

## **АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ТЕНЕВЫМ УЧАСТКОМ ОРБИТЫ**

### **Введение**

Космические аппараты (КА) технологического назначения (ТН) предполагают обеспечение низкого уровня микроускорений в рабочей зоне. Это связано с особенностями реализации гравитационно-чувствительных процессов на борту малого космического аппарата (МКА) [1–6]. Теневой участок орбиты МКА обуславливает периодическое погружение в тень и выход из неё. С этим связано явление температурного удара, которое слабо изучено, поскольку для КА среднего класса практически не оказывает влияния на его движение [7]. Для МКА отношение массы больших упругих элементов и общей массы КА существенно выше, чем для КА среднего класса. В связи с этим для выполнения ограничений на микроускорения необходимо учитывать не только собственные колебания больших упругих элементов, но и последствие температурного удара [7]. Существенность влияния температурного удара на динамику орбитального движения МКА отмечается в работах [8–10]. Для функционирования МКА в космическом материаловедении и реализации гравитационно-чувствительных процессов необходима разработка эффективных алгоритмов управления движением МКА. Широта использования исполнительных органов [11, 12] определила разработку законов управления при наличии постоянной и переменной тяги. Для решения проблемы рассмотрены четыре вопроса:

- решение задачи отыскания функции, описывающей температурное поле больших упругих элементов в процессе температурного удара;
- исследование динамики больших упругих элементов в результате температурного удара, которая обусловлена конечной скоростью прогрева больших упругих элементов, вызывающем появление градиента температур внутри элементов;
- рассмотрение динамики корпуса МКА, вызванной движением больших упругих элементов из-за температурного удара;
- формирование алгоритмов управления, подразумевающих законы функционирования исполнительных органов системы ориентации и управления движением МКА, которые минимизируют возникающие из-за температурного удара микроускорения.

В работе остановимся на формировании задачи теплопроводности и алгоритмов управления.

### **Задача теплопроводности**

В качестве больших упругих элементов рассматриваются панели солнечных батарей (ПСБ). Это объясняется тем, что большинство гравитационно-чувствительных процессов являются энергоёмкими и требуют высокой энергооборужённости КА. ПСБ на сегодняшний день являются самым эффективным источником электроэнергии в околоземном космическом пространстве. Для эффективного использования ПСБ их необходимо ориентировать на Солнце так, чтобы плоскость панели была перпендикулярна потоку солнечной энергии. Поэтому явление температурного удара для ПСБ вызовет самые значимые возмущения по сравнению с любыми другими конструктивными элементами. Введём упрощающие предположения для построения базовой модели температурного поля.

1 В качестве первого приближения для моделирования температурного поля используем модель однородной ортотропной пластины с жёстко заделанным одним краем и тремя свободными краями.

2 Рассмотрим предельный случай, при котором направление подающего потока солнечного излучения перпендикулярно поверхности пластины.

3 Считаем поток солнечного излучения равномерным и стационарным:

$$Q(x_h, y_h, t) = 1400 \left[ \frac{W}{m^2} \right],$$

где  $(x_h, y_h)$  – точки граничной поверхности пластины, на которую падает излучение.

4 Собственные колебания ПСБ не влияют на их температурное поле.

5 Все свойства ПСБ предполагаются однородными и одинаковыми.

6 Для базовой модели справедлив закон Фурье.

7 Начальное поле распределения температур в ПСБ является однородным.

8 Толщина ПСБ пренебрежимо мала по сравнению с её длиной и шириной.

### **Формирование алгоритмов управления движением МКА.**

Фактически ставится задача минимизации целевой функции:

$$|N_{x=0}(t) - F_c| \rightarrow \min_{F_c \in P_0}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – множество допустимых решений, которое определяется как характеристиками исполнительного органа, так и законом его управления.

Предположим, что в процессе управления можно реализовать постоянную тягу. Примером может служить электротермический микродвигатель [12, 13]. Исследования [12, 14] показывают, что выход электротермического двигателя на штатный режим

функционирования сопровождается переходным участком. В рамках этого участка тяга двигателя возрастает, достигая целевых значений. В данной работе рассмотрим случай, когда тяга двигателя постоянна на всём участке управления, т.е. в выражении для целевой функции (2)  $F_c = const$ . Воспользуемся методом наименьших квадратов, имея в виду, что при выполнении условия (1) будет справедливо и следующее условие:

$$U = \int_{t_0}^{t_1} (N_{x=0}(t) - F_c)^2 dt \rightarrow \min_{F_c \in P_0}, \quad (2)$$

где  $t_0$  – момент времени включения исполнительного органа системы ориентации и управления движением, а  $t_1$  – момент времени его включения.

Запишем условия минимума подинтегральной функции, исходя из постоянства тяги:

$$\frac{\partial U}{\partial F_c} = \frac{\partial}{\partial F_c} \left[ \int_{t_0}^{t_1} (N_{x=0}(t) - F_c)^2 dt \right] = -2 \int_{t_0}^{t_1} (N_{x=0}(t) - F_c) dt = 0. \quad (3)$$

Из (3) вытекает следующее выражение для постоянной величины тяги исполнительного органа системы ориентации и управления движением:

$$F_c = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} N_{x=0}(t) dt. \quad (4)$$

При этом в выражении (4) остаются два параметра:  $t_0$  и  $t_1$ . Поэтому оптимальный с точки зрения минимума микроускорений закон управления подразумевает не только выбор тяги, но моментов включения и выключения исполнительного органа. Данную задачу следует решать итерационно.

1 Выбираем  $t_0(0) = 0$  и  $t_1(0)$  таким, что в этот момент  $N_{x=0}(t_1) \leq 0,1 \cdot \max_{t \geq 0} (N_{x=0}(t))$ .

2 Вычисляем  $F_c(0)$  по формуле (4).

3 Определяем промежуток времени  $[\min\{t_0(0), t_0(1)\}; \max\{t_0(0), t_0(1)\}]$ , для которого  $|N_{x=0}(t) - F_c(0)| \geq N_{x=0}(t)$  и выбираем  $t_0(1)$  в качестве нового значения момента включения исполнительного органа системы ориентации и управления движением.

4 Определяем промежуток времени  $[\min\{t_1(0), t_1(1)\}; \max\{t_1(0), t_1(1)\}]$ , для которого  $|N_{x=0}(t) - F_c(0)| \geq N_{x=0}(t)$  и выбираем  $t_1(1)$  в качестве нового значения момента выключения исполнительного органа системы ориентации и управления движением.

5 Вычисляем  $F_c(1)$  по формуле (4).

6 Сравниваем полученные результаты с требуемой точностью. Если  $|F_c(i) - F_c(i-1)| \leq \varepsilon_p$ , то оптимальное с точки зрения минимума микроускорений постоянное

значение тяги и моменты времени включения и выключения исполнительного органа считаются найденными. При невыполнении условия точности пункты 3–6 следует повторять до тех пор, пока оно не удовлетворится. В рассматриваемом случае понадобилось четыре итерации (табл. 2). Оценка микроускорений с управлением и без управления приведена на рис. 1.

Таблица 2 – Определение оптимальной с точки зрения минимальных значений микроускорений тяги исполнительного органа

Номер итерации	$t_0, c$	$t_1, c$	$F_c, мН$
1	0	10	203,4
2	0,19	7,90	240,8
3	0,23	7,40	250,6
4	0,24	7,33	255,0

Как видно из рис. 1, благодаря построенному алгоритму управления удалось в два раза снизить максимальный уровень микроускорений, вызванных температурным ударом.

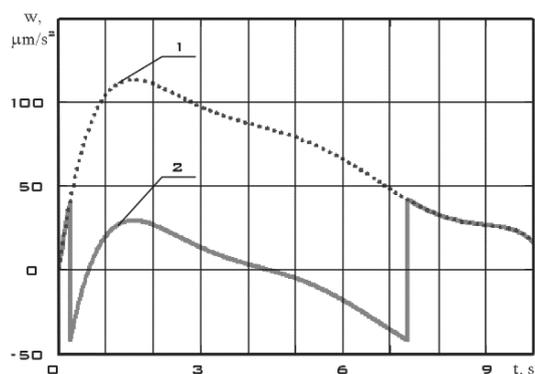


Рис. 1 – Динамика модуля микроускорений:  
1 – без управления; 2 – с постоянной тягой

Проведённые исследования наглядно демонстрируют:

- актуальность проблемы температурного удара с точки зрения обеспечения благоприятных условий для реализации гравитационно-чувствительных процессов на борту МКА ТН (уровень микроускорений на порядок превышает допустимый для КА ТН ОКА-Т);

- возможность эффективной борьбы с влиянием температурного удара на уровень микроускорений (исполнительным органом с постоянной тягой удалось снизить возникающие микроускорения более чем в 2 раза);

- ограниченность возможностей исполнительного органа с постоянной тягой по контролю микроускорений (превышение допустимого уровня по микроускорениям для КА ТН ОКА-Т более чем в 5 раз с учётом управления).

С одной стороны, постоянная тяга лишь отчасти сглаживает последствия удара. Реализация сложного закона работы реального исполнительного органа системы ориентации и управления движением затруднительна. С практической стороны необходимо рассмотреть ситуацию, когда исполнительный орган может выдавать постоянную тягу, либо тяга может изменяться по линейному закону. В функционале (4) тяга изменяется по линейному закону, построим кусочно-линейный закон управления с двумя участками: возрастание и убывание реакции. Закон изменения тяги исполнительного органа системы ориентации и управления движением имеет вид:

$$F_c = F't + F_0, \quad (5)$$

где  $F'$  и  $F_0$  – искомые параметры управления.

Согласно методу наименьших квадратов с учётом (5):

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial F'} = \frac{\partial}{\partial F'} \left[ \int_{t_0}^{t_1} (N_{x=0}(t) - F't - F_0)^2 dt \right] = -2 \int_{t_0}^{t_1} (N_{x=0}(t) - F't - F_0) t dt = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial F_0} = \frac{\partial}{\partial F_0} \left[ \int_{t_0}^{t_1} (N_{x=0}(t) - F't - F_0)^2 dt \right] = -2 \int_{t_0}^{t_1} (N_{x=0}(t) - F't - F_0) dt = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Из (6) можно получить выражения для искомых параметров:

$$\begin{cases} F' = \frac{\frac{3}{t_1^3 - t_0^3} \left( \int_{t_0}^{t_1} N_{x=0}(t) t dt - \frac{t_1 + t_0}{2} \int_{t_0}^{t_1} N_{x=0}(t) dt \right)}{1 - \frac{3}{4} \frac{(t_1 + t_0)^2}{t_1^2 + t_1 t_0 + t_0^2}}; \\ F_0 = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} N_{x=0}(t) dt - \frac{F'}{2} (t_1 + t_0). \end{cases} \quad (7)$$

На рис. 2 представлена динамика модуля микроускорений с учётом управления по линейному закону (7). Результаты моделирования представлены в таб. 3.

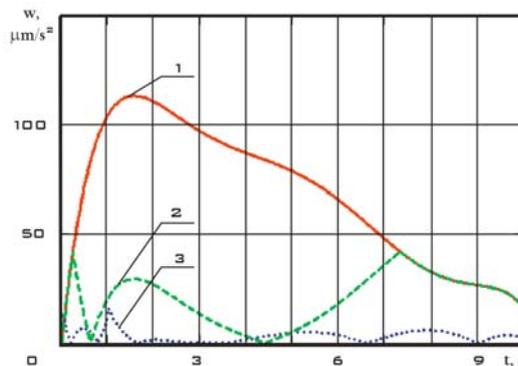


Рис. 2. Модуль микроускорений от температурного удара:  
1 – без управления; 2 – с постоянной тяги;  
3 – с тягой, изменяющейся по линейному закону

Таблица 3 – Основные параметры управления и максимальные от температурного удара микроускорения при различных режимах управления

Режим	Число участков	Тяга исполнительного органа, мН				Максимальные микроускорения, мкм/с <sup>2</sup>
		[0; 0,24]	[0,24; 1]	[1; 7,33]	[7,33; 15]	
Без управления	1	0				113,5
Постоянная тяга	4	0	255,0	255,0	0	42,0
Линейное управление	2	0,30390t – 0,25667		– 0,03535 t + 0,43369		16,2

### Заключение и выводы

Таким образом, проблема температурного удара является очень актуальной для МКА ТН с большими упругими элементами конструкции. Разработанные в данной работе алгоритмы управления позволяют существенно снизить модуль микроускорений, возникающих от продольных возмущений, которые вызваны температурным ударом.

### Библиографический список

1. Lyubimova, T. Effects of Non-Uniform Temperature of the Walls on the Soret Experiment [Текст]/ T. Lyubimova, N. Zubova, V. Shevtsova, // Microgravity Science and Technology. – 2019. – Vol. 31, № 1. – P. 1–11.
2. Zemskov, V.S. The influence of arrangement of growth setups onboard a spacecraft on microgravity conditions of experiments: an example of floating zone melting of insb:te onboard the FOTON-3 satellite [Текст]/ V.S. Zemskov, M.R. Raukhan, V.P. Shalimov, M.V. Volkov, A.V. Egorov, A.S. Senchenkov, I.G. Filatov, A.I. Noskov, S.M. Shatokhin//Cosmic Research. – 2004. – Vol. 42, № 2. – P. 137–147.
3. Yasnou, V. Role of a layer of porous medium in the thermodiffusion dynamics of a liquid mixture [Текст]/ V. Yasnou, A. Mialdun, D. Melnikov, V. Shevtsova//International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 143. – [118480](#).
4. Gaponenko, Y. Near-Critical Behavior of Fick Diffusion Coefficient in Taylor Dispersion Experiments [Текст] / Y. Gaponenko, V. Gousselnikov, C.I.A.V. Santos, V. Shevtsova// Microgravity Science and Technology. – 2019. – Vol. 31, № 5. – P. 475–486.
5. Mingalev, S. Simulation of Primary Film Atomization in Prefilming Air-assisted Atomizer Using Volume-of-Fluid Method [Текст]/ S. Mingalev, A. Inozemtsev, L. Gomzikov, A. Sipatov, T. Abramchuk //Microgravity Science and Technology. – 2020. – Vol. 32.
6. Sedelnikov, A.V. Fast Analysis of Onboard Measurements of the Earth Magnetic Field for the Purpose of Microaccelerations Decrement on Board of the «AIST» Small Spacecraft During its Uncontrolled Orbital Flight [Текст]/ A.V. Sedelnikov // International Review of Aerospace Engineering. – 2018. – Vol. 11. № 2. – P. 76–83.

7. Sedelnikov, A.V. Modeling the effect of temperature deformations of large elements on the dynamics of the orbital motion of a small spacecraft [Текст]/A.V. Sedelnikov, V.S. Rodina, D.I. Orlov//Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368. – 042074.
8. Narasimha, M. Thermally induced vibration of a simply supported beam using finite element method [Текст]/ M. Narasimha, K.K. Appu Kuttan, K. Ravikiran//International journal of engineering science and technology. – 2010. – Vol. 2(12). – P. 7874-7879.
9. Shen, Z. Thermal shock induced dynamics of a spacecraft with a flexible deploying boom[Текст]/Z. Shen, H. Li, X. Liu//Acta Astronautica. – 2017. – Vol. 141. –P. 123 – 131.
10. Chamberlain, M.K. On-Orbit Structural Dynamics Performance of the Roll-Out Solar Array[Текст]/ M.K. Chamberlain, S.H. Kiefer, J.A. Banik// Air Force Research Laboratory, Space Vehicle Directorate. – 2018. – Vol. 1942. – 15.2514.
11. Blinov, V.N. Experimental investigations of nitrogen arcjet thruster with control unit for small spacecrafts [Текст]/V.N. Blinov, I.S. Vavilov, V.V. Fedynin, V.V. Shalay, P.S. Yachmenev //Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1210. – 012019.
12. Gorozhankina, A.S. Problems of development motion control algorithms for a small spacecraft for technological purpose taking into account temperature deformations of solar panels[Текст]/ A.S. Gorozhankina, D.I. Orlov, D.A. Belousova// Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1546. – 012015.
13. Blinov, V.N. Study of power-to-weight ratio of the electrothermal propulsion system of nanosatellite maneuvering satellite platform [Текст]/V.N. Blinov, I.S. Vavilov, V.V. Kositsin, A.I. Lukyanchik, V.I. Ruban, V.V. Shalay // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 944. – 012020.
14. Blinov, V.N. Experimental investigations of nitrogen arcjet thruster with control unit for small spacecrafts [Текст]/ V.N. Blinov, I.S. Vavilov, V.V. Fedynin, V.V. Shalay, P.S. Yachmenev //Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1210. – 012019.