УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО КОСМОСА

Н. В. Луконин¹ ✉, Е. Н. Головенкин¹,
Г. В. Дмитриев¹, И. Я. Шестаков²

¹ АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Российская Федерация

Рассмотрены способы передачи тепловой энергии электронагревателей к узлам и устройствам космических аппаратов негерметичного исполнения, находящихся в составе космических аппаратов на целевых орбитах в условиях штатного применения. Разработаны основные технические характеристики перспективных электронагревателей для условий эксплуатации, разработана модель штатного положения электронагревателей, позволяющая определить пути повышения эффективности и коэффициента полезного действия электронагревателей. Представлены основные результаты разработки гибких пленочных электронагревателей различного конструктивного исполнения с использованием материалов, производимых отечественной промышленностью и изготовленных с применением нового способа на основе метода фотолитографии и травления резистивного слоя, позволяющего реализовать новые функциональные возможности и существенно улучшить эффективность электронагревателей. Приведены эксперименты, подтверждающие расчеты в условиях, имитирующих эксплуатационные воздействия на электронагреватели. Применение гибких пленочных электронагревателей повышенной эффективности в составе существующих и перспективных космических аппаратов позволяет улучшить эффективность работы системы терморегулирования в целом и улучшает технологичность изготовления.

Ключевые слова: электронагреватель, космический аппарат, система терморегулирования, коэффициент полезного действия, фотолитография.

Введение

Разработка перспективных космических аппаратов (КА) с увеличенными сроками активного существования (САС) в негерметичном исполнении предъявляет повышенные требования к системе терморегулирования (СТР), обеспечивающей температурный режим работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [9] и узлов КА в заданном температурном диапазоне длительное время, поддержание баланса тепловой энергии и ее перераспределение между конструкциями аппарата [1].

В качестве активных исполнительных устройств СТР используются электронагреватели

ли (ЭН), установленные на нагреваемые объекты (НО): приборы, аппаратура, узлы КА и включающиеся для подогрева НО до минимальных значений эксплуатационных температур. Включение осуществляется путем подачи напряжения питания $U_{пит}$ на резистивный слой ЭН. После достижения заданных значений температур НО $U_{пит}$ снимается. Количество ЭН, применяемых в КА, зависит от габаритов КА и составляет от 300 до 500 и более. Повышение эффективности ЭН и разработка новых ЭН для условий штатной эксплуатации в составе существующих и перспективных КА негерметичного исполнения на целевой орбите в условиях открытого космоса обеспечивается совершенствованием основных технических характеристик, улучшением габаритно-массовых показателей, увеличением надежности, улучшением технологичности, увеличением КПД [2], созданием новых (дополнительных) функцио-

✉ lukonin@iss-reshetnev.ru

© Луконин Н. В., Головенкин Е. Н.,
Дмитриев Г. В., Шестаков И. Я., 2019

нальных и эксплуатационных возможностей на основе новых конструктивно-технологических решений.

Технические характеристики перспективных электронагревателей:

- ресурс работы в составе КА – более 20 лет;
- удельная тепловая нагрузка – более 2 Вт/см²;
- сопротивление изоляции – не менее 500 МОм;
- возможность использования в расширенном температурном диапазоне эксплуатации – от –125 °С до +125 °С;
- предельная температура нагрева – до +180 °С;
- применение отечественных материалов;
- требуемые геометрические размеры: форма, длина, ширина, толщина;
- требуемые прочностные характеристики: гибкость, стойкость к механическим и радиационным воздействиям [1];
- требуемый рисунок токопроводящего (резистивного) слоя;
- ширина резистивного слоя – менее 1 мм;
- равномерный нагрев резистивного слоя;
- резервирование функции нагрева – не менее двойного;
- параметры газовыделения: потеря массы – менее 0,1 %, летучие конденсирующиеся вещества – менее 0,01%;
- удельный вес – менее 1 г/см²;
- механическая прочность токовыводов ЭН – не менее 9,8 Н;
- толщина – менее 0,4 мм;
- сопротивление, приведенное к площади нагрева, – более 100 Ом/см²;
- разброс электрических и тепловых параметров – не более 10 %;
- технологичность изготовления;
- увеличенный КПД [6].

Разработка электронагревателей повышенной эффективности

С целью получения ЭН с необходимыми техническими характеристиками (ТХ) в АО «ИСС» проведены работы по увеличению эффективности, подбору новых материалов, производимых отечественной промышленностью, и отработке новых конструктивно-технологических решений, которые могут быть применены при изготовлении ЭН в условиях действующего производства. В результате предложены способы изготовления ЭН с помощью метода фотолитографии и травления нагревательного резистивного слоя для получения необходимого рисунка проводников [3]. На рис. 1–3 представлены гибкие пленочные ЭН, разработанные на основе метода фотолитографии и

травления резистивного слоя [3], различного конструктивного исполнения.

Рис. 1. Гибкий пленочный ЭН на основе константанового резистивного слоя

Рис. 2. Гибкий пленочный ЭН на основе нихромового резистивного слоя

Рис. 3. Гибкий пленочный ЭН с двукратным резервированием

Для подтверждения эксплуатационных характеристик ЭН в условиях открытого космоса были проведены испытания типоразмерного ряда ЭН, установленных на НО с имитацией космического пространства криогенными экранами термовакuumной установки (ТВУ) объемом 120 м³, охлаждаемыми в ходе испытаний до температуры минус 180±10 °С. В качестве НО использовалась сотовая панель, имитирующая часть РЭА космического аппарата (имитатор РЭА). Внешний вид имитатора РЭА в ТВУ показан на рис. 5. Для обеспечения заданного эксплуатационного давления ЭН до значений 1·10⁻⁵ мм рт. ст. была задействована система вакуумной откачки камеры. На рис. 4 представлена схема термовакuumных испытаний (ТВИ). В ходе испытаний система измерения ТВУ обеспечи-

вала регистрацию температур оборудования и имитатора РЭА с помощью автоматизированной системы измерения температурных параметров установки. Погрешность измерения температурных параметров составила не более $\pm 0,5\%$ от их диапазонов измерения. В ходе проведения всех режимов ТВИ управление ЭН осуществлялось по отдельным регулируемым каналам от стабилизированных источников постоянного тока согласно программе испытаний. Погрешность измерения потребляемых мощностей составила не более $\pm 2\%$. Тепловые инфракрасные излучатели (ИК-излучатели) были установлены на случай отказа электропитания ЭН и в ходе работ использованы не были. Требуемые граничные температуры обеспечивались путем регулирования величин мощностей, подаваемых на ЭН. На рис. 5 представлен внешний вид имитатора РЭА в ТВУ.

Рис. 4. Схема термовакуумных испытаний

Рис. 5. Внешний вид имитатора РЭА, размещенного в ТВУ

Проведено 20 термоциклов (ТЦ) имитатора РЭА с установленными ЭН в диапазоне от $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальные температуры $T_{\max}$ и максимальные удельные тепловые мощности $P_{\text{уд. max}}$ ЭН отражены в табл. 1. Выдержка в установившемся температурном режиме составляла 1 час. Переход на нижний уровень до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ производился при выключенных ЭН. При переходе на верхний уровень мощность P увеличивалась ступенчато.

Таблица 1

Максимальные температуры и максимальные удельные тепловые мощности ЭН

Номер ЭН	Выход на верхний уровень		Верхний уровень	
	$T_{\max},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{уд. max}},\text{ Вт/см}^2$	$T_{\max},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{уд. max}},\text{ Вт/см}^2$
1	134	5,1	126	4,8
2	133	5,1	123	4,8
3	87	2,3	76	1,9
4	99	2,3	86	1,9
5	105	2,3	91	1,9
6	123	4,3	112	4,2
7	118	4,3	111	4,2
8	117	4,3	110	4,2
9	107	2,6	92	2,1
10	106	2,6	91	2,1
11	86	1,1	77	0,7
12	85	1,1	75	0,7
13	139	0,25	112	0,21
14	133	0,25	108	0,21
15	136	0,25	111	0,21
16	130	2,9	124	2,8
17	126	2,9	119	2,8
18	137	2,9	130	2,8
19	164	2,3	142	2
20	125	2,3	112	2

211

На рис. 6 показаны температуры имитатора РЭА и ЭН при термоциклировании в установившемся состоянии.

Рис. 6. Температурные режимы имитатора РЭА с ЭН при термоциклировании

На участке 1 (рис. 7) видно, что при подаче рабочей мощности $P_{\text{раб}} = 39\text{ Вт}$, $P_{\text{уд}} = 2,2\text{ Вт/см}^2$, $\Delta T_{\max} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. На участке 2 на каждый ЭН подается $P_{\text{перезр}} = 50\text{ Вт}$, что соответствует $P_{\text{уд}} = 2,85\text{ Вт/см}^2$, $\Delta T_{\max} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ЭН прошли испытания при $P_{\text{уд}}$ от $2,2\text{ Вт/см}^2$ до $2,85\text{ Вт/см}^2$. При $P_{\text{уд}} = 2,2\text{ Вт/см}^2$ ΔT не превышала заданного ограничения $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. При проведении ТЦ посадочные места достигали температур свыше

+70 °С, а $P_{уд}$ для ряда ЭН существенно превышала величину 2,2 Вт/см², для отдельных ЭН (с нихромовым резистивным слоем) доходила до 5,1 Вт/см², температура ЭН при этом, с учетом данных тепловых полей, достигала плюс 135–155 °С. ТЦ прошло с отработочным запасом от 10 до 30 °С относительно установленной эксплуатационной температуры ЭН. После завершения ТЦ и открытия ТВУ замечания по внешнему виду ЭН отсутствовали, изменений теплового поля ЭН при съемке тепловизором не отмечено.

Рис. 7. Зависимость температуры ЭН от времени

Одним из важнейших показателей эффективности ЭН является КПД, определяемый отношением полного теплового потока A , переданного НО, к суммарному тепловому потоку Q_0 , выделенному ЭН:

$$\eta = A/Q_0 \cdot 100 \%. \quad (1)$$

Из теории теплообмена известно три способа передачи тепловой энергии: кондуктивный, конвективный, излучением. Способы передачи тепловой энергии от ЭН к нагреваемому объекту зависят от внешней среды вокруг ЭН. В КА негерметичного исполнения приборы, узлы (нагреваемые объекты) и ЭН расположены в негерметичном отсеке в условиях космоса. Космос, как физическая среда, характеризуется малой плотностью частиц вещества. Зависимость параметров атмосферы Земли от высоты H над ее поверхностью приведены в [4].

При количестве частиц n менее 10^{10} , соответствующем давлению атмосферы менее 10^{-6} мм рт. ст., передача тепла конвекцией ничтожна. Целевые орбиты отечественных КА расположены на высотах более 200 км от поверхности Земли. В связи с этим рассматривается теплообмен двумя способами:

- кондуктивным, между поверхностью ЭН и твердой поверхностью НО;
- излучением, с поверхности ЭН.

Модель штатного положения ЭН представлена на рис. 8.

Рис. 8. Модель штатного положения ЭН

Полный тепловой поток A , передаваемый ЭН к нагреваемому объекту, составит:

$$A = Q_0 - Q_2 - Q_4 \quad (2)$$

или

$$A = Q_1 + Q_3 - Q_2 - Q_4, \quad (3)$$

где Q_0 — полный тепловой поток, выделяемый ЭН, Вт; Q_1 — тепловой поток, передаваемый кондуктивным способом, Вт; Q_2 — тепловой поток, передаваемый излучением в верхнюю полусферу, Вт; Q_3 — тепловой поток, передаваемый излучением в нижнюю полусферу, Вт; Q_4 — тепловой поток, передаваемый излучением вдоль поверхности НО, Вт.

Передача тепловой энергии ЭН излучением в соответствии с рис. 8 имеет три направления относительно поверхности ЭН: в нижнюю полусферу, в верхнюю полусферу, вдоль поверхности.

Передача тепловой энергии ЭН излучением в нижнюю полусферу нагревает объект (повышает КПД ЭН). Передача тепловой энергии ЭН излучением в верхнюю полусферу не нагревает объект (снижает КПД ЭН) и является нежелательной. Передачей тепловой энергии ЭН вдоль поверхности ЭН можно пренебречь исходя из малой толщины ЭН [8] и согласно закону Ламберта:

$$Q_4 \sim 0, \text{ Вт}. \quad (4)$$

Для определения полного теплового потока Q_0 , выделяемого при работе ЭН, можно использовать Закон Джоуля-Ленца [4].

Традиционно, при расчетах ЭН КА, в качестве задаваемых параметров используются параметры, контролируемые при электрических испытаниях ЭН как автономных, так и в составе узлов КА. Поэтому более удобной является формула:

$$Q_0 = U^2/R, \quad (5)$$

где Q_0 — полный тепловой поток, Вт; I — сила тока, А; R — сопротивление, Ом.

Тепловой поток ЭН Q_1 , передаваемый НО кондуктивным способом в соответствии с моделью штатного положения ЭН, представленной на рис. 2, формулой (3) и допущением (4), определяется следующим образом:

$$Q_1 = Q_0 - Q_2 - Q_3. \quad (6)$$

Тепловой поток излучения плоского ЭН, в соответствии с рис. 4, представляет собой сумму из-

лучений в верхнюю и нижнюю полусферы. Таким образом, тепловой поток излучения составит:

$$Q_{изл} = Q_2 + Q_3 \quad (7)$$

или

$$Q_2 = Q_3 = Q_{изл} / 2. \quad (8)$$

Плотность теплового потока излучения во всем диапазоне длин волн и по всем направлениям рассчитывается по формуле Стефана – Больцмана [4].

Степень черноты полного нормального излучения ϵ конструкционных материалов ЭН представлена в [4]. Степень черноты для стеклоткани с олигомерным связующим [8] установлена экспериментально и составляет 0,85.

Исходя из модели штатного положения ЭН в составе КА в условиях открытого космоса (рис. 8) следует, что если в конструкцию ЭН в качестве покрывного слоя ввести дополнительный слой отражающего материала, то можно увеличить КПД.

Дополнительный слой должен отражать инфракрасное излучение ЭН, направленное в верхнюю полусферу, в направлении нижней полусферы, т. е. иметь малый коэффициент черноты. В качестве материала дополнительного слоя можно использовать алюминиевую фольгу и/или композиционную полимерную пленку со слоями из термоактивного и/или термопластичного полимеров с отражающим инфракрасное излучение слоем.

В табл. 2 приведены результаты расчетов полного теплового потока Q_0 и тепловых потоков ЭН 1 с экраном, передаваемых: на нагрев КА $Q_{нагр}$, кондуктивностью Q_1 , излучением $Q_{изл}$, излучением в полусферу $Q_{изл}/2$ в зависимости от температуры нагрева резистивного слоя с учетом излучения в направлении верхней полусферы, имеющего площадь нагрева $17,5 \text{ см}^2$. $U_{ном}$ составляет 100 В, сопротивление резистивного слоя – 511 Ом, мощность – 19,57 Вт.

Таблица 2

Результаты расчетов теплового потока

Индекс ДСЕ	$T, ^\circ\text{C}$	$Q_0, \text{Вт}$	$Q_1, \text{Вт}$	$Q_{изл}, \text{Вт}$	$Q_{изл}/2, \text{Вт}$	$Q_{нагр}, \text{Вт}$	$Q_{нагр}, \text{Вт}$	КПД, %	Увеличение КПД, %
ЭН 1	-75	19,57	19,44	0,13	0,06	0,06	19,57	99,98	0,32
ЭН 1	-50	19,57	19,36	0,21	0,10	0,10	19,56	99,97	0,51
ЭН 1	-25	19,57	19,25	0,32	0,16	0,15	19,56	99,96	0,78
ЭН 1	0	19,57	19,10	0,47	0,23	0,22	19,56	99,94	1,14
ЭН 1	25	19,57	18,90	0,67	0,33	0,32	19,55	99,91	1,62
ЭН 1	50	19,57	18,65	0,92	0,46	0,44	19,55	99,88	2,23
ЭН 1	75	19,57	18,33	1,24	0,62	0,59	19,54	99,84	3,01
ЭН 1	100	19,57	17,93	1,64	0,82	0,78	19,53	99,79	3,97
ЭН 1	125	19,57	17,45	2,12	1,06	1,01	19,52	99,73	5,15
ЭН 1	150	19,57	16,86	2,70	1,35	1,28	19,50	99,65	6,57
ЭН 1	175	19,57	16,17	3,40	1,70	1,62	19,48	99,57	8,26

На рис. 9 представлено изменение тепловых потоков ЭН в зависимости от температуры нагрева резистивного слоя с учетом экранирования в верхнюю полусферу.

Рис. 9. Изменение тепловых потоков ЭН от температуры нагрева резистивного слоя

Таким образом, введение экрана в условиях вакуума позволяет увеличить КПД для эксплуатационных температур нагрева ЭН на 4–5 %.

На рис. 10 представлен внешний вид ЭН, частично закрытого фольгой. На рис. 11 пред-

ставлена термограмма ЭН, показывающая эффект экранирования в направлении верхней полусферы в инфракрасном диапазоне измерений длин волн 7,5–13 мкм.

Рис. 10. Внешний вид ЭН

Рис. 11. Термограмма ЭН с ограничением излучения в верхнюю полусферу

Заключение

Проведенные работы подтвердили правильность путей увеличения эффективности исполнительных устройств СТР – ЭН, позволили разработать ЭН нового поколения, наметили направления дальнейшего совершенствования СТР. Способы изготовления ЭН с использованием метода фотолитографии и травления резистивного слоя [3; 8] и применение в качестве конструкционных и технологических материалов, производимых отече-

ственной промышленностью, позволяют реализовывать различные конструкции ЭН, существенно повышают эффективность ЭН и обеспечивают заданные ТХ при работе в условиях вакуума и температур, соответствующих штатному применению в составе КА негерметичного исполнения [7].

Электронагреватели нового поколения имеют существенный потенциал для модернизации в целях увеличения эффективности в составе СТР существующих и перспективных КА с увеличенными САС.

Список литературы

- [1] Луконин Н. В., Шестаков И. Я. Способ изготовления гибко-плоских электронагревателей космических летательных аппаратов // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск. 2015.
- [2] Луконин Н. В., Шестаков И. Я., Головенкин Е. Н., Михнев М. М., Морозов П. С. Разработка электронагревателей повышенной эффективности космических аппаратов негерметичного исполнения // Научные технологии. № 12. 2017. С. 38–47.
- [3] Луконин Н. В., Полякова Г. В., Шушерина Г. П., Снытко Д. В. Способ изготовления гибко-плоского электронагревателя. Пат. № 2602799, Российская Федерация, 2016, бюл. № 32.
- [4] Фаворский О. Н., Каданер Я. С. Вопросы теплообмена в космосе. М. : Высшая школа, 1967. 240 с.
- [5] Альтгаузен А. П., Гутман М. Б., Малышев С. А. Низкотемпературный электронагрев. М. : Энергия, 1978. 207 с.
- [6] Луконин Н. В., Дмитриев Г. В., Морозов П. С., Шестаков И. Я. Способ изготовления электронагревателей повышенной эффективности космических аппаратов негерметичного конструктивного исполнения // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск. 2017.
- [7] Lukonin N. V., Shestakov I. Ya., Golovenkin E. N., Mikhnev M. M., Maksimov I. A., Pankina S. N. Development of electric heaters with increased efficiency of unpressurized designed space vehicles // MIST Aerospace 2018. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 450, 022007. doi:10.1088/1757-899X/450/2/022007
- [8] Луконин Н. В., Шестаков И. Я., Швердлов В. Ф., Морозов П. С., Лавриненко А. И., Способ изготовления гибко-плоского электронагревателя : заявка 2018140353, Российская Федерация ; заявл. 25.11.2018; опубл. 29.08.2019.
- [9] Луконин Н. В., Толмачев С. А., Сунцов С. Б., Морозов Е. А., Рунова Г. Н., Черноков Д. О., Гнигитиев В. П. Способ поверхностного монтажа электрорадиоизделий радиоэлектронной аппаратуры. Пат. № 2698306, Российская Федерация, 2019, бюл. № 24.
- [10] Федотов А. Я., Поль Г. Фотолитография и оптика. М. : Советское радио, 1974. 392 с.
- [11] Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высшая школа, 1967. 599 с.

INCREASE OF EFFICIENCY OF ACTUATORS OF SPACECRAFT THERMAL CONTROL SYSTEM IN OUTER SPACE

**N. V. Lukonin¹, E. N. Golovenkin¹,
G. V. Dmitriev¹, I. Ya. Shestakov²**

¹ JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation

The article deals with the methods of transfer of thermal energy of electric heaters to the nodes and devices of non-pressurized spacecraft, which are part of the spacecraft in the target

orbits in the conditions of regular use. The basic technical characteristics of perspective electric heaters for operating conditions are developed, the model of regular position of electric heaters allowing to define ways of increase of efficiency and efficiency of electric heaters is developed. The main results of the development of flexible film electric heaters various design using materials produced by the domestic industry and manufactured using a new method based on the method of photolithography and etching the resistive layer, allowing to implement new functionality and improve efficiency of electric heaters, the experiments confirming the calculations in conditions simulating operational influences on electric heaters. The using of flexible film electric heaters increased efficiency in the existing and future spacecraft can improve the efficiency of the thermal control system as a whole, improves manufacturability.

Keywords: electric heater, spacecraft, thermal control system, efficiency, photolithography.

References

- [1] Lukonin N. V., Shestakov I. Ya. *Sposob izgotovleniya gibko-ploskih elektronagrevatelej kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Method for the manufacture of flexible-flat electric heaters for spacecraft] // Reshetnev readings: materials of the XIX International scientific-practical conference. Krasnoyarsk, 2015. (In Russian)
- [2] Lukonin N. V., Shestakov I. Ya., Golovenkin E. N., Mikhnev M. M., Morozov P. S. *Razrabotka elektronagrevatelej povyshennoj effektivnosti kosmicheskikh apparatov negermetichnogo ispolneniya* [Development of electric heaters of increased efficiency of unpressurized spacecraft] // Naukoemkie tekhnologii, no. 12, 2017, pp. 38–47. (In Russian)
- [3] Lukonin N. V., Polyakova G. V., Shusherina G. P., Snytko D. V. *Sposob izgotovleniya gibko-ploskogo elektronagrevatelya* [A method of manufacturing a flexible-flat electric heater]. Patent RU 2602799, 2016, bulletin no. 32. (In Russian)
- [4] Favorsky O. N., Kadaner Ya. S. *Voprosy teploobmena v kosmose* [Issues of heat transfer in space]. Moscow, Higher School, 1967, 240 p. (In Russian)
- [5] Altgauzen A. P., Gutman M. B., Malyshev S. A. *Nizkotemperaturnyj elektronagrev* [Low-temperature electric heating]. Moscow, Energy, 1978, 207 p. (In Russian)
- [6] Lukonin N. V., Dmitriev G. V., Morozov P. S., Shestakov I. Ya. *Sposob izgotovleniya elektronagrevatelej povyshennoj effektivnosti kosmicheskikh apparatov negermetichnogo konstruktivnogo ispolneniya* [Method for the manufacture of electric heaters of increased efficiency for unpressurized spacecraft] // Reshetnev readings: materials of the XXI International scientific-practical conference. Krasnoyarsk, 2017. (In Russian)
- [7] Lukonin N. V., Shestakov I. Ya., Golovenkin E. N., Mikhnev M. M., Maksimov I. A., Pankina S. N. Development of electric heaters with increased efficiency of unpressurized designed space vehicles // MIST Aerospace 2018. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 450, 022007. doi:10.1088/1757-899X/450/2/022007
- [8] Lukonin N. V., Shestakov I. Ya., Sheverdov V. F., Morozov P. S., Lavrinenko A. I. *Sposob izgotovleniya gibko-ploskogo elektronagrevatelya* [Method for manufacturing a flexible-flat electric heater]. Application RU 2018140353, 2018. (In Russian)
- [9] Lukonin N. V., Tolmachev S. A., Suntsov B. B., Morozov E. A., Runova G. N., Chernokov D. O., Gnatiev V. P. *Sposob poverhnostnogo montazha elektroradioizdelij radioelektronnoj apparatury* [Method for surface mounting of electronic equipment of electronic equipment]. Patent RU 2698306, 2019, bulletin no. 24. (In Russian)
- [10] Fedotov A. Ya., Paul G. *Fotolitografiya i optika* [Photolithography and optics]. Moscow, Soviet Radio, 1974, 392 p. (In Russian)
- [11] Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, Higher School, 1967, 599 p. (In Russian)