DOI: 10.15593/2224-9982/2019.56.08

УДК 621.326.78:629.78

Д.С. Куликов¹, В.В. Бирюк², В.В. Моисеев¹

¹ АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева, Самара, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ТРУБЧАТОЙ ГАЛОГЕННОЙ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Приводятся результаты экспериментального исследования по определению теплового режима галогенных ламп накаливания (ГЛН) марок КГТ-220-1300 и КГТ-220-1000-1 при питающем напряжении, отличном от номинального (220 В). В качестве одного из средств измерений использовалась тепловизионная камера. Полученные данные являются высокоактуальными на сегодняшний день и нашли широкое применение при проведении термовакуумных испытаний на базе ОА «РКЦ «Прогресс».

По результатам проведенных измерений была выведена аппроксимационная формула для вычисления температуры средней части кварцевой колбы при различных напряжениях с погрешностью не более 2 %. Также получена функциональная зависимость температуры тела накала от питающего напряжения. Проведенный анализ корректности результатов показал хорошую сходимость с данными открытой печати, что подтверждает достоверность результатов.

Ввиду создания в последнее время цифровых двойников разрабатываемых объектов, а также в связи с частичным переносом физических испытаний на математический эксперимент полученная информация послужит в качестве исходных данных для построения тепловой математической модели инфракрасного излучателя для термовакуумного комплекса.

Ключевые слова: термовакуумные испытания, инфракрасный излучатель, аппроксимация, напряжение, нить накаливания, температура, тепловизионная камера, галогенная лампа, цифровой двойник.

D.S. Kulikov¹, V.V. Biryuk², V.V. Moiseev¹

¹ JSC "Space Rocket Center Progress", Samara, Russian Federation

² Korolev Samara National Research University, Samara, Russian Federation

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TUBULAR HALOGEN LAMP THERMAL CONDITIONS

In the present article the authors provide the results of experimental studies to determine thermal conditions tubular halogen lamps (THL) stamps QHT-220-1300 QHT-220-1000-1 with voltage different from nominal (220 V). A thermal imaging camera was used as one of the measuring instruments. The data obtained are highly relevant to date and are widely used in conducting thermal vacuum tests (TVT) on the basis of JSC «SRC «Progress».

According to the results of the measurements, an approximation formula was derived to calculate the temperature of the middle part of the quartz bulb at different voltages with an error of not more than 2%. Also, the functional dependence of the body temperature of the filament on the supply voltage is obtained. The analysis of the correctness of the results showed good convergence with the data of open printing, which confirms the reliability of the results.

In the light of the latest trends in the creation of digital counterparts of the developed objects, as well as the partial transfer of physical tests to a mathematical experiment, the information obtained will serve as the initial data for the construction of a thermal mathematical model of an infrared radiator of the thermal vacuum complex.

Keywords: thermal vacuum test, infrared radiator, approximation, voltage, filament, temperature, thermal imaging camera, halogen lamp, digital twin.

Введение

Лучистый нагрев от высокоинтенсивных источников излучения весьма эффективен для реализации сложных теплофизических процессов на поверхности объектов испытаний ракетно-космической техники (РКТ). Однако для расчета нагревательных устройств и оптимизации воздействия лучистого потока необходима точная информация по тепловым режимам источников излучения.

Целью работы является определение теплового режима галогенной лампы накаливания (ГЛН) КГТ-220-1300, функционирующей при питающем напряжении, отличном от номинального (220 В). Данный тип ламп нашел широкое применение при проведении термовакуумных испытаний (ТВИ) на базе АО «РКЦ «Прогресс» [1, 2]. В зависимости от организации, которая проводит испытания, могут быть использованы и иные типы ламп [3, 4]. Информация, полученная в ходе этого этапа исследования, послужит в качестве исходных данных для разработки тепловой математической модели инфракрасного излучателя – одного из базовых компонентов комплексной тепловой модели ТВУ.

Конструктивно ГЛН представляет собой линейный источник излучения в виде осесимметричной системы элементов: моноспиральное цилиндрическое тело накала из вольфрама помещено в трубчатую оболочку из кварцевого стекла, заполненную парами йода (брома).

Для номинального питающего напряжения 220 В температура нити накала и температура кварцевой оболочки в средней части для лампы КГТ-220-1300 равны 2800 К (цветовая температура) и 700 К соответственно¹.

Изменение напряжения питания ГЛН приводит к изменению температуры как самого тела накала, так и кварцевой оболочки. Определить действительные значения температуры кварцевой оболочки на первом этапе возможно только прямыми измерениями при помощи термопреобразователя или тепловизионной камеры, работающей в спектральной области, которая соответствует непрозрачности кварцевого стекла². Температуру спирали можно получить прямыми и косвенным способами: измерением яркостной температуры оптическим пирометром с последующим пересчетом на истинную температуру спирали; тепловизионной камерой [5], работающей в спектральной области прозрачности кварцевого стекла; через относительное электрическое сопротивление спирали.

В данной работе применена тепловизионная камера – для измерения температуры колбы. Температуру спирали определяли через изменение относительного электрического сопротивления.

Описание эксперимента

Для проведения экспериментов взяли лампы КГТ-220-1300 и КГТ-220-1000-1 различного года выпуска, не бывшие в эксплуатации. Внешний вид и номинальные паспортные характеристики этих ламп приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Рис. 1. Общий вид ламп КГТ-220-1300 (а) и КГТ-220-1000-1 (б)

¹ ТУ ИФМР.675000.010. Лампы накаливания галогенные инфракрасного излучения.

² ГОСТ ИЕС 60432-3–2016. Лампы вольфрамовые галогенные (не для транспортных средств).

Таблица 1

Характеристики ГЛН

Марка ГЛН	U , В	$l_{т.н}$, мм	P , кВт	$T_{цв}$, К	$T_{кб\ min}$, К	$T_{кб\ max}$, К
КГТ 220-1300	220	300	1,3	2500	523	1073
КГТ 220-1000-1	220	243	1,0	2800	523	1073

Примечание. U – напряжение питания; $l_{т.н}$ – длина тела накала; P – электрическая мощность; $T_{цв}$ – цветовая температура тела накала; $T_{кб\ min}$, $T_{кб\ max}$ – минимальная и максимальная допустимые значения температуры колбы ГЛН соответственно.

Лампа КГТ-220-1000-1 взята на рассмотрение для проверки результатов по определению температуры колбы с помощью тепловизионной камеры и температуры нити накала резистивным методом. Для данной лампы, ввиду ее широкого применения в пищевой промышленности для сушки продуктов питания и при испытаниях теплозащитных покрытий, в печати присутствует информация по ее тепловому режиму, полученная оптическими пирометрами и термопреобразователями, априори являющаяся более точной. Эти данные необходимы для сравнения с результатами измерений, проведенных с использованием тепловизионной камеры. Поскольку применение такого оборудования для измерения температуры полупрозрачных материалов не всегда дает удовлетворительный результат [6].

Питание ламп осуществлялось от сети переменного тока через стабилизатор и трансформатор. Напряжение в цепях изменяли от 20 до 220 В с дискретностью в 20 В. Как показывает практика, форсирование мощности ГЛН при ТВИ не требуется, поэтому максимальное напряжение ограничивается величиной 220 В. На каждом из 11 режимов падение напряжения на лампах и ток в цепях регистрировали мультиметрами Appa 305 с погрешностью измерений в любом из режимов $\pm 0,06\ %$.

Температура колбы

Измерения температуры кварцевой оболочки проводили тепловизионной камерой Fluke Ti55FT-3L/7.5 с диапазоном измерений 253,1–873,15 К и погрешностью ± 2 К. Камера градуирована по модели абсолютно черного тела [7], которое, как известно, испускает и поглощает максимальную при данной температуре тепловую энергию и обладает коэффициентом излучения, близким к единице. Колба имеет коэффициент излучения менее единицы, что вызовет погрешность температурных измерений, определяемую точностью задания корректирующего значения. Влияние коэффициента излучения на температурные измерения обусловлено тем фактом, что тепловой поток F , регистрируемый приемником излучения, является функцией как абсолютной температуры T , так и коэффициента излучения ϵ . Довольно часто связь T и ϵ иллюстрируют на основе закона Стефана – Больцмана для серого тела:

$$F \sim \epsilon \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К.

Связь изменений ΔT и $\Delta \epsilon$ получают в виде

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{4} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}, \quad (1)$$

При реальных измерениях использование формулы (1) не вполне корректно в силу того, что зависимость F от T изменяется в различных спектральных диапазонах. Кроме того, тепловизионная камера также регистрирует отраженное излучение окружающей среды (других предметов). Более корректной является формула

$$F \sim \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda, T) d\lambda + (1 - \varepsilon) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda, T_a) d\lambda, \quad (2)$$

где $R(\lambda, T)$ – функция Планка; $(1 - \varepsilon)$ – коэффициент отражения твердого тела; T_a – температура окружающей среды.

Для фиксированных спектральных диапазонов можно считать, что $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda, T) d\lambda \approx KT^n$,

где K – численный коэффициент; n – показатель степени, зависящий от спектрального интервала. Тогда уравнение (2) примет вид

$$F \sim \varepsilon T^n + (1 - \varepsilon) T_a^n.$$

Для спектральных интервалов 3–5,5 и 7–14 мкм соответственно n равно 10,11 и 4,83 [8].

Очевидно, что тепловизионная камера, калиброванная по черному телу, покажет кажущуюся (радиационную) температуру серого тела $T_{\text{каж}}$ согласно трансцендентному уравнению

$$T_{\text{каж}} = \varepsilon T^n + (1 - \varepsilon) T_a^n. \quad (3)$$

Соотношение вида (3) используется в тепловизоре Fluke Ti55FT-3L/7.5 для автоматической коррекции результатов, если введены значения коэффициента излучения ε и температуры окружающей среды T_a .

В качестве настроечных параметров для тепловизионной камеры были введены коэффициент излучения кварцевого стекла марки КИ [9] 0,94 и температура окружающего воздуха 294,8 К (измерена термогигрометром ИВА-6Н).

На рис. 2 изображены термограммы исследуемых ламп при номинальном питающем напряжении.

Рис. 2. Термограммы кварцевых оболочек ламп КГТ-220-1300 (а) и КГТ-220-1000-1 (б) при номинальном напряжении

Обработка термограмм проводилась попиксельно в программе SmartView 3.0. Результаты обработки вдоль линий L1 и L2 изображены на рис. 3 и 4.

Рис. 3. Температура колб исследуемых ламп вдоль линий L1

Рис. 4. Температура колб исследуемых ламп в зависимости от угла наблюдения

Полученные профили температуры колбы в продольном и поперечном направлениях вдоль линий L1 (соответствует проекции нити накала на колбу) и L2 закономерны по следующим причинам:

- снижение температуры по направлению от центра лампы к ее концам объясняется уменьшением коэффициента взаимооблученности нити и колбы, а также утечек тепловой энергии через токовводы;

- неравномерность значений вдоль линий L1 связана с неидеальной осесимметричностью нити и колбы, а также наличием в некоторых областях провисов спирали;

- в поперечном сечении на периферии ИК-изображения колбы зафиксирован пониженный уровень значений температуры, так как уменьшение коэффициента излучения при больших углах обусловлено ростом отражательной способности в соответствии с законом Френеля, относящимся к прохождению электромагнитных волн через границу раздела двух сред. Изменение в инфракрасной области яркости и, следовательно, температуры объекта, излучение которого подчиняется закону Ламберта, дает постоянную величину для любой ориентации поверхности объекта. Однако излучение кварцевого стекла марки КИ как диэлектрика не подчиняется закону Ламберта. Его коэффициент излучения, как показано на рис. 5, уменьшается при углах наблюдения, превышающих 60° , и эффективные значения температуры становятся меньше действительных³ [10].

³ ГОСТ 15130–86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.

На пересечении линий L1 и L2 (соответствует средней части колбы) тепловизионной камерой для обеих ламп фиксируются максимальные значения температуры 673 и 717 К. Для лампы КГТ-220-1300 эта величина соответствует температуре колбы при номинальном питающем напряжении 220 В с точностью в 1,5 %⁴.

По результатам измерений пяти однотипных ламп КГТ-220-1300 была получена аппроксимационная формула (погрешность не более 2 %) для расчетов температуры средней части колбы в зависимости от напряжения питания:

$$T_k = 331,45758 + 3,58339U - 0,01629U^2 + 32 \cdot 10^{-6}U^3.$$

График данной функции и экспериментальные данные в виде точек изображены на рис. 6.

Рис. 6. Зависимость температуры кварцевой оболочки ГЛН КГТ-220-1300 от напряжения питания и экспериментальные данные

Для лампы КГТ-220-1000-1 в работе [11] представлен график зависимости температуры кварцевой колбы от напряжения питания. График построен по результатам измерений, проведенных хромель-копелевой термопарой, приклеенной снаружи колбы на слой алюминия, напыленный в вакууме. Данный график изображен на рис. 7, где в виде точек были наложены измерения, проведенные тепловизионной камерой.

Рис. 7. Зависимость температуры кварцевой оболочки ГЛН КГТ-220-1000-1 от напряжения питания и экспериментальные данные

Погрешность измерений, полученных тепловизионной камерой, в данном случае не превышает 3 %.

⁴ ТУ ИФМР.675000.010. Лампы накаливания галогенные инфракрасного излучения.

Температура тела накала

В марках проволоки, используемых при производстве ламп типа КГТ, массовая доля вольфрама составляет не менее 99,95 %⁵. Нить накаливания является проводником, нагреваемым за счет эффекта Джоуля, и связь электрического сопротивления нити с удельным электрическим сопротивлением вольфрама описывается формулой [12]

$$\left[\frac{R(T_{\text{пр}})}{R_0} \right] = \beta \frac{\rho_w(T_{\text{пр}})}{\rho_{w300}},$$

где $R(T_{\text{пр}})$ и R_0 – электрическое сопротивление нити накала при температуре $T_{\text{пр}}$ и температуре 300 К соответственно; $\rho_w(T_{\text{пр}})$ и ρ_{w300} – удельное электрическое сопротивление вольфрама при температуре $T_{\text{пр}}$ и 300 К соответственно; β – коэффициент учитывающий изменение формы нити за счет теплового расширения.

Из данной формулы следует, что относительное электрическое сопротивление нити соответствует относительному удельному сопротивлению вольфрама с поправкой на коэффициент β при данной температуре. Соответственно, температуру нити лампы, работающей при напряжении, отличном от номинального, можно определить через относительное электрическое сопротивление вольфрама.

Как указано в табл. 1, цветовая температура $T_{\text{цв}}$ нитей накаливания исследуемых ламп при напряжении 220 В составляет 2800 К для КГТ-220-1300 и 2500 К для КГТ-220-1000-1. Для перехода к истинной температуре воспользуемся следующей формулой [13]:

$$T_{\text{ист}} = \frac{T_{\text{цв}}}{1 + T_{\text{цв}} \frac{(\ln \epsilon_{\lambda_1} / \epsilon_{\lambda_2})}{c_2 (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}},$$

где ϵ_{λ_1} и ϵ_{λ_2} – спектральная излучательная способность вольфрама при длине волны излучения $\lambda_1 = 0,655$ мкм и $\lambda_2 = 0,467$ мкм соответственно; c_2 – вторая постоянная формулы Планка, $c_2 = 1,4388$ см·К.

Следовательно, для исследуемых ламп при номинальном напряжении истинные значения температуры равны 2728 и 2543 К, данные величины могут служить ориентиром для сравнения результатов, описанных ниже.

В ходе экспериментов мультиметром в режиме омметра было измерено электросопротивление нитей накала ламп, находящихся в климатической камере при температуре 300 К. Величины составили 2,4 Ом для КГТ-220-1300 и 3,24 Ом для КГТ-220-1000-1.

После подключения ламп к сети провели измерения силы тока I в цепях и падение напряжения ΔU на лампах для вычисления R . Результаты приведены в табл. 2.

В 2017 г. в рамках международного проекта International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) [14] были проведены исследования по обобщению и уточнению теплофизических свойств вольфрама. Рекомендовано для вычисления удельного электрического сопротивления в диапазоне значений температуры от 100 до 3600 К применять полином четвертой степени, полученный Уайтом и Мингесом [15], включающий поправку на тепловое расширение материала:

$$\rho_w = -0,9680 + 1,9274 \cdot 10^{-2} \cdot T + 7,8260 \cdot 10^{-6} T^2 - 1,8517 \cdot 10^{-9} T^3 + 2,0790 \cdot 10^{-13} T^4.$$

⁵ ГОСТ 19671–91. Проволока вольфрамовая для источников света.

Таблица 2

Результаты электрических измерений

$U_{\text{пит}}, \text{В}$	$\Delta U, \text{В}$		$I, \text{А}$		$R = \Delta U/I, \text{Ом}$		R/R_0	
	КГТ-220-1300	КГТ-220-1000-1	КГТ-220-1300	КГТ-220-1000-1	КГТ-220-1300	КГТ-220-1000-1	КГТ-220-1300	КГТ-220-1000-1
20	17,83	–	1,63	–	10,94	–	4,56	–
40	36,79	–	2,30	–	16,00	–	6,66	–
60	56,38	–	2,80	–	20,14	–	8,39	–
80	75,59	75,65	3,28	2,63	23,05	28,76	9,60	8,85
100	95,23	93,1	3,73	2,95	25,53	31,56	10,64	9,71
120	114,37	111,67	4,14	3,26	27,63	34,26	11,51	10,54
140	134,01	130,71	4,52	3,55	29,65	36,82	12,35	11,33
160	153,94	150,22	4,89	3,82	31,48	39,33	13,12	12,1
180	173,41	170,13	5,23	4,08	33,16	41,7	13,82	12,83
200	191,81	189,82	5,53	4,32	34,69	43,94	14,45	13,52
220	211,08	208,97	5,83	4,54	36,21	46,03	15,09	14,16

Согласно данному выражению отношение $\frac{\rho_w}{\rho_{w300}}$ для температуры вольфрама 2728 и 2543 К равно 15,31 и 14,16 соответственно. Эти величины соответствуют R/R_0 приведенным в табл. 2 данным для напряжения 220 В с точностью 1,5 % для лампы КГТ-220-1300 и 1 % для лампы КГТ-220-1000-1.

После обработки результатов измерений опосредованно через R/R_0 получена зависимость температуры тела накала лампы КГТ-220-1300 в зависимости от питающего напряжения:

$$T_{\text{т.н}} = 535,87 + 27,83U - 0,197U^2 + 7,97 \cdot 10^{-4}U^3 - 1,25 \cdot 10^{-6}U^4.$$

Графическое представление полученных результатов представлено на рис. 8.

Рис. 8. Зависимость температуры тела накала ГЛН КГТ-220-1300 от напряжения питания и экспериментальные данные

Для лампы КГТ-220-1000-1 в работе [16] присутствует график зависимости температуры тела накала в зависимости от напряжения, полученный экспериментально путем измерения яркостной температуры пирометром с последующим пересчетом на истинную температуру. Имеющийся график с нанесенными в виде точек экспериментальными данными изображен на рис. 9.

Рис. 9. Зависимость температуры тела накала ГЛН КГТ-220-1000-1 от напряжения питания и экспериментальные данные

Выводы

В результате исследования теплового режима ГЛН КГТ-220-1300 получены функциональные зависимости температуры кварцевой колбы и тела накала от питающего напряжения, проведен анализ корректности результатов, получаемых альтернативными методами измерений. Для лампы КГТ-220-1000-1 наблюдается хорошая сходимость с данными открытой печати. Учитывая, что материалы, применяемые в конструкциях ламп, и теплофизические процессы, протекающие при их функционировании, идентичны, приведенные результаты можно считать достоверными. Полученные данные для лампы КГТ-220-1300 пригодны к использованию в качестве исходных данных в решении ряда прикладных задач лучистого нагрева при различных режимах работы ламп.

Библиографический список

1. Thermal balance test of PAMELA telescope / C. Vetorre, F. Pamio, A.A. Sochivko, I.P. Lukaschuk, A.S. Smolijaninov // 34th Inter. Conf. on Environmental Systems, 19–22 July. – Colorado Springs, 2004. – Paper № 2004-01-2304. DOI: 10.4271/2004-01-2304
2. Особенности термовакuumных испытаний МКА «АИСТ» / А.И. Китаев, И.Г. Вельмисов, Д.С. Куликов, А.Е. Потапов, О.В. Власенко // Актуальные проблемы ракетно-космической техники: тр. III Всерос. конф., 16–20 сентября 2013 г. – Самара, 2013. – С. 419–420.
3. AGILE satellite thermal balance and thermal vacuum test / M. Giacomazzo, M. Molina, C. Vettore, G. Annoni, P. Sabatini // 37th Inter. Conf. on Environmental Systems, 9–12 July. – Chicago, 2007. – Paper № 2007-01-3165. DOI: 10.4271/2007-01-3165
4. Mars exploration rover thermal test overview / M.T. Pauken, G.M. Kinsella, K.S. Novak, G.T. Tsuyuki, C.J. Phillips // 34th Inter. Conf. on Environmental Systems, 19–22 July. – Colorado Springs, 2004. – Paper № 2004-01-2310. DOI: 10.4271/2004-01-2310
5. Vollmer M., Mollmann K.P. Infrared thermal imaging. – WILEY-VCH, Weinheim, 2010. – 593 p.
6. Прошкин С.С. К вопросу о точности измерения температуры с помощью тепловизора // Вестник международной академии холода. – 2014. – № 1. – С. 51–54.
7. Вавилов В.П., Александров А.Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике / НТФ «Энергопрогресс». – М., 2003. – 76 с.
8. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Спектр, 2009. – 544 с.
9. IR FlexCam Thermal Imagers. Руководство пользователя // Fluke: офиц. сайт. – URL: <http://fluke.com/ru-ru/support/manuals/> (accessed 04 December 2018).
10. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
11. Зворыкин Д.Б., Александрова А.Т., Байкальцев Б.П. Отражательные печи инфракрасного нагрева. – М.: Машиностроение, 1985. – 175 с.

12. Towards thermal model of automotive lamps / M. Dauphin, S. Albin, M. El Hafi, Y. Le Maoult, F.M. Schmidt // 11th Inter. Conf. on Quantitative Infrared Thermography, 11–14 June. – Naples, 2012. DOI: 10.21611/qirt.2012.262
13. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. – М.: Наука, 1964. – 221 с.
14. Tolias P. Analytical expressions for thermophysical properties of solid and liquid tungsten relevant for fusion applications // J. of Nuclear Materials and Energy. – 2017. – Vol. 13. – P. 42–57. DOI: 10.1016/j.nme.2017.08.002
15. White G.K., Minges M.L. Thermophysical properties of some key solids: an update // Inter. J. of Thermophysics. – 1997. – Vol. 18, no. 5. – P. 1269–1327. DOI: 10.1007/BF02575261
16. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 396 с.

References

1. Vettore C., Pamio F., Sochivko A.A., Lukaschuk I.P., Smolijaninov A.S. Thermal balance test of «PAMELA» telescope. 34th International Conference on Environmental Systems. July 19-22, 2004, Colorado Springs. Paper no. 2004-01-2304. DOI: 10.4271/2004-01-2304
2. Kitaev A.I., Velmisov I.G., Kulikov D.S., Potapov A.E., Vlasenko O.V. Osobennosti termovakuumnykh ispytaniy MKA "AIST" [Features of thermal vacuum test «AIST» small satellite]. Proceedings of III All-Russian conference «Aktualnye problemy raketno-kosmicheskoi tekhniki». September 16-20, Samara, 2013, pp. 419-420.
3. Giacomazzo M., Molina M., Vettore C., Annoni G., Sabatini P./ AGILE satellite thermal balance and thermal Vacuum Test. 37th International Conference on Environmental Systems, July 9-12, 2007, Chicago, no. 2007-01-3165. DOI: 10.4271/2007-01-3165
4. Pauken M.T., Kinsella G.M., Novak K.S., Tsuyuki G.T., Phillips C.J. / Mars exploration rover thermal test overview / 34th International Conference on Environmental Systems, July 19-22, 2004, Colorado Springs, no. 2004-01-2310. DOI: 10.4271/2004-01-2310
5. Vollmer M., Mollmann K.P. Infrared Thermal Imaging. WILEY-VCH, Weinheim, 2010, 593 p.
6. Proshkin S.S. K voprosu o tochnosti izmerenija temperatury s pomoshhju teplovizora [The problem of the accuracy of temperature measuring by means of a thermographic camera]. Journal of International Academy of Refrigeration, 2013, no. 1, pp. 51-54.
7. Vavilov V.P., Aleksandrov A.N. Infkrasnaia termograficheskai diagnostika v stroitel'stve i energetike [Infrared thermographic diagnostics in construction and energy]. Moscow: Energoprogress, 2003, 76 p.
8. Vavilov V.P. Infkrasnaia termografiia i teplovoi kontrol [Infrared thermography and heat control]. Moscow: Spektr, 2009, 544 p.
9. IR FlexCam Thermal Imagers. User guide, available at: <http://fluke.com/ru-ru/support/manuals/> (accessed 4 December 2018).
10. Gossorg Zh. Infkrasnaia termografiia. Osnovy, tekhnika, primenenie. [Infrared thermography. Basics, technique, application]. Moscow: Mir, 1988, 416 p.
11. Zvorykin D.B., Aleksandrova A.T., Baikaltsev B.P. Otrazhatelnye pechi infkrasnogo nagreva [Reflective infrared heating ovens]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, 175 p.
12. Dauphin M., Albin S., Hafi M. El, Maoult Y. Le, Schmidt F.M. Towards thermal model of automotive lamps. 11th International Conference on Quantitative Infrared Thermography. June 11-14, 2012. Naples. DOI: 10.21611/qirt.2012.262
13. Bramson M.A. Infkrasnoe izluchenie nagretykh tel [Infrared radiation of heated bodies]. Moscow: Nauka, 1964, 221 p.
14. Tolias P. Analytical expressions for thermophysical properties of solid and liquid tungsten relevant for fusion applications. Journal of Nuclear Materials and Energy, 2017, vol. 13, pp. 42-57. DOI: 10.1016/j.nme.2017.08.002
15. White G.K., Minges M.L. Thermophysical properties of some key solids: an update. International Journal of Thermophysics, 1997, Vol. 18, No. 5. pp. 1269-1327. DOI: 10.1007/BF02575261
16. Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Teploobmen i teplovye ispytaniia materialov i konstruktssii aerokosmicheskoi tekhniki pri radiatsionnom nagreve [Heat transfer and thermal testing of materials and structures of aerospace engineering during radiation heating]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2014, 396 p.

Об авторах

Куликов Дмитрий Сергеевич (Самара, Россия) – инженер-конструктор АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» (443009, г. Самара, ул. Земеца, д. 18, e-mail: kulikovsamspace@gmail.com).

Бирюк Владимир Васильевич (Самара, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели» ФГБОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева» (443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 314, e-mail: teplotex_ssau@bk.ru).

Моисеев Виктор Викторович (Самара, Россия) – инженер по испытаниям АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» (443009, г. Самара, ул. Земеца, д. 18, e-mail: moiseev.viktor@bk.ru).

About the authors

Dmitriy S. Kulikov (Samara, Russian Federation) – Design Engineer, JSC "Space Rocket Center "Progress" (18, Zemetsa st., Samara, 443009, Russian Federation, e-mail: kulikovsamspace@gmail.com).

Vladimir V. Biryuk (Samara, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of Heating Engineering and Heat Engines Department, Korolev Samara National Research University (34, Moskovskoye highway, Samara, 443086, Russian Federation, e-mail: teplotex_ssau@bk.ru).

Viktor V. Moiseev (Samara, Russian Federation) – Test Engineer, JSC "Space Rocket Center "Progress" (18, Zemetsa st., Samara, 443009, Russian Federation, e-mail: moiseev.viktor@bk.ru).

Получено 12.03.2019