КОСМОНАВТИКА

УДК 629.78.064.5

**С. В. Тимофеев, М. А. Ильин,
В. Е. Чеботарев, В. Д. Звонарь,
Р. Ф. Фаткулин**

*ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнева»,
г. Железногорск, Красноярский край, Россия*

ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ

Приводится математическая модель выбора характеристик электрообогревателей космического аппарата по критерию – минимум площади обогреваемой поверхности при наличии конструктивных и тепловых ограничений.

Ключевые слова: обогреватели, космический аппарат, тепловой поток.

**S. V. Timofeev, M. A. Ilyin,
V. E. Chebotarev, V. D. Zvonar,
R. F. Fatkulin**

*JSC «Academician M.F. Reshetnev «Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Russia*

SELECTION OF SATELLITE HEATERS PERFORMANCE UNDER CONSTRAINTS

It is presented mathematical model to select satellite heaters performance with respect to criterion – minimum square of heated area (Under construction and heat constrains).

Key words: heater, satellite, heat flow.

Электрообогреватели космического аппарата (КА) совместно со средствами охлаждения используются для поддержания заданного теплового режима оборудования, создавая необходимое равновесие между притоком и оттоком тепла от этого оборудования. Электрообогреватель (ЭО) содержит токонесущий провод и электроизолирующую подложку [1].

Основными параметрами ЭО являются: мощность, масса, площадь обогреваемой поверхности.

© Тимофеев С. В., Ильин М. А., Чеботарев В. Е., Звонарь В. Д., Фаткулин Р. Ф., 2012

Мощность ЭО, Вт, определяется по закону Ома [2]:

$$N_{\text{ЭО}} = \frac{U^2}{R_{\text{пр}}} = \frac{U^2}{R_l \cdot l_{\text{пр}}} = \frac{U^2 \cdot S_{\text{пр}}}{\rho_{\text{пр}} \cdot l_{\text{пр}}}; \quad (1)$$

где U – напряжение электропитания ЭО, В; $R_{\text{пр}}$ – электрическое сопротивление провода, Ом; R_l – удельное электрическое сопротивление единицы длины провода, Ом/м; $S_{\text{пр}}$ – площадь сечения провода, м^2; $\rho_{\text{пр}}$ – удельное электрическое сопротивление материала провода, Ом·м; $l_{\text{пр}}$ – длина провода, м.

Площадь обогреваемой с помощью ЭО поверхности $F_{ЭО}$ зависит от площади провода $F_{ЭО}$ и коэффициента заполнения им обогреваемой поверхности $K_{ЗАП}$:

$$F_{ЭО} = \frac{F_{пр}}{K_{ЗАП}},$$

$$F_{пр} = l_{пр} \cdot d_{пр} = \frac{U^2 \cdot S_{пр}}{\rho_{ЭО} \cdot N_{ЭО}} \cdot d_{пр}, \qquad (2)$$

где $d_{пр}$ – максимальный размер сечения провода.

Масса ЭО формируется как сумма масс токонесущего провода $m_{пр}$, электроизолирующей подложки и клея $m_{ЭП}$:

$$m_{ЭО} = m_{пр} + m_{ЭП} = \gamma_{пр} \cdot l_{пр} \cdot S_{пр} + \gamma_{ЭП} \cdot \frac{F_{пр}}{K_{ЗАП}} =$$

$$= F_{ПР}\left(\gamma_{пр} \cdot \frac{S_{пр}}{d_{пр}} + \frac{\gamma_{ЭП}}{K_{ЗАП}}\right), \qquad (3)$$

где $\gamma_{пр}$ – объемная плотность провода, кг/м^3; $\gamma_{ЭП}$ – поверхностная плотность подложки, кг/м^2.

Эффективность применения ЭО характеризуют следующие удельные показатели:

- тепловая эффективность

$$q_Э = \frac{\rho_{пр} \cdot K_{ЗАП}}{d_{пр} \cdot S_{пр}} \cdot \left(\frac{N_{ЭО}}{U}\right)^2, \qquad (4)$$

- массовая эффективность

$$m_Э = \frac{N_{ЭО}}{\mathbf{т}_{ЭО}} =$$

$$= \frac{\rho_{пр}}{\left(\gamma_{пр} \cdot S_{пр} + \gamma_{ЭП} \cdot \frac{d_{пр}}{K_{ЗАП}}\right) \cdot S_{пр}} \cdot \left(\frac{N_{ЭО}}{U}\right)^2. \qquad (5)$$

Удельные показатели ЭО могут быть использованы для оптимизации параметров ЭО по критерию $q_Э \to \max$, $m_Э \to \max$. С помощью этих критериев проведем выбор материала токонесущего провода по максимуму $\rho_{пр}$ провода (4), или максимуму $\rho_{пр}/\gamma_{пр}$ (5).

Анализ представленных в табл. 1 данных позволяет сформулировать следующие рекомендации:

- материал нихром имеет лучшие показатели по обоим критериям;
- материал константан имеет удовлетворительные показатели по критерию 1, но уступает материалу алюминий по критерию 2;
- материал алюминий имеет удовлетворительные показатели по критерию 2, но неудовлетворительные – по критерию 1.

В итоге в ЭО КА применяют токонесущий провод из материала с большим удельным сопротивлением (критерий 1): нихром, константан.

Кроме того, удельные показатели ЭО также содержат информацию о других частных критериях оптимизации ЭО $U \to \min$, $S_{пр} \to \min$, $K_{ЗАП} \to \max$.

Уменьшение напряжения ЭО повышает удельный показатель $g_Э$, $m_Э$, однако приводит к увеличению массы кабелей системы электропитания

$$m_к = K_{об} \cdot \gamma_к \cdot l_к^2 \cdot \rho_к \cdot \frac{N_{ЭО}}{\Delta U_к \cdot U}, \qquad (6)$$

где $K_{об}$ – коэффициент конструктивных затрат массы на оболочку кабеля; $\gamma_к$ – объемная плотность провода кабеля, кг/м^3; $l_к$ – длина кабеля, м; $\rho_к$ – удельное электрическое сопротивление материала провода кабеля, Ом·м; $\Delta U_к$ – допустимое падение напряжения в кабеле за счет омического сопротивления.

Ввиду неопределенности реализации длины кабеля для конкретного типа ЭО выработаны общие рекомендации по выбору напряжения ЭО: для $N_{ЭО} \le 60$ Вт $U = 27$ В, а для $N_{ЭО} \ge 60$ Вт $U = 100$ В.

Минимизация площади сечения провода ЭО $S_{пр}$ и максимизация $K_{ЗАП}$ связаны с тепловыми и конструктивными ограничениями.

Рассмотрим методику выбора в условиях ограничений ЭО, применяемых на КА ин-

Таблица 1

№ п/п	Наименование	$\rho_{пр}$, Ом·мм^2/м	$\gamma_{пр}$, кг/л	$\rho_{пр}/\gamma_{пр}$
1	Медь	0,0178 (5)	8,9	0,002 (5)
2	Алюминий	0,0287 (4)	2,71	0,106 (2)
3	Вольфрам	0,055 (3)	19,1	0,003 (4)
4	Костантан	0,5 (2)	8,9	0,056 (3)
5	Нихром	1,12 (1)	8,4	0,133 (1)

Примечание: в скобках приведен номер позиции материала, занимаемой по данному критерию.

формационного обеспечения для обогрева сотопанелей с приборами негерметичного приборного отсека, т. н. плоских ЭО.

В электрообогревателях этого типа используется пленочный токонесущий провод в виде ленты (фольги) из материала с большим удельным сопротивлением (константана), укладываемой на изолирующую подложку в виде змейки с организацией необходимых зазоров между лентами. В качестве изолирующей подложки в космической отрасли используется стеклоткань, а в более новых разработках полиимидная плёнка.

Конструктивные ограничения на ширину и зазор между лентами зависят от способа изготовления нагревателя. При ручном приклеивании ленточки технологические ограничения на минимальные геометрические размеры ленты из константана следующие: ширина $a_{\text{П}} \geq a_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м, толщина $b_{\text{П}} \geq b_0 = 12 \cdot 10^{-6}$ м, а конструктивный зазор между лентами $L_{\text{СП}} \geq L_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м. Кроме того, ширина и длина ленты могут принимать непрерывное значение, обеспечиваемое соответствующей нарезкой, а толщина принимает дискретное значение: $12 \cdot 10^{-6}$ м; $13 \cdot 10^{-6}$ м и т. д.

При изготовлении плёночных нагревателей путем травления дорожки из фольги константана или нихрома, нанесенной на полиимидную плёнку, расстояние между дорожками может быть уменьшено до 0,127 мм.

Тепловые ограничения обусловлены исключением плавления материала изолирующей подложки и токонесущего провода. В условиях вакуума и при умеренной температуре считается, что вся выделяемая тепловая мощность ЭО передается на обогреваемую поверхность. В этом случае для заданного термического сопротивления изолирующей подложки $R_{\text{П}}$ и допустимого значения перепада температур между лентой и сотопанелью $\Delta T_{\text{П}}$, существует ограничение на плотность мощности

$$q_{\text{П}} = \frac{\Delta T_{\text{П}}}{R_{\text{П}}} . \qquad (7)$$

В формализованном виде тепловое ограничение на характеристики пленочного ЭО представляется как неравенство

$$q = \frac{N_{\text{ЭО}}}{F_{\text{пр}}} = \frac{N_{\text{ЭО}}^2 \cdot \rho_{\text{пр}}}{U^2 \cdot a_{\text{П}}^2 \cdot b_{\text{П}}} \leq q_{\text{П}}. \qquad (8)$$

Мощность пленочного ЭО определяется из следующего выражения:

$$N_{\text{ЭО}} = \frac{U^2 \cdot a_{\text{П}} \cdot b_{\text{П}}}{\rho_{\text{пр}} \cdot l_{\text{пр}}}, \qquad (9)$$

где $a_{\text{П}}$, $b_{\text{П}}$ – ширина и толщина ленты, м.

Геометрические размеры ЭО определяются по следующим формулам:

$$F_{\text{ЭО}} = h_{\text{ЭО}} \cdot L_{\text{ЭО}} = \frac{l_{\text{пр}} \cdot a_{\text{П}}}{K_{\text{ЗАП}}}, \qquad (10)$$

$$l_{\text{пр}} = (h_{\text{ЭО}} + L_{\text{СП}}) \cdot n_{\text{В}} = L_{\text{ЭО}} \cdot \frac{h_{\text{ЭО}} + L_{\text{СП}}}{a_{\text{П}} + L_{\text{СП}}}, \qquad (11)$$

$$K_{\text{ЗАП}} = \frac{l_{\text{пр}} \cdot a_{\text{П}}}{F_{\text{ЭО}}} = \frac{1 + L_{\text{СП}} / h_{\text{ЭО}}}{1 + L_{\text{СП}} / a_{\text{П}}}, \qquad (12)$$

где $h_{\text{ЭО}}$, $L_{\text{ЭО}}$ – геометрические размеры пленочного ЭО, м; $K_{\text{ЗАП}}$ – коэффициент заполнения.

Представленная математическая модель позволяет осуществить расчеты характеристик ЭО в условиях тепловых и конструктивных ограничений, при этом минимальная площадь ЭО обеспечивается при минимальных значениях ширины и толщины ленты.

Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения : учеб. пособие : в 2 кн. Кн. 2. Внутреннее проектирование космического аппарата / Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. – Красноярск, 2006. – 140 с.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике : пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 520 с.