

ОБ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БОЛЬШИХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ОЦЕНКЕ МИКРОУСКОРЕНИЙ

© 2012 А.В. Седельников

Институт энергетики и транспорта
Самарского государственного аэрокосмического университета

Поступила в редакцию 18.03.2012

В работе анализируется проблема учета влияния эффекта температурных деформаций больших упругих элементов космической лаборатории при оценке микроускорений, возникающих в ее внутренней среде. Рассмотрены различные гравитационно-чувствительные процессы, а также типы космических аппаратов. Даны практические рекомендации об учёте влияния.

Ключевые слова: температурные деформации, большие упругие элементы, космическая лаборатория, микроускорения

Проблема оценки микроускорений является актуальной задачей космического материаловедения при проектировании космических лабораторий, предназначенных для реализации на их борту гравитационно-чувствительных технологических процессов [1]. Эти процессы, как правило, являются энергоёмкими и требуют протяженных панелей солнечных батарей (ПСБ) для их успешного проведения [2]. Разрабатываемые в СССР и России космические лаборатории «НИКА-Т» и «ОКА-Т» по проекту имели в своей конструктивно-компоновочной схеме ПСБ длиной 5 м и 7 м соответственно. Исследования показывают [3, 4], что основным фактором, создающим поле микроускорений во внутренней среде лаборатории являются колебания ПСБ после работы двигателей ориентации и управления движением. Исключения составляют космические аппараты (КА) класса «ФОТОН», не имеющие больших упругих элементов [5, 6], а также КА, на которых реализуются низкоэнергетические гравитационно-чувствительные процессы. Ярким примером такого аппарата может служить КА «Spot-4» [7]. Единственная ПСБ «Spot-4» крепилась к корпусу КА посредством упругого стержня и фактически не оказывала никакого влияния на движение центрального тела КА. Однако в большинстве случаев высокая энергоёмкость проводимых процессов требует жёсткой ориентации ПСБ на Солнце, например, в

проекте «НИКА-Т» косинус угла между нормалью к ПСБ и направлением на Солнце должен быть выше 0,9. В таких случаях собственные движения ПСБ приводят к нарушению благоприятных условий микрогравитационного штiria и, как следствие, неудачному завершению ряда гравитационно-чувствительных процессов.

Если, двигаясь по орбите, КА периодически оказывается в тени Земли, то большие упругие элементы такого аппарата подвержены периодическому воздействию высоких порядка $+110^0$ С и низких порядка -170^0 С температур. Такие воздействия вызывают скачкообразное изменение размеров и формы больших упругих элементов КА в такой степени, что могут нарушать условия микрогравитационного штiria, поэтому задача оценки микроускорений, возникающих из-за температурных деформаций больших упругих элементов является актуальной и подлежит анализу. Её решение зависит от ряда факторов, таких как инерционно-массовые характеристики центрального тела КА и его больших упругих элементов, числа этих элементов, способа их крепления к корпусу и т.д.

Балочная модель упругого элемента.

Для построения оценки микроускорений и доказательства актуальности поставленной проблемы в качестве модели больших упругих элементов была использована простейшая модель балки Эйлера-Бернулли. Для решения одномерной задачи теплопроводности было использовано уравнение [8]:

Седельников Андрей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, директор. E-mail: axe_backdraft@inbox.ru

$$k\nabla T + B = c_1 T,$$

где k – теплопроводность; B – тепловыделение в объеме; c_1 – теплоемкость на единицу объема. При граничных подвижных условиях:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

где $a^2 = \frac{\lambda}{c\rho}$, λ – коэффициент теплопроводности, c – удельная теплоёмкость, ρ – плотность вещества стержня. Численное моделирование прогрева проводилось в математическом пакете Mathcad v 14 и показало, что распределение температуры по толщине стержня выглядит так, как показано на рис. 1.

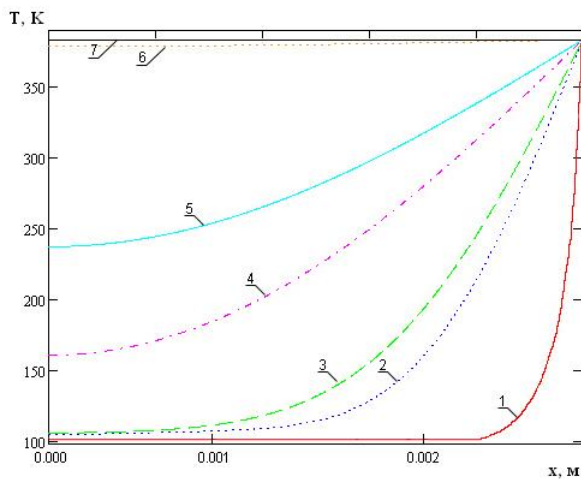


Рис. 1. Эпюра распределения температуры внутри панели радиатора: линии 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 соответствуют моментам времени 0; 0,005 с; 0,01 с; 0,05 с; 0,1 с; 0,5 с и 1,6 с

Оценка микроускорений, полученная с помощью этой простейшей модели, даёт максимальное микроускорение [9]:

$$w_b \cong 2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$$

Это значение на порядок выше допустимого уровня микроускорений для проекта «НИКА-Т» и в двадцать раз выше, чем предельный уровень для проекта «ОКА-Т». Однако связано это, прежде всего, со слишком упрощённым представлением деформации балки. Из-за температурных перепадов она удлиняется либо укорачивается, не изгибаясь, и передаёт весь дополнительный импульс корпусу КА. Поэтому вся энергия, связанная с такой деформацией, участвует в создании поля микроускорений.

Моделирование упругого элемента однородной ортотропной пластиной. Совсем иначе дело обстоит, если упругий элемент КА представить однородной ортотропной пластиной, уравнение теплопроводности для которой можно записать в виде [8]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{ grad } T) + q_v(x; y; z; t)$$

где $q_v(x; y; z; t)$ – локальная удельная мощность тепловыделения элемента пластины в точке $A(x; y; z)$. В этом случае, в отличие от балки, более корректно удаётся учесть теплоотдачу с поверхности пластины, подчиняющуюся закону Стефана-Больцмана:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0}^{x=l} = \varepsilon \sigma \left(T^4(x; t) \Big|_{x=0}^{x=l} - T_c^4 \right)$$

где ε – интегральный коэффициент теплового излучения тела, σ – постоянная Стефана-Больцмана, $T(x; t) \Big|_{x=0}^{x=l}$ – поле температур на поверхности пластины, T_c – температура окружающей среды. Считая λ , c и ρ постоянными величинами, а q_v – зависящим только от времени, поскольку излучающие источники расположены на внешней поверхности пластины, можно получить оценку для микроускорений [10]:

$$w_p \cong 10^{-6} \text{ м/с}^2$$

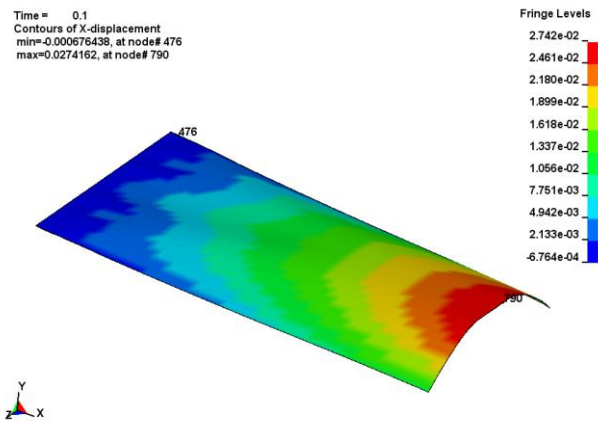


Рис. 2. Деформация пластины при её нагреве

Эта оценка в 200 раз ниже предыдущей и говорит о том, что лишь незначительная часть энергии, связанной и температурными деформациями, уйдёт в дополнительный импульс и будет участвовать в создании поля микроускорений. Большая её часть перейдёт в потенциальную энергию деформации пластины, т.е. пластина подвергается сложной деформации,

включающей растяжение-сжатие, а также изгиб. Действительно, как показало численное моделирование в математическом пакете LS-Dyna, после воздействия теплового потока со стороны Солнца она теряет прямоугольную форму (рис. 2). Прогрев пластины будет таким, как показано на рис. 3. Вся толщина пластины была разделена на 5 равных слоёв, температура слоя аппроксимировалась температурой средней линии слоя.

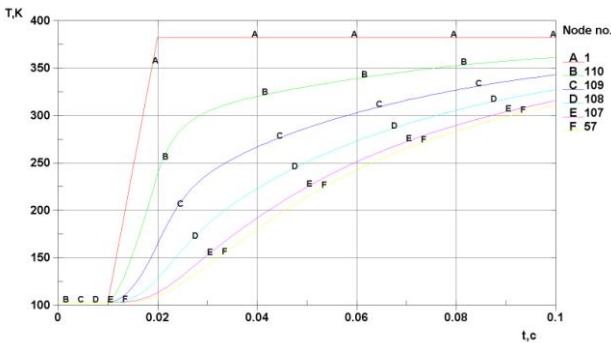


Рис. 3. Прогрев пластины по слоям

Движение элементов ПСБ при изгибе относительно недеформированного положения пластины вызовет появление момента от сил инерции. Это в свою очередь будет способствовать возникновению углового ускорения КА относительно центра масс и появлению поля микроускорений, рассматриваемых при постановке задачи в [1] при вращении КА вокруг центра масс. Для решения задачи оценки создаваемых микроускорений была построена конечноэлементная модель ПСБ с учётом характеристик материалов, используемых при её изготовлении [11]. Оценка микроускорений была сделана исходя из анализа движения точки, принадлежащей незакреплённому краю пластины, противоположному заделке. Момент от сил инерции из-за деформации ПСБ оценивался формулой:

$$M(\Phi_\tau) = \int_0^l \gamma x^2 \ddot{y}_{\max} dx$$

где γ – погонная масса ПСБ, а l – длина ПСБ. В пакете «COMSOL Multiphysics» v. 3.5a был проведён анализ движения вышеуказанной точки, а в качестве максимального ускорения рассматривалась линейная оценка ускорения движения центра масс пластины, равная половине ускорения концевой точке. В результате такого подхода оценка микроускорений составила:

$$w_{\max} = \frac{M(\Phi_\tau)}{I} R \approx 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$$

где $I = 16100 \text{ кг м}^2$, а $R=1 \text{ м}$ – радиус-вектор точки размещения технологического оборудования относительно центра масс КА [1].

Таким образом, в случае пластины можно сделать вывод о пренебрежимой малости микроускорений, возникающих из-за изменения длины ПСБ, по сравнению с микроускорениями, вызываемыми моментом от сил инерции из-за изменения формы ПСБ при тепловом ударе. Также можно констатировать факт о непригодности модели ПСБ в виде балки Эйлера-Бернулли для анализа их температурных деформаций.

Нелинейная оценка. Чтобы убедиться в правильности сделанных выводов, следует построить нелинейную модель распределения линейных ускорений точек пластины. Для сравнения с полученной линейной оценкой достаточно учесть первую форму и воспользоваться упрощением [12], где первую форму предлагается оценить балочными функциями:

$$\varphi_i(x) = C \left[U(k_i x) - \frac{V(k_i l)}{S(k_i l)} V(k_i x) \right],$$

где U, V, S – функции Крылова, $k_i l$ – i -й корень уравнения $ch(kl)\cos(kl) + 1 = 0$, а x – координата, отсчитываемая от заделки вдоль пластины.

Константа C определяется, исходя из результатов численного моделирования. Согласно [11], максимальное отклонение концевой точки составляло 16 мм при длине ПСБ, равной 5 м [1]. Тогда, ограничиваясь только первой формой, имеем:

$$C = \frac{\varphi_1(l) S(k_1 l)}{U(k_1 l) S(k_1 l) - V^2(k_1 l)} \cong 0,016 \text{ м}$$

Используя разложение [12]:

$$y(x, t) = \varphi(x) \sin(pt + \alpha),$$

по-прежнему рассматривая только первую форму, и пренебрегая изменением длины пластины при колебаниях ($\dot{x} = \ddot{x} = 0$), получим оценку линейных ускорений, взяв вторую полную производную по времени:

$$\ddot{y}(x, t) = -\varphi_1(x) \sin(p_1 t + \alpha) p_1^2,$$

где p_1 – частота первого тона, которая в первом приближении может быть оценена [12]:

$$p_1 = \frac{3,52}{l^2} \sqrt{\frac{Dg}{\rho h}}$$

где ρ – плотность материала, h – толщина пластины, а D – цилиндрическая жёсткость на изгиб.

Соответственно оценка максимальных ускорений выглядит так:

$$\ddot{y}_{\max} = \varphi_1(x) p_1^2$$

Таким образом, вместо линейной оценки момента от сил инерции будет справедливо следующее выражение:

$$M(\Phi_\tau) = \gamma p_1^2 \int_0^l x^2 \varphi_1(x) dx$$

Численные расчёты проводились в математическом пакете «Mathcad» v. 14 и показали, что для тех же параметров, для которых рассчитывалась линейная оценка, значение момента от сил инерции существенно выше и составляет $M(\Phi_\tau) \cong 1,3H \cdot m$, а создаваемые максимальные микроускорения можно оценить как:

$$w_{\max} = \frac{M(\Phi_\tau)}{I} R \approx 8,2 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$$

Выводы: собранные в работе результаты моделирования можно представить в виде сравнительной диаграммы (рис. 4).

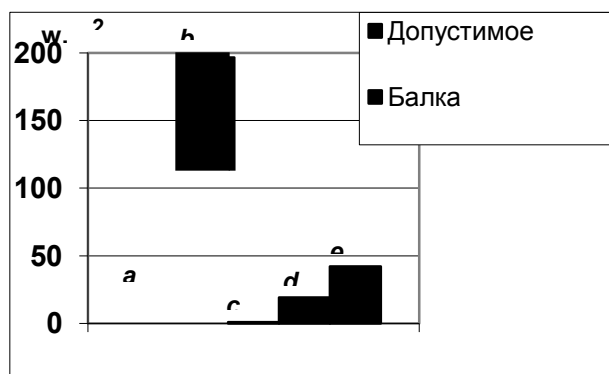


Рис. 4. Сравнительная диаграмма оценок микроускорений, полученных с использованием разных моделей, с их допустимым значением

На рис. 4 слева направо показаны следующие значения: a – допустимое значение микроускорений для проекта технологической космической лаборатории «НИКА-Т»; b – оценка, полученная с помощью балочной модели ПСБ; c – оценка микроускорений от изменения длины пластины при тепловом ударе; d – линейная оценка микроускорений от изменения

формы пластины при тепловом ударе; f – нелинейная оценка микроускорений от изменения формы пластины при тепловом ударе.

Проведенные исследования показывают, что, в отличие от задачи оценки микроускорений от работы двигателей ориентации и управления движением КА [1], модель балки Эйлера-Бернулли в качестве ПСБ не подходит даже для самой грубой оценки температурных деформаций больших упругих элементов КА, возникающих при тепловом ударе. Это связано, прежде всего, с неверным представлением о распределении энергии деформации, которая формирует дополнительный импульс при изменении длины упругого элемента, передающийся корпусу КА и создающий поле микроускорений. Этот недостаток усугубляется тем, что упругий элемент из-за его одномерного представления не излучает энергию при нагреве его Солнцем. В результате получается неадекватно завышенная оценка, пользоваться которой на практике не представляется возможным.

Моделирование ПСБ пластиной показало более сложный характер явления, чем можно было представить балочной моделью. Выявлена пренебрежимая малость микроускорений, возникающих при изменении длины пластин, по сравнению с микроускорениями, возникающими при изменении её формы. Показано, что анализ движения концевой точки пластины, лежащей на её краю, противоположному заделке, даёт существенно заниженную линейную оценку, которой нельзя пользоваться на практике. В случае возникновения спорных ситуаций следует рассмотреть более сложную нелинейную оценку линейных ускорений точек пластины, чем показано в работе, и построить более точную картину поля микроускорений.

Расчёты, выполненные для проекта космической лаборатории «НИКА-Т», свидетельствуют от актуальности учёта явления теплового удара при проверке условий выполнения микрогравитационного штудия, способствующих успешной реализации гравитационно-чувствительных технологических процессов. При определённых обстоятельствах тепловой удар в случае КА типа «НИКА-Т» способен нарушить эти условия, а в совокупности с другими факторами такое нарушения является ещё более вероятным. Здесь также стоит отметить, что новый проект космической лаборатории типа «ОКА-Т» предусматривает более жёсткие требования к микроускорениям, чем «НИКА-Т» [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Седельников, А.В.* Микроускорения: от осознания до фрактальной модели / *А.В. Седельников*. – М.: РАН. Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий, 2010. 106 с.
2. *Бабичева, Д.С.* Задача о температурных колебаниях больших упругих элементов космической лаборатории / *Д.С. Бабичева, М.И. Казарина, А.А. Серпухова, Е.В. Кожевникова* // Современные наукоемкие технологии. 2008. № 8. С. 119-120.
3. *Седельников, А.В.* Моделирование движения упругого космического аппарата в целях оценки микроускорений / *А.В. Седельников, А.А. Серпухова* // Известия вузов. Авиационная техника. 2009. № 4. С. 71-72.
4. *Седельников, А.В.* Фрактальная модель микроускорений: физический аспект / *А.В. Седельников, А.А. Серпухова* // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11, №5. С. 185-191.
5. *Сазонов, В.В.* Обработка данных измерений угловой скорости и микроускорения, полученных на спутнике *Фотон 12* / *В.В. Сазонов* // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2008. № 62.
6. *Beuselinck, T.* Reconstruction of spacecraft FOTON M-2 attitude motion by acceleration measurements / *T. Beuselinck, C. Van Bavinchove, V.V. Sazonov, S.Yu. Chebikov* // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2008. № 57.
7. *Седельников, А.В.* Космический аппарат «Спот-4» как пример успешной борьбы с квазистатической компонентой микроускорений / *А.В. Седельников, Д.П. Подлеснова* // Известия вузов. Северо-кавказский регион. Естественные науки. 2007. № 4 (140). С. 44-46.
8. *Елисеев, В.В.* Механика упругих тел / *В.В. Елисеев*. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 341 с.
9. *Седельников, А.В.* О влиянии температурных деформаций упругих элементов на динамику движения космического аппарата / *А.В. Седельников, М.И. Казарина* // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, №4. С. 321-324.
10. *Седельников, А.В.* Влияние температурных деформаций упругих элементов на динамику КА типа «НИКА-Т» / *А.В. Седельников, М.И. Казарина* // Вестник МАИ. 2011. Т.18. №2. С. 47-51.
11. *Седельников, А.В.* Оценка влияния температурных деформаций упругих элементов космической лаборатории на поле микроускорений ее внутренней среды / *А.В. Седельников, В.В. Юдинцев* // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13, № 1(2). С. 344-346.
12. *Бабаков, И.М.* Теория колебаний / *И.М. Бабаков*. –М: Дрофа, 2004. 341 с.

ABOUT THE ACCOUNTING OF INFLUENCE OF TEMPERATURE DEFORMATIONS OF LARGE ELASTIC STRUCTURAL ELEMENTS OF THE SPACECRAFT AT MICROACCELERATIONS ESTIMATIONS

© 2012 A.V. Sedelnikov

Power and Transport Institute of Samara State Aerospace University

In work the problem of the accounting the influence of temperature deformations effect of large elastic elements of space laboratory at estimation of microaccelerations arising in its internal medium is analyzed. Various gravitational sensing processes, and also types of spacecrafts are considered. Practical recommendations about the accounting of influence are made.

Key words: *temperature deformations, large elastic elements, space laboratory, microaccelerations*