega}\times\mathbf{R})\times\mathbf{\Omega}+\mathbf{R}\times\frac{d\mathbf{\Omega}}{dt}-2(\mathbf{\Omega}\times\mathbf{u})+\Omega_*^2[3(\mathbf{e}\cdot\mathbf{R})\mathbf{e}-\mathbf{R}]\right\} \tag{1.1}$$

Здесь ρ – плотность жидкости, $\mathbf{\Omega}$ – абсолютная угловая скорость станции, Ω_* – угловая скорость ее орбитального движения, $\mathbf{e}$ – орт геоцентрического радиуса-вектора центра масс станции, $\mathbf{u}(\mathbf{R})$ – относительная скорость жидкости. Выражение, стоящее в фигурных скобках в правой части (1.1), называется микроускорением. В данном случае оно записано в предположении, что орбита станции круговая и можно пренебречь составляющей микроускорения, обусловленной сопротивлением атмосферы.

Положим $\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 + \mathbf{r}$, где $\mathbf{R}_0$ – радиус-вектор некоторой фиксированной точки внутри полости относительно центра масс станции. Тогда, считая температурные изменения в жидкости малыми и принимая во внимание соотношение $|\mathbf{r}|\ll|\mathbf{R}_0|$, выражение (1.1) можно преобразовать к виду

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \nabla\varphi+\rho_0\left(\mathbf{r}\times\frac{d\mathbf{\Omega}}{dt}\right)+\mathbf{g}\rho_0\beta(T-T_0)-2\rho_0(\mathbf{\Omega}\times\mathbf{u}) \tag{1.2}$$

$$\nabla\varphi = \rho_0\left\{\mathbf{R}_0\times\frac{d\mathbf{\Omega}}{dt}+(\mathbf{\Omega}\times\mathbf{R}_0)\times\mathbf{\Omega}+\Omega_*^2[3(\mathbf{e}\cdot\mathbf{R}_0)-\mathbf{R}_0]\right\}$$

$$\mathbf{g} = \frac{d\Omega}{dt}\times\mathbf{R}_0+\mathbf{\Omega}\times(\mathbf{\Omega}\times\mathbf{R}_0)-\Omega_*^2[3(\mathbf{e}\cdot\mathbf{R}_0)\mathbf{e}-\mathbf{R}_0]$$

Здесь β – коэффициент теплового расширения жидкости, $T = T(\mathbf{r})$ – температура, ρ_0 – плотность жидкости при температуре T_0. Первое слагаемое в (1.2) соответствует потенциальной части силы $\mathbf{F}$ и вносит вклад только в распределение давления в жидкости, второе слагаемое отвечает пространственно неоднородной части поля микроускорений, третье и четвертое слагаемые описывают силы плавучести и Кориолиса. В формуле (1.2) зависимость плотности ρ жидкости от T сохранена только в третьем слагаемом, а зависимость от $\mathbf{r}$ – во втором.

С учетом (1.2) уравнения Навье – Стокса в приближении Буссинеска представляются в безразмерной форме

$$\begin{gathered}\frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t}+(\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}+2\mathbf{\Omega}\times\mathbf{u} = \mathrm{Ek}\,\nabla^2\mathbf{u}-\nabla p+\mathbf{r}\times\frac{d\mathbf{\Omega}}{dt}+\mathrm{GrEk}^2\,\mathbf{g}(T-T_0)\\ \nabla\cdot\mathbf{u} = 0\\ \frac{\partial T}{\partial t}+\mathbf{u}\cdot\nabla T = \frac{\mathrm{Ek}}{\mathrm{Pr}}\nabla^2 T\end{gathered} \tag{1.3}$$

$$\mathrm{Ek} = \frac{\nu}{\Omega_0 h^2}, \quad \mathrm{Gr} = \frac{\beta \Delta T \Omega_0^2 |\mathbf{R}_0| h^3}{\nu^2}, \quad \mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a}$$

Здесь Ek, Gr, Pr – числа Экмана, Грасгофа и Прандтля, a – температуропроводность жидкости, h – характерный размер полости, Ω_0 – характерное значение модуля угловой скорости станции, ΔT – максимальный перепад температуры в полости

$$\mathbf{g} = \frac{d\mathbf{\Omega}}{dt} \times \mathbf{e}_R + \mathbf{\Omega} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{e}_R) - \Omega_*^2 [3(\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}_R)\mathbf{e} - \mathbf{e}_R] \tag{1.4}$$

$$\varepsilon = \frac{h}{|\mathbf{R}_0|}, \quad \mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{R}_0}{|\mathbf{R}_0|}$$

В уравнениях (1.3)–(1.4) характерными масштабами служат: длины – h, времени – Ω_0^{-1}, скорости – $\Omega_0 h$, давления – $\rho \Omega_0^2 h^2$, угловой скорости – Ω_0, ускорения – $\Omega_0^2 h$, температуры – ΔT. Наличие члена $\mathbf{r} \times \dot{\Omega}$ в правой части уравнения (1.3) отличает данную постановку задачи от используемой обычно при моделировании движения жидкости в условиях микрогравитации, когда движущей силой конвекции является лишь сила Архимеда.

При движении станции все три компоненты ее угловой скорости зависят от времени t и поэтому конвекция жидкости, вызываемая квазистатической компонентой микроускорения, является трехмерной. Для упрощения задачи ниже рассматривается полость в форме куба со стороной h и жесткими стенками. С кубом свяжем систему координат xyz. В безразмерных переменных его внутренность в этой системе задается неравенствами $0 \leqslant x \leqslant 1$, $0 \leqslant y \leqslant 1$, $0 \leqslant z \leqslant 1$. Стенки куба, перпендикулярные оси z ($z = 0$ и 1), считались изотермическими, остальные стенки – теплоизолированными. В этом случае граничные и начальные условия для системы (1.3) записываются в виде

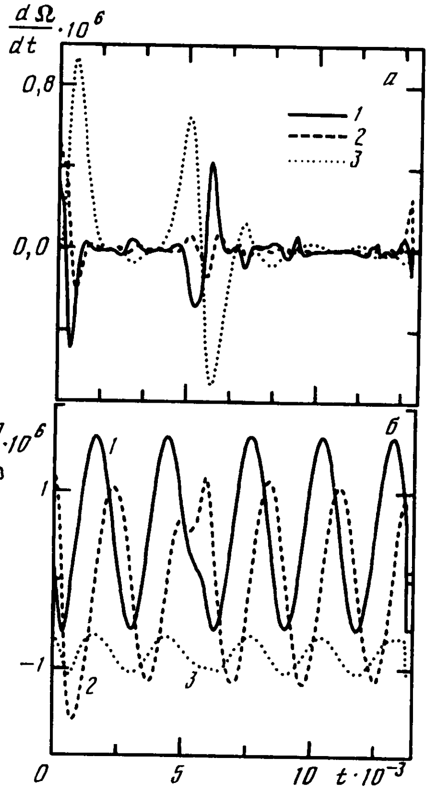
$$\begin{gathered} \mathbf{u}_w = 0 \\ z = 0,\ T = 0;\ z = 1,\ T = \pm 1 \\ x = 0,\ x = 1,\ \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ y = 0,\ y = 1,\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \end{gathered} \tag{1.5}$$

$$t = 0{:}\ \mathbf{u} = 0,\ T = \pm z \tag{1.6}$$

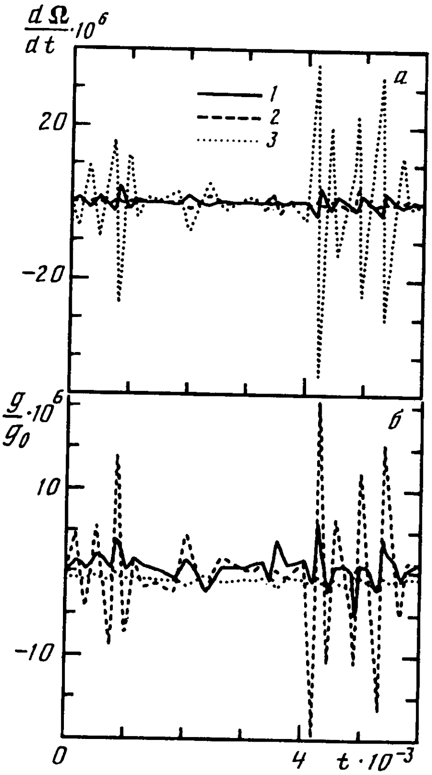
Начальные условия (1.6) отвечают стационарному решению системы (1.3), (1.5) при $\Omega = 0$, $\mathbf{g} = 0$. Граничное условие (1.5) предусматривает, что разность температур между изотермическими стенками полости может иметь разные знаки. Изучение конвекции, вызванной движением относительно центра масс транспортного корабля "Шаттл", показало [5], что интенсивность конвекции может существенно зависеть от знака этой разности. В настоящей работе указанный эффект исследуется применительно к станции "Мир", характер вращательного движения которой существенно отличается от вращательного движения "Шаттла".

Поскольку главная цель многих космических экспериментов состоит в исключении или значительном ослаблении естественной конвекции, основное внимание здесь уделяется изучению интенсивности конвекции, порождаемой квазистатической компонентой микроускорения на станции "Мир". В качестве меры интенсивности конвекции, как и в [2, 4, 5], используется максимум модуля конвективной скорости $U = \max\limits_{x,y,z} |\mathbf{u}|$. Метод решения задачи (1.3)–(1.6) изложен в [5].

2. Результаты расчетов. Основная особенность рассматриваемой задачи состоит в том, что движение жидкости вызывается действием двух сил: плавучести, определяе-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Зависимости от t (в с) углового ускорения $\dot{\Omega}$ (в c^{-2}) (*а*) и квазистатической компоненты микроускорения $\mathbf{g}/g_0$ (*б*): кривые *1–3* – составляющие относительно осей x, y, z

Фиг. 2. Зависимости от t углового ускорения $\dot{\Omega}$ (*а*) и квазистатической компоненты микроускорения $\mathbf{g}/g_0$ (*б*): кривые *1–3* – составляющие относительно осей x, y, z

мой микроускорением $\mathbf{g}$, и инерции, обусловленной угловым ускорением станции. Соотношение между этими силами определяется параметром $\alpha = \mathrm{GrEk}^2 = \beta\Delta T\varepsilon^{-1}$, где $\varepsilon = h/|\mathbf{R}_0|$. Этот параметр имеет смысл теплового числа Россби и равен отношению двух малых параметров: $\beta\Delta T$ и ε. Первый мал вследствие малости коэффициента теплового расширения жидкости β, а ε – когда $h \ll |\mathbf{R}_0|$.

Если $\alpha \ll 1$ (полость с жидкостью расположена вблизи центра масс, или температурные перепады в жидкости очень малы), то конвекция в жидкости определяется силой инерции $\mathbf{r}\times\dot{\Omega}$. При $\alpha \gg 1$ имеет место обычная тепловая конвекция, вызываемая изменяющимся во времени микроускорением $\mathbf{g}$. В действительности же значения $\alpha \approx 1$. В этом случае, как показано в [5], интенсивность конвекции существенно зависит от знака произведения $\mathbf{e}_R \cdot \nabla T$.

Для расчетов были выбраны два типичных интервала движения станции относительно центра масс, показанные на фиг. 1 и 2. Метод расчета указанных величин изложен в [6, 8]. Компоненты углового ускорения и микроускорения даны в строительной системе координат станции. Микроускорение вычислено в точке с координатами (– 4,16, 0,86, –8,07 м).

Кривые на фиг. 1, имеющие вид не слишком больших, достаточно широких и разнесенных по времени всплесков, соответствуют случаю, когда вариации угловых ускорений относительно невелики. Распределения на фиг. 2 иллюстрируют противоположную ситуацию, когда амплитуда изменения угловых ускорений весьма значительна, промежутки времени между соседними экстремумами непродолжительны, а отвечающие экстремумам лепестки графиков довольно узкие. На первом интервале (фиг. 1,*б*) доминируют периодические колебания микроускорения с периодом около 45 мин, обусловленные градиентом напряженности гравитационного поля (член в (1.4), содержащий Ω_*^2).

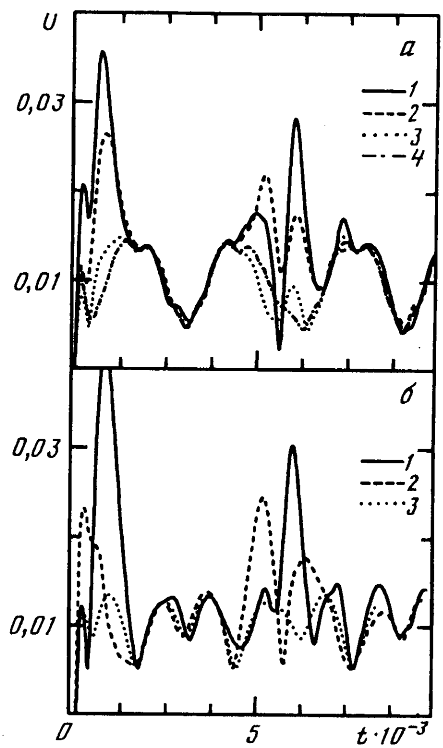
Такой вид вариаций микроускорения типичен для интервалов, на которых станция сохраняет постоянную ориентацию в абсолютном пространстве. Амплитуда микроускорения имеет порядок нескольких $10^{-6}\,g_0$, где g_0 – ускорение силы тяжести на поверхности Земли. Влияние же вращения станции на микроускорение $\mathbf{g}$ незначительно. На втором интервале (фиг. 2,*б*) влияние такого вращения, напротив, доминирует – микроускорение практически полностью определяется вариациями углового ускорения станции при разворотах. В этом случае амплитуда и характерная частота изменений микроускорений оказываются на порядок больше, чем в первом случае.

В соответствии с данными, представленными на фиг. 1,*а* и 2,*а* в качестве характерного масштаба угловой скорости было выбрано значение $\Omega_0 = 0{,}001$ с$^{-1}$. Расчеты выполнены при $\mathrm{Ek} = 0{,}3$, $\mathrm{Pr} = 0{,}01$ и $\alpha = 0{,}607$, типичных для процесса выращивания полупроводников из расплава. Например, для германия значения числа Экмана, равное 0,3, достигается уже при $h = 2$ см.

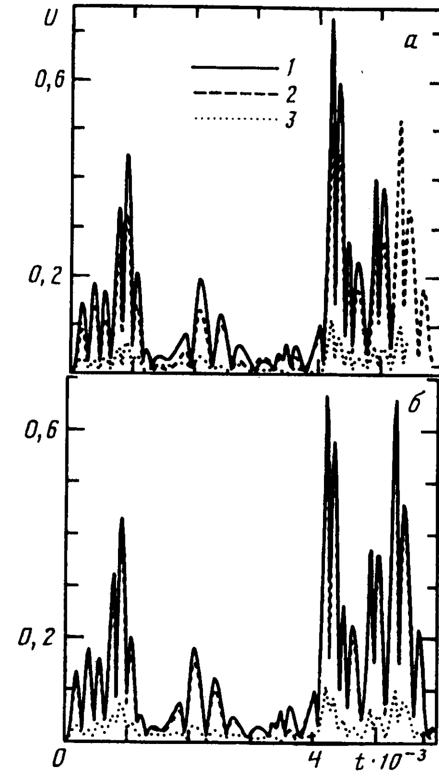
Рассмотрены две ориентации полости относительно осей строительной системы координат станции. Первая R_1 соответствует случаю, когда оси системы xyz, связанной с полостью, параллельны осям строительной системы координат. Вторая ориентация R_2 получена из первой путем поворота системы xyz вокруг оси y на 90° против часовой стрелки. Расчеты были выполнены как для положительного градиента температуры, когда при $z = 1$ $T = 1$, так и для отрицательного, когда $T = -1$. Соответственно значение произведения $\mathbf{e}_R \cdot \nabla T = \pm 0{,}885$ для ориентации R_1 и $\pm 0{,}456$ для R_2.

Результаты расчета максимальной скорости конвекции под действием квазистатической компоненты микроускорения, представленной на фиг. 1,*а*, показаны на фиг. 3. Составляющая микроускорения, обусловленная градиентом гравитационного поля, вызывает периодические пульсации поля скорости, которые относительно невелики. В то же время малые вариации угловой скорости станции приводят к значительному усилению конвекции, причем всплески максимальной скорости конвекции повторяют всплески угловых ускорений на фиг. 1,*а*. Поскольку, как уже подчеркивалось, вращение воздействует на жидкость через две силы, то, для того чтобы разделить их влияние и тем самым яснее продемонстрировать воздействие пространственно неоднородного микроускорения, для варианта $T = -1$ были рассчитаны два дополнительных случая. В первом – вращение отсутствовало полностью, т.е. $\Omega = 0$ (кривая *4* на фиг. 3,*а*). Во втором – отсутствовала лишь пространственно неоднородная часть микроускорения $\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{\Omega}}$, в то время как влияние вращения в векторе $\mathbf{g}$ сохранялось (кривые *3* на фиг. 3). Последний случай соответствует стандартной модели конвекции. Кривые для указанных двух случаев на фиг. 3,*а* расположены близко друг к другу. Следовательно, усиление конвекции вызывается главным образом пространственно неоднородной составляющей микроускорения, в то время как воздействие угловых ускорений на жидкость через силу плавучести незначительно. Видно также, что конвекция оказывается более интенсивной, когда $\mathbf{e}_R \cdot \nabla T < 0$, что соответствует анализу [5]. Сравнение кривых на фиг. 3,*а* и *б* показывает, что ориентация полости с жидкостью относительно осей строительной системы координат также заметно влияет на интенсивность конвекции.

Результаты расчета максимальной скорости конвекции для микроускорения, показанного на фиг. 2, представлены на фиг. 4. Интенсивность движения жидкости в этом случае оказывается на порядок большей. Она также вызывается составляющей



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 3. Зависимости от t максимального значения модуля скорости U движения жидкости, вызванного действием микроускорений, показанных на фиг. 1; *а*, *б* – ориентации R_1 и R_2: кривые *1–4* – для положительного и отрицательного градиентов температуры, без учета пространственно неоднородных микроускорений и без вращения

Фиг. 4. Зависимости от t максимального значения модуля скорости U движения жидкости, вызванного действием микроускорений, показанных на фиг. 2. Обозначения такие же, как на фиг. 3

микроускорения $\mathbf{r}\times\dot{\mathbf{\Omega}}$. Вклад силы плавучести незначителен, что следует из того, что кривые, соответствующие положительному и отрицательному градиенту температуры, практически не отличаются друг от друга. Влияние ориентации полости в данном случае также оказалось небольшим, что объясняется симметрией области, занятой жидкостью. Если вместо куба рассмотреть вытянутый параллелепипед, то в нем влияние ориентации полости более существенно.

Заключение. Пространственно неоднородные микроускорения, связанные с вариациями углового ускорения спутника, оказывают существенное влияние на движение жидкости в условиях невесомости даже в том случае, когда его ориентация с высокой точностью поддерживается неизменной в абсолютном пространстве. Вследствие этого обычно используемая модель конвекции, в которой поле микроускорений является пространственно однородным и учитывается только в выражении для архимедовой силы, не позволяет в общем случае получить полную картину движения жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полежаев В.И.* Режимы микроускорений, гравитационная чувствительность и методы анализа технологических экспериментов в условиях невесомости // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 5. С. 22–36.
2. *Yuferev V.S., Polovko Yu.A., Zhmakin A.I., Kolesnikova E.N.* Effect of spacecraft rotation on convection and impurity transport under microgravity // Proc. Joint 10th Europ. and 6th Russian Symp. on Phys. Sci. in Microgravity, St. Petersburg, Russia, 1997. Moscow: Inst. Probl. Mech. RAS, 1997. V. 1. P. 37–41.
3. *Yuferev V.S., Kolesnikova E.N., Polovko Yu. A., Zhmakin A. J.* Effect of the Coriolis Force on Thermal Convection under Microgravity // Theor. and Comput. Fluid Dynamics. 1998. V. 12. № 1. P. 53–70.
4. *Половко Ю.А., Юферев В.С.* Влияние вариаций угловой скорости вращения космического корабля на тепловую конвекцию в условиях невесомости // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 24. С. 6–13.
5. *Yuferev V.S., Polovko Yu.A., Sazonov V.V.* Three-dimensional thermal convection caused by spacecraft rotation in a rectangular enclosure with rigid walls // Phys. Fluids. 1998. V. 10. № 10. P. 2517–2524.
6. *Sazonov V.V., Komarov M.M., Polezhaev V.I. et al.* Microaccelerations on board the Mir orbital station and quick analysis of the gravitational sensitivity of convective heat/mass transfer processes // Proc. Joint 10th Europ. and 6th Russian Symp. on Phys. Sci. in Microgravity, St. Petersburg, Russia, 1997. Moscow: Inst. Probl. M3ch. RAS, 1997. V. 2. P. 284–292. = *Сазонов В.В., Комаров М.М., Полежаев В.И. и др.* Микроускорения на орбитальной станции "Мир" и оперативный анализ гравитационной чувствительности конвективных процессов тепломассопереноса // Космич. исслед. 1999. Т. 37. Вып. 1. С. 86–101.
7. *Boschert St., Danilewsky A.N., Benz K.W.* Numerical cimulation of the influence of the orbiters attitude on the μg growth of InP:S crystals from an In solution during the EURECA-1 flight // J. Crystal Growth. 1999. V. 205. № 1–2. C. 92–96.
8. *Сазонов В.В., Комаров М.М., Беляев М.Ю. и др.* Оценка микроускорений на борту орбитальной станции "Мир" по показаниям оптического звездного датчика // Космич. исслед. 1996. Т. 34. Вып. 5. С. 491–499.

Москва
Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
9.III.1999