

**ИМИТАТОРЫ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК С ДИФФУЗНО ИЗЛУЧАЮЩИМИ МОДУЛЯМИ В СТРОГО ОГРАНИЧЕННОМ ТЕЛЕСНОМ УГЛЕ**

**А.В. Колесников**  
**А.В. Палешкин**  
**Е.В. Шеметова**

paleshkin.andrey@mail.ru

**Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
«МАИ», Москва, Российская Федерация**

**Аннотация**

Рассмотрены методы формирования потоков излучения с направленной силой, характеризуемой ламбертовскими индикатрисами в ограниченном телесном угле. Приведено описание радиационно-оптических схем модулей имитаторов внешних тепловых нагрузок, диффузно испускающих излучение. В состав модулей входят диффузно излучающие в полусферическом телесном угле диски или ленты, а также зеркальные отражатели, поверхностями которых являются параболоид вращения и параболический цилиндр с определенными геометрическими характеристиками направляющих линий. Используя изложенные методы в различных комбинациях, можно разработать принципиальные схемы оптических устройств для воспроизведения лучистых потоков с определенными направленными свойствами

**Ключевые слова**

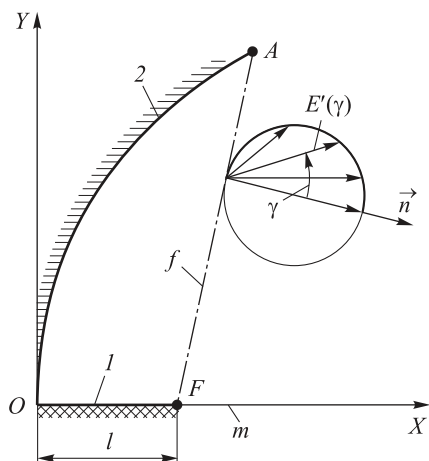
*Имитация, тепловые нагрузки, космический аппарат, индикатриса излучения, диффузное излучение*

Поступила в редакцию 12.12.2017  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

**Введение.** При тепловой обработке космических аппаратов суммарные внешние тепловые нагрузки или их отдельные компоненты часто воспроизводятся с помощью совокупности каких-либо источников излучения, размещаемых вокруг испытываемого объекта на некотором удалении от его поверхности. В качестве источников излучения могут применяться токопроводящие и нагреваемые электрическим током ленты, полые керамические стержни с вмонтированными в них электронагревателями, тонкостенные трубы с наружными проволочными нагревателями, сетчатые нагреватели, галогенные кварцевые лампы накаливания, излучающие панели и т. п. [1, 2]. Из отмеченных источников излучения наиболее популярными являются токопроводящие ленты, чаще всего заключенные в отражатели, которые позволяют повысить долю энергии излучения, направляемого в сторону испытываемого объекта. Основными элементами известных отражателей являются плоские зеркальные поверхности, образующие в совокупности с излучателем расширяющуюся к выходу излучающую полость [3]. Индикатриса выходящего из этой полости излучения не является диффузной и имеет сложный вид, обусловленный как плоской формой поверхностей отражателя, так и особенностью взаимного расположения элементов отражателя и излучателя.

В настоящей работе изложены методы формирования потоков излучения с направленной силой, характеризуемой ограниченными в той или иной степени ламбертовскими индикатрисами. Используя эти методы в различных комбинациях, можно разрабатывать принципиальные схемы оптических устройств для воспроизведения лучистых потоков с определенными направленными свойствами.

**Применение зеркальной поверхности параболического цилиндра в совокупности с диффузным излучателем.** Рассмотрим бесконечно протяженную систему, состоящую из диффузно излучающей в полусферу полоски шириной  $l$  и идеального зеркала ( $\rho = 1$ ), поверхность которого представляет собой поверхность параболического цилиндра. При этом оптическая ось направляющей линии  $OA$  цилиндрической поверхности (параболы) лежит в плоскости  $m$  излучателя. Фокус  $F$  параболы совпадает с наиболее удаленным краем излучателя, а вершина  $O$  параболы совпадает с другим краем излучателя (рис. 1).



**Рис. 1.** Формирование в бесконечно протяженной оптической системе диффузного в ограниченном телесном угле потока излучения:

1 — диффузный излучатель; 2 — зеркальная поверхность параболического цилиндра;  $F$  — фокус направляющей линии поверхности

Первой особенностью данной оптической системы является то, что испускаемое ею излучение не пересекает плоскость  $m$  излучателя, поскольку лучи, исходящие от наиболее удаленного края излучателя (точки  $F$  на рис. 1), после отражения от зеркала будут распространяться в плоскостях, параллельных плоскости  $m$ . Это следует из свойства параболы. Лучи, выходящие из других точек излучателя, после отражения от зеркала пойдут выше отмеченной плоскости  $m$ . В этом легко убедиться, сопоставив углы падения лучей из разных точек излучателя на элементарные участки зеркала. Таким образом, испускаемое рассматриваемой системой излучение будет снизу ограничено плоскостью излучателя.

Второй особенностью системы является то, что через щель, образованную диффузным излучателем и зеркалом, излучение будет испускаться с интенсивностью (яркостью), не зависящей от направления в пределах телесного угла  $\omega$ , ограниченного плоскостью излучателя и плоскостью  $f$  среза излучающей системы.

Последнее утверждение нуждается в доказательстве. Если это утверждение верно, то направленная сила эффективного излучения площадки  $f$ , изображенной на рис. 1 в виде отрезка  $|FA|$ , должна характеризоваться ламбертовской индикатрисой (законом косинуса) в пределах телесного угла, ограниченного снизу плоскостью излучателя  $OF$ . При этом энергия излучения, испускаемая площадкой  $FA$  в отмеченном телесном угле, должна быть равна энергии полусферического излучения диффузного излучателя  $OF$ .

Для доказательства сопоставим значения энергии излучения площадки  $OF$  и энергии эффективного излучения площадки  $FA$ , предполагая, что площадка  $FA$  испускает энергию диффузно в пределах телесного угла  $\omega$ . Обозначим полусферическую поверхностную плотность потока излучения источника  $OF$  через  $E$ . Тогда в единицу времени единицей длины источника испускается энергия, равная  $E \cdot OF$ . Предположим, плоскость  $f$  среза излучающей системы составляет с осью  $OX$  угол  $\alpha$ . Используя каноническое уравнение параболы ( $y^2 = 2px$ ) и схему на рис. 1, выразим отрезок  $FA$  через  $OF = p/2$ :

$$FA = \sqrt{y^2 + (x - p/2)^2} = \sqrt{2px + (x - p/2)^2} = x + p/2; \quad (1)$$

$$x = FA \cos \alpha + p/2. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) следует, что

$$FA = OF \frac{2}{1 - \cos \alpha}. \quad (3)$$

Определять относительную величину энергии эффективного излучения площадки  $FA$  [ $\bar{E}_{FA} = E_{FA}/(E \cdot OF)$ ] можно по-разному. Воспользуемся способом, основанным на понятии углового коэффициента и алгебре угловых коэффициентов. Как известно, локальный угловой коэффициент элемента  $d1$  и поверхности 2 ( $\varphi$ ) численно равен той доле энергии диффузного излучения элемента  $d1$ , которая попадает на поверхность 2 [4, 5]. Если в качестве поверхности 2 взять бесконечно протяженную плоскость  $m$ , а в качестве элемента  $d1$  — площадку  $FA$ , то долю энергии диффузного излучения площадки  $FA$ , испускаемую в телесном угле  $\omega$ , можно определить как разность  $1 - \varphi$ . Угловой коэффициент элементарной площадки и бесконечно протяженной полоски легко определяется путем интегрирования функции, характеризующей дифференциальный угловой коэффициент в прямоугольных координатах. Согласно [5],  $\varphi = (1 + \cos \alpha)/2$ .

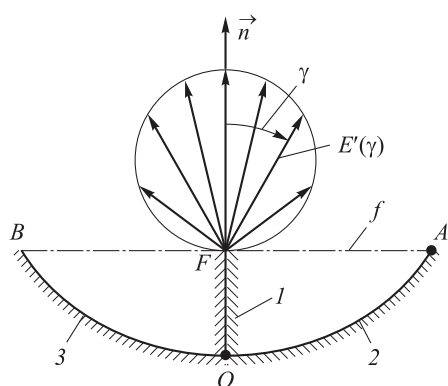
Следовательно,  $1 - \varphi = (1 - \cos \alpha)/2$ , а энергия эффективного излучения площадки  $FA$  в телесном угле  $\omega$  определяется произведением  $FA \frac{1 - \cos \alpha}{2} E$ , которое равно  $OF \cdot E$ .

Это означает равенство энергии эффективного излучения площадки  $FA$  в телесном угле  $\omega$  энергии полусферического излучения площадки  $OF$ . Следовательно, предположение о том, что рассматриваемая оптическая система испус-

кает излучение в пределах телесного угла  $\omega$  с постоянной интенсивностью, оказалось верным.

На рис. 1 в качестве индикатрисы излучения для большей наглядности изображена зависимость направленной силы излучения  $E'$  от направления в плоскости  $XOY$ .

Таким образом, анализируемая оптическая система формирует в определенном телесном угле, зависящем от геометрических параметров системы, поток излучения, направленная сила которого характеризуется ограниченной плоскостью ламбертовской индикатрисой. Такую излучающую систему, как в [6], можно использовать в составе модуля имитатора, воспроизводящего одну из моделей поля теплового излучения планет.



**Рис. 2.** Формирование диффузного излучения с помощью вертикального двустороннего ленточного излучателя 1 и двух зеркальных параболических цилиндров 2 и 3

Интерес представляет схематично изображенная на рис. 2 оптическая система, состоящая из двусторонне излучающей полоски 1 и двух цилиндрических зеркальных отражателей 2 и 3 (образующие их линии — это параболы  $OA$  и  $OB$  с общим фокусом  $F$ ). При этом точки  $A$ ,  $F$  и  $B$  лежат на одной прямой. Используя предыдущую оптическую схему, легко убедиться в том, что из полости, образованной отражателями, будет испускаться лучистый поток, направленная сила которого  $E'$  характеризуется полной ламбертовской индикатрисой.

**Применение параболических зеркал в совокупности с диффузным излучателем**

**в форме диска.** Рассмотрим излучающую систему (рис. 3), состоящую из диффузно излучающего диска и параболического зеркального отражателя. Образующей линией поверхности зеркала является парабола  $CB$  с фокусом  $F$ , совпадающим с наиболее удаленной точкой диска и с осью  $OX$ , параллельной прямой  $AB$ , где  $A$  — край зеркала, а  $B$  — точка излучателя, диаметрально противоположная точке  $F$ .

Покажем, что данная излучающая система формирует лучистый поток, распространяющийся с одинаковой интенсивностью в пределах конического телесного угла  $\omega$  с углом полураствора  $\alpha$ . Из особенностей взаимного расположения края диффузного диска, фокуса и оптической оси параболы следует, что испускаемое данной оптической системой излучение будет заключено в пределах телесного угла  $\omega$ . Неясным лишь остается вопрос о характере зависимости интенсивности излучения системы от направления.

Как и в предыдущем разделе, сопоставим энергию излучения  $E$  оптической системы в пределах отмеченного телесного угла  $\omega$  с энергией полусферического излучения  $E_0$  диффузного диска. При определении  $E$  предположим, что

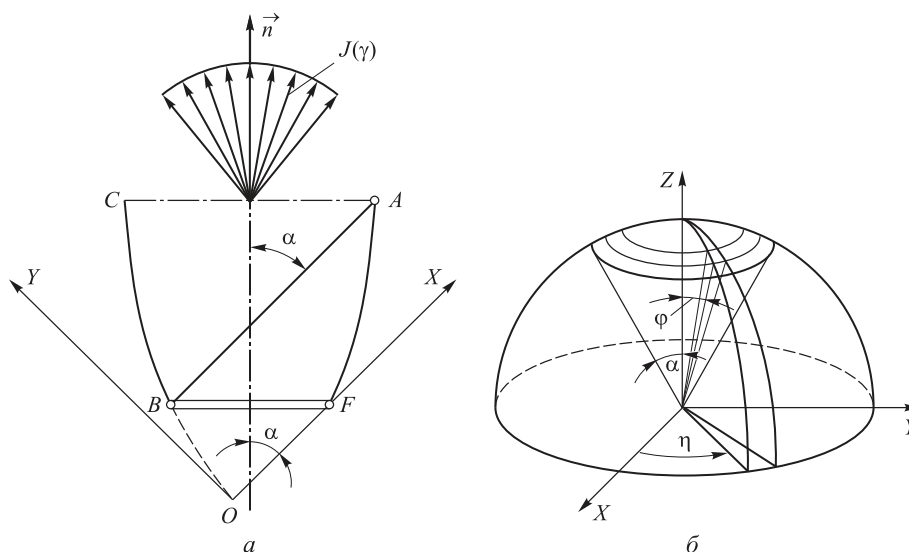


Рис. 3. Оптическая (а) и расчетная (б) схемы системы с диффузным излучателем 1 и зеркальным отражателем 2, имеющим форму поверхности параболоида вращения

интенсивность  $J$  рассматриваемой системы по всем направлениям в пределах  $\omega$  постоянна. Согласно расчетной схеме на рис. 3, имеем

$$E = \frac{\pi D^2}{4} J \int_{\omega} \cos \gamma d\omega = \frac{\pi D^2}{4} J \int_0^{2\pi} d\eta \int_0^{\alpha} \sin \gamma \cos \gamma d\gamma = J \frac{\pi D^2}{4} \sin^2 \alpha.$$

Отметим, что  $E_0 = J\pi \frac{\pi d^2}{4}$ .

Используя каноническое уравнение параболы и расчетную схему, приведенную на рис. 3, б, нетрудно выразить геометрические параметры анализируемой системы через  $d$  и  $\alpha$ :

$$D = \frac{d}{\sin \alpha}, \quad h = \frac{d(1 + \sin \alpha)}{2 \sin^2 \alpha}, \quad P = d(1 + \sin \alpha), \quad (4)$$

где  $p$  — параметр параболы.

Если подставить в соотношение для  $E$  вместо  $D$  его выражение через  $d$  и  $\alpha$ , то получим, что  $E = E_0$ . Это свидетельствует о том, что предположение относительно независимости  $J$  от направления в пределах телесного угла  $\omega$  оказалось верным.

Таким образом, данная оптическая система испускает энергию излучения только в пределах телесного угла  $\omega$  и с постоянной интенсивностью, равной интенсивности излучения диффузного источника (при условии, если отражательная способность параболоидного зеркала равна единице).

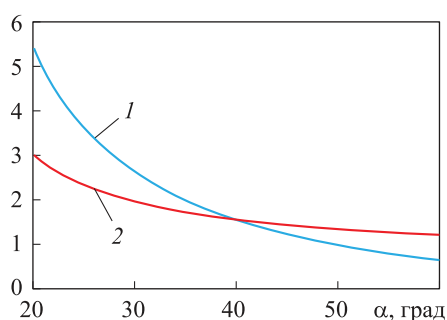
**Применение параболических зеркал в совокупности с диффузным ленточным излучателем.** Рассмотрим бесконечно протяженную систему, состоящую из

диффузно излучающей в полусферу полосы шириной  $l$  и двух идеальных зеркал ( $\rho = 1$ ), поверхности которых представляют собой поверхности параболических цилиндров. Пусть геометрические характеристики направляющей линии отражателей этой бесконечно протяженной системы полностью соответствуют характеристикам образующей линии осесимметричной системы, рассмотренной в предыдущем разделе. Отражатели данной излучающей системы имеют линейчатую форму (образующая линия параллельна оси модуля). В любом поперечном сечении излучающей системы отраженный в какой-то точке цилиндрического зеркала луч можно представить в виде трех составляющих, два луча лежат в плоскости поперечного сечения, а третий находится в плоскости, параллельной продольной оси системы. В силу геометрической особенности поперечного сечения сумма двух первых векторов не отклонится от вертикальной оси модуля более чем на угол  $\alpha$ . Следовательно, из полости рассматриваемой бесконечно протяженной излучающей системы будет испускаться излучение, не выходящее за пределы пространства, ограниченного симметрично расположенными относительно нормали модуля плоскостями. Обе ограничивающие плоскости составляют с продольной центральной плоскостью модуля угол  $\alpha$ . В случае реализации такой излучающей системы в виде модуля имитатора интерес представляют относительные (по отношению к диаметру излучателя  $d$ ) геометрические размеры его поперечного сечения, а именно соотношение  $D/d$  и  $h/d$ , где  $D$  и  $h$  ширина выходного сечения модуля и его высота.

Из соотношений (4) получим

$$\frac{D}{d} = \frac{1}{\sin \alpha}; \quad \frac{h}{d} = \frac{1 + \sin \alpha}{2 \sin^2 \alpha} \cos \alpha.$$

Результаты расчета зависимостей  $D/d$  и  $h/d$  от  $\alpha$  приведены на рис. 4. Видно, что рассмотренные оптические схемы излучателей могут быть воплощены в компактных по конструкции излучающих модулях. Их отражающие элементы не создают недопустимо большого затеняющего эффекта, из-за которого в экспериментальной установке могло бы появиться большое фоновое излучение.



**Рис. 4.** Зависимость относительных размеров поперечного сечения линейчатого модуля (кривые 1, 2 —  $\bar{h} = h/d$ ,  $\bar{D} = D/d$ ) от предельного угла  $\alpha$  выхода излучения из полости модуля

**Выводы.** Разработанные радиационно-оптические схемы модулей имитаторов для воспроизведения внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата позволят при их конструктивной реализации обеспечить об-

лученность испытываемого объекта диффузным в ограниченном телесном угле потоком излучения. В результате можно повысить точность моделирования внешнего теплообмена космического аппарата, а также увеличить коэффициент полезного использования подводимой к имитатору энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н.* Тепловые испытания космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 143 с.
2. *Елисеев В.Н., Товстоног В.А.* Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.
3. *Ульянов В.А., Соловьев М.В.* Оптимизация тепловакуумных испытаний космических комплексов на установке ВК 600/300. М.: Полет, 2009. С. 82–93.
4. *Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R.* Thermal radiation heat transfer. CRC Press, 2015. 1016 p.
5. *Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В.* Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1979. 207 с.
6. *Колесников А.В., Сербин В.И.* Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов. М.: Информация–XXI век, 1997. 170 с.

**Колесников Анатолий Васильевич** — д-р техн. наук, профессор, старший научный сотрудник Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ» (Российская Федерация, 125993, А-80, ГСП-3, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

**Палешкин Андрей Вячеславович** — канд. техн. наук, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ» (Российская Федерация, 125993, А-80, ГСП-3, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

**Шеметова Елена Владиславовна** — аспирантка Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ» (Российская Федерация, 125993, А-80, ГСП-3, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Колесников А.В., Палешкин А.В., Шеметова Е.В. Имитаторы тепловых нагрузок с диффузно излучающими модулями в строго ограниченном телесном угле // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 4. С. 47–54.

DOI: 10.18698/0236-3941-2018-4-47-54

## THERMAL LOADING SIMULATORS WITH DIFFUSE EMITTER MODULES OPERATING OVER A STRICTLY BOUNDED SOLID ANGLE

A.V. Kolesnikov

A.V. Paleshkin

E.V. Shemetova

paleshkin.andrey@mail.ru

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

### Abstract

The study deals with the methods of creating directed radiation fluxes with intensities described by Lambertian phase functions over a finite solid angle. We describe radiation and optical layouts for diffuse emitter modules simulating external thermal loading. These modules comprise disks or ribbons that emit diffuse radiation over a hemispherical solid angle, as well as specular reflectors the surfaces of which can be represented by a paraboloid of revolution and a parabolic cylinder with specific geometrical properties of their directrices. It is possible to develop basic layouts of optical devices for creating radiant fluxes with specific directional properties, using various combinations of the methods described

### Keywords

*Simulation, thermal loading, spacecraft, radiation phase function, diffuse radiation*

Received 12.12.2017

© BMSTU, 2018

### REFERENCES

- [1] Andreychuk O.B., Malakhov N.N. Teplovye ispytaniya kosmicheskikh apparatov [Thermal testing of spacecraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 143 p.
- [2] Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Teploobmen i teplovye ispytaniya materialov i konstruktsiy aerokosmicheskoy tekhniki [Heat transfer and thermal testing of aerospace materials and structures]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 396 p.
- [3] Ul'yanov V.A., Solov'ev M.V. Optimizatsiya teplovakuumnykh ispytaniy kosmicheskikh kompleksov na ustanovke VK 600/300 [Optimization of space systems thermal and vacuum testing at the VK 600/300 simulator]. Moscow, Polet Publ., 2009. Pp. 82–93.
- [4] Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R. Thermal radiation heat transfer. CRC Press, 2015. 1016 p.
- [5] Zaletaev V.M., Kapinos Yu.V., Surguchev O.V. Raschet teploobmena kosmicheskogo apparata [Calculation of spacecraft heat transfer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 207 p.
- [6] Kolesnikov A.V., Serbin V.I. Modelirovanie usloviy vneshnego teploobmena kosmicheskikh apparatov [Modelling external heat exchange conditions of spacecraft]. Moscow, Informatsiya–XXI vek Publ., 1997. 170 p.

**Kolesnikov A.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Senior Research Fellow, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, A-80 GSP-3, 125993 Russian Federation).

**Paleshkin A.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, A-80 GSP-3, 125993 Russian Federation).

**Shemetova E.V.** — post-graduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, A-80 GSP-3, 125993 Russian Federation).

### Please cite this article in English as:

Kolesnikov A.V., Paleshkin A.V., Shemetova E.V. Thermal Loading Simulators with Diffuse Emitter Modules Operating over a Strictly Bounded Solid Angle. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 4, pp. 47–54 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-4-47-54