

УДК 519.6+535.2

## РАСЧЁТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ СЛОЖНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

© 2013 И. Е. Евдокимов<sup>1</sup>, В. С. Николаенко<sup>1</sup>, Г. С. Филиппов<sup>1</sup>, Б. Ю. Яценко<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)<sup>2</sup>ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»

В статье приведены результаты расчёта пространственного распределения лучистой энергии от излучателя, состоящего из цилиндрического источника излучения и двух тарельчатых отражателей с диффузным характером излучения и отражения. В качестве основного инструмента расчёта использовалась программа моделирования оптических параметров сложных отражателей. В основе применяемой методики лежит итерационно-зональный метод, суть которого состоит в разбиении излучающей и отражающей системы, а также собирающей полусферы на элементарные площадки. Обмен энергией между площадками определяется при помощи метода прямого хода луча. Проведено сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными, полученными в ходе модельного светового эксперимента.

*Математическое моделирование, индикатриса, излучение, излучатель, отражатель, тепловое излучение, зональный метод, имитационное моделирование, диффузный, зеркальный.*

### Введение

Разработка способов расчёта пространственного распределения потоков лучистой энергии (индикатрисы) от сложных излучателей видимого и инфракрасного диапазонов, а также путей уменьшения их интенсивности, является актуальной задачей для ряда областей науки и техники. Все излучающие элементы конструкции являются, как правило, сложными геометрическими фигурами, что значительно усложняет процесс вычислений из-за необходимости учитывать реальные оптические характеристики поверхностей и многократные переотражения лучистого потока между ними. На сегодняшний день многие методы систематизированы и описаны в учебниках [1-3]. Однако, несмотря на большое количество публикаций в области радиационно-конвективного теплообмена, исследования в области расчёта оптических характеристик излучателей являются не столь распространёнными [4,5]. Настоящая работа посвящена математическому моделированию пространственного распределения потока

лучистой энергии от сложного излучателя.

Существующие программы расчёта теплового излучения (TERM, PATRAN) позволяют рассчитывать температуры нагрева элементов конструкции в приближении диффузно излучающих поверхностей, но не моделируют распределение теплового потока в пространстве. Программы, используемые в компьютерной графике для определения освещённости объектов, рассматривают распределение светового потока в пространстве (освещённость, яркость объектов, сцен), однако они не позволяют рассчитывать тепловые потоки.

### Постановка задачи

Цель исследования – разработать метод, который позволяет решить обе задачи – рассчитывать излучение нагретых поверхностей сложных излучателей и определять распределение лучистых потоков в пространстве. За основу исследования, посвящённого разработке математического моделирования сложных излучателей, взят усложнённый метод расчёта переноса

излучения Ю.А. Суринова, получивший название итерационно-зонального.

Суть предлагаемого метода расчёта состоит в разбиении излучающей и отражающей системы, а также собирающей полусферы на элементарные площадки. Каждая площадка на собирающей полусфере соответствует некоторому телесному углу суммирования  $d\Omega = dF_{i,j}/L^2$  (рис.1), в пределах которого переносится лучистая энергия от излучающих и отражающих элементарных площадок в направлении полусферы суммирования. Перенос энергии осуществляется при помощи лучей, которым она приписывается. Для определения параметров лучей, соединяющих центры площадок излучения или отражения с площадкой  $dF_{i,j}$  на поверхности сферы суммирования радиуса  $L$ , необходимо определить координаты вектора нормали к центрам элементарных площадок.

С использованием вышеуказанных допущений разработан метод, алгоритм и программа математического

моделирования пространственного распределения лучистой энергии от сложных излучателей.

Подобное программное средство позволит иметь совершенный инструмент расчёта оптических характеристик различных систем на начальных этапах проектирования излучающих устройств.

### Модель излучателя

В качестве объекта математического моделирования пространственного распределения лучистой энергии с использованием разработанного метода был выбран излучатель, состоящий из цилиндрического диффузного источника излучения и тарельчатого отражателя, образованного внешними поверхностями двух соосных диффузно отражающих круговых прямых усечённых конусов, вершины которых обращены друг к другу и опираются на основания расположенного между ними цилиндрического светящего тела (рис. 2).

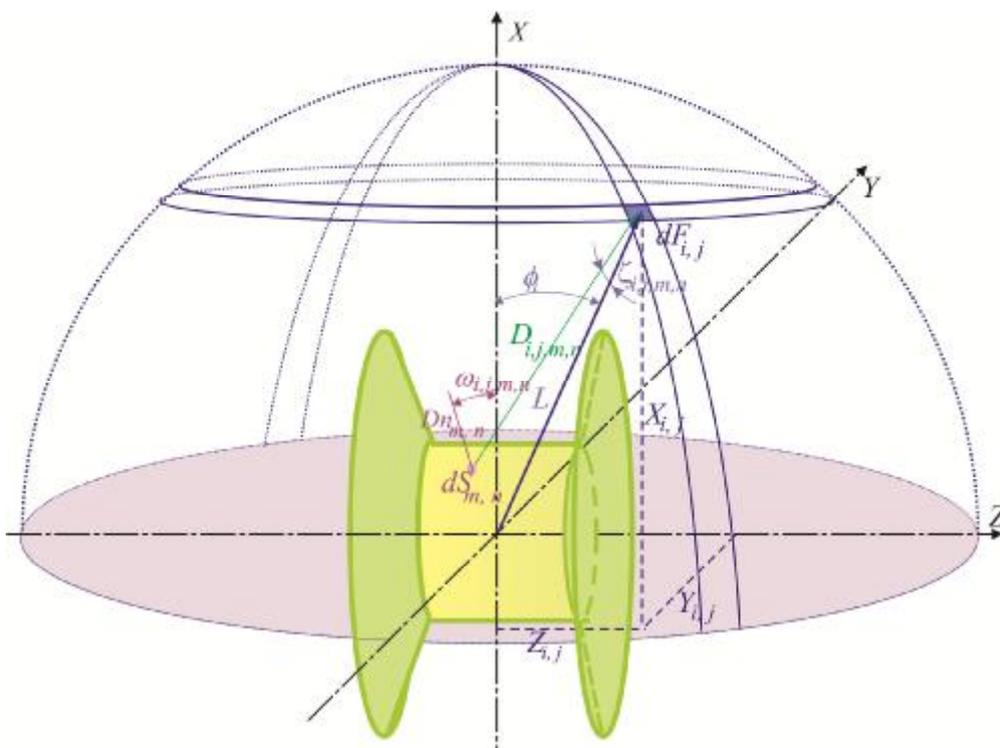


Рис. 1. Поверхность излучателя и сфера суммирования

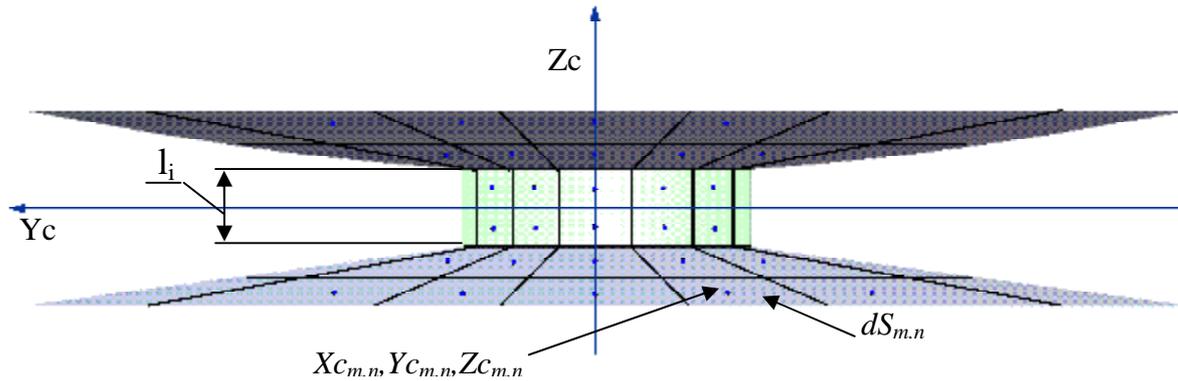


Рис. 2. Модель излучателя с тарельчатым отражателем

Для расчёта модель излучателя, приведённая на рис. 1, 2, разбита на элементарные площадки  $dS_{m,n}$  с координатами центров  $X_{c,m,n}, Y_{c,m,n}, Z_{c,m,n}$ . Пространственное распределение отражённого излучения находилось в результате численного интегрирования потока излучения по сфере суммирования радиуса  $L$ , которая окружает излучатель (рис. 1). Сфера суммирования также разбита на элементарные площадки  $dF_{i,j}$  в соответствии с заданными параметрами разбиения по азимутальному  $\theta_j$  и зенитному  $\varphi_i$  углу. В произвольном случае радиус  $L$  сферы суммирования может быть выбран любым.

Согласно закону Ламберта количество энергии  $dQ_{m,n,i,j}$ , излучаемое элементом  $dS_{m,n}$  в направлении площадки  $dF_{i,j}$  (рис. 1), равно:

$$dQ_{i,j,m,n} = \frac{(E_{n,m,n}) \cdot \cos(z_{i,j,m,n}) \cdot \cos(\omega_{i,j,m,n}) \cdot dS_{m,n} \cdot dF_{i,j}}{p \cdot (D_{i,j,m,n})^2} \quad (1)$$

Здесь  $E_{n,m,n}$  – собственное излучение поверхности,  $\omega_{i,j,m,n}$  – угол между нормалью  $Dn_{m,n}$  к поверхности  $dS_{m,n}$  и направлением  $D_{i,j,m,n}$  на площадку  $dF_{i,j}$ ;  $z_{i,j,m,n}$  – угол между нормалью  $L$  к площадке  $dF_{i,j}$  и направлением  $D_{i,j,m,n}$  на  $dS_{m,n}$ ;  $D_{i,j,m,n}$  – расстояние между центрами

$X_{c,m,n}, Y_{c,m,n}, Z_{c,m,n}$  поверхностей  $dS_{m,n}$  и  $X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}$  площадки  $dF_{i,j}$ :

$$D_{i,j,m,n} = \left[ (X_{i,j} - X_{c,m,n})^2 + (Y_{i,j} - Y_{c,m,n})^2 + (Z_{i,j} - Z_{c,m,n})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Координаты  $X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}$  центров поверхностей  $dF_{i,j}$  равны:

$$\begin{aligned} X_{i,j} &= L \cdot \cos[(j_i + j_{i-1})/2] \\ Y_{i,j} &= L \cdot \sin[(j_i + j_{i-1})/2] \cdot \sin[(J_i + J_{i-1})/2] \\ Z_{i,j} &= L \cdot \sin[(j_i + j_{i-1})/2] \cdot \cos[(J_i + J_{i-1})/2] \end{aligned} \quad (3)$$

Величины азимутального  $\theta_j$  и зенитного  $\varphi_i$  углов лежат соответственно в пределах  $0^0 \leq \theta_j \leq 360^0$  и  $0^0 \leq \varphi_i \leq 90^0$ .

Косинус угла  $z_{i,j,m,n}$  между нормалью  $L$  к поверхности  $dF_{i,j}$  и направлением  $D_{i,j,m,n}$  на  $dS_{m,n}$  равен:

$$\begin{aligned} \cos(z_{i,j,m,n}) &= \frac{(X_{c,m,n} - X_{i,j}) \cdot (0 - X_{i,j})}{L \cdot D_{i,j,m,n}} + \\ &+ \frac{(Y_{c,m,n} - Y_{i,j}) \cdot (0 - Y_{i,j}) + (Z_{c,m,n} - Z_{i,j}) \cdot (0 - Z_{i,j})}{L \cdot D_{i,j,m,n}} \end{aligned} \quad (4)$$

Косинус угла  $\omega_{i,j,m,n}$  между нормалью  $Dn_{m,n}$  к поверхности  $dS_{m,n}$  и направлением  $D_{i,j,m,n}$  на  $dF_{i,j}$  равен:

$$\cos(w_{i,j,m,n}) = \frac{(X_{n,m,n} - X_{c,m,n}) \cdot (X_{i,j} - X_{c,m,n})}{D_{n,m,n} \cdot D_{i,j,m,n}} + \frac{(Y_{n,m,n} - Y_{c,m,n}) \cdot (Y_{i,j} - Y_{c,m,n})}{D_{n,m,n} \cdot D_{i,j,m,n}} + \frac{(Z_{n,m,n} - Z_{c,m,n}) \cdot (Z_{i,j} - Z_{c,m,n})}{D_{n,m,n} \cdot D_{i,j,m,n}} \quad (5)$$

Энергия  $dQ_{i,j,m,n}$ , излучаемая элементами  $dS_{m,n}$ , будет беспрепятственно распространяться в направлении площадок  $dF_{i,j}$  в случае одновременного выполнения следующих условий:

элементы  $dS_{m,n}$  не затенены, т.е. находятся в пределах прямой видимости, и направление  $D_{i,j,m,n}$  составляет угол менее  $90^\circ$  с нормалью к площадке сферы  $dF_{i,j}$ .

В итоге, поток энергии  $Q_{i,j}$  равен сумме потоков энергии  $dQ_{i,j,m,n}$ , излучаемых элементами  $dS_{m,n}$  на площадки  $dF_{i,j}$

$$Q_{i,j} = \sum_{n=1}^{n \max} \sum_{m=1}^{m \max} dQ_{i,j,m,n} \quad (6)$$

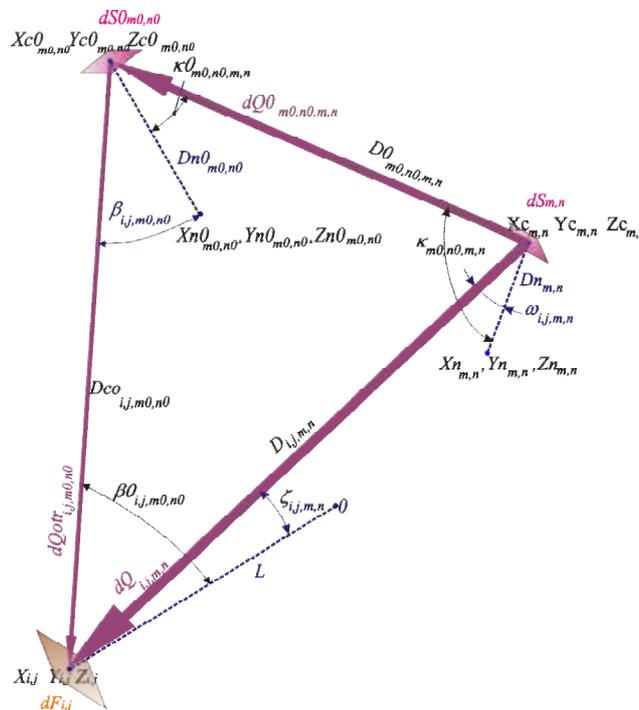


Рис. 3. Схема к объяснению расчёта отражённого и переотражённого излучения

Энергию, приходящую с разных направлений на элемент диффузно отражающей поверхности, в отличие от зеркальной можно суммировать вне зависимости от угла падения. Это обстоятельство сильно (больше чем на два порядка) упрощает дальнейшие вычисления. Так, суммарное излучение  $dQ_{ots\ m0,n0}$  от площадок  $dS_{m,n}$  на площадки  $dS_{m0,n0}$  равно:

$$dQ_{ots\ m0,n0} = \sum_m \sum_n dQ_{0\ m0,n0,m,n} \quad (7)$$

Энергия  $dQ_{otr\ i,j,m0,n0}$ , отражаемая элементами  $dS_{m0,n0}$  в направлении площадок  $dF_{i,j}$ , равна:

$$dQ_{otr\ i,j,m0,n0} = dQ_{ots\ m0,n0} \cdot (1 - a_{0\ m0,n0}) \times \frac{\cos(b_{0\ i,j,m0,n0}) \cdot \cos(b_{i,j,m0,n0}) \cdot dF_{i,j}}{p \cdot (D_{co\ i,j,m0,n0})^2} \quad (8)$$

Здесь  $\beta_{i,j,m0,n0}$  – угол между нормалью  $D_{n0\ m0,n0}$  к поверхности  $dS_{m0,n0}$  и направлением  $D_{co\ i,j,m0,n0}$  на площадку  $dF_{i,j}$ ;  $\beta_{0\ i,j,m0,n0}$  – угол между нормалью  $L$  к площадке  $dF_{i,j}$  и направлением  $D_{co\ i,j,m0,n0}$

на  $dSO_{m0,n0}$ ;  $Dco_{i,j,m0,n0}$  – расстояние между центрами  $Xc0_{m0,n0}, Yc0_{m0,n0}, Zc0_{m0,n0}$  поверхностей  $dSO_{m0,n0}$  и  $X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}$  площадки  $dF_{i,j}$ , равное

$$Dco_{i,j,m,n} = \left[ (X_{i,j} - Xc0_{m0,n0})^2 + (Y_{i,j} - Yc0_{m0,n0})^2 + (Z_{i,j} - Zc0_{m0,n0})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

С использованием аналогичных геометрических соотношений выводятся зависимости для переотражённых составляющих излучения (рис.3). Количество проводимых расчётов (отражений) зависит от степени черноты отражающих поверхностей. Результаты расчёта будут приведены на рис. 5 в виде зависимости, характеризующей изменение безразмерной силы излучения ( $I_{\max}$ ) от угла наблюдения  $Z_{i,j,m,n}$ .

### Схема эксперимента

Для экспериментального подтверждения разработанного метода расчёта пространственного распределения лучистой энергии от сложных излучателей выбран метод светового моделирования. Он получил большое распространение, поскольку заметно

упрощает задачу экспериментального определения индикатрисы любого излучателя. Приборы для измерения светового излучения во многих случаях проще и точнее измерительных приборов тепловой радиации [6] – радиометров, пирометров или болометров. Данное утверждение справедливо и по настоящее время – тепловизионная аппаратура, несмотря на широкую распространённость, остаётся дорогой и не всегда удовлетворяет специфическим запросам конкретных исследований. Законы распространения теплового излучения подчиняются законам геометрической оптики (в макроскопическом масштабе), и поэтому между оптическим и тепловым излучением в ряде случаев можно поставить знак равенства. Кроме того, в модельных условиях не происходит сколько-нибудь заметного изменения теплового состояния источника излучения и, следовательно, исключается воздействие конвективных и кондуктивных перетечек тепла на индикатрису излучения.

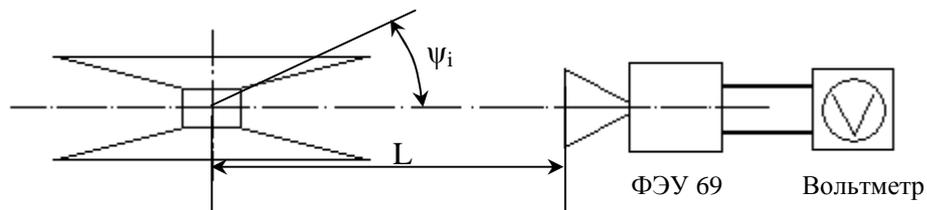


Рис. 4. Схема светового эксперимента

Конструктивно экспериментальный узел представлял цилиндрическую люминесцентную лампу (рис. 4), на которой соосно закреплены два прямых круговых конических отражателя.

Измерения индикатрисы проводились по схеме, рекомендованной ГОСТ-17677-82. Для этого источник излучения устанавливался на поворотном устройстве таким образом, чтобы вертикальная ось вращения стола была перпендикулярна оси симметрии излучателя и проходила через его

оптический центр. Между источником излучения и фотоприёмником, находящимся на удалении  $L$ , расположена система экранов для защиты от рассеянного излучения.

Изменение угла наблюдения  $\psi_i$  осуществлялось вращением поворотного стола с излучателем относительно неподвижного фотоприёмника. В качестве приёмника оптического излучения использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-69А. Перед каждым экспериментом производилась его

тарировка с использованием стандартного источника излучения (лампа СИ-8-200) и оптического делителя. Оптические измерения проводились в области линейной зависимости потока излучения от сигнала фотоприёмника.

### Результаты расчётов

Расчётные и экспериментальные результаты приведены на рис. 5. Согласно полученным данным, математическая модель достаточно точно описывает

экспериментальные пространственного лучистого потока излучателя. закономерности распределения рассмотренного

Максимальное расхождение экспериментальных и расчётных данных не превышает 3%, что создаёт предпосылки для обоснованного моделирования излучателей с разнообразной геометрией в случае диффузных свойств отражающих поверхностей.

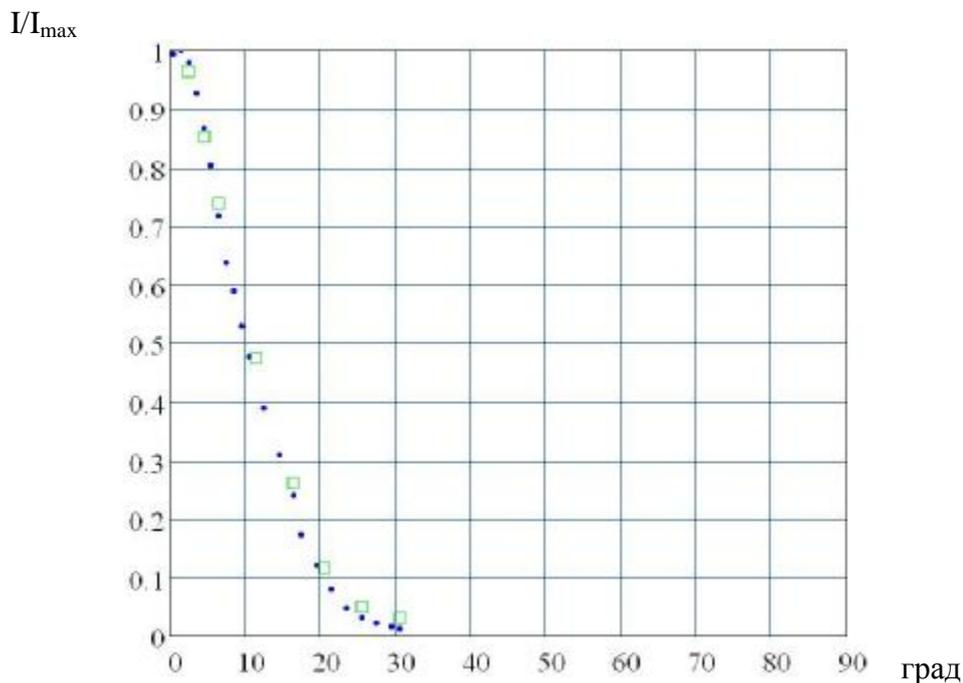


Рис. 5. Зависимость безразмерной силы излучения от угла наблюдения:

○ – эксперимент, □ – расчет,  $l_i=1$  мм

### Заключение

Разработанная математическая модель востребована при расчёте пространственных лучистых потоков от сложных излучателей, например, двигателей и корпусов летательных аппаратов, у которых диффузно излучающие и отражающие поверхности сложной формы задаются в виде массива точек с координатами  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$ .

Совпадение пространственного распределения лучистой энергии,

расчитанное с использованием данного метода для простейших излучателей (диск, сфера, цилиндр и др.), с результатами их аналитических решений, а для более сложных излучателей – с данными модельного физического эксперимента позволяет сделать вывод о перспективности использования данной методики.

**Библиографический список**

1. Оцисик, М.Н., Сложный теплообмен [Текст] / М.Н. Оцисик. – М.: «Мир», 1976 г.

2. Modest, M. F. Radiative Heat Transfer/ M. F. Modest. – 2nd edn. New York: Academic Press, 2003.

3. Зигель, Р. Теплообмен излучением [Текст] / Р. Зигель, Дж. Хауэлл; пер. с англ. – М.: Мир, 1975.

4. Куш, О.К. Расчет зеркальных светильников на ЭВМ с использованием сплайнов [Текст] / О.К. Куш, Н.Н. Со-

фронов // Светотехника. – 1985. – № 12. – С.19-21.

5. Расчёт индикатрисы излучателя. Рабочие процессы в подсистемах энергосиловых установок [Текст] / И.В. Власов, В.И. Гук, В.С. Николаенко, И.Г. Паневин // Тем. сб. науч. тр. МАИ. – М., 1987. – 76 с., ил.

6. Световое моделирование лучистого теплообмена [Текст] / С.Н. Шорин, Г.Л. Поляк, И.П. Колченогова [и др.] // Теплопередача и тепловое моделирование. – М.: Изд. АН СССР, 1959. – С. 365-418.

**CALCULATION OF SPATIAL DISTRIBUTION OF ENERGY OF A COMPLEX RADIATOR**

© 2013 I. Ye. Yevdokimov<sup>1</sup>, V. S. Nikolaenko<sup>1</sup>, G. S. Filippov<sup>1</sup>, B. Yu. Yashchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University)

<sup>2</sup>Lavochkin Research and Production Association

The paper presents the results of calculating spatial distribution of radiant energy from a radiator consisting of a cylindrical source of radiation and two disk reflectors, accordingly, with a diffuse character of radiation and reflection. A program of modeling optical parameters of complex reflectors is used as the basic tool of calculation. The basis for the procedure applied is the iterative-zonal method the essence of which consists in separating the radiating and reflecting systems as well as the light-trapping hemisphere into elementary platforms. The exchange of energy between the platforms is defined by means of a forward stroke beam method. The results of calculation are compared to the experimental data obtained in the course of the model light experiment.

*Mathematical modeling, indicatrix, radiation, radiator, reflector, thermal radiation, zonal method, simulation, diffuse, mirror.*

**Информация об авторах**

**Евдокимов Илья Евгеньевич**, аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: [dir\\_sov@mail.ru](mailto:dir_sov@mail.ru). Область научных интересов: инфракрасное излучение, заметность двигателей вертолётов, малогабаритные авиационные двигатели.

**Николаенко Владимир Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: инфракрасное излучение, заметность двигателей вертолётов, малогабаритные авиационные двигатели, математическое моделирование.

**Филиппов Глеб Сергеевич**, аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: [Filippov.Gleb@gmail.com](mailto:Filippov.Gleb@gmail.com). Область научных интересов: инфракрасное излучение, заметность двигателей, малогабаритные авиационные двигатели, математическое моделирование.

**Яценко Богдан Юрьевич**, кандидат технических наук, ведущий специалист, ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Область научных интересов: инфракрасное излучение, заметность двигателей, малогабаритные авиационные двигатели, математическое моделирование.

**Yevdokimov Ilya Yevgenyevich**, postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: [dir\\_sov@mail.ru](mailto:dir_sov@mail.ru). Area of research: infra-red radiation, observability of helicopter engines, small-sized aviation engines.

**Nikolaenko Vladimir Sergeevich**, candidate of engineering, associate professor, Moscow Aviation Institute (National Research University). Area of research: infrared radiation, observability of helicopter engines, small-sized aviation engines, mathematical modeling.

**Filippov Gleb Sergeevich**, postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: [Filippov.Gleb@gmail.com](mailto:Filippov.Gleb@gmail.com). Area of research: infrared radiation, observability of engines, small-sized aviation engines, mathematical modeling.

**Yashchenko Bogdan Yuryevich**, candidate of engineering, senior researcher, Lavochkin Research and Production Association. Area of research: infrared radiation, observability of engines, small-sized aviation engines, mathematical modeling.