

$P_{\text{анализ}}$  – мощность помехового сигнала, измеренного анализатором спектра.

Таким образом, калибровка измерительного тракта позволяет рассчитать поправочный коэффициент  $N$  к показаниям анализатора спектра в  $L_1$  и  $L_2$  диапазоне, который равен сумме коэффициентов передачи всех блоков от анализатора спектра до приемной антенны:

$$N = -K_{\text{Аэфф}} - G_{\text{МШУ}} + L_{\text{каб.изм.}} + L_{\text{ад}} + L_{\text{дел.}} \quad (14)$$

При помощи найденного поправочного коэффициента определяется мощность помехового сигнала, приведенного к входу приемной антенны АФУ НАП СРНС, при котором происходят срывы сопровождения и захвата сигналов НКА. Применение предложенной методики позволяет измерять реальную устойчивость НАП СРНС к воздействию помех вне зависимости от значений коэффициентов передачи приемного тракта, что дает возможность сравнить ее с предлагаемыми моделями помеховой обстановки.

V. N. Tyapkin, Y. L. Fateev, D. D. Dmitriev, V. G. Konnov

#### CALIBRATION OF MEASURING PATH FOR ECM TEST OF NAVIGATION EQUIPMENT OF CUSTOMERS OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS

*The authors consider calculation of radio-frequency lines «Navigation space satellite – the spectrum analyzer» and «the generator of noises – the spectrum analyzer» for their calibration for ECM test of navigation equipment of customers of satellite radio navigation systems.*

*Keywords: navigation equipment of customers, satellite radio navigation systems, interference immunity.*

© Тяпкин В. Н., Фатеев Ю. Л., Дмитриев Д. Д., Коннов В. Г., 2012

УДК 629.78.064.5

В. Е. Чеботарев, В. Д. Звонарь, Р. Ф. Фаткулин, Г. В. Дмитриев

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ

*Проведен анализ различного типа электрообогревателей космического аппарата и для каждого из них составлена математическая модель расчета параметров при наличии конструктивных и тепловых ограничений. Разработана методика выбора параметров электрообогревателей по критериям, зависящим от вида ограничений и обеспечивающих заданную плотность теплового потока. Представлены результаты расчета параметров электрообогревателей космического аппарата информационного обеспечения и сформулированы рекомендации по их выбору в условиях неопределенности факторов эксплуатации.*

*Ключевые слова: космический аппарат, электрообогреватель, математическая модель.*

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.

Мощность ЭО определяется по закону Ома [2]:

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

где  $N_{\text{ЭО}}$  – мощность ЭО, Вт;  $U$  – 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<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{пр}}$  – удельное электриче-

#### Библиографические ссылки

1. Дмитриев Д. Д. Исследование помехоустойчивости аппаратуры радионавигации // Современные проблемы развития науки, техники и образования : сб. научн. тр. / под науч. ред. М. А. Барышева, В. И. Кокорина. Красноярск : ИПК СФУ, 2009. С. 202–209.
2. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Навигационный радиосигнал в диапазонах  $L_1, L_2$  / РНИИ КП. ред. 5.1. М. : РНИИ КП, 2008.
3. Айбиндер И. М. Шумы радиоприемников. М. : Связь, 1974. 328 с.
4. Уайт Д. Р. Ж. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. М. : Советское радио, 1977.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Радиотехника, 2010.
6. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. Микрополосковые антенны. М. : Радио и связь, 1986.

ское сопротивление материала провода, Ом·м;  $l_{\text{пр}}$  – длина провода, м.

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

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

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

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

$$m_{\text{ЭО}} = m_{\text{пр}} + m_{\text{ЭП}} = \gamma_{\text{пр}} \cdot l_{\text{пр}} \cdot S_{\text{пр}} + \gamma_{\text{ЭП}} \cdot \frac{F_{\text{пр}}}{K_{\text{ЗАП}}} = F_{\text{ПР}} \left( \gamma_{\text{пр}} \cdot \frac{S_{\text{пр}}}{d_{\text{пр}}} + \frac{\gamma_{\text{ЭП}}}{K_{\text{ЗАП}}} \right), \quad (3)$$

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

Эффективность применения ЭО характеризуется следующими удельными показателями:

– тепловая эффективность

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

– массовая эффективность

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

Удельные показатели ЭО могут быть использованы для оптимизации параметров ЭО по критерию  $q_{\text{Э}} \rightarrow \max$ ,  $m_{\text{Э}} \rightarrow \max$ . С помощью этих критериев проведем выбор материала токонесущего провода по максимуму  $\rho_{\text{пр}}$  провода (формула (4)), или максимуму  $\frac{\rho_{\text{пр}}}{\gamma_{\text{пр}}}$  (формула (5)) (табл. 1, в скобках приведен номер позиции материала, занимаемой по данному критерию).

Анализ данных табл. 1 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, выполненный из материала с большим удельным сопротивлением (критерий 1): нихром, константан.

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

Уменьшение напряжения ЭО повышает удельный показатель  $q_{\text{Э}}$ ,  $m_{\text{Э}}$ , однако приводит к увеличению массы кабелей системы электропитания:

$$m_{\text{К}} = K_{\text{об}} \cdot \gamma_{\text{К}} \cdot l_{\text{К}}^2 \cdot \rho_{\text{К}} \cdot \frac{N_{\text{ЭО}}}{\Delta U_{\text{К}} \cdot U}, \quad (6)$$

где  $K_{\text{об}}$  – коэффициент конструктивных затрат массы на оболочку кабеля;  $\gamma_{\text{К}}$  – объемная плотность провода кабеля, кг/м<sup>3</sup>;  $l_{\text{К}}$  – длина кабеля, м;  $\rho_{\text{К}}$  – удельное электрическое сопротивление материала провода кабеля, Ом·м;  $\Delta U_{\text{К}}$  – допустимое падение напряжения в кабеле за счет омического сопротивления.

Ввиду неопределенности реализации длины кабеля для конкретного типа ЭО выработана общая рекомендация: напряжение ЭО выше 27 В целесообразно применять для ЭО мощностью более 110 Вт.

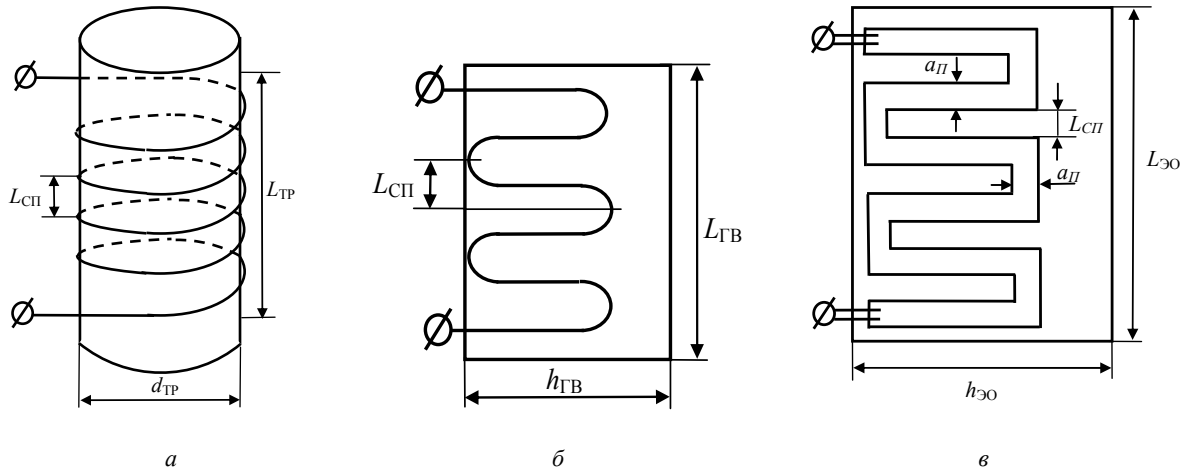
Минимизация площади сечения провода ЭО  $S_{\text{пр}}$  и максимизация  $K_{\text{ЗАП}}$  связаны с тепловыми и конструктивными ограничениями.

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 сопотанелью  $\Delta T_{\text{П}}$ , существует ограничение на плотность мощности

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

Таблица 1

№ п/п	Наименование	$\rho_{\text{пр}}$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	$\gamma_{\text{пр}}$ , кг/л	$\frac{\rho_{\text{пр}}}{\gamma_{\text{пр}}}$
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	Константан	0,5 (2)	8,9	0,056 (3)
5	Нихром	1,12 (1)	8,4	0,133 (1)



Схематичное размещение провода электрообогревателя  
 а – вокруг трубопровода; б – на цилиндрической поверхности газопровода; в – на плоской поверхности сотованели

Конструктивные ограничения, а также величина предельной плотности мощности ЭО зависят от назначения, места размещения и условий эксплуатации ЭО, формы обогреваемой поверхности: плоская или цилиндрическая и типа используемого токонесущего провода: проволочный или пленочный. Рассмотрим наиболее характерные типы ЭО, применяемые на КА информационного обеспечения: для обогрева трубопроводов ДУ, газа гермоконтейнера, сотованелей с приборами негерметичного приборного отсека (см. рисунок) [1].

Электрообогреватели трубопроводов ДУ предназначены поддерживать узкий диапазон температур (10...25 °С) рабочего тела (гидразина) в трубопроводе. Электрообогреватели устанавливаются на участках трубопровода, находящихся вне приборного отсека КА, поэтому они дополнительно закрываются теплоизоляцией для уменьшения утечки тепла в окружающее внешнее космическое пространство.

В этом случае применять проволочный токонесущий провод в ЭО допустимо из условия теплопередачи, что приводит к упрощению технологии его сборки: провод наматывается в один слой через электроизолятор на наружную цилиндрическую поверхность трубопровода. При этом резервный ЭО формируется наматыванием провода через электроизолятор на основной ЭО. Такая конструктивная схема позволяет в экстремальных случаях включать одновременно оба комплекта ЭО. Плотность укладки провода, задаваемая как количество витков на единицу длины  $n_L$  или шаг между витками спирали  $L_{СП} = 1/n_L$ , регулируется для обеспечения требуемого значения плотности теплового потока.

Максимальное значение шага ограничено неравномерностью теплового потока, а минимальное – исключением электропробоя между витками. Величина плотности теплового потока, формируемая ЭО трубопровода, рассчитывается по формуле

$$q_F = \frac{N_{ЭО}}{\pi \cdot L_{ТР} \cdot d_{ТР}} = \frac{q_L}{\pi \cdot d_{ТР}}, \quad (8)$$

где  $L_{ТР}$  – длина термостатируемой части трубопровода, м;  $d_{ТР}$  – наружный диаметр трубопровода, м;  $q_L$  – плотность теплового потока на единицу длины трубопровода, Вт/м.

Для заданной длины термостатируемой части трубопровода и его диаметра, выбранного типа провода и номинала напряжения определяются следующие параметры ЭО:

$$n_L = \frac{1}{\pi \cdot d_{ТР}} \cdot \sqrt{\left(\frac{U^2}{\pi \cdot R_l \cdot q_F \cdot d_{ТР} \cdot L_{ТР}^2}\right)^2 - 1}, \quad (9)$$

$$N_{ЭО} = \pi \cdot q_F \cdot d_{ТР} \cdot L_{ТР},$$

$$l_{пр} = L_{ТР} \cdot \sqrt{(\pi \cdot n_L \cdot d_{ТР})^2 + 1}. \quad (10)$$

В связи с наличием ограничений по плотности укладки провода  $n_L$  появляется ограничение на длину термостатируемой части трубопровода, оцениваемой с помощью уравнения

$$L_{ТР}^2 = \frac{U^2}{\pi \cdot R_l \cdot q_F \cdot d_{ТР} \cdot \sqrt{(\pi \cdot n_L \cdot d_{ТР})^2 + 1}}. \quad (11)$$

Величина теплового потока  $q_F$  в формулах (8)...(10) определяется из условия гарантированного поддержания температурного диапазона рабочего тела ДУ, и для гидразина (диапазон температур 10...25°С) составляет  $q_F = 59...75$  Вт/м<sup>2</sup>. Для этого случая диапазон параметров ЭО трубопровода КА диаметром  $d_{ТР} = 6$  мм при использовании провода, выполненного из нихрома ( $R_l = 15,85$  Ом/м) для расчетных ограничений на  $n_L$  представлен в табл. 2.

Информация табл. 2 может быть использована для проектных оценок выбираемой длины трубопровода, удовлетворяющей ограничениям.

Наименование	$q_F = 59 \text{ Вт/м}^2 (q_L = 1,1 \text{ Вт/м})$		$q_F = 75 \text{ Вт/м}^2 (q_L = 1,4 \text{ Вт/м})$	
	$n_L = 0,5 \text{ в/м}$	$n_L = 3,5 \text{ в/м}$	$n_L = 0,5 \text{ в/м}$	$n_L = 3,5 \text{ в/м}$
$L_{ГП}, \text{ м}$	5,5	2,5	4,9	2,2
$N_{ЭО}, \text{ Вт}$	6,0	2,8	6,9	3,1
$l_{ЭО}, \text{ м}$	7,6	16,7	6,7	14,8

Последующий расчет параметров ЭО проводится по формулам (9)...(10) для известного значения длины трубопровода.

Электрообогреватели газа гермоконтейнера предназначены для поддержания заданного диапазона температур герметичного приборного отсека при минимальных тепловыделениях аппаратуры. Электрообогреватели устанавливаются в зонах цилиндрической части газоведа, интенсивно обдуваемых газом. В этом случае применение проволочного токонесущего провода в ЭО допустимо по условию теплоотдачи в газовый контур и приводит к упрощению технологии сборки: провод наклеивается в один слой на поверхность газоведа, являющегося электроизолятором, с равномерным шагом  $L_{СП}$  укладки провода. Резервный ЭО формируется на рядом расположенной свободной поверхности газоведа.

Плотность укладки провода, задаваемая шагом между витками спирали  $L_{СП}$ , регулируется, обеспечивая требуемое значение плотности теплового потока. Для поддержания температуры газа гермоконтейнера в пределах 10...40 °С при интенсивной циркуляции газа в газоведе требуемое значение плотности теплового потока составляет  $q_F = 140 \text{ Вт/м}^2$ .

Для заданной мощности ЭО и типа провода определяется его длина из уравнения (1):

$$l_{пр} = \frac{U^2}{N_{ЭО} R_l}, \quad (12)$$

а для обеспечения требуемой величины теплового потока  $q_F$  определяются площадь и геометрические размеры ЭО:

$$F_{ЭО} = \frac{N_{ЭО}}{q_F} = h_{ГВ} \cdot L_{ГВ},$$

$$L_{ГВ} = l_{пр} - \frac{F_{ЭО}}{L_{СП}} \geq L_{СП}, \quad n_B = \frac{L_{ГВ}}{L_{СП}},$$

$$l_{пр} = (L_{СП} + h_{ГВ}) \cdot n_B = L_{ГВ} + \frac{h_{ГВ} \cdot L_{ГВ}}{L_{СП}}, \quad (13)$$

где  $h_{ГВ}$ ,  $L_{ГВ}$  – геометрические размеры ЭО, размещаемого на газоведе, м;  $n_B$  – количество витков провода (подбирается четное число).

Исходя из ограничения  $L_{ГВ} \geq L_{СП}$  находим

$$L_{СП.min} = 0,5 l_{ЭО} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot F_{ЭО}}{l_{пр}^2}} \right] \approx \frac{F_{ЭО}}{l_{пр}}. \quad (14)$$

Дополнительно максимальное значение шага  $L_{СП}$  ограничено неравномерностью теплового потока, а

минимальное – исключением электропровода между витками.

Проведем оценку параметров ЭО, размещаемого на газоведе, со следующими требованиями по обеспечению теплового режима:  $N_{ЭО} = 10 \text{ Вт}$ ,  $q_F = 140 \text{ Вт/м}^2$ ,  $U = 27 \text{ В}$  и использующего провод из нихрома ( $R_l = 15,85 \text{ Ом/м}$ ), укладываемого с шагом  $L_{СП} = 3...20 \text{ мм}$ . Для этого величина шага  $L_{СП}$  должна быть более 15,5 мм. Принимая величину шага  $L_{СП} = 16 \text{ мм}$ , получим следующие геометрические размеры ЭО:

- площадь  $F_{ЭО} = 0,072 \text{ м}^2$ ;
- габариты  $h_{ГВ} = 0,378 \text{ м}$ ,  $L_{ГВ} = 0,189 \text{ м}$ ;
- длина провода  $l_{пр} = 4,62 \text{ м}$ .

Количество витков провода согласно формуле (13) составляет  $n_B = 11,8$ , которое должно принимать целочисленное значение  $n_B = 12$ . За счет округления необходимо уточнить величину длины провода  $l_{пр} = 4,73 \text{ м}$  и мощность ЭО  $N_{ЭО} = 9,76 \text{ Вт}$ .

Электрообогреватели сопанелей и приборов негерметичного приборного отсека предназначены для поддержания требуемой температуры сопанели с приборами, а также непосредственно приборов, требующих особых условий поддержания температуры и обособленных от панели в тепловом отношении.

В электрообогревателях этого типа используется пленочный токонесущий провод в виде ленты (фольги), изготовленной 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 пленка.

Оптимизация параметров этого типа ЭО заключается в минимизации его площади, которая достигается выбором соотношений между геометрическими размерами провода с учетом технологических и тепловых ограничений.

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

ние, обеспечиваемое соответствующей нарезкой, а толщина принимает дискретное значение:  $12 \cdot 10^{-6}$  м;  $18 \cdot 10^{-6}$  м и т. д.

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

Тепловое ограничение на характеристики пленочного ЭО обусловлено исключением плавления материала изолирующей подложки и токонесущего провода, которое соответствует температуре выше 100 °С. Перепад температуры между нагревателем и панелью обусловлен термическим сопротивлением изолирующей подложки  $R_{\Pi}$ , которое представляется в виде суммы термических сопротивлений клеевого слоя между ленточкой и электроизолирующей подложкой, электроизолирующей подложки и клеевого слоя между нагревателем и панелью:

$$R_{\Pi} = \left( \frac{\delta_{\text{кл1}}}{\lambda_{\text{кл1}}} + \frac{\delta_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}}} + \frac{\delta_{\text{кл2}}}{\lambda_{\text{кл2}}} \right), \quad (15)$$

где  $\delta_{\text{кл1}}$ ,  $\delta_{\text{из}}$ ,  $\delta_{\text{кл2}}$  – толщина электроизолятора и клеевых слоев,  $\lambda_{\text{кл1}}$ ,  $\lambda_{\text{из}}$ ,  $\lambda_{\text{кл2}}$  – теплопроводность электроизолятора и клеевых слоев.

Использование в качестве подложки ЭО стеклоткани толщиной  $\delta = 0,3$  мм ( $\lambda = 0,2$  Вт/м·К) и клеевых слоев толщиной  $\delta = 0,1$  мм ( $\lambda = 0,2$  Вт/м·К) создает термическое сопротивление  $R_{\Pi} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>·К/Вт.

При установке нагревателя на внутреннюю обшивку радиационной сотовой панели, не оснащенную тепловыми трубами, для исключения нагрева поверхности сотовой панели выше температуры 100 °С необходимо учитывать перепад температур в сотовой панели до радиатора или обогреваемого прибора (30...50 °С). В результате предельная плотность теплового потока от ЭО  $q_{\Pi} = 12\,000$  Вт/м<sup>2</sup>.

При установке на сотовую панель тепловых труб, ограничение по тепловому потоку определяется возможностями тепловых труб воспринимать тепло без возникновения кризиса кипения теплоносителя (аммиака) в ее капиллярных канавках. В зависимости от диаметра тепловой трубы ограничение составляет порядка  $q_{\Pi} = 80\,000$  Вт/м<sup>2</sup>. При наличии основной и запасной трубы это ограничение уменьшается вдвое и составляет  $q_{\Pi} = 40\,000$  Вт/м<sup>2</sup> (для обеспечения работоспособности при отказе одной из тепловых труб).

При установке нагревателя на прибор ограничения обусловлены требуемой равномерностью температурного поля прибора, доступными местами для установки нагревателей и определяются с помощью тепловой математической модели прибора.

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

$$q = \frac{N_{\text{ЭО}}}{F_{\text{пр}}} = \frac{N_{\text{ЭО}}^2 \rho_{\text{пр}}}{U^2 a_{\Pi}^2 b_{\Pi}} \leq q_{\Pi}. \quad (16)$$

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

Мощность пленочного ЭО определяется по формуле (1) подстановкой значения  $S_{\text{пр}} = a_{\Pi} \cdot b_{\Pi}$ :

$$N_{\text{ЭО}} = \frac{U^2 a_{\Pi} b_{\Pi}}{\rho_{\text{пр}} l_{\text{пр}}}. \quad (17)$$

Геометрические размеры ЭО вычисляются по следующим формулам:

$$F_{\text{ЭО}} = h_{\text{ЭО}} \cdot L_{\text{ЭО}} = \frac{l_{\text{пр}} a_{\Pi}}{K_{\text{ЗАП}}}; \quad (18)$$

$$l_{\text{пр}} = (h_{\text{ЭО}} + L_{\text{СП}}) \cdot n_{\text{В}} = L_{\text{ЭО}} \frac{h_{\text{ЭО}} + L_{\text{СП}}}{a_{\Pi} + L_{\text{СП}}}; \quad (19)$$

$$K_{\text{ЗАП}} = \frac{l_{\text{пр}} \cdot a_{\Pi}}{F_{\text{ЭО}}} = \frac{1 + L_{\text{СП}}/h_{\text{ЭО}}}{1 + L_{\text{СП}}/a_{\Pi}}, \quad (20)$$

где  $h_{\text{ЭО}}$ ,  $L_{\text{ЭО}}$  – геометрические размеры пленочного ЭО, м;  $K_{\text{ЗАП}}$  – коэффициент заполнения;  $n_{\text{В}}$  – число витков провода,  $n_{\text{В}} = \frac{L_{\text{ЭО}}}{a_{\Pi} \cdot L_{\text{СП}}}$ .

Рассчитаем геометрические параметры ЭО по формулам (18)..(20) с учетом тепловых и конструктивных ограничений.

В начале определим значение мощности ЭО  $N_{\text{ПР}}$ , при которой достигается предельная плотность теплового потока:

$$N_{\text{ПР}} = \sqrt{q_{\Pi} \cdot \frac{U^2 a_0^2 b_0}{\rho_{\text{пр}}}}. \quad (21)$$

Так, предельное значение мощности ЭО для ленты, выполненной из константана ( $\rho_{\text{ЭО}} = 0,48 \cdot 10^{-6}$  Ом·м) и принятых значениях  $a_0$ ,  $b_0$  равно  $N_{\text{ПР}} = 29,6$  Вт ( $U = 27$  В) и  $N_{\text{ПР}} = 109,6$  Вт ( $U = 100$  В).

Если  $N_{\text{ЭО}} \geq N_{\text{ПР}}$ , то для заданного  $N_{\text{ЭО}}$  находим с помощью уравнения (16) поверхностную плотность омического сопротивления:

$$R_S = \frac{R}{F_{\text{пр}}} = \frac{\rho_{\text{пр}}}{a_{\Pi}^2 \cdot b_{\Pi}} = \frac{U^2}{N_{\text{ЭО}}^2} \cdot q_{\Pi}, \quad (22)$$

В этом случае, принимая известными значения параметров  $N_{\text{ЭО}}$ ,  $U$ ,  $R_S$ ,  $\rho_{\text{пр}}$ ,  $b_{\Pi}$ , определяем ширину ленты по формуле (21):

$$a_{\Pi} = \frac{N_{\text{ЭО}}}{U} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{пр}}}{b_{\Pi} \cdot q_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{пр}}}{R_S \cdot b_{\Pi}}}, \quad (23)$$

и ее длину  $l_{\text{пр}}$  по формуле (17):

$$l_{\text{пр}} = \frac{U^2 \cdot a_{\Pi} \cdot b_{\Pi}}{\rho_{\text{пр}} \cdot N_{\text{ЭО}}}, \quad (24)$$

а затем для известного значения  $L_{\text{СП}}$  и одного из габаритных размеров ЭО вычисляем другой габаритный размер ЭО – площадь  $F_{\text{ЭО}}$  и коэффициент заполнения  $K_{\text{ЗАП}}$ :

$$L_{\text{ЭО}} = l_{\text{пр}} \cdot \frac{a_{\Pi} + L_{\text{СП}}}{h_{\text{ЭО}} + L_{\text{СП}}}, \quad h_{\text{ЭО}} = \frac{l_{\text{пр}}}{L_{\text{ЭО}}} (a_{\Pi} + L_{\text{СП}}) - L_{\text{СП}}. \quad (25)$$

При этом подбирается четное число витков провода.

Для квадратной формы ЭО его габаритные размеры определяют путем решения квадратного уравнения

$$h_{ЭО} = L_{ЭО} = 0,5 \cdot L_{СП} \times \left( \sqrt{1 + 4 \cdot l_{ЭО} \cdot \left( \frac{1}{L_{СП}} + \frac{a_{П}}{L_{СП}^2} \right)} - 1 \right). \quad (26)$$

Если  $N_{ЭО} < N_{ПР}$ , то параметры ЭО в условиях ограничений рассчитываем с помощью уравнений (18)...(25), подставив в них минимальные значения  $a_0, b_0, L_0$ .

Расчетные значения параметров ЭО с учетом ограничений, принятых на КА информационного обеспечения, приведены в табл. 3.

Анализ данных табл. 3 позволяет сформулировать следующие рекомендации:

1) напряжение 100 В целесообразно применять для мощности ЭО более 110 Вт;

2) увеличение толщины ленты провода увеличивает площадь ЭО;

3) ширину зазора между лентами необходимо минимизировать, чтобы не увеличивать площадь ЭО.

При использовании разработанной модели для расчета проектных параметров ЭО в условиях неопределенности факторов эксплуатации (наличие диапазона по напряжению, дискретности геометрических размеров) рекомендуется реализовывать четное число

витков с некоторым завышением мощности ЭО. Применение ЭО увеличенной мощности допустимо, так как ЭО, как правило, работает в скважном режиме, организуемом контуром управления по показаниям датчиков температуры.

Итак, проведен анализ различного типа электрообогревателей космического аппарата и для каждого из них составлена математическая модель расчета параметров при наличии конструктивных и тепловых ограничений.

Разработана методика выбора параметров электрообогревателей по критериям, зависящим от вида ограничений и обеспечивающих заданную плотность теплового потока.

Представлены результаты расчета параметров электрообогревателей космического аппарата информационного обеспечения и сформулированы рекомендации по их выбору в условиях неопределенности факторов эксплуатации.

### 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. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2006.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике : пер. с нем. М. : Мир, 1982.

Таблица 3

$N_{ЭО}$ , Вт	20	30	60	70	70	110	110	160	180	240	240
$U$ , В	27	27	27	27	100	27	100	100	100	100	100
$b_{П}$ , мм	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,018
$a_{П}$ , мм	2	2,03	4,06	4,73	2	7,44	2,01	2,92	3,29	4,38	3,58
$L_{СП}$ , мм	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$l_{ПР}$ , м	1,8225	1,23	1,23	1,23	7,14	1,23	4,56	4,56	4,56	4,56	5,585
$K_{ЗАП}$	0,512	0,519	0,685	0,719	0,506	0,805	0,509	0,601	0,63	0,695	0,649
$F_{ЭО}$ , м <sup>2</sup>	0,007	0,005	0,007	0,008	0,028	0,012	0,018	0,022	0,024	0,029	0,031
$q_{ПР}$ , Вт/м <sup>2</sup>	5468	12015	12015	12032	4902	12022	12001	12016	12009	12016	12010
$q_{ЭО}$ , Вт/м <sup>2</sup>	2810	6233	8234	8651	2480	9167	6109	7224	7563	8348	7796
$n_{В}$	22	18	14	14	42	12	34	30	30	26	32

V. E. Chebotarev, V. D. Zvonar, R. F. Fatkulin, G. B. Dmitriev

### TECHNIQUE FOR CALCULATION AND SELECTION OF SPACECRAFT ELECTRIC HEATERS PARAMETERS UNDER UNCERTAINTY CONDITIONS

The authors present analysis of different electrical heaters of spacecraft. Taking into account design and heat limitations, the mathematical models are presented for each of them. Technique for selection of heater parameters, based on limitations dependent criteria and providing for specified heat-flux density, is developed. The obtained calculation data of spacecraft heaters are presented and recommendations on choice of their parameters under uncertainty conditions are formulated.

Keywords: spacecraft, electric heater, mathematic model.

© Чеботарев В. Е., Звонарь В. Д., Фаткулин Р. Ф., Дмитриев Г. В., 2012