

УДК 536.3: 629.78

Перспективы применения галогеновых ламп накаливания для моделирования условий внешнего теплообмена космических аппаратов

А. В. Колесников, А. В. Палешкин, Ш. О. Сыздыков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва;
e-mail: paleshkin.andrey@mail.ru

Поступила в редакцию 04.09.2017

На основе составленной радиационно-оптической модели галогеновой лампы накаливания проведено исследование возможности их использования в качестве источников излучения в составе имитаторов расчетных внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата при проведении различных тепловых экспериментов. Выявлены зависимости спектрального состава излучения лампы в целом и ее отдельных компонент от температуры спирали. Полученные спектральные характеристики лампы использовались для расчета возможных погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата с неоднородными радиационными характеристиками покрытий ее тепловоспринимающих элементов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при моделировании воздействия на поверхность различных материалов и покрытий космического аппарата инфракрасных потоков излучения, характерных для источников, испускающих излучение в средней и дальней инфракрасной области спектра, могут возникать чрезмерно большие погрешности моделирования даже при сравнительно невысоких значениях температуры спирали лампы – не выше 1000 К. Высокий уровень погрешностей моделирования обусловлен тем, что спектральные и интегральные радиационные характеристики галогеновой лампы накаливания кардинальным образом зависят от подводимой к ним электрической мощности. В связи с этим актуальной является задача разработки нового подхода к решению задачи формирования управляющих воздействий на излучающие модули имитаторов. Излагаются предварительные рекомендации по методике управления имитатором на основе галогеновой лампы накаливания.

Ключевые слова: космический аппарат, имитатор, моделирование тепловых нагрузок, излучение, галогеновые лампы накаливания.

Введение

При экспериментальных исследованиях, связанных с решением задач отработки тепловых режимов космического аппарата (КА), с термомеханическими испытаниями элементов их конструкции и с комплексными электрическими испытаниями КА в условиях моделирования космического вакуума, в тепловакуумных установках среди систем, моделирующих основные факторы космического полета, почти всегда присутствуют упрощенные средства воспроизведения каких-то компонент внешних тепловых нагрузок, а иногда

и суммарных тепловых нагрузок, включая и воздействие на поверхность КА потоков солнечного излучения. В слова “упрощенные средства” обычно вкладывается тот смысл, что при использовании этих средств не воспроизводятся по основным параметрам поля излучения источников теплового нагружения КА, а лишь расчетные значения тепловых потоков, поглощаемых элементами поверхности КА. Эти расчетные тепловые нагрузки воспроизводятся почти всегда с помощью лучистых источников, в качестве которых могут применяться нагреваемые электрическим током ленты, полые керамические стержни с вмонти-

рованными в них электронагревателями, тонкостенные трубы с наружными проволочными нагревателями, сетчатые нагреватели, галогеновые лампы накаливания, излучающие панели и др. [1–5]. Из отмеченных источников излучения наиболее популярными являются токопроводящие углеродосодержащие ленты, иногда заключенные в отражатели, которые позволяют повысить долю энергии излучения, направляемой в сторону испытываемого объекта. Для имитаторов с ленточными и практически серыми (по радиационным характеристикам) излучателями разработано эффективное методическое обеспечение их эксплуатации. Такие имитаторы широко применяют в крупных тепловакуумных установках, несмотря на существенный их недостаток, заключающийся в том, что излучающие ленты при нагреве из-за испарения с их поверхности углерода могут становиться причиной загрязнения зеркальных и оптических элементов оборудования экспериментальной установки и элементов испытываемого объекта [6].

В связи с этим пристального внимания заслуживают трубчатые галогеновые лампы накаливания (ГЛН) как удобные в эксплуатации источники излучения, сравнительно легко komponующиеся в конструкцию имитатора и не вызывающие загрязнения элементов испытываемого объекта и оборудования экспериментальной установки.

Хотя трубчатые ГЛН можно рассматривать как условно линейчатые излучатели и для грубой оценки функциональных возможностей имитаторов на основе этих ламп, казалось бы, можно воспользоваться отдельными фрагментами известных методических подходов [1, 2, 4, 5], разработанных для имитаторов с ленточными и серыми (по радиационным свойствам) излучателями, но существуют два обстоятельства, чрезвычайно затрудняющих эффективное использование этих ламп в системах имитации внешних тепловых потоков, поглощаемых элементами наружной поверхности КА. Первое из них обусловлено недостаточной изученностью вопросов, связанных с особенностями зависимости радиационных характеристик ГЛН от подводимой к ним электрической мощности. Второе обстоятельство связано с отсутствием методики определения оптимального энергетического режима работы имитаторов с модулями, спектральные и интегральные радиационные характеристики которых кардинальным образом зависят от под-

водимой к ним электрической мощности. В итоге возникает необходимость разработки нового методического подхода к решению задачи формирования управляющих воздействий на излучающие модули имитатора, обеспечивающих максимально возможную, в пределах средств рассматриваемой радиационно-технической системы, точность воспроизведения требуемых тепловых нагрузок на поверхность испытываемого объекта.

Преодоление трудностей, связанных с первым обстоятельством, затрудняющим решение задачи эффективного применения имитаторов на основе ГЛН, сводится к решению задачи расчета плотности поглощаемых элементами испытываемого объекта потоков излучения, исходящих от ламповых модулей имитатора. Эта задача подразделяется на две составляющие: 1) расчет плотности падающих на элементы исследуемого объекта потоков уходящего от поверхности ламп излучения; 2) расчет плотности поглощаемого элементами поверхности испытываемого объекта потоков приходящего от ламп излучения.

Первая составляющая задачи с привязкой результатов ее решения к задаче выбора оптимального режима работы лампового имитатора с принятием ряда упрощающих предположений рассмотрена в [7].

Вторая составляющая общей задачи является более сложной и трудоемкой. Подходы к ее решению и некоторые полученные результаты излагаются в данной статье.

1. Модель спектра излучения лампы

Примем следующие упрощающие предположения относительно геометрической и радиационной модели лампы:

- в спектре излучения ГЛН не присутствует (ввиду относительной малости) энергия излучения заполняющих колбу газов (аргона и паров йода);

- излучение, испускаемое модулем (лампой), исходит с поверхности колбы лампы (эффективной поверхности);

- каждый элемент эффективной поверхности излучает диффузно;

- локальная плотность излучения по всей эффективной поверхности одинакова;

- диаметр колбы мал по сравнению с ее длиной, т. е. $D \ll l_0$;

– диаметр колбы бесконечно мал по сравнению с расстоянием до тепловоспринимающих элементов;

– длина вольфрамовой излучающей спирали принимается равной длине колбы;

– излучение спирали рассматривается как излучение цилиндрической поверхности диаметром d , соответствующим внешнему диаметру спирали. Спектральная степень черноты этой цилиндрической поверхности принимается равной спектральной степени черноты $\varepsilon_{\lambda,w}$ вольфрама;

– не учитывается энергия излучения спирали, отраженного на границе раздела сред (газ–кварцевая стенка внутренней поверхности колбы);

– условимся в дальнейшем, говоря об излучении лампового модуля, иметь в виду излучение, исходящее от цилиндрической поверхности с диаметром D и длиной l_0 , равными соответственно диаметру и длине колбы лампы;

– во всех выражениях, касающихся энергии излучения, речь идет об энергии излучения единицы длины излучающего элемента.

Примем следующий механизм формирования уходящего с поверхности лампы излучения.

Колба, материал которой обладает селективным внутренним поглощением, хорошо пропускает через свои стенки излучение спирали с длиной волны, не превышающей ≈ 3.5 мкм и поглощает большую часть энергии излучения с длиной волны, превышающей 4.5 мкм [4, 8]. Колба, нагреваясь за счет поглощенной энергии излучения спирали, сама становится источником инфракрасного излучения с длиной волны, превышающей по крайней мере 3 мкм, что следует из закона Кирхгоффа [9]. Таким образом, спектральный состав излучения, исходящего от поверхности лампы, является сложным.

Используя принятые обозначения, упрощающие предположения и известные из литературных источников спектральные характеристики вольфрама и кварцевого стекла [3, 8, 9], составим математическую модель спектра излучения лампы, относя текущие абсолютные значения спектральной интенсивности излучения к максимальному ее значению при заданной температуре спирали. Спектральная плотность потока излучения спирали, отнесенная к площади поверхности колбы лампы, равна:

$$q_{\lambda,w}(T_w) = \frac{d}{D} \cdot \varepsilon_{\lambda,w} \cdot q_{\lambda,b}(T_w),$$

где спектральная поверхностная плотность потока излучения абсолютно черного тела при температуре T_w :

$$q_{\lambda,b}(T_w) = \frac{2\pi \cdot C_1}{\lambda^5 \cdot (\exp(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_w}))};$$

D – внешний диаметр; d – условный диаметр вольфрамовой спирали; λ – длина волны излучения, мкм; $\lambda, w, kolb$ – подстрочные индексы, относящиеся соответственно к спектральным радиационным характеристикам, к радиационным характеристикам вольфрама и кварцевой колбы; b – подстрочный индекс, относящийся к радиационным характеристикам абсолютно черного тела; T_w – температура спирали; ε – степень черноты; $C_1 \approx 0.59544 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² и $C_2 \approx 1.44 \cdot 10^{-2}$ м·К – постоянные в законе Планка распределения энергии по спектру.

Спектральная плотность поглощаемого колбой потока излучения, исходящего от спирали равна:

$$q_{\lambda,kolb}^* = \frac{d}{D} \cdot \varepsilon_{\lambda,kolb} \cdot \varepsilon_{\lambda,w} \cdot q_{\lambda,b}(T_w),$$

спектральная плотность потока собственного излучения наружной поверхности колбы

$$q_{\lambda,kolb} = \varepsilon_{\lambda,kolb} \cdot q_{\lambda,b}(T_{kolb}),$$

где спектральная поверхностная плотность потока излучения абсолютно черного тела при температуре колбы T_{kolb}

$$q_{\lambda,b}(T_{kolb}) = \frac{2\pi \cdot C_1}{\lambda^5 \cdot (\exp(\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{kolb}}))}.$$

Температура колбы равна

$$T_{kolb} = \sqrt[4]{\frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} q_{\lambda,kolb}^* d\lambda}{\varepsilon_{kolb} \cdot \sigma}}, \quad \varepsilon_{kolb} = \frac{\int_0^{\infty} q_{\lambda,kolb}^* \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \frac{d}{D} \cdot \varepsilon_{\lambda,w} \cdot q_{\lambda,b}(T_w) \cdot d\lambda}.$$

Спектральная плотность потока излучения, исходящего с поверхности лампы

$$q_{\lambda,lamp}(T_w) = q_{\lambda,w}(T_w) + q_{\lambda,kolb}.$$

Относительная величина спектральной плотности потока излучения, исходящего с поверхности лампы

$$\bar{q}_{\lambda,lamp}(T_w) = \frac{q_{\lambda,lamp}(T_w)}{q_{\lambda,max}(T_w)},$$

где $q_{\lambda, \max}$ – максимальное значение спектральной интенсивности излучения лампы при температуре спирали, равной T_W .

Плотность интегрального потока излучения, исходящего от поверхности колбы лампы

$$q_{lamp}(T_W) = \int_0^{\infty} q_{\lambda}(T_W) \cdot d\lambda;$$

эффективная степень черноты лампы

$$\varepsilon_{lamp} = \frac{q_{lamp}(T_W)}{\sigma \cdot T_W^4}.$$

Кроме рассмотренных радиационных характеристик лампы интерес представляет и ее так называемая радиационная температура T_{rad} , под которой понимается температура абсолютно черного тела с плотностью интегрального излучения, равной плотности интегрального излучения системы вольфрамовая спираль–кварцевая колба. Эта температура определяется простым и очевидным выражением:

$$T_{rad} = \sqrt[4]{\frac{\int_0^{\infty} q_{\lambda, lamp}(T_W) \cdot d\lambda}{\sigma}},$$

где *rad* – подстрочный индекс, относящийся к радиационным характеристикам излучающей системы спираль–колба; $q_{\lambda, lamp}(T_W)$ – спектральная плотность потока излучения, исходящего с поверхности лампы; $\sigma \approx 5.67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м² К⁴).

Большое значение в формировании радиационных характеристик ГЛН имеет значение геометрического параметра $\bar{d} = d/D$.

Таким образом, в рамках принятых допущений основные радиационные характеристики лампы – q_{λ} , \bar{q}_{λ} и q_{lamp} – являются функциями температуры спирали и зависят от параметра \bar{d} и величин $\varepsilon_{\lambda, w}$, $\varepsilon_{\lambda, kolb}$, которые можно условно назвать параметрами.

Анализируя имеющуюся в литературных источниках информацию о геометрических характеристиках ГЛН, можно принять значение параметра \bar{d} в пределах [0.3; 0.7]. Данные о зависимости величин $\varepsilon_{\lambda, w}$ и $\varepsilon_{\lambda, kolb}$ от λ заимствовались из [8, 9].

С использованием сплайн-интерполяции дискретно заданные функции представлялись в виде непрерывных функций $\varepsilon_{\lambda, w} = f(\lambda)$ и $\varepsilon_{\lambda, kolb} = \varphi(\lambda)$, проиллюстрированных на рис. 1 в виде графиков.

Эти функции используются для расчета зависимости от λ абсолютных и относительных значений спектральной интенсивности излучения лампы в целом и ее отдельных компонент – спирали и колбы – при различных значениях T_W .

Для лампы в целом зависимость $\bar{q}_{\lambda, lamp}$ от λ представлена на графиках рис. 2 для ряда значений $T_W \in [400; 3200]$.

Для сравнения на графиках рис. 3 приводится спектр проходящего через колбу излучения спирали, т. е. зависимость $\bar{q}_{\lambda, w}$ от λ также при различных значениях T_W .

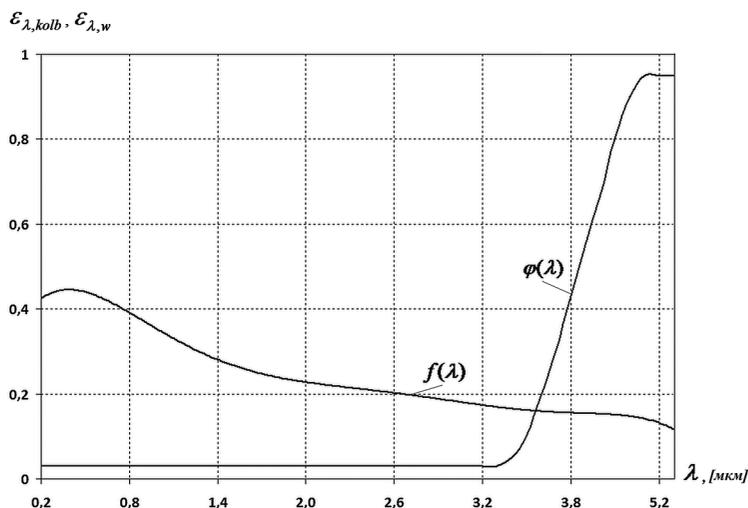


Рис. 1. Используемая модель спектральной степени черноты вольфрамовой спирали $\varepsilon_{\lambda, w}$ и кварцевой колбы $\varepsilon_{\lambda, kolb}$ ($\varepsilon_{\lambda, w} = f(\lambda)$; $\varepsilon_{\lambda, kolb} = \varphi(\lambda)$)

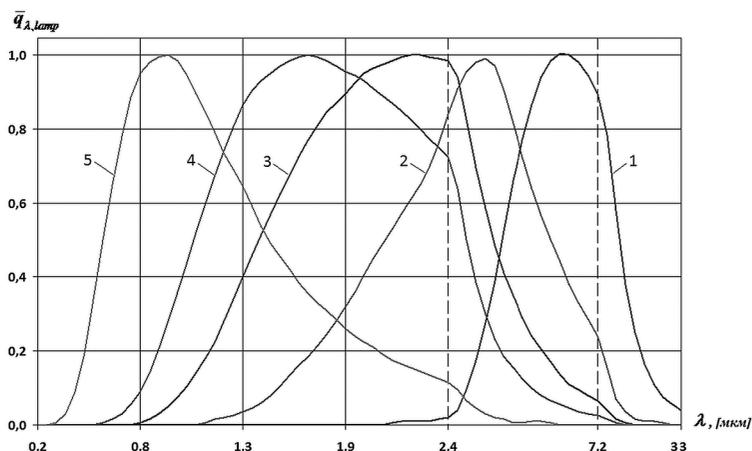


Рис. 2. Относительные величины спектральной интенсивности излучения лампы $\bar{q}_{\lambda, lamp}$ при различных значениях температуры T_W спирали: 1–400; 2–800; 3–1200; 4–1600; 5–3200 К; (- - - линии раздела масштаба)

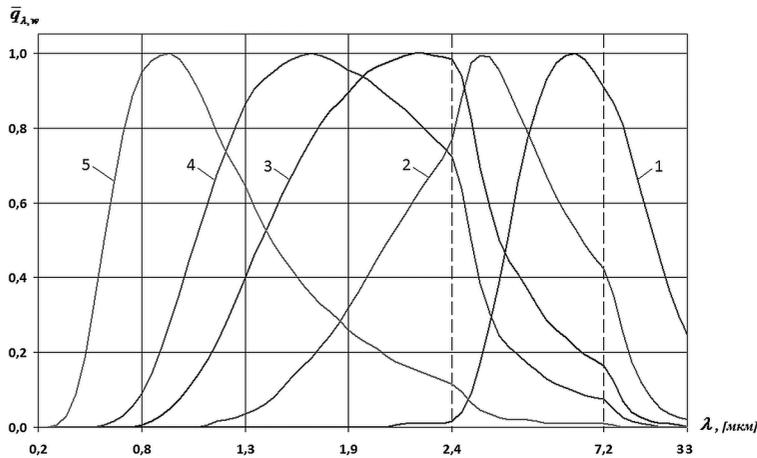


Рис. 3. Относительные величины спектральной интенсивности излучения спирали лампы $\bar{q}_{\lambda,w}$ при различных значениях ее температуры: 1–400; 2–800; 3–1200; 4–1600; 5–3200 К; (--- линии раздела масштаба)

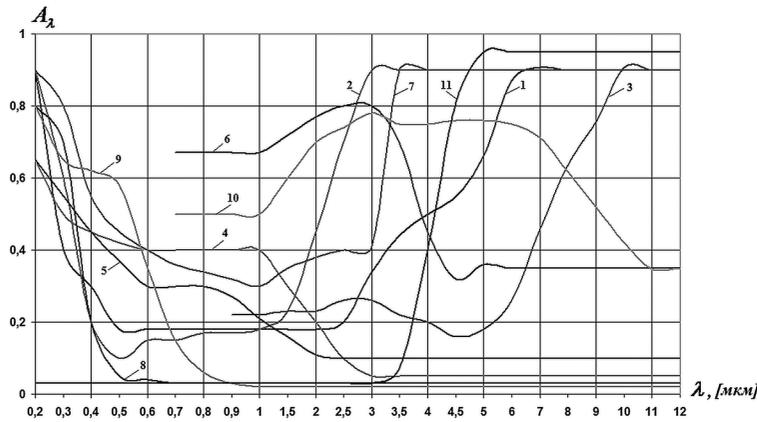


Рис. 4. Зависимость от λ спектральной поглощательной способности A_λ рассматриваемых покрытий и материалов. 1 – белая эмаль; 2 – керамические покрытия; 3 – анодированный алюминий; 4 – хром; 5 – сплав АМГ6; 6 – сплав титана; 7 – белая стеклоткань; 8 – серебро; 9 – золото; 10 – нержавеющая сталь; 11 – кварцевое стекло

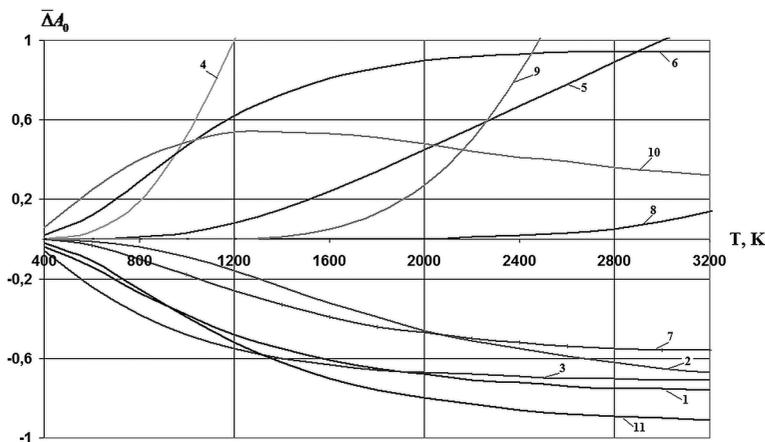


Рис. 5. Зависимости спектральных погрешностей $\bar{\Delta}A_0$ от температуры T_w спирали лампы при моделировании воздействия на различные тепловоспринимающие элементы излучения черного тела с температурой $T=300$ К. Используется такая же нумерация кривых, как и на рис. 4

Из сопоставления представленных на рис. 2 и 3 спектров можно сделать вывод об их существенном различии при невысоких значениях температуры спирали – при $T_w < 1200$ К и о малом (или пренебрежимо малом) отличии при температуре спирали выше 1600 К.

2. Анализ уровня погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА с неоднородными радиационными характеристиками покрытий ее тепловоспринимающих элементов

Рассмотрим два характерных случая внешнего теплового нагружения поверхности КА:

1) поверхность объекта с неоднородными радиационно-оптическими характеристиками подвергается воздействию излучения серого тела с радиационной температурой $T_0 = 300$ К;

2) на поверхность объекта падает поток солнечного излучения, спектр которого будем для простоты считать идентичным спектру излучения абсолютно черного тела с температурой $T_s = 5785$ К (радиационная температура Солнца).

В качестве покрытий тепловоспринимающих элементов рассмотрим перечисленные ниже покрытия и материалы, применяемые в аэрокосмической технике: 1) белая эмаль; 2) керамические покрытия; 3) анодированный алюминий; 4) хром; 5) сплав АМГ6; 6) сплав титана; 7) белая стеклоткань; 8) серебро; 9) золото; 10) нержавеющая сталь; 11) кварцевое стекло.

Данные о спектральной поглощательной способности этих материалов и покрытий заимствованы из [1, 3] и отражены для наглядности на графиках рис. 4.

Для двух рассматриваемых случаев теплового нагружения определялись относительные погрешности в величине

плотности поглощаемых различными покрытиями и материалами потоков падающего излучения.

Для первого случая:

$$\bar{\Delta}A_0(j) = \frac{A_{lamp}(j) - A_0(j)}{A_0(j)},$$

где

$$A_{lamp}(j) = \frac{\int_0^{\infty} A_{\lambda}(j) \cdot q_{\lambda,lamp}(T_W) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} q_{\lambda,lamp}(T_W) \cdot d\lambda},$$

$$A_0(j) = \frac{\int_0^{\infty} A_{\lambda}(j) \cdot q_{\lambda,b}(T_0) \cdot d\lambda}{\sigma \cdot T_0^4}.$$

Для второго случая:

$$\bar{\Delta}A_S = \frac{A_{lamp}(j) - A_S(j)}{A_S(j)},$$

где

$$A_S(j) = \frac{\int_0^{\infty} A_{\lambda}(j) \cdot q_{\lambda,b}(T_S) \cdot d\lambda}{\sigma \cdot T_S^4},$$

A_S, T_S – соответственно поглощательная способность покрытия по отношению к падающему солнечному излучению и радиационная температура T_S поверхности Солнца ($T_S \approx 5785$ К); $A_0(j)$ – интегральная поглощательная способность покрытия под номером j по отношению к излучению абсолютно черного тела с некоторой умеренной температурой T_0 (например $T_0 = 300$ К); $A_{\lambda}(j)$ – спектральная поглощательная способность некоторого покрытия под номером j по отношению к монохроматическому излучению с длиной волны λ ; $A_{lamp}(j)$ – спектральная поглощательная способность по отношению к лампе; Δ – символ погрешности; $\bar{\Delta}$ – символ относительной погрешности.

Результаты расчета зависимости спектральных погрешностей от температуры спирали лампы для рассматриваемых 11 различных материалов и покрытий представлены на рис. 5 и 6.

Анализируя представленные на рис. 5 результаты расчета зависимости погрешностей моделирования воздействия на поверхность различных материалов и покрытий КА инфракрасных потоков излучения, характерных для источников, испускающих излучение

в средней и дальней инфракрасной области спектра [10], можно сделать вывод о наличии чрезмерно больших погрешностей моделирования даже при сравнительно невысоких значениях температуры спирали лампы – не выше 1000 К.

Расчет погрешностей $\bar{\Delta}A_S$ для второго случая внешнего теплового нагружения осуществлялся с целью оценки возможности применения ГЛН для приближенного моделирования воздействия потока солнечного излучения на некоторые покрытия и материалы поверхности КА. Анализируя представленные на графиках рис. 6 результаты расчета зависимости $\bar{\Delta}A_S$ от температуры T_W спирали лампы, можно заключить, что для таких материалов и покрытий как белая эмаль, анодированный алюминий, сплав титана, белая стеклоткань, нержавеющая сталь относительные погрешности невелики и не превышают 12%, в то время как для других из рассмотренных материалов погрешности настолько значительные, что их нельзя считать приемлемыми.

Обобщая результаты проведенного исследования по вопросам, касающимся особенностей спектрального состава излучения ГЛН, можно определенно сказать лишь то, что ГЛН, безусловно, пригодны при испытаниях объектов с серыми характеристиками наружных поверхностей. Во всех других случаях могут возникать погрешности, подчас и недопустимо большие, связанные, с одной стороны, со сложной зависимостью спектральной степени черноты излучающей системы спираль–колба от длины волны излучения и с трудностью учета этой зависимости в рамках

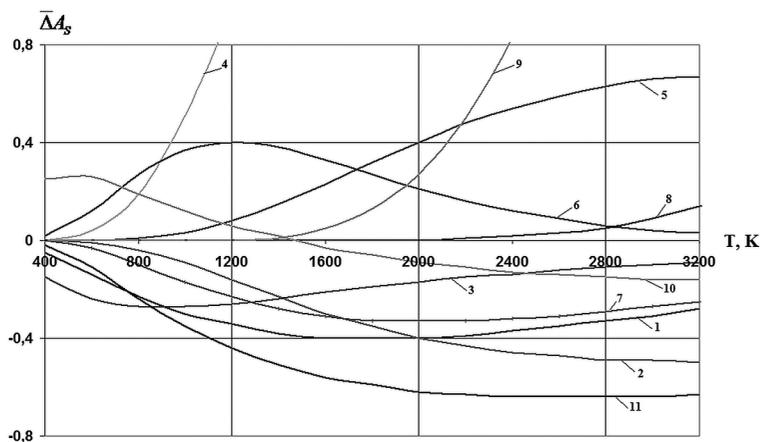


Рис. 6. Зависимости от температуры T_W спирали спектральных погрешностей $\bar{\Delta}A_S$ моделирования воздействия на различные тепловоспринимающие элементы потока солнечного излучения. Обозначения кривых аналогичны обозначениям на рис. 4

решения задачи управления энергетическими характеристиками имитатора в целом; а с другой стороны – с ярко выраженной нерегулярностью спектральных поглотительных свойств большинства материалов и покрытий, применяемых в космической технике.

В связи с отмеченными обстоятельствами, препятствующими эффективному использованию ГЛН в системах имитации внешних тепловых нагрузок на поверхность КА, представляется целесообразным в первую очередь пойти по пути изменения радиационно-оптических характеристик наружной поверхности колб ламп, произведя, например, напыление на их поверхность непрозрачной и термостойкой пленки, обладающей высокой степенью черноты в средней и дальней инфракрасной области спектра. Для учета нерегулярности спектральных поглотительных свойств тепловоспринимающих элементов необходимо усложнение радиационно-оптической модели испытуемого объекта, задавая для его элементов значения спектральной поглотительной способности, по крайней мере, для нескольких фиксированных длин волн излучения и осуществляя линейную интерполяцию между этими фиксированными значениями.

Заключение

Галогеновые лампы накаливания безусловно пригодны для использования при испытаниях объектов с серыми радиационными характеристиками наружных поверхностей.

При моделировании воздействия на поверхность различных материалов и покрытий КА инфракрасных потоков излучения, характерных для источников, испускающих излучение в средней и дальней инфракрасной области спектра, могут возникать чрезмерно большие погрешности моделирования даже при сравнительно невысоких значениях температуры спирали лампы – не выше 1000 К.

В связи с тем, что спектральные и интегральные радиационные характеристики ГЛН кардинальным образом зависят от подводимой к ним электрической мощности, актуальной является задача разработки нового методического подхода к решению задачи формирования управляющих воздействий на излучающие модули имитатора. А именно, подхода, основанного на учете зависимости изменения спектральных радиационных характеристик ламп от подводимой к ним электрической мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моделирование** тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. акад. Г.И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
2. **Елисеев В.Н., Товстоног В.А.** Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 200 с.
3. **Колесников А.В., Сербин В.И.** Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов. М.: «Информация–XXI век», 1997. 170 с.
4. **Cao Zhisong, Pei Yifei, Liu Shouwen, Yin Xiaofang.** Infrared lamp array design and radiation heat flux analysis // Proceedings of the 7th IASME/WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE '09). P. 96–100.
5. **Wang Jing, Liu Shouwen, Pei Yifei.** Infrared lamp array simulation technology used during satellite thermal testing // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. 2010. V. 4. N 9. P. 905–907.
6. **Ульянов В.А., Соловьев М.В.** Оптимизация тепловакуумных испытаний космических комплексов на установке ВК 600/300. М.: Полет, НИЦ РКП. 2009. С. 82–93.
7. **Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О.** Методика расчета облученности элементов испытуемых объектов в ламповых имитаторах внешних тепловых нагрузок // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 6. С. 267–275.
8. **Излучательные свойства твердых материалов.** Справочник / Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. М.: «Энергия», 1974. 472 с.
9. **Зигель Р., Хауэлл Дж.** Теплообмен излучением. М.: Издательство «Мир», 1975. 934 с.
10. **Хадсон Р.** Инфракрасные системы. М.: Изд-во «Мир», 1972. 535 с.

Prospects for the use of halogen incandescent lamps to simulate conditions of external heat exchange of spacecraft

A. V. Kolesnikov, A. V. Paleshkin, Sh. O. Syzdykov

*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow
e-mail: paleshkin.andrey@mail.ru*

On the basis of the compiled radiation-optical model of a halogen incandescent lamp, a study was made of the possibility of using them as radiation sources in the composition of simulators of

calculated external thermal loads on the spacecraft surface during various thermal experiments. Dependences of the spectral composition of the radiation of the lamp as a whole and its individual components on the temperature of the spiral are revealed. The obtained spectral characteristics of the lamp were used to calculate the possible errors in modeling external thermal loads on the surface of a spacecraft with inhomogeneous radiation characteristics of coatings of elements that perceive heat. The results indicate that when modeling the impact on the surface of various materials and coatings of spacecraft of infrared radiation fluxes typical for sources emitting radiation in the middle and far infrared region of the spectrum, there may be excessively large modeling error even at relatively low lamp spiral temperatures – not higher than 1000 K. The obtained results indicate that when simulating the effect on the surface of various materials and coatings of the spacecraft of infrared radiation fluxes typical for sources emitting radiation in the middle and far infrared regions of the spectrum, there may be excessively large modeling errors even at relatively low lamp spiral temperatures – not higher than 1000 K. A high level of modeling errors is due to the fact that the spectral and integral radiation characteristics of the halogen lamps are radically depended on the electric power supplied to them. In this regard, the current task is the development of a new approach to solving the problem of formation of control actions on radiant modules of imitators. Preliminary recommendations for the method for controlling the simulator based on a halogen incandescent lamp are given.

Keywords: spacecraft, simulator, simulation of thermal loads, radiation, halogen incandescent lamps.

REFERENCES

1. **Modelirovanie** teplovykh rezhimov kosmicheskogo apparata i okruzhayushhej ego sredy / Pod red. akad. G. I. Petrova [Modeling of Thermal Regimes of a Spacecraft and Its Environment. Edited by akad. G. I. Petrov]. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 382 p. In Russ.
2. **Eliseev V. N., Tovstonog V. A.** *Teploobmen i teplovye ispytaniya materialov i konstrukcij aerokosmicheskoy tekhniki pri radiacionnom nagreve* [Heat Exchange and Thermal Testing of Materials and Structures of Aerospace Engineering During Radiation Heating]. Moscow: Izd-vo MVTU im. N. E. Baumana. 2014. 200 p. In Russ.
3. **Kolesnikov A. V., Serbin V. I.** *Modelirovanie uslovij vneshnego teploobmena kosmicheskix apparatov* [Modeling of External Heat Transfer Conditions of Space Vehicles]. Moscow, «Informaciya–XXI vek» Publ., 1997. 170 p.
4. **Cao Zhisong, Pei Yifei, Liu Shouwen, Yin Xiaofang.** Infrared lamp array design and radiation heat flux analysis. *Proceedings of the 7th IASME/WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE'09)*, 2009. pp. 96–100.
5. **Wang Jing, Liu Shouwen, Pei Yifei.** Infrared lamp array simulation technology used during satellite thermal testing. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2010, vol. 4, no. 9, pp. 905–907.
6. **Ulyanov V. A., Solovov M. V.** *Optimizaciya teplovakuumnykh ispytaniy kosmicheskikh kompleksov na ustanovke VK 600/300* [Optimization of heat-vacuum tests of space complexes on VK 600/300 installation]. Moscow, “Polet” Publ., NIC RKP, 2009. pp. 82–93. In Russ.
7. **Kolesnikov A. V., Paleshkin A. V., Syzdykov Sh. O.** Metodika rascheta obluchennosti elementov ispytuemykh obektov v lampovykh imitatorakh vneshnikh teplovykh nagruzok [Method of calculation of irradiance of elements of tested objects in lamp simulators of external thermal loads]. *Teplovye processy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 267–275. In Russ.
8. **Izluchatelnye svoystva tverdykh materialov. Spravochnik. Pod obshh. red. A. E. Shejndlina.** [Radiating Properties of Solid Materials. Reference Book. Edited by A. E. Shejndlin]. Moscow, Energiya 1974. 472 p. In Russ.
9. **Siegel R., Howell J. R.** *Teploobmen izlucheniem* [Thermal Radiation Heat Transfer]. Moscow, Mir Publ., 1975. 934 p.
10. **Hudson R. D.** *Infrared System Engineering*. New York, London, Sydney, Toronto: Willey, 1969 (Russ. ed. Hudson R. *Infrakrasnye sistemy*. Moscow, Mir Publ., 1972. 535 p.).