

01;03

Влияние вариаций угловой скорости вращения космического корабля на тепловую конвекцию в условиях невесомости

© Ю.А. Половко, В.С. Юферев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 11 июля 1997 г.

В отличие от обычного подхода, когда считается, что движение жидкости в условиях невесомости вызывается вибрациями или остаточными квазистационарными микроускорениями, в работе исследуется конвекция под действием вариаций угловой скорости вращения космического корабля. Показано, что, хотя уровень микроускорений, связанных с вариациями угловой скорости вращения, для кораблей "Шаттл", станции "Мир" и непилотируемых спутников является весьма низким, порядка $0.1-1 \mu g$, возникающая конвекция и неоднородность в распределении примеси при выращивании кристаллов могут быть весьма заметными.

В настоящее время считается, что при отсутствии в жидкости свободной поверхности движущей силой конвекции в условиях невесомости является сила плавучести, генерируемая вектором микроускорений. Последний характеризует результирующее воздействие сил различной природы и в произвольной точке P спутника, жестко связанной с его корпусом, может быть вычислен по формуле [1]

$$\mathbf{g} = \mathbf{R} \times \dot{\Omega} + (\Omega \times \mathbf{R}) \times \Omega + \Omega_*^2 (3(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{R})\mathbf{e}_r - \mathbf{R}) - \mathbf{g}_v. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{R} — радиус-вектор точки P относительно центра масс спутника; Ω — вектор абсолютной угловой скорости спутника, точкой обозначено дифференцирование по времени t ; Ω_* — орбитальная частота; \mathbf{e}_r — орт направление "центр Земли–центр масс спутника"; \mathbf{g}_v — вектор микроускорения, вызванного негравитационными воздействиями (вибрациями, сопротивлением атмосферы и т.п.). Первые два слагаемых в (1) связаны с движением спутника относительно его центра масс, а третье — с неоднородностью гравитационного поля Земли. Очевидно,

что в такой постановке задачи воздействие микрогравитационного поля исчезает, если в жидкости отсутствуют градиенты плотности. Однако на самом деле воздействие микрогравитации носит более сложный характер. Действительно, вращение космического корабля приводит к появлению двух сил: центробежной $\rho(\Omega \times \mathbf{R}) \times \Omega$ и силы инерции $\rho(\dot{\Omega} \times \mathbf{R})$, связанной с колебаниями угловой скорости корабля (ρ — плотность жидкости). Центробежная сила является потенциальной и поэтому при отсутствии в жидкости градиентов плотности будет давать вклад только в давление, не вызывая движения жидкости, а при наличии градиентов плотности будет приводить жидкость в движение через силу плавучести. С другой стороны, сила инерции $\rho(\dot{\Omega} \times \mathbf{R})$ не является потенциальной и поэтому не может быть полностью включена в давление. В результате указанная сила будет вызывать движение жидкости даже при отсутствии силы плавучести. Таким образом, при произвольном вращении космического корабля сила, действующая на неоднородно нагретую жидкость в условиях орбитального полета (неоднородностью гравитационного поля Земли пренебрегается), может быть записана в виде

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_c, \quad (2)$$

где $\mathbf{F}_b = \rho_0(\mathbf{g}_v + \Omega \times (\Omega \times \mathbf{R}) + \dot{\Omega} \times \mathbf{R}_0)\beta_T(T - T_0)$ — сила плавучести или Архимедова сила; $\mathbf{F}_i = -\rho_0(\dot{\Omega} \times \mathbf{r})$ — сила инерции, вызванная неравномерным вращением контейнера, и $\mathbf{F}_c = -2\rho_0(\Omega \times \mathbf{u})$ — сила Кориолиса. В этих выражениях β_T — коэффициент объемного теплового расширения жидкости, T — температура жидкости, T_0 — значения температуры в некоторой фиксированной точке внутри контейнера, \mathbf{R}_0 — радиус-вектор этой точки относительно центра масс спутника, $\mathbf{r} = \mathbf{R} - \mathbf{R}_0$ — радиус-вектор, соединяющий указанную точку с произвольной точкой внутри контейнера, и \mathbf{u} — вектор скорости движения жидкости. Можно видеть, что только сила плавучести \mathbf{F}_b в (2) определяется вектором \mathbf{g} как единым целым, в то время как силы \mathbf{F}_i и \mathbf{F}_c определяются угловым ускорением и угловой скоростью спутника. Необходимо подчеркнуть также, что действие силы \mathbf{F}_i не может быть сведено к действию какой-либо эквивалентной силы плавучести. Отсюда следует, что для характеристики микрогравитационного поля орбитальной станции необходимо использовать не только вектор микроускорений \mathbf{g} , но и вектор угловой скорости вращения станции Ω .

До сих пор основное внимание специалистов по физике жидкости и моделированию роста кристаллов в условиях невесомости уделялось изучению конвекции под действием вибраций (*g-jitter*) и остаточных микроускорений, в то время как воздействие силы \mathbf{F}_i не учитывалось. Цель настоящей работы состоит в рассмотрении конвекции жидкости под действием неравномерного вращения космического корабля. Как будет показано ниже, эта конвекция может быть весьма заметной, хотя вариации угловой скорости космического корабля являются достаточно малыми.

Величина угловой скорости и ее колебания существенно зависят от режима полета и ориентации космического корабля. В случае постоянной ориентации орбитальной станции в геоцентрической системе координат угловая скорость вращения станции, вообще говоря, равна нулю. Однако на практике ориентация станции поддерживается с точностью порядка нескольких десятков угловых минут и по этой причине могут иметь место отклонения угловой скорости от нулевого значения с амплитудой порядка $10^{-5} - 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. При других режимах полета средняя угловая скорость станции отлична от нуля и ее модуль имеет порядок орбитальной частоты, т. е. угловой скорости вращения станции вокруг Земли.

Чтобы продемонстрировать значимость данного вида конвекции, рассмотрим движение несжимаемой жидкости в прямоугольной трехмерной полости с жесткими стенками, показанной на рис. 1. Выберем в качестве масштабов следующие величины: высота области h в качестве масштаба длины, Ω_0^{-1} — времени, $\Omega_0 h$ — скорости, $\rho \Omega_0^2 h^2$ — давления, Ω_0 — угловой скорости вращения, $\Omega_0^2 h$ — величины микроускорения, ΔT — температуры. Тогда в приближении Буссинеска уравнения движения жидкости могут быть записаны в следующем безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} &= \text{Ek} \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} - \frac{\partial \boldsymbol{\Omega}}{\partial t} \times \mathbf{r} \\ &+ \text{Gr Ek}^2 \left(\frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} \times \mathbf{R}_0 + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{R}_0 + \mathbf{r})) \right) T, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T &= \frac{\text{Ek}}{\text{Pr}} \nabla^2 T \end{aligned} \quad (3)$$

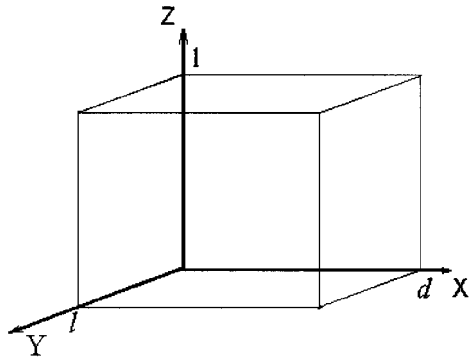


Рис. 1. Схема области.

где $Ek = \frac{\nu}{\Omega_0 h^2}$, $Gr = \frac{\beta \Delta T \Omega_0^2 h^4}{\nu^2}$, $Pr = \frac{\nu}{a}$ есть числа Экмана, Грасгофа и Прандтля соответственно, а ν и a — кинематическая вязкость и температуропроводность жидкости.

Граничные условия для системы (3) задавались в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= 0 \text{ при } z = 0, 1, \quad x = 0, d \text{ и } y = 0, l, \\ T &= 0 \text{ при } z = 0 \text{ и } T = 1 \text{ при } z = 1, \\ \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 \text{ при } x = 0; d \text{ и } \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \text{ при } y = 0; l. \end{aligned} \quad (4)$$

Что же касается начальных условий, то до момента $t = 0$ конвективное движение предполагалось отсутствующим. Для численного интегрирования задачи (3)–(4) использовался метод, предложенный в [2], который был обобщен на трехмерный случай.

Мы рассмотрели конвекцию, которая возникает под действием реальных колебаний угловой скорости космического корабля. Примеры подобных колебаний даны на рис. 2 для пилотируемого комплекса "Мир"–"Шаттл" (рис. 2, *a*) и непилотируемого спутника (рис. 2, *b*). Зависимости безразмерных компонент угловой скорости были рассчитаны В.В. Сазоновым, который любезно предоставил нам эти данные. Здесь и далее масштаб Ω_0 принимался равным 0.001 s^{-1} . Метод получения этих скоростей подробно описан в работах [1,3]. Полет

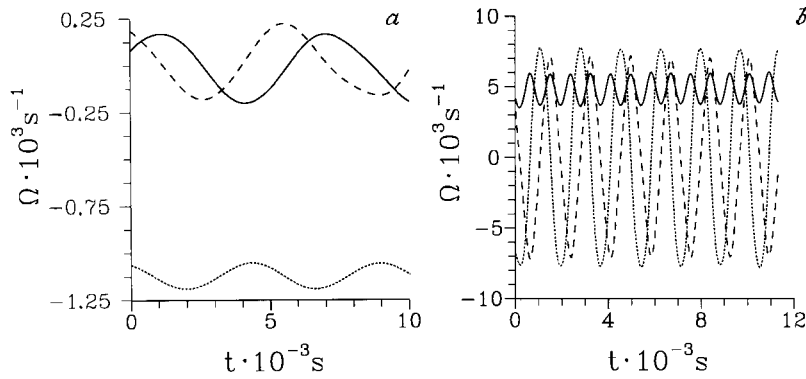


Рис. 2. Зависимость угловой скорости космического корабля от времени: *a* — связка "Мир"—"Шаттл", *b* — непилотируемый спутник. Сплошные линии — Ω_x , пунктирные — Ω_y , точки — Ω_z .

связки "Мир"—"Шаттл" проходил в режиме гравитационной ориентации. В этом случае модуль угловой скорости комплекса оказывается близким к угловой скорости его обращения вокруг Земли ($\approx 0.001 \text{ s}^{-1}$), а амплитуда колебаний угловой скорости и угловые ускорения являются достаточно малыми: порядка 10^{-4} s^{-1} и 10^{-7} s^{-2} соответственно. Подобные значения угловых ускорений и амплитуд колебаний угловой скорости являются типичными для тяжелых космических аппаратов, летающих в режиме гравитационной ориентации. В то же время спутники с меньшей массой и летающие на более низких орбитах могут вращаться существенно быстрее и с большими колебаниями угловой скорости (рис. 2, *b*).

Из (2) следует, что соотношение между силой плавучести \mathbf{F}_b и силой инерции \mathbf{F}_i определяется выражением $\frac{|\mathbf{F}_i|}{|\mathbf{F}_b|} \approx \frac{|\mathbf{r}|}{\beta \Delta T |\mathbf{R}_0|}$, где $|\mathbf{R}_0|$ есть расстояние между контейнером с жидкостью и центром тяжести корабля. Последнее в расчетах принималось постоянным и равным $R_{0x} = R_{0y} = R_{0z} = 60$, в то время как $\beta \Delta T$ варьировалось. В качестве меры интенсивности конвекции использовалось максимальное значение модуля конвективной скорости u_{\max} . Предполагалось также, что $\mathbf{g}_v = 0$, т.е. остаточными микроускорениями и вибрациями (*g-jitter*) пренебрегалось. Результаты расчета максимальной скорости конвекции,

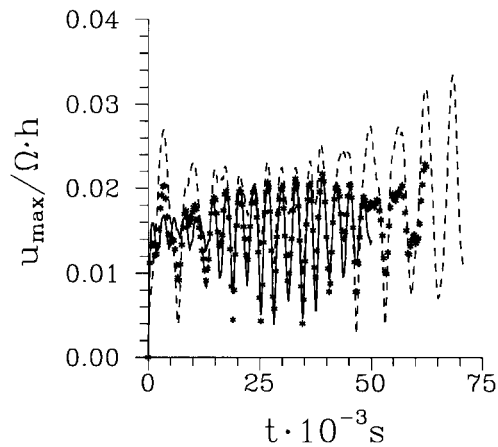


Рис. 3. Изменение максимальной скорости конвекции жидкости в кубической области во времени под действием колебаний угловой скорости связки "Мир"—"Шаттл". $Ek = 0.1$, $Pg = 0.01$. $\beta\Delta T = 0$ — сплошная кривая, 0.001 — звездочки, 0.003 — пунктирная кривая.

которая возникла бы в кубической полости под действием вариаций угловой скорости связки "Мир"—"Шаттл" показаны на рис. 3. Случай $\beta\Delta T$ соответствует изотермической конвекции, не учитываемой при стандартном подходе к проблеме конвекции в невесомости. Видно, что в этом случае размерная скорость конвекции оказывается равной $0.01-0.02\Omega_0 h$ или $0.1-0.2\nu/h$. Последнее выражение следует из того, что при расчетах число Экмана было принято равным 0.1. Можно видеть, что хотя скорость конвекции достаточно мала, тем не менее ее влияние на процессы переноса примеси при выращивании кристаллов может быть достаточно заметным, особенно при малых скоростях роста (порядка одного микрона) и малых коэффициентах диффузии примеси. С увеличением $\beta\Delta T$ наблюдается существенное увеличение амплитуды колебаний максимальной скорости конвекции, что, по-видимому, вызывается взаимодействием силы плавучести F_b и инерционной силы F_i . Однако влияние тепловой конвекции становится заметным лишь при достаточно больших перепадах температур, когда $\beta\Delta T|\mathbf{R}_0| \gg 0.1$. На рис. 4 показаны результаты расчета максимальной скорости конвекции,

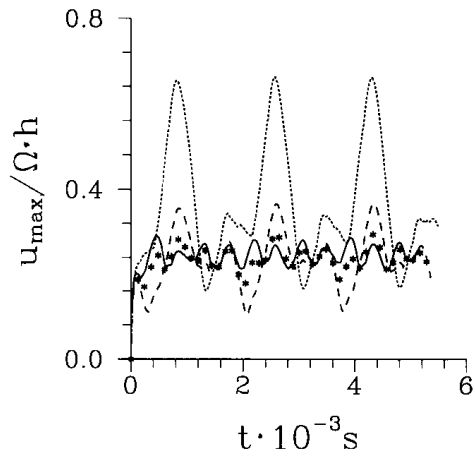


Рис. 4. Изменение максимальной скорости конвекции жидкости в прямоугольной области со сторонами $l = d = 0.5$ во времени под действием колебаний угловой скорости, приведенных на рис. 2, *b*. $Ek = 0.158$, $Pr = 0.01$. $\beta\Delta T = 0$ — сплошная кривая, 0.001 — звездочки, 0.003 — пунктирная кривая, 0.01 — точки.

возникающей под действием колебаний угловой скорости, представленных на рис. 2, *b*, в прямоугольной области со сторонами $l = d = 0.5$. В этом случае интенсивность конвекции оказывается существенно выше, что неудивительно, поскольку амплитуда колебаний угловой скорости спутника более чем на порядок превосходит амплитуду колебаний угловой скорости связки "Мир"—"Шаттл". Необходимо отметить, что в обоих рассмотренных примерах величина микроускорений оказывается малой, порядка $0.2-210^{-6}g_0$, где g_0 — ускорение силы тяжести на уровне поверхности Земли.

Таким образом, конвекция, вызываемая вариациями угловой скорости вращения космического корабля, может быть весьма значительной и ее необходимо иметь в виду при проектировании технологических экспериментов и экспериментов по физике жидкости на борту космического корабля и анализе их результатов.

Работа выполнена в рамках контракта между Российским космическим агентством и НАСА NAS-15-10110.

Список литературы

- [1] *Сазонов В.В., Зыков С.Г.* Расчет и измерение низкочастотной составляющей микроускорения на борту ИСЗ. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша. 1996. № 31.
- [2] *Soh W.Y., Goodrich J.W.* // J. Comput. Physics. 1988. V. 79. P. 113–134.
- [3] *Сазонов В.В., Комаров М.М., Беляев М.Ю., Зыков С.Г., Стажков В.М.* Оценка квазистатической компоненты микроускорения на борту искусственного спутника Земли. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша. 1995. № 45.