

## ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В ИНФРАКРАСНЫХ ИМИТАТОРАХ

А.В. Колесников<sup>1</sup>

А.В. Палешкин<sup>1</sup>

П.Ф. Пронина<sup>1</sup>

Е.В. Шеметова<sup>2</sup>

paleshkin@mai.ru

pronina-p19.94@yandex.ru

elena\_shemetova08@mail.ru

<sup>1</sup> МАИ, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «НПО Лавочкина», г. Химки, Московская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

На основании данных о спектральной поглотительной способности материалов и покрытий, применяемых в космической технике, выполнена оценка уровня возможных погрешностей моделирования заданных внешних тепловых нагрузок на поверхность космических аппаратов в инфракрасных имитаторах с серыми по радиационным характеристикам излучателями при вводимом в известных методиках определения оптимального режима их работы предположении о независимости в полосе спектра излучения имитатора спектральной поглотительной способности элементов наружной поверхности космического аппарата от длины волны падающего на них излучения. Полученные результаты свидетельствуют о зависимости погрешностей от температуры излучателей имитатора для покрытий, спектральные радиационные характеристики которых в ближней инфракрасной, средней и дальней областях спектра кардинально различаются. Для некоторых покрытий погрешности являются недопустимо большими. Приведен вывод о необходимости корректировки известных методик решения задачи выбора режимов работы инфракрасных имитаторов. Выбор основан на использовании итерационного процесса поиска решения задачи, заключающегося в многократном определении вектора интенсивности излучения модулей имитатора путем минимизации целевой функции  $\psi$  при одновременном уточнении на каждой итерации значений коэффициентов, характеризующих погло-

### Ключевые слова

*Космический аппарат, тепловые испытания, внешние тепловые нагрузки, спектральные погрешности, инфракрасные источники излучения*

щательную способность элементов наружной по- Поступила 24.05.2021  
верхности космического аппарата по отношению Принята 06.09.2021  
к излучению, приходящему от модулей имитатора © Автор(ы), 2022

---

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России  
(проект № FSFF-2020-0016)*

**Введение.** При экспериментальных исследованиях, связанных с моделированием воздействия внешних тепловых потоков на поверхность космических аппаратов (КА) [1–5], все большее применение находят инфракрасные (ИК) имитаторы, представляющие собой системы ИК-источников излучения, размещаемых в тепловакуумной установке вокруг испытуемого объекта. Различные по конструкции и способу подвода энергии такие имитаторы имеют следующую особенность — в рабочем объеме не воспроизводятся параметры полей излучения источников, тепловое воздействие которых на поверхность КА они призваны воспроизводить в процессе испытаний. Воспроизводятся лишь расчетные значения внешних тепловых нагрузок, источником которых могут быть электромагнитное излучение Солнца, тепловое излучение планет, их спутников, а также тех частей КА, которые не вошли в состав испытуемого объекта, например, из-за ограниченности размеров экспериментальной установки. Под тепловыми нагрузками понимаются плотности поглощаемых элементами поверхности КА внешних тепловых потоков.

Практическое использование ИК-имитаторов сопряжено с необходимостью решения чрезвычайно сложной задачи управления их энергетическими режимами эксплуатации, т. е. с выбором режимов, при реализации которых обеспечивалась бы максимально возможная точность моделирования заданных тепловых нагрузок в рамках принципиальных возможностей рассматриваемой излучающей системы.

Существуют различные подходы к решению задач по моделированию тепловых воздействий и работы ИК-имитаторов различного типа [4, 6–13]. Методические подходы [8–11] основаны на упрощающем предположении о постоянстве спектральной поглощательной способности  $A_\lambda$  покрытий тепловоспринимающих элементов испытуемого объекта во всей полосе спектра падающего от имитатора излучения. По сути, вводится предположение о том, что покрытие каждого тепловоспринимающего элемента является серым в полосе спектра исходящего от имитатора излучения. Сильная зависимость  $A_\lambda$  многих покрытий от длины волны  $\lambda$  падающего на них излучения, а также радиационная температура излучающих элементов имитатора, изменяющаяся в широких пределах (от малых значе-

ний до значительно превышающих 1000 К), указывают на возможные погрешности моделирования, обусловленные введенным упрощающим предположением. Результаты оценки зависимости уровня этих погрешностей от радиационной температуры излучателей послужат основой решения вопроса о корректности и области применения известных методических подходов к определению режимов работы ИК-имитаторов.

Во всех известных работах, посвященных оптимизации энергетических режимов работы ИК-имитаторов, критерием оптимальности является достижение минимума функции  $\psi$ , представляющей собой сумму квадратов погрешностей  $\Delta q_i$  воспроизведения в имитаторе, содержащем  $n$  излучающих модулей, расчетных значений  $q_i^0$  внешних тепловых потоков к  $N$  выделенным тепловоспринимающим элементам испытуемого объекта ( $i = 1, 2, \dots, N$ ). Величина  $\Delta q_i$  равна разности плотности  $q_i$  потока излучения, поглощаемого  $i$ -м элементом в условиях экспериментальной установки, и заданного значения плотности теплового потока  $q_i^0$ , подводимого к выделенным элементам в штатных условиях эксплуатации. При этом

$$q_i = \sum_{j=1}^n \pi A_{ij} \Phi(\vec{r}) \varphi_{di-j} J_j(0),$$

где  $n$  — число модулей имитатора;  $A_{ij}$  — интегральная поглощательная способность поверхности  $i$ -го тепловоспринимающего элемента по отношению к излучению, исходящему от  $j$ -го модуля;  $\Phi(\vec{r})$  — индикатриса излучения элемента имитатора;  $\vec{r}$  — единичный вектор, направленный от  $j$ -го излучателя к  $i$ -му тепловоспринимающему элементу;  $\varphi_{di-j}$  — локальный диффузный угловой коэффициент  $i$ -го элемента и  $j$ -го излучателя;  $J_j(0)$  — интенсивность излучения  $j$ -го модуля (если рассматривается имитатор модульного типа) в направлении своей нормали.

Вид функции  $\psi$ , являющейся функцией  $n$  переменных  $J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0)$ , определяется следующим выражением:

$$\psi(J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0)) = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^n \pi A_{ij} \varphi_{di-j} \Phi(\vec{r}) J_j(0) - q_i^0 \right)^2.$$

Для определения оптимальных значений  $J_j(0)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , решается задача минимизации функции  $\psi$  [8–10]. На искомые значения компонентов вектора  $J(0) = (J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0))$  интенсивности излучения модулей имитатора накладываются ограничения, вытекающие из их фи-

зического смысла и допустимых условий их эксплуатации  $J_j(0) \geq 0$ ,  $J_j(0) \leq J_{\max}(0)$ , где  $J_{\max}(0)$  — максимально допустимое значение интенсивности излучения модуля.

Особенностью решаемой задачи является то, что коэффициенты  $A_{i,j}$ , входящие в выражение для целевой функции, зависят не только от характера распределения по  $\lambda$  спектральной поглотительной способности  $A_\lambda$  покрытий тепловоспринимающих элементов, но и характера распределения по  $\lambda$  спектральной интенсивности излучения  $J_\lambda$  каждого  $j$ -го модуля имитатора. Отметим, что  $J_\lambda = f(\lambda, T, \varepsilon_\lambda)$ , где  $T$  — температура;  $\varepsilon_\lambda$  — спектральная степень черноты излучателя модуля. Поскольку значения  $J_j(0)$  могут быть самыми различными, то для покрытий, не являющихся серыми, будут отличаться и коэффициенты  $A_{i,j}$  для одних и тех же тепловоспринимающих элементов, т. е. коэффициенты  $A_{i,j}$  являются функцией искомых величин  $J_j(0)$ .

Решить задачу оптимизации режима работы ИК-имитатора можно, используя итерационный процесс поиска решения. Сначала зададим нулевые приближения коэффициентов  $A_{i,j}$  и, минимизируя функцию  $\psi$ , определим первое приближение вектора  $J(0)^{(1)}$ . Затем, используя полученный результат, вычислим первые приближения коэффициентов  $A_{i,j}^{(1)}$  и  $\varepsilon_j$ , для чего применим известные из теории теплообмена излучением [14] соотношения:

$$A_{i,j} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} J_\lambda^*(\lambda, T_j)(\varepsilon_\lambda)_j (A_\lambda)_i d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} J_\lambda^*(\lambda, T_j)(\varepsilon_\lambda)_j d\lambda}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_j = \frac{\pi \int_{\lambda=0}^{\infty} J_\lambda^*(\varepsilon_\lambda)_j d\lambda}{\sigma T_j^4}; \quad (2)$$

$$T_j = \sqrt[4]{\frac{J_j(0) \pi}{\varepsilon_j \sigma}}, \quad (3)$$

где  $J_\lambda^*$  — спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела;  $\varepsilon_j$  — интегральная степень черноты  $j$ -го излучателя;  $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана — Больцмана. При этом

$$J_{\lambda}^* = \frac{2C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)},$$

$C_1 \approx 0,595 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$ ,  $C_2 \approx 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ .

Несобственные интегралы, входящие в выражения (1) и (2), при известных зависимостях  $A_{\lambda} = f(\lambda)$  и  $\varepsilon_{\lambda} = \varphi(\lambda)$  можно вычислить приближенно путем численного интегрирования в пределах от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ , удовлетворяющих условиям  $\lambda_1 T \geq 1,5 \cdot 10^3 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ ;  $\lambda_2 T \leq 5 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

При выполнении этих условий доля не учитываемой в процессе интегрирования энергии излучения пренебрежимо мала. Информация о  $A_{\lambda}$  и  $\varepsilon_{\lambda}$  обычно бывает задана в виде совокупности значений этих величин для ряда фиксированных значений  $\lambda$ . В интервале между этими значениями предполагается линейный характер зависимости радиационных характеристик от  $\lambda$ :

$$A_{\lambda} = A_{\lambda(k)} + \frac{A_{\lambda(k+1)} - A_{\lambda(k)}}{\lambda(k+1) - \lambda(k)} (\lambda - \lambda(k));$$

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda(k)} + \frac{\varepsilon_{\lambda(k+1)} - \varepsilon_{\lambda(k)}}{\lambda(k+1) - \lambda(k)} (\lambda - \lambda(k)).$$

Такую кусочно-линейную аппроксимацию можно использовать при численном определении интегралов в выражениях (1) и (2).

Вычислив первые приближения коэффициентов  $A_{i,j}$ ,  $\varepsilon_j$  и температур излучателей  $T_j$ , повторно решаем задачу минимизации целевой функции  $\psi$  с целью определить второе приближение вектора  $J(0)$ . Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока последующие приближения будут незначительно отличаться от предыдущих.

Именно такой подход к решению задачи выбора режима работы имитатора представляется правильным. Однако если элементы поверхности испытуемого объекта не являются серыми в полосе спектра, в которой сосредоточена большая часть энергии исходящего от имитатора излучения, то очевидно, что кратко охарактеризованный процесс решения задачи оптимизации режима работы имитатора может оказаться весьма трудоемким.

В связи с этим при практическом использовании известных методических подходов к выбору режима работы ИК-имитаторов обычно в выражение для целевой функции  $\psi$  вводятся не значения коэффициентов  $A_{i,j}$  (двумерный вектор), а значения коэффициентов  $\tilde{A}_i$  (одномерный вектор), представляющих собой совокупность значений поглощательной

способности тепловоспринимающих элементов по отношению к излучению, испускаемому в средней и дальней ИК-области спектра. Таким образом, коэффициенты  $\tilde{A}_i$  принимаются равными  $\varepsilon_i$  (интегральной степени черноты тепловоспринимающих элементов,  $i = 1, 2, \dots, N$ ). Возможность такой замены при определенных обстоятельствах следует из упрощенной и часто практически используемой трактовки закона Кирхгофа: если в какой-то полосе спектра тело хорошо излучает, то в этой же полосе спектра оно и хорошо поглощает падающее на него излучение. Однако опыт решения различных задач, связанных с поиском оптимальных режимов работы ИК-имитаторов, показывает, что значения интенсивности излучения модулей имитатора, определяемые по известным методикам и обеспечивающие минимум целевой функции, могут изменяться в широких пределах. Следовательно, и диапазон длин волн, где находится значимая часть энергии излучения имитатора, весьма широк. Если элементы поверхности испытываемого объекта по радиационным свойствам не являются серыми, то возникает вопрос о возможных погрешностях моделирования внешних тепловых нагрузок при замене коэффициентов  $A_{i,j}$  коэффициентом  $\tilde{A}_i$ . Особенно остро этот вопрос встает в случае определения режима работы имитатора, в котором в качестве источников излучения используются весьма удобные в эксплуатации галогенные лампы накаливания. Спектр излучения этих ламп может сильно зависеть от спектра излучения вольфрамовой спирали [15]. При небольшой мощности, подводимой к лампе, когда температура спирали не превышает  $\sim 1000$  К и большая часть энергии излучения поглощается кварцевой колбой, спектр излучения лампы мало отличается от спектра излучения кварцевого стекла при температуре, равной температуре колбы, следовательно, и от спектра излучения черного тела при соответствующей температуре, поскольку при невысоких температурах диэлектрики, в том числе и стекло, имеют высокую степень черноты. По мере увеличения подводимой к лампе мощности и связанным с этим увеличением температуры спирали отличие будет возрастать, так как относительная доля энергии излучения спирали, поглощаемая кварцевой колбой лампы и переизлучаемая в средней и дальней ИК-области спектра, будет уменьшаться. Это важно, поскольку галогенные лампы накаливания часто, например [12–13], рассматриваются как перспективный источник излучения для ИК-имитаторов без указания каких-либо ограничений на режим их эксплуатации.

Приведенные соображения по поводу одного из аспектов проблемы экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА с помощью ИК-имитаторов свидетельствуют о необходимости решения следующей задачи.

**Постановка задачи.** Используя известные данные о спектральной поглотительной способности применяемых в космической технике материалов и покрытий, необходимо оценить уровень возможных погрешностей моделирования заданных внешних тепловых нагрузок на поверхность КА в ИК-имитаторах с серыми по радиационным характеристикам излучателями при введении предположения о независимости в полосе спектра излучения имитатора спектральной поглотительной способности элементов наружной поверхности КА от длины волны излучения. На основании этих результатов необходимо также рассмотреть вопрос об условиях возможного применения известных методических подходов к определению режимов работы ИК-имитаторов.

**Методический подход к решению задачи и исходные данные.** Предположим, что спектр излучения модулей имитатора соответствует спектру излучения абсолютно черного тела при соответствующей температуре. Погрешности, о которых говорится в постановке задачи, равны

$$\bar{\Delta}A_{i,j} = \frac{A_i^0 - A_{i,j}}{A_{i,j}}, \quad (4)$$

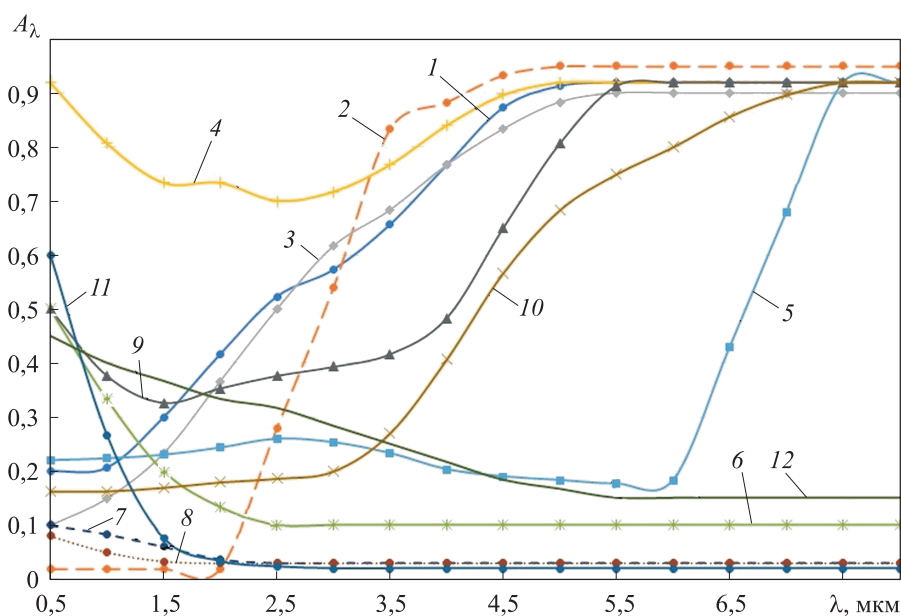
где  $A_i^0$  — поглотительная способность  $i$ -го тепловоспринимающего элемента испытываемого объекта по отношению к падающему на него излучению от черного источника с некоторой характерной температурой  $T_0$ . При этом

$$A_i^0 = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} (A_{\lambda})_i J_{\lambda}^0(\lambda, T_0) d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} J_{\lambda}^0(\lambda, T_0) d\lambda}.$$

Под характерной температурой подразумевается температура поверхности покрытия или материала, при которой определялась их спектральная поглотительная способность  $A_{\lambda}$ . Чаще всего  $A_{\lambda}$  определялась при предполагаемой температуре применения материалов и покрытий. В рассматриваемом случае интерес представляют данные о спектральных характеристиках, полученных при невысоких температурах, которые сопутствуют условиям внешнего теплообмена КА. Примем  $T_0$  равной 400 К. Для опре-

деления  $A_i^0$  необходима также информация о равенстве  $(\varepsilon_\lambda)_i = f(\lambda)$ . Используя упрощенную трактовку закона Кирхгофа, можно принять  $(\varepsilon_\lambda)_i = (A_\lambda)_i$ . Для вычисления значения  $A_{i,j}$  можно воспользоваться выражениями (1)–(3), приняв в них  $\varepsilon_\lambda = 1$  при всех  $\lambda \in (0; \infty)$ .

Данный алгоритм решения сформулированной задачи, реализованный в виде компьютерной программы, использовался для расчета зависимости  $\bar{\Delta}A_{i,j}$  от температуры  $T$  черного излучателя для 12 материалов и покрытий, спектральная поглощательная способность которых приведена на графиках (рис. 1), построенных на основании данных [8, 16–18].

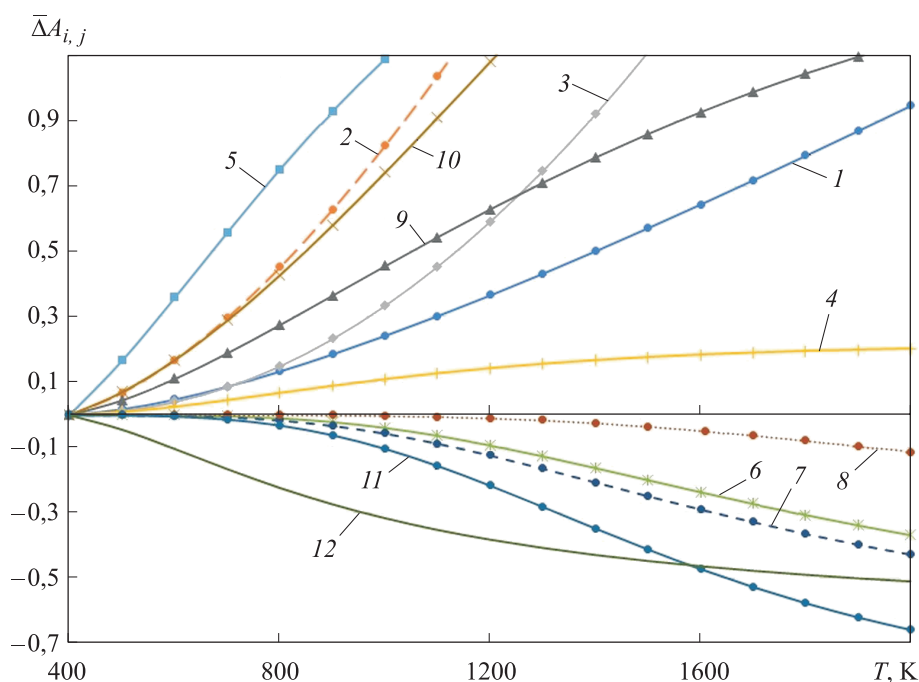


**Рис. 1.** Зависимость спектральной поглощательной способности  $A_\lambda$  некоторых материалов и покрытий от длины волны  $\lambda$  излучения:

- 1 — белая эмаль; 2 — толстая пластина из кварцевого стекла; 3 — керамическое покрытие; 4 — зеленая эмаль; 5 — анодированный алюминий; 6 — сплав АМг-6; 7 — полированный алюминий; 8 — полированное серебро; 9 — белая стеклоткань; 10 — оксид алюминия; 11 — полированное золото; 12 — титан

**Результаты решения задачи.** Результаты расчета зависимости  $\bar{\Delta}A_{i,j}$  от температуры  $T$  черного излучателя для 12 материалов и покрытий приведены на рис. 2. Далее для краткости будем называть материалы и покрытия одним словом — покрытия. Рассматриваемые покрытия не являются серыми в полосе спектра, в которой заключена значимая часть энергии излучения ИК-имитаторов  $\lambda \in (0,5; 15)$  мкм.





**Рис. 2.** Зависимость относительного отличия коэффициентов  $A_i^0$  от  $A_{i,j}$  для различных покрытий тепловоспринимающих элементов ( $i = 1, 2, \dots, 12$ ) от температуры черного излучателя  $T$  (кривые 1–12 — см. рис. 1)

Расчет выполнялся для  $T \in [400; 2000]$  К. Результаты свидетельствуют о сильной зависимости погрешностей от температуры излучателей, особенно для тех покрытий, у которых спектральные радиационные характеристики ( $A_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$ ) в ближней ИК-области спектра ( $\lambda \in (0,7; 4)$  мкм) кардинально отличаются от этих характеристик в средней и дальней ИК-области ( $\lambda > 4$  мкм). Так, для покрытий из анодированного алюминия, кварцевого стекла и оксида алюминия погрешности превышают 50 % уже при  $T > 900$  К. Именно покрытия с неоднородными по длине волны излучения радиационными характеристиками часто применяют в качестве терморегулирующих покрытий. Для покрытий, спектральные радиационные характеристики которых в средней и дальней части ИК-спектра слабо зависят от длины волны излучения, погрешности при невысоких значениях температуры излучателя ( $T < 1200$  К) невелики. Так, для зеленой эмали, серебряного покрытия и сплава АМг-6 погрешности не превышают 15 %. Однако полученные результаты в целом не могут быть основой для оптимистического вывода о допустимости принимаемого упрощенного предположения о постоянстве спектральной поглоща-

тельной способности  $A_\lambda$  покрытий тепловоспринимающих элементов испытуемого объекта во всей полосе спектра падающего от ИК-имитатора излучения при определении режима его работы. Если наружные поверхности КА по радиационным свойствам в ИК-области спектра близки к серым поверхностям, то такое предположение является допустимым. Однако для общего случая необходимо корректировать известные методики решения задачи выбора оптимальных режимов работы ИК-имитаторов, используя предложенный в настоящей работе итерационный процесс поиска решения задачи, заключающийся в многократном определении вектора интенсивности излучения  $J(0)$  путем минимизации целевой функции  $\Psi$  и одновременном уточнении значений коэффициентов  $A_{i,j}$  на основании полученных на каждой итерации значений вектора  $J(0)$ .

**Выводы.** При решении задачи оптимизации энергетического режима работы ИК-имитаторов внешних тепловых нагрузок на поверхность КА необходимо учитывать зависимость поглотительной способности тепловоспринимающих элементов испытуемого объекта от интенсивности излучения модулей имитатора путем использования итерационного процесса поиска решения задачи, заключающегося в неоднократном определении вектора интенсивности излучения модулей и одновременном уточнении значений поглотительной способности тепловоспринимающих элементов по отношению к излучению, приходящему к поверхности испытуемого объекта от различных модулей.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chisabas R.S.S., Loureiro G., de Oliveira Lino C., et al. Development of a thermal vacuum chamber for testing in small satellites. *47th ICES*, 2017, art. ICES-2017-228.
- [2] Kang S.J., Oh H.U. On-orbit thermal design and validation of 1 U standardized Cubesat of STEP cube lab. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2016, vol. 2016, art. 4213189. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/4213189>
- [3] Leite R., Li G., Vlassov V., et al. CBERS 3&4 TM thermal balance test results and satellite thermal mathematical model correlation. *40th Int. Conf. Environ. Syst.*, 2010, no. AIAA 2010-6224. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2010-6224>
- [4] Семена Н.П. Численное моделирование тепловых режимов российского приборного комплекса АЦС, интегрированного в европейский космический аппарат ЕхoMars. *Математическое моделирование и численные методы*, 2018, № 1, с. 55–69.
- [5] Добрица Д.Б., Ушакова А.А., Шабарчин А.Ф. и др. Моделирование внешних тепловых воздействий от инфракрасных источников излучения при испытаниях ракетно-космической техники в ВК-600/300. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2017, т. 16, № 3, с. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-3-27-38>

- [6] 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.
- [7] Семена Н.П. Использование масштабных моделей в наземных экспериментах, воспроизводящих теплообмен в условиях космического пространства. *Теплофизика и аэромеханика*, 2014, т. 21, № 1, с. 47–58.
- [8] Колесников А.В., Сербин В.И. Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов. М., Информация-XXI век, 1997.
- [9] Колесников А.В., Палешкин А.В., Мамедова К.И. Градиентные методы оптимизации режима работы имитатора внешних тепловых нагрузок. *Тепловые процессы в технике*, 2014, т. 6, № 11, с. 522–528.
- [10] Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. Моделирование внешних тепловых нагрузок на космический аппарат в термобарокамере. *Инженерно-физический журнал*, 2019, т. 92, № 4, с. 997–1003.
- [11] Галеев А.Г., Колесников А.В., Палешкин А.В. и др. Проектирование испытательных стендов для тепловакуумных испытаний космических аппаратов. М., Изд-во МАИ, 2015.
- [12] Yu Y., Ming P., Zhou S. Numerical study on transient heat transfer of a quartz lamp heating system. *Math. Probl. Eng.*, 2014, vol. 2014, art. 530476. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/530476>
- [13] Wang J., Liu S., Pei Y. Infrared lamp array simulation technology used during satellite thermal testing. *Int. J. Mechan., Aerosp., Industr., Mechatr. Manuf. Eng.*, 2010, vol. 4, no. 9. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1327642>
- [14] Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R. Thermal radiation heat transfer. CRC Press, 2015.
- [15] Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. Перспективы применения галогенных ламп накаливания для моделирования условий внешнего теплообмена космических аппаратов. *Тепловые процессы в технике*, 2018, т. 10, № 3-4, с. 158–165.
- [16] Шейндлин А.Е., ред. Излучательные свойства твердых материалов. М., Энергия, 1974.
- [17] Minissale M., Pardanaud C., Bisson R., et al. The temperature dependence of optical properties of tungsten in the visible and near-infrared domains: an experimental and theoretical study. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, vol. 50, no. 45, art. 455601. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa81f3>
- [18] Петров Г.И., ред. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. М., Машиностроение, 1971.

**Колесников Анатолий Васильевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

**Палешкин Андрей Вячеславович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

**Пронина Полина Федоровна** — аспирантка кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

**Шеметова Елена Владиславовна** — инженер 2-й категории по испытаниям АО «НПО Лавочкина» (Российская Федерация, 141402, Московская обл., г. Химки, Ленинградская ул., д. 24).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Колесников А.В., Палешкин А.В., Пронина П.Ф. и др. Влияние особенностей спектральных радиационных характеристик поверхности космического аппарата на точность моделирования тепловых нагрузок в инфракрасных имитаторах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 1 (140), с. 40–54.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-1-40-54>

**INFLUENCE OF SPACECRAFT SURFACE SPECTRAL RADIATION CHARACTERISTICS ON THE ACCURACY OF THERMAL LOAD SIMULATIONS IN INFRARED SIMULATORS**

**A.V. Kolesnikov<sup>1</sup>**

**A.V. Paleshkin<sup>1</sup>**

**P.F. Pronina<sup>1</sup>**

**E.V. Shemetova<sup>2</sup>**

[paleshkin@mai.ru](mailto:paleshkin@mai.ru)

[pronina-p19.94@yandex.ru](mailto:pronina-p19.94@yandex.ru)

[elena\\_shemetova08@mail.ru](mailto:elena_shemetova08@mail.ru)

<sup>1</sup> **Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation**

<sup>2</sup> **JSC “NPO Lavochkina”, Khimki, Moscow Region, Russian Federation**

---

**Abstract**

Relying on the data on the spectral absorptivity of materials and coatings used in space engineering, we estimated the level of possible errors in simulating the given external thermal loads on the spacecraft surface in infrared simulators with emitters of grey radiation characteristics. We used an assumption, which is introduced in the known methods for determining the optimal mode of the operation, that the outer spacecraft surface elements' spectral absorptivity does not depend on the wavelength of the incident radiation in the spectral bandwidth of the simulator. Findings of the research show that errors depend on the emitter temperature, especially for those coatings having spectral characteristics of radiation in the near infrared region of spectrum which cardinally differ from these charac-

**Keywords**

*Spacecraft, thermal tests, external thermal loads, spectral errors, infrared radiation sources*

teristics in the middle and far regions of spectrum. For some coatings, the errors are unacceptably large. We arrived at a conclusion that it is necessary to adjust the known techniques to solve the problem of choosing the operating modes of infrared simulators. The technique is based on the iteration process of searching for a solution of the problem including repeated determination of radiation intensity vector of the simulator modules by minimization of the target function  $\psi$  with simultaneous specification, at each iteration, of coefficient values characterizing the absorptivity of the spacecraft outer surface elements with respect to radiation arriving from the simulator modules

Received 24.05.2021

Accepted 06.09.2021

© Author(s), 2022

*The study was conducted as part of a government assignment by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. FSFF-2020-0016)*

## REFERENCES

- [1] Chisabas R.S.S., Loureiro G., de Oliveira Lino C., et al. Development of a thermal-vacuum chamber for testing in small satellites. *47th ICES*, 2017, art. ICES-2017-228.
- [2] Kang S.J., Oh H.U. On-orbit thermal design and validation of 1 U standardized Cubesat of STEP cube lab. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2016, vol. 2016, art. 4213189. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/4213189>
- [3] Leite R., Li G., Vlassov V., et al. CBERS 3&4 TM thermal balance test results and satellite thermal mathematical model correlation. *40th Int. Conf. Environ. Syst.*, 2010, no. AIAA 2010-6224. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2010-6224>
- [4] Semena N.P. Numerical simulation of thermal conditions of the Russian instrument complex ACS, integrated into European ExoMars spacecraft. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody* [Mathematical Modeling and Computational Methods], 2018, no. 1, pp. 55–69 (in Russ.).
- [5] Dobritsa D.B., Ushakova A.A., Shabarchin A.F., et al. Modeling external thermal influence of infrared radiation sources during tests of rocket and space equipment in VK-600/300. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2017, vol. 16, no. 3, pp. 27–38 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-3-27-38>
- [6] Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Teploobmen i teplovye ispytaniya materialov i konstruktsiy aerokosmicheskoy tekhniki pri radiatsionnom nagreve [Heat transfer and thermal testing of aerospace materials and structures]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014.
- [7] Semena N.P. The use of scale models in ground tests reproducing heat transfer in space. *Thermophys. Aeromech.*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869864314010053>

- [8] Kolesnikov A.V., Serbin V.I. Modelirovanie usloviy vneshnego teploobmena kosmicheskikh apparatov [Modelling of external heat exchange conditions for spacecraft]. Moscow, Informatsiya-XXI vek Publ., 1997.
- [9] Kolesnikov A.V., Paleshkin A.V., Mamedova K.I. Gradient methods for optimization of operating mode of external thermal loads simulator. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2014, vol. 6, no. 11, pp. 522–528 (in Russ.).
- [10] Kolesnikov A.V., Paleshkin A.V., Syzdykov Sh.O. Modeling external heat loads on the spacecraft in a thermal vacuum chamber. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2019, vol. 92, no. 4, pp. 965–970. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02010-9>
- [11] Galeev A.G., Kolesnikov A.V., Paleshkin A.V., et al. Proektirovanie ispytatel'nykh stendov dlya teplovakuumnykh ispytaniy kosmicheskikh apparatov [Design of test benches for thermal vacuum tests on spacecraft]. Moscow, MAI Publ., 2015.
- [12] Yu Y., Ming P., Zhou S. Numerical study on transient heat transfer of a quartz lamp heating system. *Math. Probl. Eng.*, 2014, vol. 2014, art. 530476. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/530476>
- [13] Wang J., Liu S., Pei Y. Infrared lamp array simulation technology used during satellite thermal testing. *Int. J. Mechan., Aerosp., Industr., Mechatr. Manuf. Eng.*, 2010, vol. 4, no. 9. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1327642>
- [14] Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R. Thermal radiation heat transfer. CRC Press, 2015.
- [15] Kolesnikov A.V., Paleshkin A.V., Syzdykov Sh.O. Prospects for the use of halogen incandescent lamps to simulate conditions of external heat exchange of spacecraft. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2018, vol. 10, no. 3-4, pp. 158–165 (in Russ.).
- [16] Sheyndlin A.E., ed. Izluchatel'nye svoystva tverdykh materialov [Emission properties of solids]. Moscow, Energiya Publ., 1974.
- [17] Minissale M., Pardanaud C., Bisson R., et al. The temperature dependence of optical properties of tungsten in the visible and near-infrared domains: an experimental and theoretical study. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, vol. 50, no. 45, art. 455601. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa81f3>
- [18] Petrov G.I., ed. Modelirovanie teplovykh rezhimov kosmicheskogo apparata i okruzhayushchey ego sredy [Modeling of spacecraft thermal regimes and environment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971.

**Kolesnikov A.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Managing the Operation of Space Rocket Systems, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

**Paleshkin A.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Managing the Operation of Space Rocket Systems, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

**Pronina P.F.** — Post-Graduate Student, Department of Managing the Operation of Space Rocket Systems, Moscow Aviation Institute (Vолоколамское шоссе 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

**Shemetova E.V.** — Engineer of the 2nd category, JSC “NPO Lavochkina” (Leningradskaya ul. 24, Khimki, Moscow Region, 141402 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Kolesnikov A.V., Paleshkin A.V., Pronina P.F., et al. Influence of spacecraft surface spectral radiation characteristics on the accuracy of thermal load simulations in infrared simulators. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 1 (140), pp. 40–54 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-1-40-54>