

Исследования космоса

Правильная ссылка на статью:

Стеганов Г.Б., Каргу Д.Л., Маленин Е.Н., Янгузов А.В. — Методика оценки теплового режима панелей солнечных батарей при выполнении угловых разворотов космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Исследования космоса. – 2019. – № 2. – С. 1 - 8. DOI: 10.7256/2453-8817.2019.2.31434
URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=31434

Методика оценки теплового режима панелей солнечных батарей при выполнении угловых разворотов космического аппарата дистанционного зондирования Земли

Стеганов Геннадий Борисович

кандидат технических наук

доцент, кафедра бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов,
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

197198, Россия, Ленинградская область, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

✉ vka_22kaf-maleninen@rambler.ru



Каргу Дмитрий Леонидович

кандидат технических наук

доцент, кафедра бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов,
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

197198, Россия, Ленинградская область, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

✉ vka_22kaf-maleninen@rambler.ru



Маленин Евгений Николаевич

кандидат технических наук

старший преподаватель, кафедра бортового электрооборудования и энергетических систем
летательных аппаратов, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

197198, Россия, Ленинградская область, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

✉ vka_22kaf-maleninen@rambler.ru



Янгузов Андрей Валериевич

старший инженер, в/ч 13973

197198, Россия, Ленинградская область, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

✉ izlow427@mail.ru



[Статья из рубрики "Астрономия"](#)

DOI:

10.7256/2453-8817.2019.2.31434

Дата направления статьи в редакцию:

20-11-2019

Дата публикации:

13-02-2020

Аннотация.

Представлены результаты моделирования теплового режима работы панелей солнечных батарей (ПСБ) космического аппарата дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при движении по круговой орбите. Моделирование теплового режима осуществляется для двух групп фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). ФЭП условно поделены на группы в зависимости от силы влияния различных тепловых потоков, характерных для движения космического аппарата по круговой орбите. Приведены аналитические выражения для уравнения теплового баланса ПСБ и результаты численных расчетов на конец срока активного существования (САС). В данной работе были использованы методы дедукции, индукции, анализа, моделирования, формализации, эксперимента, а также статистический метод, системный и структурно-функциональный метод. Представленная модель расчета температуры панели солнечной батареи космического аппарата ДЗЗ представляет из себя совокупность математических выражений, позволяющих на любой момент времени моделируемого периода полета рассчитать температуру «средневзвешенного», или иначе, базового ФЭП ПСБ КА. По этим данным, используя тепловую модель СБ и данные из таблицы коэффициентов переизлучения, можно рассчитать температуру любого ФЭП в пределах конкретной СБ и внести корректировки в план задействования КА ДЗЗ.

Ключевые слова: тепловая модель, панели солнечных батарей, тепловой баланс, космический аппарат ДЗЗ, фотоэлектрические преобразователи, тепловой поток, коэффициент переизлучения ФЭП, выходная мощность, теплообмен, температура ФЭП

ВВЕДЕНИЕ

При планировании применения космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) по назначению возможно появление энергетических ограничений, связанных с фактически располагаемыми характеристиками системы электроснабжения. В настоящее время основным источником электроэнергии на борту КА являются солнечные батареи (СБ). Как известно [\[1, 2, 4\]](#), одним из факторов, оказывающих значительное влияние на электрические параметры СБ, является ее температура. Для низкоорбитальных КА на температуру СБ часто влияет не только воздействие лучистого потока от Солнца, но и тепловое воздействие Земли, уровень электрической нагрузки СБ, тепловые потоки от конструктивных элементов КА. Основными конструктивными элементами СБ являются панели, створки, модули и отдельные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП).

Так как СБ современных КА как правило имеют большую площадь и содержат много ФЭП, то электрические параметры ее однотипных конструктивных элементов могут существенно различаться между собой. Поэтому при анализе температурных условий функционирования СБ следует учитывать параметры каждого ее элемента вплоть до ФЭП.

Учет изменения температуры каждого ФЭП в процессе движения КА по орбите является актуальной, но крайне трудоемкой задачей. Поэтому для корректного снижения

трудоемкости ее решения обычно принимают ряд допущений [3]:

- 1) Отдельные ФЭП объединены в сборки – модули (например, по 36 штук), что обеспечивает простоту анализа их температурного режима работы;
- 2) Условия теплообмена освещенных ФЭП в пределах створки, в каждый момент времени одинаковы; как и баллистические условия их освещенности;
- 3) Теплообмен между соседними ФЭП отсутствует, градиент температуры в поперечном сечении ФЭП пренебрежимо мал;
- 4) ФЭП является физически однородной (не слоистой) средой;
- 5) Теплопроводность между элементами каркаса СБ и ФЭП отсутствует;
- 6) Теплообмен между корпусом КА и СБ отсутствует.

Также следует разделить все ФЭП на две группы:

I ФЭП, тепловые условия которых практически не зависят от тепловых потоков со стороны каркаса створки, а определяются в среднеинтегральном (среднемассовом и среднеповерхностном) отношении текущим положением КА на орбите и угловым положением каждой створки СБ относительно Солнца и Земли;

II ФЭП, при оценивании теплового режима которых невозможно пренебречь излучением тепловых потоков каркасом створки (створок) и другими элементами конструкции.

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ФЭП ПЕРВОЙ ГРУППЫ В СОСТАВЕ ПСБ

Для разработки тепловой модели ПСБ с учетом сделанных допущений предлагается вначале определить текущий тепловой режим ФЭП первой группы (базовых ФЭП в модулях). Обозначим их температуру $T_{\text{баз.ФЭП}} = T$. При этом в первую очередь для них необходимо составить уравнение теплового баланса [1, 2]

$$C_m \frac{dT}{dt} = C \cdot \varphi_c \cdot \alpha_c + Q_w \cdot \varphi_1 \cdot \alpha_1 + Q_{sw} \cdot \varphi_2 \cdot \alpha_2 + Q_K - \frac{P_H}{S_{\text{ФЭП}}} - \sigma \cdot T^4 (\varepsilon_L + \varepsilon_K), \quad (1)$$

где C_m – удельная теплоемкость ФЭП;

$$Q_w = \frac{1 - A_{\text{сп}}}{4} \cdot C,$$

$$\varphi_c = \cos \gamma;$$

$$Q_{sw} = A_{\text{сп}} C,$$

φ_1, φ_2 – угловые коэффициенты излучений ФЭП;

T – текущее значение температуры ФЭП в момент времени τ ;

γ – угол между вектором \vec{S} направления на Солнце и нормалью к ПСБ;

Q_w – плотность теплового потока инфракрасного излучения от Земли, поглощенная поверхностью ФЭП;

Q_{sw} – плотность теплового потока отраженного от Земли солнечного света, поглощенная поверхностью ФЭП;

$A_{\text{ср}}$ – среднее значение альбедо Земли (равное 0,37);

$Q_{\text{к}}$ – плотность теплового потока, излучаемого от элементов конструкции КА;

C – солнечная постоянная ($C = 1396 \text{ Вт/м}^2$);

$P_{\text{н}}$ – электрическая мощность, отводимая с поверхности $S_{\text{ФЭП}}$;

σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{K}^4}$);

$\varepsilon_{\text{л}}, \varepsilon_{\text{т}}$ – степень черноты соответственно лицевой и тыльной сторон ФЭП.

Коэффициенты уравнения зависят от спектра воздействующих излучений и различаются между собой для лицевой и тыльной сторон ПСБ. Результат вычислений в особенности зависит от точности экспериментального определения $\alpha_1, \alpha_2, \varepsilon_{\text{л}}, \varepsilon_{\text{т}}, C_{\text{м}}$.

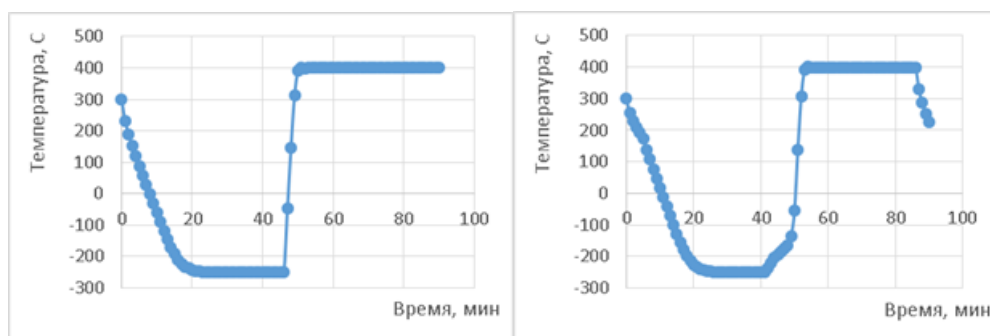
Поскольку при $\frac{dT}{dt} = 0$ устанавливается равновесная температура ФЭП $T = T_{\text{р}}$, из (1) имеем

$$T_{\text{р}}^4 = \left(C \cdot \varphi_{\text{с}} \cdot \alpha_{\text{с}} + Q_{\text{св}} \cdot \varphi_1 \cdot \alpha_1 + Q_{\text{в}} \cdot \varphi_2 \cdot \alpha_2 + Q_{\text{к}} - \frac{P_{\text{н}}}{S_{\text{ФЭП}}} \right) \cdot \frac{1}{\sigma \cdot (\varepsilon_{\text{л}} + \varepsilon_{\text{т}})}. \quad (2)$$

С учетом (2) выражение (1) примет вид

$$\frac{dT}{dt} = \left(\text{sign}(T_{\text{р}}^4) - \text{sign}(T^4) \right) \cdot \frac{\sigma(\varepsilon_{\text{л}} + \varepsilon_{\text{т}})}{C_{\text{м}}}. \quad (3)$$

Располагая значениями угловых коэффициентов, как функций времени [1,2] и при известных начальных условиях (для окончания теневого участка), можно определить текущую температуру ПСБ из уравнения (3), например, методом Рунге-Кутты. Также решение уравнения для дискретных моментов времени можно получить, заменяя дифференциалы малыми приращениями, что с шагом по времени Dt даст ряд значений температуры. Между этими точками реальная температура изменяется как непрерывная функция времени. Однако для упрощения и ускорения расчетов в промежуточных точках при заходе КА в тень и выходе из нее можно предложить два варианта аппроксимации реальной кривой.



а) б)

Рис. 1. Изменение температуры ФЭП и равновесной температуры КА ДЗЗ на одном витке при ступенчатой (а) и трапецеидальной (б) аппроксимации функции $T(t)$

Если считать, что изменение температуры происходит ступенчато, то можно получить график указанной зависимости $T_{\text{св}}$ для одного витка КА в виде рисунка 1.а. Если же предположить, что температура между известными точками изменяется линейно с переменным наклоном, то точность вычисления изменения $T_{\text{св}}$ при полете КА повышается

(рисунок 1.6).

Однако данная простейшая тепловая модель пригодна только для предварительного анализа влияния температуры на усредненные (интегральные) характеристики подсистемы генерирования электрической энергии. Для более точного анализа необходимо обоснованно преодолеть ряд ограничений, указанных выше.

УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ДЛЯ ПСБ КА ДЗЗ

Чтобы найти температуру всех ФЭП ПСБ, необходимо составить общее уравнение теплового баланса с учетом большего числа тепловых потоков, участвующих в балансе. Так, для низкоорбитальных КА нельзя пренебречь переизлучением от поверхности Земли (отраженным потоком). На рисунке 2 представлена схема передачи тепла в космосе между составными частями КА по нескольким направлениям.

Исходя из схемы теплообмена ФЭП в космосе и выражения (1), составим уравнение теплового баланса для ФЭП находящегося рядом с каркасом створки (или другим элементом конструкции КА)

$$Q_s - Q_E - Q_{K1} - Q_{K2} + Q_{KA1} + Q_{KA2} + Q_W + Q_{SW} - Q_m = C_m \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

где Q_s – плотность потока солнечного излучения, поглощенного лицевой поверхностью ФЭП;

Q_{K1}, Q_{K2} – плотность теплового потока, излучаемого от ФЭП в пространство;

Q_{KA1}, Q_{KA2} – плотность теплового потока, излучаемого корпусом КА на лицевую и тыльную стороны ФЭП;

Q_E – плотность теплового потока, определяющего теплообмен с поверхностью КА;

Q_m – плотность теплового потока, определяющего теплообмен с поверхностью каркаса ПСБ.

Большинство этих величин являются функциями времени. Если учесть движение КА вокруг Земли, то необходимо разложить Q_W, Q_{SW} на составляющие для лицевой и тыльной частей ФЭП панелей СБ.

С учетом изложенного запишем уравнение теплового баланса для ФЭП:

$$C \cdot \cos \gamma \cdot \alpha_c - \frac{P_{\Pi}}{S_{\text{ФЭП}}} - \varepsilon_{\Pi} \cdot \sigma \cdot T_{\text{сб}}^4 - \varepsilon_{\Gamma} \cdot \sigma \cdot T_{\text{сб}}^4 (1 - \varphi_m) - \varepsilon_{\text{сб}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{п}}^4 - T_{\text{сб}}^4) \cdot \varphi_m + \\ + \varepsilon_{\Pi} \cdot Q_{\text{вл}} + \varepsilon_{\Gamma} \cdot Q_{\text{вт}} (1 - \varphi_m) + Q_{\text{свл}} \cdot \varphi_1 \cdot \alpha_1 + Q_{\text{свт}} \cdot (1 - \varphi_m) \cdot \alpha_2 = C_m \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{сб}}$ – приведенная степень черноты системы тел (ФЭП и каркаса);

$Q_{\text{вл}}, Q_{\text{вт}}$ – плотность теплового потока от планеты, падающего на поверхность ФЭП, на лицо и тыл соответственно;

$Q_{\text{свл}}, Q_{\text{свт}}$ – плотность теплового потока отраженного от планеты солнечного света, попавшего на ФЭП, на лицо и тыл соответственно;

φ_m – угловые коэффициенты излучения (переизлучения) между каркасом створки ПСБ и рассматриваемыми ФЭП.

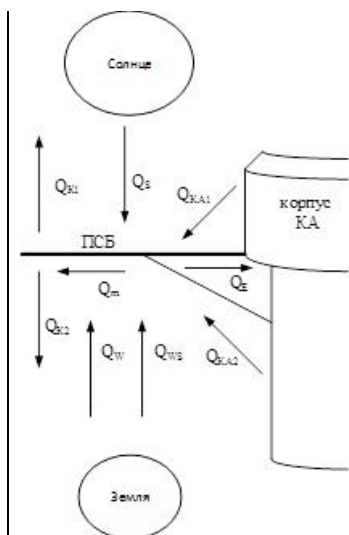


Рис. 2. Схема теплообмена ФЭП и каркаса СБ в космосе

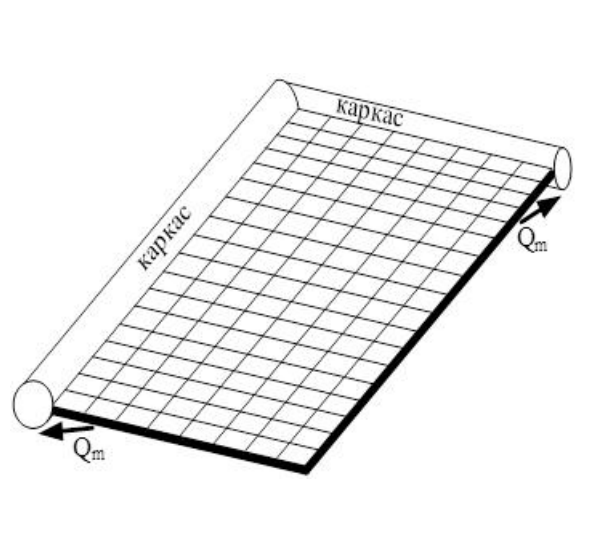


Рис. 3. Теплообмен излучением между ФЭП и каркасом

Будем считать, что ФЭП, которые имеют одинаковые коэффициенты φ_m , будут иметь и достаточно близкие текущие температуры при том условии, что по остальным физическим параметрами режима работы данные ФЭП являются идентичными. Как видно из рисунка 3, в теплообмене с ФЭП будут участвовать поверхность части каркаса и тыльная поверхность ФЭП, а также вспомогательные элементы конструкции на тыльной стороне модулей ФЭП (на рисунке не показаны).

По известной методике [3] находится коэффициент излучения для каждого ФЭП с поверхности части каркаса. При этом максимальное значение коэффициента излучения ФЭП на поверхность части каркаса (в углу каркаса) приблизительно равно 0,381.

Для упрощения расчётов ПСБ можно разделить осями симметрии и выделить участки ФЭП с одинаковыми коэффициентами излучения. Следовательно, указанные коэффициенты достаточно определить для модулей части створки. Результаты расчета коэффициентов излучения для уравнения теплового баланса ФЭП представлены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты переизлучения ФЭП

| Порядковый № ФЭП | по горизонтали | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| по вертикали | 1 | 0,381 | 0,139 | 0,033 | 0,031 | 0,030 | 0,031 | 0,033 | 0,039 | 0,333 |
| | 2 | 0,056 | 0,012 | 0,006 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,006 | 0,212 | 0,057 |
| | 3 | 0,06 | 0,017 | 0,011 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,011 | 0,416 | 0,061 |
| | 4 | 0,133 | 0,099 | 0,094 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,094 | 0,298 | 0,136 |

Для упрощения расчёта вольт-амперной характеристики СБ, используя результаты проведённых расчётов, можно с достаточной точностью учесть влияние каркаса на мощность ПСБ, а именно - снижение напряжения на величину $K_{\text{тв}}=0,985$.

Таким образом, определив значения температуры базовых ФЭП и коэффициенты излучения для остальных элементов ПСБ, можно используя выражения (1)-(5) рассчитать тепловые параметры всей СБ КА ДЗЗ и оценить влияние температуры на ее выходные энергетические характеристики. Графики напряжения и температуры СБ при отборе максимальной мощности в конце срока активного существования на рабочей орбите

показаны на рисунке 4 (угол между нормалью к СБ и направлением на Солнце $\gamma = 0^\circ$, $Q_s = 1367 \text{ Вт/м}^2$, теневая орбита).

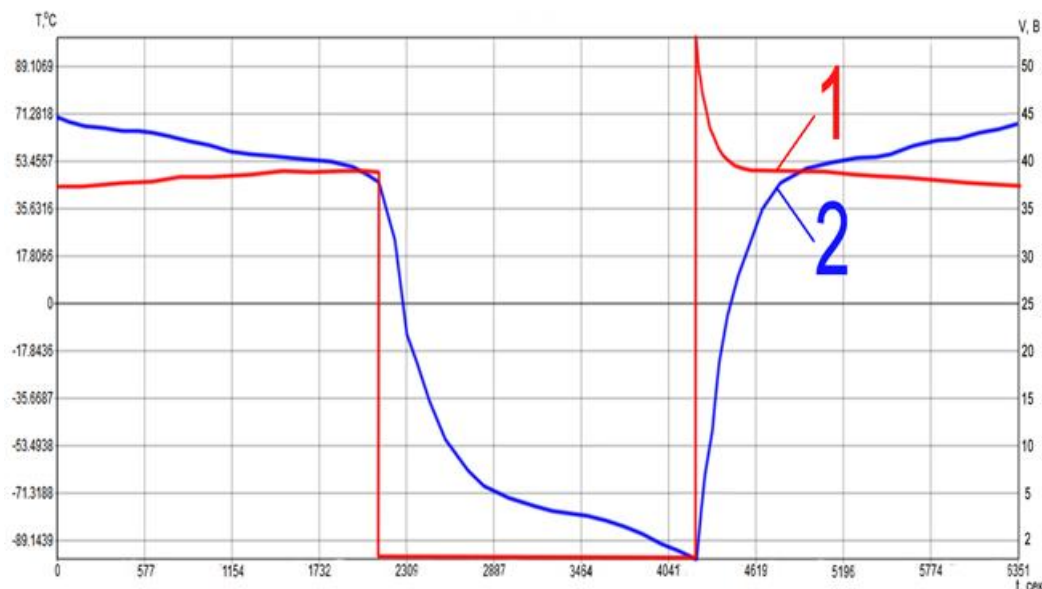


Рис. 4. Зависимость напряжения (1) и температуры (2) СБ от времени при отборе максимальной мощности в конце 8 лет САС на рабочей орбите (теневая орбита)

Оценив значения потоков тепловой энергии, оказывающих воздействие на температурный режим панелей СБ, можно перейти к рассмотрению общих принципов функционирования КА с точки зрения оценки электрических параметров подсистемы генерирования электроэнергии КА ДЗЗ. Следовательно, можно скорректировать наложенные энергетические ограничения при планировании задействования КА по назначению

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель расчета температуры ПСБ КА ДЗЗ представляет из себя совокупность математических выражений, позволяющих на любой момент времени моделируемого периода полета рассчитать температуру «средневзвешенного», или иначе, базового ФЭП ПСБ КА. По этим данным, используя тепловую модель СБ и данные из таблицы коэффициентов переизлучения, можно рассчитать температуру любого ФЭП в пределах конкретной СБ и внести корректировки в план задействования КА ДЗЗ.

Библиография

1. Базилевский А. Б., Лукьяненко М. В. Анализ энергетических возможностей солнечной батареи при различных условиях эксплуатации // Вестник СГАУ имени академика М. Ф. Решетнева. 2013. Т. 43. № 6. С. 582-587.
2. Малоземов В. В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.
3. Шубин Д. А., Каргу Д. Л., Астахов Н. Н., Горбулин В. И., Стеганов Г. Б. Математическая моделирование динамики температуры солнечных батарей в различных условиях орбитального полета космического аппарата // Вестник Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2016. Вып. 6 (111). С. 4-21.
4. Цаплин С.В., Большев С.А., Романов А.Е. Теплообмен в космосе. Самара: Самарский университет, 2013. 56 с.

