

## О ВЛИЯНИИ ТЕНЕВОГО УЧАСТКА ОРБИТЫ НА ДЕМПФИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

© 2012 А. И. Белоусов, А. В. Седельников

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Рассматривается влияние теневого участка орбиты космической лаборатории, предназначенной для реализации гравитационно-чувствительных процессов, на логарифмический декремент собственных колебаний солнечных панелей. Для численного моделирования используются орбиты высотой от 200 до 600 км. Предполагается, что каркас панелей выполнен из магниевых сплавов МА2. Полученные результаты могут быть использованы при разработке космической лаборатории специализированного технологического назначения.

*Космическая лаборатория, логарифмический декремент колебаний, поле микроускорений.*

Исследование поля микроускорений внутренней среды космической лаборатории является актуальной задачей современного космического материаловедения. Разработанные гравитационно-чувствительные процессы требуют для своей успешной реализации низкого уровня микроускорений вплоть до  $1 \text{ мкм/с}^2$  [1]. Получение кратковременного поля микроускорений с модулем примерно  $10 \text{ мкм/с}^2$  возможно в специализированных башнях, которыми оборудованы ведущие мировые центры по изучению микроускорений, такие как National Center for Microgravity Research (США), Microgravity laboratory «Drop Tower Bremen» (ZARM, Германия), Japan Microgravity Center (JAMIC, Япония), National Microgravity Laboratory (Китай) и др. [2]. Однако самым перспективным путём развития новых космических технологий сегодня является создание специализированных космических лабораторий технологического назначения, во внутренней среде которых возможно создание низкого уровня микроускорений в длительный промежуток времени.

Проекты отечественных космических лабораторий нацелены на реализацию уровня до  $20 \text{ мкм/с}^2$  («НИКА-Т», середина-конец 80-х годов прошлого века) и до  $10 \text{ мкм/с}^2$  («ОКА-Т», планируемый запуск в 2015 году) [3]. Разрабатываемые специализированные устройства дополнительной виброизоляции, такие как Microgravity Isolation Mount [4], ВЗП-1К [5], Микрогравитационная платформа [6], Microgravity Vibration Isolation Subsystem [7] позволяют в несколько раз

снизить уровень микроускорений в защищённой зоне. Исследования, проведённые на борту КА серии «Фотон», показывают достижимость таких низких значений модуля микроускорений [8]. Несмотря на то, что КА серии «Фотон» лишён больших упругих элементов, имеет срок активного существования, не превышающий 18 суток [3], и не может служить прообразом будущего космического мини-завода, в настоящее время готовится к запуску КА «Фотон-М4», конструктивно-компоновочная схема которого содержит две панели солнечных батарей (ПСБ), а срок активного существования увеличен до 90 суток. Таким образом, низкий уровень микроускорений во внутренней среде специализированной космической лаборатории в сочетании с дополнительными устройствами виброизоляции на данном этапе развития является единственным путём удовлетворения требований гравитационно-чувствительных процессов для их успешной реализации.

Особенностью высокоэнерговооружённых космических лабораторий, в отличие от КА серии «Фотон», допускающих неуправляемое движение по орбите, является требование к ориентации ПСБ на Солнце. При разгрузке кинетического момента гироскопических устройств используются двигатели системы ориентации и управления движением (УРД). В этой ситуации значительный вклад в поле микроускорений вносят собственные колебания ПСБ, которые возбуждаются при включении УРД [3]. Поэтому задача исследования влияния параметров ко-

лебаний ПСБ на создаваемые микроускорения является актуальной, что подтверждают отечественные и зарубежные работы [9-11].

В случае отсутствия теневого участка орбиты температура ПСБ изменяется незначительно, поэтому логарифмический декремент колебаний можно считать постоян-

ным [12]. При периодическом погружении КА в тень Земли возможны перепады температур в несколько сотен градусов. На рис. 1 показана зависимость логарифмического декремента различных материалов от температуры [13].

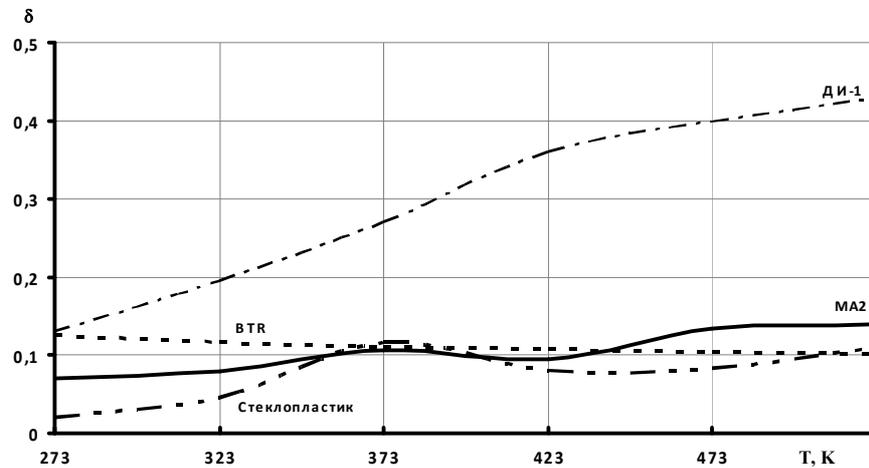


Рис. 1. Зависимость логарифмического декремента колебаний от температуры

Как видно из рис. 1, логарифмический декремент различных материалов ведёт себя с ростом температуры по-разному. Поэтому получение практических результатов для конкретного КА возможно в том случае, когда известен материал, из которого будет изготовлен каркас ПСБ. В данной работе за основу взят проект технологической лаборатории «НИКА-Т», каркас ПСБ которой планировалось изготовить из МА2 [14]. При самом неблагоприятном нулевом наклонении орбиты, когда теневой участок будет максимальным, а также критическом наклонении приблизительно  $56^\circ$ , когда теневой участок отсутствует, зависимость температуры для орбиты КА типа «НИКА-Т» [3] при начальной температуре  $0^\circ\text{C}$  представлена на рис. 2. Как видно из рис. 2, для нулевого наклонения орбиты характерен большой разброс температур, поэтому считать логарифмический декремент постоянным нельзя даже в приближённых оценках.

Исследования показывают, что наличие теневого участка приводит к появлению микроускорений, связанных с тепловым ударом при погружении и выходе КА из тени Земли. Такие микроускорения для КА типа «НИКА-Т» могут составлять до  $19 \text{ мкм/с}^2$  [14], что является допустимым для данного проекта.

Логарифмический декремент колебаний в силу случайности включения УРД также является случайной величиной, что существенно осложняет оценку микроускорений. В этом случае микроускорения являются случайным процессом и могут быть представлены разложением Пугачёва [15]:

$$W(t) = MW + \frac{R}{I} \sum_{i=1}^{\infty} (M_{0i} - \bar{M}_{0i}) e^{-\beta_i t} \cos(\omega_i t),$$

где  $MW$  – математическое ожидание  $W(t)$ ;  $M_{0i}$  и  $\bar{M}_{0i}$  – соответственно момент, возникающий в заделке упругого элемента в корпус космического аппарата (КА) от собственных колебаний упругого элемента по  $i$ -й собственной форме и его среднее значение;  $R$  – радиус-вектор точки расположения технологического оборудования относительно центра масс;  $I$  – момент инерции КА;  $\omega_i$  – собственная частота колебаний  $i$ -го тона;  $\beta_i$  – коэффициент затухания, который определяется формулой:

$$\beta_i = \frac{\delta_i \omega_i}{2\pi} = \delta_i f_i,$$

где  $\delta_i$  – логарифмический декремент, соответствующий  $i$ -й собственной форме, а  $f_i$  – собственная циклическая частота колебаний  $i$ -го тона.

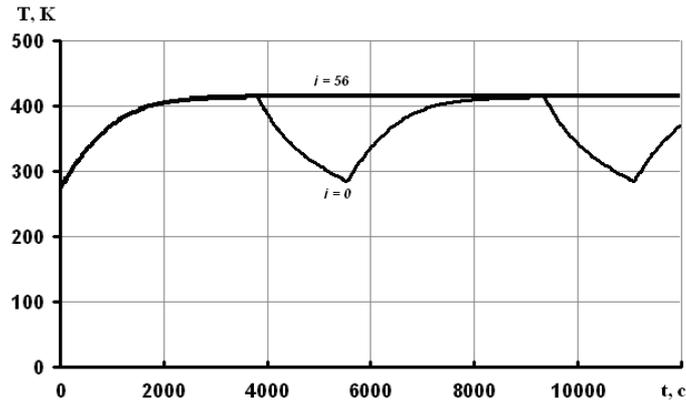


Рис. 2. Зависимость температуры ПСБ от времени при движении КА по орбите

Микроускорения, порождаемые собственными колебаниями больших упругих элементов, не являются постоянными во времени и уменьшаются за счёт демпфирования. Благоприятные условия для реализации гравитационно-чувствительных процессов [3]:

$$\begin{cases} |\ddot{w}| \leq 10^{-6} g & \text{для } f_u < 0,1 \text{ Гц;} \\ |\ddot{w}| \leq 10^{-5} f_u g & \text{для } 0,1 \leq f_u \leq 100 \text{ Гц;} \\ |\ddot{w}| \leq 10^{-3} g & \text{для } f_u > 100 \text{ Гц,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, а  $f_u$  – циклическая частота колебаний, наступают не сразу после выключения УРД, а спустя некоторый промежуток времени. Случайность логарифмического декремента приводит к тому, что величина этого промежутка также является случайной. На рис. 3 представлена оценка максимального времени ожидания в зависимости от наклона орбиты КА типа «НИКА-Т».

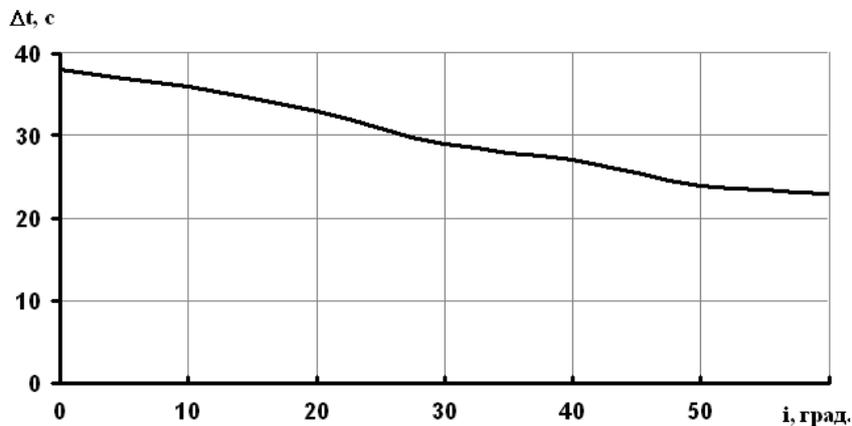


Рис. 3. Оценка максимального времени ожидания благоприятных условий после выключения УРД от наклона орбиты КА типа «НИКА-Т»

При этом закон распределения времени ожидания будет полностью соответствовать закону распределения самого логарифмического декремента. Поскольку логарифмический декремент и динамика его изменения зависят от выбора материала каркаса ПСБ, то и время ожидания для различных материалов будет существенно отличаться. Следует заметить, что для некоторых материалов логарифмический декремент уменьшает-

ся с увеличением температуры (рис. 1), поэтому теневой участок орбиты может оказать позитивное воздействие на время ожидания.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Теневой участок орбиты оказывает негативное влияние на уровень микроускорений внутренней среды космической лаборатории в случае, если каркас ПСБ выполнен из металлических сплавов, например МА2

для КА типа «НИКА-Т». В этой ситуации из-за температурного удара появляются дополнительные микроускорения (до  $19 \text{ мкм/с}^2$  для КА типа «НИКА-Т»), связанные с температурными деформациями ПСБ. С другой стороны, снижение температуры ПСБ при погружении КА в тень Земли уменьшает логарифмический декремент металлических сплавов, что приводит к увеличению максимального времени ожидания благоприятных условий для реализации гравитационно-чувствительных технологических процессов.

2. На современном этапе развития космического материаловедения в условиях формирования опытно-серийного производства в космосе и создания прообраза космического мини-завода данная проблема может быть решена выбором наклона орбиты КА, не позволяющего ему погружаться в тень Земли. Так для проекта «НИКА-Т» предполагались наклоны орбит  $81,4^\circ$  и  $97^\circ$  [3] при критическом наклоне  $56^\circ$ . Однако по мере развития космического производства, в целях безопасности полёта мини-заводов, возможно придётся рассматривать орбиты с теневыми участками.

3. Используя современные конструкционные материалы и покрытия, влияющие на логарифмический декремент, можно добиться ситуации, когда вместо негативного влияния на уровень микроускорений теневой участок орбиты будет способствовать их снижению. Хотя его наличие и будет по-прежнему означать перерывы в выработке электроэнергии ПСБ, благоприятные условия протекания гравитационно-чувствительных процессов при этом нарушаться не будут.

### **Библиографический список**

1. Лобыкин, А.А. Методы улучшения микрогравитационной обстановки на борту автоматического космического аппарата, предназначенного для микрогравитационных исследований [Текст] / А.А. Лобыкин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 2. – С. 84–91.

2. Zhang X., Yuan L., Wu W., Tian L., Yao K. Some key technics of drop tower experiment device of National Microgravity Laboratory (China) (NMLC) // Science in China Ser. E

Engineering & Materials Science. – 2005. – Vol. 48. – № 3. – pp. 305-316.

3. Седелников, А.В. Проблема микроускорений: от осознания до фрактальной модели. [Текст] / А.В. Седелников // Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий – М.: РАН. 2010.

4. Jones D.I., Owens A.R., Owen R.G. A microgravity isolation mount // Acta Astronautica. – 1987. – Vol. 15. – № 6-7. – pp. 441-448.

5. Результаты лётно-космических испытаний виброзащитной платформы ВЗП-1К [Текст] / В.Л. Левтов., В.В. Романов, А.И. Иванов [и др.] // Космические исследования. – 2001. – Т. 39. – № 2. – С. 136-147.

6. Абрашкин, В.И. Выбор параметров средств контроля и компенсации микроускорений низкоорбитальной космической микрогравитационной платформы [Текст] / В.И. Абрашкин, Ю.Я. Пузин // Полет. – 2011. – № 2. – С. 25-35.

7. Bushnell G.S., Fialho I.J., McDavid T., Allen J.L., Quraishi N. Ground and on-orbit command and data handling architectures for the active rack isolation system microgravity flight experiment // Acta Astronautica. – 2003. – Vol. 53. – № 4-10. – pp. 309-316.

8. Полежаев, В.И. Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы [Текст] / В.И. Полежаев, В.В. Сазонов // Препринт ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН. – 2009. – № 898.

9. Zhang L., Chen Y. The on-orbit thermal-structural analysis of the spacecraft component using MSC/NASTRAN // MSC 1999 Aerospace Users' Conference Proceedings. – 1999. – P. 1-8.

10. Narasimha M., Appu Kuttan K.K., Ravikiran K. Thermally induced vibration of a simply supported beam using finite element method // International journal of engineering science and technology. – 2010. – Vol. 2(12). – P. 7874-7879.

11. Седелников, А.В. Влияние температурных деформаций упругих элементов на динамику КА типа «НИКА-Т» [Текст] / А.В. Седелников, М.И. Казарина // Вестн. МАИ. – 2011. – Т. 18. – № 2. – С. 47-51.

12. Белоусов, А.И. О законе распределения логарифмического декремента при моделировании микроускорений [Текст] / А.И. Белоусов, А.В. Седелников // Изв. СИЦ РАН. – 2012. – Т. 14. – № 1(2). – С. 461-463.

13. Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем [Текст] / под ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Наукова Думка, 1966.

14. Седельников, А.В. Оценка влияния температурных деформаций упругих элементов космической лаборатории на поле микроускорений её внутренней среды [Текст] / А.В. Седельников, В.В. Юдинцев // Извест-

тия СНЦ РАН. – 2011. – Т. 13. – № 1(2). – С. 344-346.

15. Седельников, А.В. Вероятностная модель микроускорений с постоянным логарифмическим декрементом [Текст] / А.В. Седельников // Изв. СНЦ РАН. – 2011. – Т. 13. – № 4(4). – С. 1022-1026.

## EFFECT OF SHADY AREAS ORBIT OF DAMPING NATURAL OSCILLATIONS OF SOLAR PANELS

© 2012 A. I. Belousov, A. V. Sedelnikov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

The paper discusses the impact of the shadow area of the orbit space laboratory, designed to implement the gravity-sensitive processes, the logarithmic decrement of natural oscillations of solar panels. For the numerical simulations are used orbit ranging from 200 to 600 km. It is assumed that the panel frame is made of magnesium alloy MA2. The results can be used when designing a special laboratory space technology applications.

*Space laboratory, logarithmic decrement, microaccelerations field.*

### Информация об авторах

**Беловусов Анатолий Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [a\\_belousov@mail.ru](mailto:a_belousov@mail.ru). Область научных интересов: разработка и создание демпфирующих устройств.

**Седельников Андрей Валерьевич**, доцент, кандидат физико-математических наук, докторант кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [axe\\_backdraft@inbox.ru](mailto:axe_backdraft@inbox.ru). Область научных интересов: моделирование поля микроускорений внутренней среды КА.

**Belousov Anatolii Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor of the department of design of aircraft engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [a\\_belousov@mail.ru](mailto:a_belousov@mail.ru). Area of research: design and development of damping devices.

**Sedelnikov Andrew Valerievich**, associate professor, candidate of physical and mathematical sciences, doctorant of the department of design of aircraft engines Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [axe\\_backdraft@inbox.ru](mailto:axe_backdraft@inbox.ru). Area of research: Modeling microaccelerations field environment inside the spacecraft.