DOI: 10.15593/2224-9982/2020.61.06

УДК 621.326: 629.78

Д.С. Куликов

Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, Россия

ЧИСЛЕННАЯ ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Приводятся результаты работы по созданию численной тепловой модели инфракрасного излучателя на базе трубчатой галогенной лампы накаливания КГТ-220-1300 как одного из элементов оборудования, используемого при проведении термовакуумных испытаний космических аппаратов.

В качестве инструмента для решения комплексной задачи теплообмена применялось программное обеспечение Thermal Model Generator.

Проведены варианты расчетов для функционирования лампы при различных значениях напряжения. Результаты математического моделирования с применением полосовой аппроксимации свойств элементов системы вкпе с методом Монте-Карло в решении задачи теплообмена излучением системы тело накала–кварцевая оболочка–окружающая среда показали высокую эффективность. Выполненный анализ корректности результатов продемонстрировал хорошую сходимость с данными ранее проведенных экспериментов по измерению температуры кварцевой оболочки, что подтверждает достоверность результатов.

Получение в распоряжение разработчиков систем обеспечения теплового режима КА подобного рода качественной модели является важным шагом в комплексной работе, нацеленной на проведение сквозного математического моделирования тепловых режимов КА, а также позволит решить ряд вопросов, связанных с методическим обеспечением ТВИ, их проведением и оптимизацией.

Ключевые слова: термовакуумные испытания, инфракрасный излучатель, полосовая аппроксимация, метод Монте-Карло, тело накала, температура, галогенная лампа, Thermal Model Generator.

D.S. Kulikov

Space Rocket Center “Progress”, Samara, Russian Federation

NUMERICAL THERMAL MODEL OF AN INCANDESCENT LAMP FOR SATELLITES TESTING

In the present article the author gives the results work to create a numerical thermal model of infrared (IR) emitter on the base of tubular halogen lamp (THL) KGT-220-1300, as one of the elements of the equipment used when conducting thermal vacuum tests (TVT) of satellites.

As a tool to solve complex problem of heat transfer used software Thermal Model Generator.

Variants of calculations for the operation of the lamp at different voltages are carried out. The results of mathematical modeling using band approximation of the properties of the system elements in combination with the Monte Carlo method in solving the problem of heat exchange by radiation showed high efficiency. The performed analysis of the correctness of the results showed good convergence with the data of previous experiments on measuring the temperature of the quartz bulb, which confirms the reliability of the results. Getting a high-quality model of this type at the disposal of satellite thermal engineer is an important step in the complex work aimed at conducting end-to-end mathematical modeling of satellite thermal design, and will also solve a number of issues related to the methodological support of TVT, their implementation and optimization.

Keywords: thermal vacuum test, infrared radiator, band approximation, Monte-Carlo method, filament, temperature, halogen lamp, Thermal Model Generator.

Введение

ИК-имитаторы на базе трубчатых галогенных ламп накаливания (ГЛН) довольно часто используются в качестве источников, обеспечивающих пространственно-временное рас-

пределение энергетической облученности на внешней поверхности космических аппаратов (КА) в ходе проведения термовакуумных испытаний (ТВИ). Этот вид испытаний является самым ресурсозатратным из всех этапов экспериментальной отработки КА. Естественно,

что применение математического моделирования для данного вида испытаний является весьма привлекательным с точки зрения сокращения времени их проведения за счет переноса части испытательных режимов на математический эксперимент. Для этого помимо тепловой модели самого объекта испытаний необходимо иметь и модель испытательного стенда. Наибольшую трудность в моделировании внутрикамерных процессов представляет учет инфракрасных излучателей (ИК).

Математические модели ИК-излучателей и имитаторов на их базе можно условно разделить на два типа:

- упрощенные аналитические для определения облученности объекта испытаний и оценки ее неравномерности, используемые для разработки оптимального с этой точки зрения имитатора;

- комплексные численные модели, учитывающие теплофизические и радиационные параметры конструктивных элементов излучателей, с возможностью моделирования всех видов теплообмена и применения этих моделей для анализа внутрикамерных процессов.

Целью работы является создание численной тепловой модели ГЛН КГТ-220-1300 с применением современного средства инженерного анализа как первого этапа на пути разработки комплексной модели излучателя, включающего, помимо прочего, угловой рефлектор. На данном этапе было необходимо выбрать метод решения поставленной задачи, проверить работоспособность программного обеспечения и корректность получаемых результатов на модели, ограниченной лишь лампой, т.е. решить задачу теплообмена излучением в системе с наличием полупрозрачного тела (кварцевой колбы) и сопоставить результаты с ранее полученными экспериментальными данными по температуре кварцевой колбы [1], которая изменяется в зависимости от напряжения питания.

Поскольку в процессе функционирования лампы колба нагревается до значительных значений температуры, кроме энергии излучения самого тела накала, нужно учитывать пропущенное и собственное излучение полупрозрачной оболочки. Ввиду этого основным критерием оценки достоверности модели будет

совпадение именно расчетных и экспериментальных значений температуры колбы.

Анализ подходов

Математические модели рассматриваемого типа излучателей, описанные в предыдущих работах [2, 3], потребовали введения следующих упрощений:

- кварцевая колба рассматривалась как единственный источник излучения, а взаимодействие между телом накала и колбой не учитывается;

- энергия излучения генерируется поверхностью кварцевой колбы;

- интенсивность излучения с поверхности колбы не зависит от направления;

- излучение носит диффузный характер;

- все поверхности являются «серыми»;

- излучение, отраженное в сторону источника, не учитывается;

- доля поглощенного, пропущенного и отраженного поверхностями излучения не зависит от длины волны.

Как отмечается самими авторами, эти упрощения вводят определенные ограничения на применение разработанных математических моделей и имеют существенные неточности. При моделировании лучистого теплообмена в этих работах применены методы расчета на основе моделей диффузного излучения и отражения (метод угловых коэффициентов) [4].

Наиболее корректным подходом в системе с наличием полупрозрачных тел представляется разработка селективной модели с трассировкой лучей методом Монте-Карло совместно с полосовой аппроксимацией радиационных свойств материалов [5–9]. Этот метод также хорошо разработан и успешно применяется в различных областях, особенно в системах автоматизированного проектирования и инженерного анализа. Основным недостатком этого метода является значительное время расчета, необходимое для достижения требуемой точности. Однако применение многоядерной вычислительной техники с возможностью распараллеливания процесса решения делает этот метод наиболее предпочтительным, тем более что разработаны алгоритмические приемы (обратная трассировка лучей), позволяющие ускорить процесс вычисления.

Вольфрамовое тело накала имеет несерый спектр излучения и характеризуется зависимостями спектральной степени черноты от температуры и длины волны, т.е. $\varepsilon_\lambda = f(T\lambda)$.

На рис. 1 приведены ранее полученные [10] типичные индикатрисы относительной яркости излучения и плотности излучения для лампы КИ 220-1000-1, где индикатрисы относительной плотности излучения лампы $R_\lambda(\varphi)/R_\lambda(\varphi_n)$ сопоставлены с индикатрисой диффузного (косинусного) цилиндрического излучателя $R^0(\varphi)/R^0(\varphi_n)$. Здесь $R(\varphi_n)$ – плотность интегрального излучения по нормали.

Рис. 1. Индикатриса излучения ГЛН равномерного излучения: 1 – относительная плотность излучения $R^0(\varphi)/R^0(\varphi_n)$ для абсолютно черного тела (а.ч.т.), т.е. для диффузного или косинусного излучателя; 2 – относительная плотность излучения $R_\lambda(\varphi)/R_\lambda(\varphi_n)$ для лампы КИ-220-1000-1 при $U_{\text{пит}} = 200$ В; 3, 4 – относительная лучистость (яркость) $I(\varphi)/I(\varphi_n)$ при $U_{\text{пит}} = 200$ В и $U_{\text{пит}} = 75$ В

Аналогичные результаты получены в работах [11, 12]. Анализ приведенных индикатрис показывает, что отклонение индикатрисы плотности излучения и яркости от закона Ламберта для ГЛН незначительно. Исходя из этого, с достаточной для инженерных расчетов точностью можно считать, что локально неравномерное по длине излучение спирали может быть представлено равномерным излучением цилиндра.

Стенка колбы из кварцевого стекла, разделяющая пространство между телом накала и поверхностью объекта испытаний, должна существенно влиять на лучистый теплообмен (ЛТО) в термовакuumной камере. Это следует из анализа спектральных характеристик поглощения и пропускания кварцевого стекла марки КИ, применяемого для колб ГЛН. Стекло марки КИ с типичной толщиной 1–5 мм

в диапазоне значений температуры 300–1100 К имеет плавный переход от почти полной прозрачности при $\lambda < 3$ мкм ($\tau_\lambda \approx 95\%$) до непрозрачности при $\lambda > 4,2$ мкм. Спектральная степень черноты кварцевых стекол характеризуется существенной зависимостью от длины волны т.е. $\varepsilon_\lambda = f(\lambda)$. Индикатриса излучения стекол толщиной 1–5 мкм в областях непрозрачности близка к диффузной [13]. Отражение в спектре $\lambda = 0,5 \dots 9$ мкм не превышает 5 % [14].

Из вышесказанного следует, что поверхности, участвующие в теплообмене излучением, характеризуются ярко выраженными селективными свойствами. Ввиду этого в модели необходимо учитывать селективность компонентов теплообмена, что, естественно, окажет весьма серьезное влияние на значение как температуры колбы, так и в последующем результирующего потока на объекте испытаний.

Энергетическая характеристика ГЛН

Лучистый поток монохроматического излучения а.ч.т.

$$F_\lambda = r_\lambda S d\lambda,$$

где r_λ – спектральная интенсивность плотности излучения; S – площадь поверхности излучающего тела.

Тело накала и кварцевую оболочку можно отнести к равноярким цилиндрическим излучателям, имеющим общую ось симметрии. Тогда для тела накала

$$F_{\lambda \text{ т.н}} = r_{\lambda \text{ а.ч.т.}}(T_{\text{т.н}}) \varepsilon_\lambda(T_{\text{т.н}}) \pi d L d\lambda, \quad (1)$$

для оболочки

$$F_{\lambda \text{ т.н}} = r_{\lambda \text{ а.ч.т.}}(T_0) \varepsilon_\lambda(T_0) \pi D L d\lambda, \quad (2)$$

где $r_{\lambda \text{ а.ч.т.}}(T_{\text{т.н}})$ и $r_{\lambda \text{ а.ч.т.}}(T_0)$ – спектральная плотность излучения абсолютно черного тела при температуре тела накала $T_{\text{т.н}}$ и температуре оболочки T_0 ; $\varepsilon_\lambda(T_{\text{т.н}})$ и $\varepsilon_\lambda(T_0)$ – спектральная излучательная способность тела накала при $T_{\text{т.н}}$ и кварцевой оболочки при T_0 ; d, D, L – геометрические размеры тела накала и оболочки.

Для равнояркого цилиндрического излучателя (с темными торцами) лучистый поток

$$F = BLD\pi^2 = \pi^2 I_{90}, \quad (3)$$

где I_{90} – сила света в нормальном направлении.

Следовательно, для трубчатой лампы спектральная плотность силы излучения в нормальном направлении

$$I_\lambda = [F_{\lambda \text{ т.н}} \tau_\lambda(T_0) + F_{\lambda \text{ о}}] \frac{1}{\pi^2},$$

где $\tau_\lambda(T_0)$ – спектральная пропускательная способность кварцевой оболочки, нагретой до температуры T_0 .

После подстановки формул (1) и (2) в выражение (3) имеем

$$I_\lambda = r_{\lambda \text{ а.ч.т.}}(T_{\text{т.н}}) \varepsilon_\lambda(T_{\text{т.н}}) \tau_\lambda(T_0) \cdot \frac{dL}{\pi} d\lambda + r_{\lambda \text{ а.ч.т.}}(T_0) \varepsilon_\lambda(T_0) \cdot \frac{DL}{\pi} d\lambda, \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), чтобы корректно определить энергетическую облученность на поверхности объекта испытаний необходимо учитывать собственное излучение кварцевой оболочки, нагреваемой за счет частичного поглощения энергии тела накала.

Для исследуемой модели примем следующие допущения:

- коэффициент отражения кварцевого стекла равен нулю;
- смещение хода луча в результате эффекта преломления на границах раздела сред несущественно;
- эффекты поляризации излучения при многократных отражениях внутри слоя стекла несущественны;
- нить накаливания для лампы с потребляемой мощностью 1300 Вт представляется в виде цилиндра диаметром 1,3 мм.

Первое допущение вносит в модель незначительные погрешности, поскольку по формуле Френеля и по экспериментальным данным [15] коэффициент отражения кварцевого стекла составляет менее 0,05 в диапазоне длин волн $\lambda = 0,5 \dots 9$ мкм.

Поскольку в расчете методом Монте-Карло применительно к данной задаче в отсутствие рефлектора не следует учитывать отражение, принятые допущения о несущественном влиянии эффектов преломления и поляризации являются оправданными.

Спектральные характеристики материалов, закладываемые в модель

В работе [15] получена эмпирическая формула вида

$$\varepsilon_{\lambda, T \text{ т.н}} = \varepsilon_{\lambda, T \text{ в}} + \Delta\varepsilon,$$

где $\varepsilon_{\lambda, T \text{ т.н}}$, $\varepsilon_{\lambda, T \text{ в}}$ – спектральная излучательная способность тела накала и вольфрама для определенного диапазона значений температуры.

Наличие $\Delta\varepsilon$ обусловлено тем, что между соседними витками спирали имеются пространственные зоны, излучательная способность которых отличается от излучательной способности материала спирали: значение величины $\Delta\varepsilon$ зависит в основном от диаметра проволоки и коэффициента шага f_s [16]. Данные по спектральной излучательной способности вольфрама в интервале для волн от 0–20 мкм были взяты из работы [17] и представлены на рис. 2.

Использовать эти данные даже с учетом применения вычислительной техники достаточно проблематично, поэтому применим полосовую аппроксимацию, при которой весь интересный диапазон длин волн разобьем на ряд интервалов конечного размера. После коррекции исходных данных с учетом $\Delta\varepsilon$ и пересчета по приему полосовой аппроксимации спектральная излучательная способность для тела накала в температурных условиях, характерных для функционирования лампы при различных напряжениях, представлена на рис. 3.

Спектральную излучательную способность кварцевой оболочки находили из выражения [18]

$$\tau_\lambda + r_\lambda + \varepsilon_\lambda = 1,$$

основываясь на спектральной пропускательной способности стекла КИ¹. При этом важно отметить, что спектральные полосы должны быть выбраны идентичными для обоих материалов. Это основное требование программного обеспечения, используемого в работе. Пример полученной спектральной излучательной способности кварцевой оболочки с применением полосовой аппроксимации представлен на рис. 4.

¹ ГОСТ 15130–86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.

Рис. 2. Спектральная излучательная способность вольфрама

Рис. 3. Применение полосовой аппроксимации для спектральной излучательной способности тела накала

Рис. 4. Применение полосовой аппроксимации для спектральной излучательной (поглощательной) способности кварцевой колбы

Построение тепловой модели

Алгоритм разработки модели и проведения вычислений разделен на следующие стадии:

- создание геометрической модели объекта исследований;
- на основе созданной модели генерируется упорядоченная сетка;
- постановка граничных условий для решения исследуемой задачи;
- численный расчет.

Каждая из перечисленных стадий в значительной мере определяет качество и точность выполняемых расчетов.

Для разработки 3D-модели использовался программный комплекс Siemens NX. В качестве инструмента для моделирования процессов теплообмена применен решатель Thermal Solver Generator (TMG).

С целью оптимизации финальной численной модели в рассмотрение берется только тело накала и часть кварцевой колбы, соответствующая его длине, т.е. токовводы, крючки и держатели были исключены. Геометрические размеры колбы взяты из источника². На рис. 5 изображена тепловая модель лампы.

Было проведено несколько серий расчетов с разными вариантами граничных условий. В качестве граничных задавались следующие условия:

- температура тела накала в соответствии с полученной ранее аппроксимационной формулой [1]

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

- поскольку расчет проводился для нормальных лабораторных условий, необходимо учесть естественный конвективный теплообмен колбы с окружающим воздухом. Коэффици-

циент теплоотдачи для условий естественной конвекции рассчитывается по формуле

$$\alpha_{\text{ж}} = 0,46 \text{Gr}^{0,25} \Lambda_{\text{ж}} / d = 0,46 \left(g \beta \Delta T l^3 / \nu^2 \right)^{0,25} \Lambda_{\text{ж}} / d,$$

где Gr – критерий Грасгофа; d – характерный размер; β – коэффициент объемного расширения воздуха. Для условий, приведенных в условиях, $\alpha_{\text{ж}} = 19 \dots 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

- также было задано условие radiative environment для учета ухода излучения от тела накала и колбы в окружающее пространство.

При итерационном подходе положительный результат расчетов был получен при настройках метода Монте-Карло, соответствующего 50 000 лучам на грань конечного элемента. На рис. 6 изображена визуализация трассировки лучей (2 % от общего числа). При этом красными линиями отображается излучение со спектром, соответствующим телу накала, синим – ослабленное излучение тела накала (за счет поглощения части энергии кварцевой колбой), а также собственное излучение колбы.

Расчеты были проведены для большого числа вариантов функционирования лампы в диапазоне значений напряжения от 20 до 220 Вт. Здесь приведем результаты в виде температурного поля по кварцевой колбе для варианта работы при номинальном напряжении $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ (рис. 7) и графики изменения значений температуры по длине лампы кварцевой колбы (рис. 8).

Температурное поле по лампе симметрично относительно геометрического центра, равномерно. Приведенные результаты математического моделирования хорошо сходятся с ранее проведенными экспериментальными исследованиями теплового режима данного типа ламп [1].

Рис. 5. Тепловая модель ГЛН КГТ-220-1300

²ГОСТ 15177–70. Трубы из прозрачного кварцевого стекла для источников света и электровакуумных приборов.

Рис. 6. Визуализация трассировки лучей в исследуемой модели

Рис. 7. Температурное поле по кварцевой колбе
(вариант функционирования при номинальном напряжении) Рис. 8. График распределения температуры по длине колбы
(вариант функционирования при номинальном напряжении)

Заключение

В результате данного этапа исследования была разработана тепловая модель ГЛН КГТ-220-1300, отработана верность принятых подходов, а также эффективность и работоспособность выбранного программного обеспечения для решения подобного класса задач.

Для перспективных КА, габаритные размеры которых соизмеримы с размерами излучателя, с целью расчета требуемого уровня лучистой энергии и распределения ее по поверхности объекта испытаний при максимальном использовании излученной энергии

необходимо использовать лампу с зеркальным рефлектором.

В последующем на базе полученного задела будет разработана комплексная численная тепловая модель ИК-излучателя, позволяющая рассчитывать энергетическую облученность на поверхности объекта испытаний как от самой лампы, так и от зеркального рефлектора, входящего в состав излучателя.

Естественно, что использование в инженерной практике такого рода тепловых моделей позволит уменьшить время и затраты на проведение ТВИ.

Библиографический список

1. Куликов Д.С., Бирюк В.В., Моисеев В.В. Экспериментальное исследование теплового режима трубчатой галогенной лампы накаливания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2019. – № 56. – С. 92–101. DOI: 10.15593/2224-9982/2019.56.08
2. Ash R.L. An analysis of the radiation field beneath a bank of tubular quartz lamps / NASA CR-191551. – 1972. – 34 p.
3. Hanson M.A., Casey J.J. High temperature test technology AFWAL-TR-863105. – U.S. Air Force, San Diego, 1987.
4. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
5. Boulet P., Parent G., Acem Z. Radiation emission from a heating coil or a halogen lamp on a semitransparent sample // Int. J. of Thermal Sci. – 2014. – Vol. 77. – P. 223–234.
6. Logerais P.O., Bouteville A. Modelling of infrared halogen lamp in a rapid thermal system // Int. J. of Thermal Sci. – 2010. – Vol. 49. – P. 1437–1445.
7. Мишин Г.С., Саква Н.В. Выбор характеристик ИК-имитатора внешней тепловой нагрузки при тепловакуумных испытаниях СОТР КА с тепловыми трубами // Тепловые трубы для космического применения: междунар. науч.-техн. конф., г. Химки, 15–18 сентября 2009. – Химки, 2009. – С. 72.
8. Bordival M., Schmidt F.M. A ray tracing method to simulate the infrared heating of semi-transparent thermoplastics // Int. J. of Material Forming. – 2010. – Vol. 3. – P. 809–812.
9. Benoit C., Fabrice S. Infrared heating stage simulation of semi-transparent media (PET) using ray tracing method // Int. J. of Material Forming. – 2011. – Vol. 4. – P. 1–10.
10. Зворыкин Д.Б., Прохоров Ю.И. Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности. – М.: Энергия, 1980. – 174 с.
11. Гинзбург А.С., Сыроедов В.И., Плаксин Ю.М. Экспериментальные исследования излучательных способностей кварцевых ИК-генераторов // Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. – 1975. – Вып. 109. – С. 353–359.
12. Сеттарова З.С., Сергеев О.А., Николаева З.Д. Температурная зависимость коэффициента поглощения некоторых кварцевых стекол // Теплофизика высоких температур. – 1970. – Т. 10, № 3. – С. 306–312.
13. Излучательные свойства твердых материалов: справ. / под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 471 с.
14. Вугман С.М., Волков В.И. Галогенные лампы накаливания. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
15. Прохоров Ю.И., Иванов В.И. Спектры излучения инфракрасных трубчатых ламп накаливания // Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. – 1971. – Вып. 112–113. – С. 24–26.
16. Branstetter J.R. Formulas for radiant heat transfer between nongray parallel plates of polished refractory metals / NASA TN D-2902. – 1965. – 17 p.
17. Maya heat transfer technologies / Ltd. Thermal Solver TMG Reference Manual Simcenter. – 12 February 2018. – 598 p.
18. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 528 с.

References

1. Kulikov D.S, Biryuk V.V., Moiseyev V.V. Eksperimentalnoye issledovaniye teplovogo rezhima trubchatoy galogennoy lampy nakalivaniya [Experimental investigation of tubular halogen lamp thermal conditions]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2019, no. 56, pp. 92-101. DOI: 10.15593/2224-9982/2019.56.08.
2. Ash, R. L. An Analysis of the Radiation Field Beneath a Bank of Tubular Quartz Lamps, NASA CR-191551, 1972.
3. Hanson, M. A., Casey, J. J. High Temperature Test Technology AFWAL-TR-863105, U.S. Air Force, San Diego, 1987.
4. Bloh A.G., Zhuravljov Ju.A., Ryzhkov L.N. Teploobmen izlucheniem [Heat exchange by radiation]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 432 p.
5. Boulet P., Parent G., Acem Z. Radiation emission from a heating coil or a halogen lamp on a semitransparent sample. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, vol. 77, pp. 223-234.

6. Logerais P.O., Bouteville A. Modelling of infrared halogen lamp in a rapid thermal system. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, vol. 49, pp. 1437-1445.
7. Mishin G.S., Sakva N.V. Vybor harakteristik IK imitatora vneshnej teplovoj nagruzki pri teplova-kuumnyh ispytaniyah SOTR KA s teplovy trubami [The choice of characteristics of IR – simulator of external thermal loading at thermal vacuum tests of satellite with heat pipes // Proceedings of Int. Conference Heat Pipes for Space Application, Himki, 15–18 September 2009. Himki, 2009, pp. 72.
8. Bordival M., Schmidt F.M. A ray tracing method to simulate the infrared heating of semi-transparent thermoplastics. *International Journal of Material Forming*, 2010, vol. 3, pp. 809-812.
9. Benoit C., Fabrice S. Infrared heating stage simulation of semi-transparent media (PET) using ray tracing method. *International Journal of Material Forming*, 2011, vol. 4, pp. 1-10.
10. Zvorykin D.B., Prohorov Ju.I. Primenenie luchistogo infrakrasnogo nagreva v jelektronnoj promyshlennosti [Application of infrared heating in electronic industry]. Moscow: Energiya, 1980, 174 p.
11. Ginzburg A.S., Syroedov V.I., Plaksin Ju.M. Jeksperimental'nye issledovaniya izluchatel'nyh sposobnostej kvarcevyh IK-generatorov [Experimental studies of quartz IK-generators emittances]. *Elektrotehnicheskaya promyshlennost. Seriya Elektrotermiya*, 1975, no. 109, pp. 353-359.
12. Settarova Z.S., Sergeev O.A., Nikolaeva Z.D. Temperaturnaja zavisimost' koeficienta pogloshheniya nekotoryh kvarcevyh stjokol [Temperature dependence of coefficient of absorption of some quartz glasses]. *High Temperature*, 1970, vol. 10, no. 3, pp. 306-312.
13. Izluchatelnye svojstva tvjordyh materialov [Radiating properties of hard materials]. Ed. A.E. Shejndlin. Moscow: Energiya, 1974, 471 p.
14. Vugman S.M., Volkov V. I. Galogennye lampy nakalivaniya [Halogen incandescent lamps]. Moscow: Energiya, 1980, 136 p.
15. Prokhorov Ju.I., Ivanov V.I. Spektry izlucheniya infrakrasnyh trubchatyh lamp nakalivaniya [Spectral bands of infrared tubular incandescent lamps]. *Elektrotehnicheskaya promyshlennost. Seriya Elektrotermiya*, 1971, pp. 112-113.
16. J. Robert Branstetter. Formulas for radiant heat transfer between nongray parallel plates of polished refractory metals. Nasa of TN D-2902. 1965. 17 p.
17. Maya Heat Transfer Technologies, Ltd. Thermal Solver TMG Reference Manual Simcenter 12.0.2.2018. 598 p.
18. Spravochnaja kniga po svtetotekhnike [The reference book about lighting technology]. Ed. by Yu.B. Aizenberg. Moscow: Energoatomizdat, 1995. 528 p.

Об авторе

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

About the author

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

Получено 29.06.2020