

## Список использованных источников

- 1 Аш Ж. Датчики измерительных систем. Книга 2. — М.: Мир, 1992. — 424 с.
- 2 Грошковский Я. Техника высокого вакуума. — М.: Мир, 1975. — 622 с.
- 3 Ислентьев С. А. Пристеночные пульсации давления при турбулентном течении газа в каналах. — М.: Издательство МГТУ, 1992. — 95 с.
- 4 Лэмб Г. Динамическая теория звука. — М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. — 372 с.
- 5 Хинце И. О. Турбулентность. — М.: Физматгиз, 1963 г. — 680 с.
- 6 Муниа А. Г., Щепочкин М. А. Спектр звуковой мощности дозвуковой струи /Акустический журнал — 1972 г. - №2. - С. 292.

УДК 533.77

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ

Семкин Н.Д., Бай Юй

Наибольшую опасность для космических аппаратов (КА) представляют мелкодисперсные частицы естественного или искусственного происхождения (микрометеороиды и техногенные частицы), так как их много больше, чем крупных фрагментов (например, осколков КА).

Изменение исходной шероховатости радиационных поверхностей системы терморегулирования (СТР) вследствие воздействия на них частиц, влечет за собой изменение оптических характеристик (коэффициент поглощения солнечного излучения  $As$  и коэффициента излучения  $\varepsilon$ ), что в свою очередь может привести к нарушению теплового режима КА.

В общем случае полный внешний тепловой ток, поглощенный радиационной поверхностью СТР может быть представлен следующим образом:

$$Q_{\Sigma} = As(Q_s + Q_{\text{отп}} + Q_{\text{КА}}^{\text{отр}}) + \varepsilon(Q_s + Q_{\text{КА}}^{\text{соб}}) + Q_{\text{мол}} + Q_{\text{рек}} \quad (1)$$

Удельный тепловой поток солнечного излучения, падающий на элемент поверхности:

$$q_s = S_0 \cdot \cos \psi_e \quad \text{при } 0 \leq \psi_e \leq \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

где  $\psi_e$  — угол между нормалью к элементу поверхности и направлением на Солнце;  $S_0$  — солнечная постоянная, равная  $1396 \pm 49$  Вт/м<sup>2</sup>.

Нами используется тепловая модель Земли с радиационными характеристиками, осредненными по поверхности, а сама планета рассматривается как диффузионно-излучающее и отражающее тело сферической формы радиуса  $R = R_3 + H_a$ , где  $R_3 = 6371$  км — средний радиус планеты,  $H_a = 12$  км — верхняя граница эффективно излучающего слоя атмосферы.

Удельный тепловой поток собственного излучения Земли, падающий на элемент поверхности КА, определяется:

$$q_1 = \frac{1 - A_{cp}}{4} S_0 \varphi_1, \quad (3)$$

где  $A_{cp}$  – среднее альбедо Земли, равно  $\sim 0,39$ ;  $\varphi_1$  – локальный угловой коэффициент для элемента поверхности:

$$\varphi_1 = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \cos \psi_e d\omega, \quad (4)$$

где  $\Omega$  – телесный угол, в пределах которого планета излучает энергию на элемент поверхности;  $\psi_e$  – угол между нормалью к элементу поверхности и направлением на участок поверхности Земли, с которого поступает излучение.

Удельный тепловой поток отраженного Землей солнечного излучения, падающий на элемент поверхности равен:

$$q_{отр} = A_{cp} S_0 \varphi_2, \quad (5)$$

где  $\varphi_2$  – локальный комбинированный угловой коэффициент.

$$\varphi_2 = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega^*} \cos \psi_e \cos \psi_0 d\omega, \quad (6)$$

где  $\psi_e$  – то же что и для  $\varphi_1$ ;  $\psi_0$  – зенитное расстояние Солнца для элемента поверхности Земли, с которого рассматривается излучение (отражение);  $d\omega$  – элементарный телесный угол:

$$d\omega = dF_{uzl} \cos \psi_{uzl} \frac{1}{r^2}, \quad (7)$$

где  $dF_{uzl}$  – элементарная площадка на поверхности Земли (излучающего тела),  $\psi_{uzl}$  – угол между нормалью к площадке на Земле и направлением на КА,  $r$  – расстояние между центрами элемента поверхности Земли и площадкой на поверхности КА.

Удельный тепловой поток, возникающий от соударения радиационной поверхности (РП) с молекулами атмосферы ( $Q_{mol}$ ), и тепловой поток, обусловленный рекомбинацией атомов атмосферы на РП ( $Q_{рек}$ ), могут быть определены с помощью известных соотношений.

Для расчета естественных внешних тепловых потоков использованы соотношения, позволяющие определить пространственную ориентацию элемента РП при движении КА по орбите, а также модель атмосферы, необходимая для расчетов молекулярного и рекомбинационного тепловых потоков.

Целью создания модели динамики функционирования СТР являлось изучение уравнений, решение которых позволило бы определить зависимость температур объектов терморегулирования при возмущающем воздействии на РП потоков космической пыли. Так как поверхность КА, не занятая в теплообмене с окружающей средой, как правило, покрывается

ЭВТИ, можно полагать, что тепловые потоки через оболочку КА пренебрежительно малы по сравнению с тепловыми потоками, которыми КА обменивается с окружающей средой через РП.

Для принятой структурной схемы СТР дифференциальное уравнение теплового баланса элемента радиационной поверхности СТР КА, функционирующего на околоземной орбите в условиях воздействия частиц запишем в виде:

$$c_i m_i \frac{dT_i}{d\tau} = [A_{\text{Soi}}(1-x_i) + A_{\text{Si}}(\tau)x_i] \{q_{\text{Si}} + q_{\text{отрп}}\} + (\varepsilon_{\text{oi}}(1-x_i) + \varepsilon_i(\tau)x_i)(q_{\text{zi}} - \sigma_{\eta} T_i^4) + (q_{\text{Mi}} + q_{\text{Pi}})F_i + \sum_K \frac{T_K - T_i}{R_{iK}}. \quad (8)$$

Уравнение теплового баланса для не тепловыделяющего элемента имеет вид:

$$(c_R m_K + u_K) \frac{dT_K}{d\tau} = \sum_j \frac{T_j - T_K}{R_{jK}} + \sum_i \frac{T_i - T_K}{R_{iK}}. \quad (9)$$

Тепловой баланс в объекте терморегулирования описывается следующим уравнением:

$$c_i m_i \frac{dT_i}{d\tau} = Q_{\text{вн}}(\tau) + \sum_K \frac{T_K - T_i}{R_{jK}}. \quad (10)$$

В уравнениях (8)-(10)  $T$  – температура элемента;  $C$  – удельная теплоемкость элемента;  $m$  – масса элемента;  $x$  – доля площади элемента РП, на которой произошло изменение оптических характеристик;  $F$  – площадь элемента РП;  $Q_{\text{вн}}$  – внутреннее тепловыделение;  $u_K$  – эффективная теплоемкость элементов конструкции, сопряженных с рассматриваемым элементом;  $A_S(\tau)$ ,  $\varepsilon(\tau)$  – законы изменений оптических характеристик РП под воздействием потока частиц.

Система уравнений (8)-(10), дополненная условиями связи между элементами, уравнениями регулирования:

$$\frac{dR_{iK}}{d\tau} = f(T_i, \tau), \quad (11)$$

$$\frac{dR_{jK}}{d\tau} = f(T_j, \tau) \quad (12)$$

и начальными условиями в момент времени  $\tau = \tau_0$ , полностью характеризует расширенный вектор состояния СТР рассматриваемой структуры на интервале времени  $(\tau_0, \tau_f)$ . К рассматриваемой системе уравнений необходимо добавить уравнения для расчета внешних тепловых потоков и внутренних тепловыделений, баллистические расчеты, описывающие положение КА на орбите и его ориентацию. Кроме того, при функционировании на низких околоземных орбитах необходимо время нахождения КА в тени Земли.

Таким образом, математическая модель динамики функционирования СТР в условиях воздействия потоков частиц запишется в виде:

$$\begin{aligned}
 c_i m_i \frac{dT_i}{d\tau} &= [A_{S_{0i}}(1-x_i) + A_{S_i}(\tau)x_i][q_{S_i} + q_{отп_i}] + (\varepsilon_{0i}(1-x_i) + \varepsilon_i x_i)(q_{z_i} - \sigma_{\eta} T_i^4) + \\
 &+ (q_{M_i} + q_{P_i})F_i + \sum_K \frac{T_K - T_i}{R_{iK}}; \\
 (c_R m_K + u_K) \frac{dT_K}{d\tau} &= \sum_j \frac{T_j - T_K}{R_{jK}} + \sum_i \frac{T_i - T_K}{R_{iK}}; \\
 c_i m_i \frac{dT_i}{d\tau} &= Q_{вн}(\tau) + \sum_K \frac{T_K - T_i}{R_{jK}}; \\
 \frac{dR_{iK}}{d\tau} &= f(T_i, \tau); \quad \frac{dR_{jK}}{d\tau} = f(T_j, \tau); \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$q_{zi} = S_0 \cos \varphi_{li} \quad \text{при } 0 \leq \psi_e \leq \frac{\pi}{2};$$

$$q_{zi} = \frac{1-R_{cp}}{4} S_0 \varphi_{li}, \quad \varphi_{li} = \frac{1}{\pi} \int \cos \psi_e d\omega;$$

$$q_{omp} = A_{cp} S_0 \varphi_{2i}; \quad \varphi_{2i} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha} \cos \psi_e \cos \psi_0 d\omega;$$

$$d\omega = dF_{изл} \cos \psi_{изл} \frac{1}{\Gamma^2};$$

$$\tau_T = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{(R_3 + H_0)^{\frac{3}{2}}}{R_3} \left( \pi - 2 \arccos \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha_0} \right).$$

Система нелинейных дифференциальных уравнений (8)-(10) решалась численно. Учитывалось создаваемое ударами частиц изменение оптических коэффициентов РП.

Возмущающее воздействие на РП потоков частиц в модели задавалось посредством введения в уравнение (8) различных законов изменения оптических характеристик  $A_S = f(\tau)$  и  $\varepsilon = f(\tau)$  при прохождении КА через "зоны засорения".

Программная реализация модели позволяет вести исследования с любым набором данных о внутренней структуре, характеристиках элементов, высоте орбиты, ориентации КА на орбите, вращении его относительно каждой из трех осей и относительно трех осей одновременно (как в орбитальной, так и инерциальной системе координат), закона изменения внутренних тепловыделений объектов терморегулирования и др.

Анализ результатов моделирования показал, что если за счет бомбардировки РП потоком частиц будет получено изменение оптических

характеристик, превышающее в полтора – два раза естественную деградацию (от воздействия факторов космического пространства), то тепловой баланс КА может быть существенно нарушен.

Среди возможных законов изменения оптических характеристик РП по времени наибольшего внимания заслуживает скачкообразное их изменение на некоторую величину. Физически такой процесс может быть реализован при пролете КА через "зоны засорения", обусловленные самогенерацией осколков искусственного происхождения в некоторой области околоземного пространства. В этом случае помимо абсолютных значений изменения температур объектов терморегулирования (ОР) важную роль играют динамические характеристики, в частности время переходного процесса.

Увеличение  $A_S$  влечет за собой увеличение амплитуды колебаний температур ОР в пределах периода обращения, что является негативным фактором.

На рисунке показано изменение температуры ОР при скачкообразном изменении  $A_S$  РП, полученное при определенных исходных данных, основными из которых являются:

$$H_3 = 300 \text{ км}, i = 70^\circ; \sum_j Q_{\text{вн},j} = 1 \text{ кВт}; Q_{\text{вн},j}(\tau) = \text{const} = 300 \text{ Вт}; F_{\text{рп}} = 12 \text{ м}^2$$

(цилиндр);

ориентация КА – в орбитальной системе координат; ось вращения цилиндра по вектору скорости.

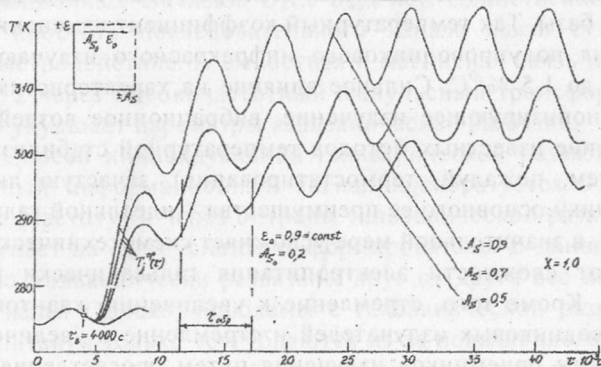


Рис. Изменение температуры объектов терморегулирования при скачкообразном изменении оптических коэффициентов РП СТР

#### Список использованных источников:

1. Марк Х., Соммерс Р.Д., Мериш М.Дж. Влияние торированного воздействия микрометеоритов на тепловые свойства поверхности./ Ракетная техника и космонавтика. – 1966. – Т.4. – №10. – с.149-157

2. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980.– 232 с.
3. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г.И.Петрова. – М.: Машиностроение. 1971.–379 с.

## **МОС СПЕКТРАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТА ИДЕАЛЬНОЙ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ**

**Матюнин С.А., Иноземцев М.Ю.**

Считается общепризнанным, что применение оптоэлектроники в измерительной технике и системах управления позволяет добиться высоких метрологических характеристик, устойчивости к электромагнитным воздействиям и др., позволяет создавать быстродействующие помехоустойчивые каналы связи, элементы гальванической развязки измерительных и управляющих цепей и т.д. В настоящее время промышленностью освоен выпуск как отдельных оптоэлектронных элементов (ОЭЭ) – источников и приемников излучения, так и целого ряда оптоэлектронных преобразователей - от элементарных оптронов до прецизионных цифровых датчиков перемещения.

При разработке оптоэлектронной аппаратуры всегда приходится учитывать возможность ее эксплуатации при жестких внешних воздействиях естественного и искусственного происхождения.

Несомненным «бичом» оптоэлектроники, и особенно полупроводниковой, является низкая температурная стабильность ее элементной базы. Так температурный коэффициент изменения мощности излучения полупроводникового инфракрасного излучающего диода доходит до  $1,5 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ . Сильное влияние на характеристики ОЭЭ оказывают ионизирующее излучение, вибрационное воздействие и др. Применение известных методов температурной стабилизации (за исключением, пожалуй, термостатирования), зачастую лишает оптоэлектронику основного ее преимущества – идеальной гальванической развязки, в значительной мере усложняет схемотехнические решения, возникают сложности электропитания гальванически развязанных ОЭЭ [1]. Кроме того, стремление к увеличению квантового выхода полупроводниковых излучателей и стремление к увеличению чувствительности приемников излучения путем просветления их поверхности и поверхностей оптических элементов приводит, зачастую, к существенному ухудшению их температурной стабильности [2].

Так, в устройствах ввода-вывода аналоговых и цифровых измерительных сигналов фирмы «L-Card» используется несколько приемов гальванической развязки аналоговых сигналов.

1. Способ групповой гальванической развязки (рис.1).