

ностью и углом расходимости $0 \leq \gamma \leq 4^\circ$ потока излучения. Проведены расчеты локальных значений коэффициента $\delta_{s,i}(\alpha)$ при различных значениях угла поворота α микроспутника в опорно-поворотном устройстве. Среднее значение коэффициента $\delta_{s,i}(\alpha)$ для различных затеняемых элементов КА на освещенном участке испытательного витка составляет примерно от 0.14 до 0.28. Дополнительным фактором, порождаемым панелями имитатора Земли, является незначительная паразитная засветка некоторых элементов КА, обусловленная рассеянием излучения на элементах конструкции имитатора.

1. Андрейчук О. Б., Малахов Н. Н. Тепловые испытания космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1982.— 202 с.
2. Колесников А. В. К вопросу о принципах моделирования поля интенсивности теплового излучения планет // Космич. исследов. — 1979.—17, вып. 1.—С. 146—150.
3. Колесников А. В. Методика расчета интенсивности излучения линейчатых излучателей имитаторов внешних тепловых потоков // Инж.-физ. журнал.—1983.—45, № 2.— С. 152—153.
4. Моделирование тепловых режимов космических аппаратов и окружающей его среды / Под ред. Г. И. Петрова. — М.: Машиностроение, 1971.—382 с.

5. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник. — М.: Машиностроение, 1980.—224 с.
6. Разработка пакета программ с автоматизированной системой формирования оптико — геометрических моделей для расчета теплообмена КА / Кислов А. М., Романенко В. Г. // Научно-технич. отчет СКТБ по КТ ФТИНТ НАН Украины. — Харьков, 2000.—108 с.
7. Ульянов Е. А. Коррозионностойкие стали и сплавы. — М.: Машиностроение, 1980.—208 с.
8. Donato M., et al. Design of an orbital heating simulator using IR techniques // J. Environ. Sci.—1987.—30, N 3.—P. 45—49.

THE SIMULATOR OF THE EARTH'S RADIATION FOR THERMO-VACUUM TESTS OF SPACECRAFTS

R. V. Gavrilov, A. M. Kislov, Yu. A. Melenevsky, A. I. Tserkovny

We developed the simulator of the Earth's radiation as a system of panels with line IR-emitters which are heated up by an electric current. The panels of emitters are fixed on the support-rotary facility. Together with a satellite the panels make preset turns with respect to the radiation flux from the solar simulator. The simulator reproduces on satellite elements summarized density of the absorbed fluxes of the Earth's emission and reflected sunlight from the Earth on the preset revolutions of the orbit. The results of our calculation of design parameters of the simulator are given.

УДК 523.72: 629.7.018

© Р. В. Гаврилов, А. М. Кислов, В. Г. Романенко

Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з криогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ В ИМИТАТОРАХ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Розроблено методику комп'ютерного моделювання процесу променистого перенесення у дзеркально-лінзових оптичних системах імітаторів сонячного випромінювання. У референтній площині імітатора обчислюються розподіл освітленості та її нерівномірність, середня освітленість і максимальний кут розбіжності світлового потоку. Наведено результати розрахунку імітатора з багатомодульною оптичною системою.

В имитаторах солнечного излучения (ИСИ) высокого качества используются сложные зеркально-линзовые оптические системы, которые содержат: блок источников излучения, коллекторные отражатели, оптический интегратор, входное окно вакуумной камеры, коллимационное зеркало [1, 4, 6, 8, 9]. Возможны варианты оптических систем без интегратора и/или коллимационного зеркала, многомодульные схемы с индивидуальными оптическими системами. Источником излучения в отдельном световом канале чаще всего служит короткодуговая ксеноновая лампа, установленная в фокусе эллип-

соидного отражателя. В ИК-имитаторах источниками излучения могут быть лампы накаливания и нагреватели с отражателями.

В качестве контрольной зоны, для которой указываются определенные характеристики ИСИ, рассматривается область заданного диаметра (мишень) в референтной плоскости имитатора. В области мишени требуется обеспечить основные характеристики светового потока: спектральный состав, близкий к солнечному, заданную среднюю освещенность, допустимые неравномерность освещенности и угол расходимости пучка (максимальный угол между све-

товыми лучами и осью пучка). При тепловых испытаниях космических аппаратов спектральный состав излучения может соответствовать спектру ксеноновой лампы или инфракрасного излучателя.

Для компьютерного моделирования процесса переноса лучистых потоков в ИСИ с зеркально-линзовыми оптическими системами и расчета характеристик потока излучения в заданной области референтной плоскости разработана программная система MIRAGE. В состав MIRAGE входят программы SIGMA, SIMPL и OPTOS. Программа SIGMA предназначена для формирования оптико-геометрических моделей ИСИ, которые содержат элементы с граничными поверхностями не выше второго порядка. Оптико-геометрическая модель строится из набора поверхностных и объемных базовых конструктивных единиц (конструктивов), записанных в программе. База данных включает все конструктивы пакета программ TRASSA [5], а также дополнительные оптические конструктивы: элементы параболоида, эллипсоида и гиперboloида, линзовые элементы с плоскими и сферическими поверхностями, решетчатые ослабители излучения. Многогранные конструктивы программа SIGMA автоматически разбивает на элементарные грани и формирует в определенном формате записи для этих граней в виде внутренних упорядоченных структур. Эти структуры используются программой SIMPL для моделирования лучистого переноса в оптической системе ИСИ.

Для всех граней конструктивов задаются оптические характеристики поверхностей и сред, ограничиваемых этими поверхностями: коэффициенты поглощения a и зеркального отражения r_s непрозрачных граней, коэффициенты преломления n и экстинкции k оптического материала линзовых элементов, коэффициенты диффузного $r_{\text{диф}}$ и зеркального r_s отражения рабочих поверхностей для линзовых элементов. На непрозрачных гранях учитываются также диффузное отражение ($r_{\text{диф}} = 1 - a - r_s$). Для рассматриваемого спектрального диапазона задаются средние значения оптических характеристик. Процессы переноса излучения в различных спектральных диапазонах моделируются отдельно.

Программа SIMPL разработана для моделирования методом Монте-Карло процесса переноса излучения от источника в область мишени референтной плоскости и расчета параметров пучка в этой области. На грани-источнике моделируется диффузный (ламбертовский) закон эмиссии излучения в конусе с углом полураствора $\alpha = 0 \dots 90^\circ$ и равномерное распределение плотности потока. Для источника в виде диска распределения плотности потока и угла излучения представляются в виде

кубических интерполяционных сплайн-функций радиуса точки испускания. Преломление лучей на поверхностях линзовых элементов моделируется законом Снеллиуса. Поглощение энергии преломленного луча в линзовом элементе вычисляется через длину хода луча в элементе и коэффициент экстинкции материала линзы.

В референтной плоскости имитатора область мишени моделируется конструктивом типа «круг» радиуса Rt с черной рабочей поверхностью и идентифицируется среди других граней оптической системы своим номером t . Мишень разбивается на M концентрических колец шириной $\Delta r = Rt/M$. Внешний радиус k -го кольца $r_k = kRt/M$, где $k = 1, \dots, M$ ($r_0 = 0$). Если кольцо $k = 1$ (круг) разделить на σ равных секторов (ячеек), то площадь одной ячейки $\Delta F = \pi(Rt/M)^2/\sigma$. Число ячеек в k -м кольце $n_k = \sigma(2k - 1)$, а на всей мишени — σM^2 . При $\sigma = 3$ размер ячейки по радиальной координате (Δr) и средний размер по угловой координате ($\pi\Delta r/3$) приблизительно равны. Величина Δr выбирается примерно равной характерному размеру датчика для измерения освещенности мишени.

Поток излучения Φ_t , поглощенный мишенью, определяется выражением

$$\Phi_t = \varphi_{s-t} \Phi_s, \quad (1)$$

где φ_{s-t} — суммарный разрешающий угловой коэффициент между блоком S граней-источников и гранью-мишенью t , Φ_s — суммарный поток излучения с блока S источников.

Освещенность n -й ячейки в k -м кольце мишени равна

$$E(k, n) = \Phi_s \Delta \varphi_{s-t}(k, n) / \Delta F, \quad (2)$$

где $\Delta \varphi_{s-t}(k, n)$ — суммарный разрешающий угловой коэффициент между блоком S граней-источников и ячейкой мишени, $n = 1, \dots, N_k$, $N_k = 3(2k - 1)$.

Среднее значение и средняя квадратичная неравномерность освещенности вычисляются с использованием (1) и (2) по формулам

$$E_{\text{med}} = \Phi_t / (\pi R t^2), \quad (3)$$

$$\overline{\Delta E} = \sqrt{(\pi R t^2)^{-1} \Delta F \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^{N_k} (E(k, n) - E_{\text{med}})^2}. \quad (4)$$

Коэффициенты φ_{s-t} , $\Delta \varphi_{s-t}$ вычисляются методом Монте-Карло по схеме со статистическими весами [3, 7] с учетом потерь веса (энергии) лучей на траекториях при отражении от граней системы и прохождении через линзовые элементы.

Угол расходимости для ν -й траектории луча ра-

вен $\gamma_\nu = \arccos |n_i \cdot v_\nu|$, где $|n_i|$, $|v_\nu|$ — направляющие векторы нормали к рабочей поверхности мишени и падающей на нее ν -й траектории луча. При моделировании траекторий для всех ячеек $\Delta F(k, n)$ в счетчиках $A(k, n)$ фиксируются максимальные значения угла расходимости

$$\gamma_{\max}(k, n) = \max_\nu \gamma_\nu(k, n). \quad (5)$$

Расчетный угол расходимости светового потока для всей мишени равен

$$\gamma = \max_{(k,n)} \gamma_{\max}(k, n). \quad (6)$$

Результаты расчета распределения освещенности представляются в виде: 1) цветогаммы, 2) одномерных графиков на концентрических окружностях и заданных радиальных лучах, 3) поверхности, которая изображается в различных ракурсах двумерным кубическим сплайном, 4) таблиц. Распределение угла расходимости (5) приводится в виде таблиц. Для осесимметричной оптической системы результат представляется графиками радиального распределения освещенности (2) и угла расходимости (5). На графиках дополнительно приводятся: среднее значение (3) и средняя квадратичная неравномерность (4) освещенности мишени, экстремальные значения освещенности и угла расходимости (6) светового потока.

Программа OPTOS решает задачу рационального расположения источников излучения или оптических модулей, при котором обеспечиваются допустимые неоднородность распределения освещенности на мишени и угол расходимости светового пучка.

В качестве примера применения программной системы MIRAGE приведем результаты расчета многомодульной оптической системы имитатора без оптического интегратора и коллимирующего зеркала. Рассматривается оптическая система с 19 световыми каналами, схема которой приведена ниже в работе [2, рис. 2]. Источником света служит блок из 19 короткодуговых Хе-ламп, формирующая оптика каждого светового канала включает зеркальный коллектор и плоское зеркало. Коллектор имеет форму пояса эллипсоида вращения, в первом фокусе которого расположена дуга Хе-лампы. Система коллекторов и плоских зеркал направляют потоки излучения на мишень радиуса Rt в референтной плоскости имитатора. Каждый световой канал создает поле освещенности радиуса r_{\max} определенного участка мишени. Все световые каналы создают результирующее поле освещенности с некоторой неоднородностью ΔE , которая зависит от взаимного расположения световых каналов (или центров свето-

вых пучков на мишени). Требуется определить такое взаимное расположение световых каналов, при котором обеспечивается минимальное значение ΔE .

При решении сформулированной задачи исходим из того, что задана создаваемая одним световым каналом освещенность $E_0(r)$ в функции радиуса r ($0 \leq r \leq r_{\max}$). Пример радиального распределения относительной освещенности $E_0 = E_0(r)/E_{0,\max}$ на мишени, вычисленного с помощью программы MIRAGE, приведен на рис. 1.

Рациональное расположение световых каналов реализуется при их «плотной» упаковке, когда центры пучков совпадают с центрами гексагонов, покрывающих мишень радиуса Rt . Тогда поле освещенности мишени определяется выражением

$$E(x, y) = E_0(\sqrt{x^2 + y^2}) + \sum_{k=1}^{18} E_0(\sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}), \quad (7)$$

где $x_k = x_k(R)$, $y_k = y_k(R)$ — координаты центра k -го гексагона в зависимости от радиуса R описанной вокруг него окружности. Неоднородность поля освещенности выражается как функция R и Rt в виде

$$\Delta E(R, Rt) = \max_{x^2 + y^2 \leq Rt^2} E(x, y) - \min_{x^2 + y^2 \leq Rt^2} E(x, y). \quad (8)$$

Так как поле освещенности (7) имеет 12 плоскостей зеркальной симметрии, поиск экстремальных значений функции $E(x, y)$ достаточно провести в секторе с угловым размером 30° . Оптимальный радиус $R_{\text{опт}}$, минимизирующий целевую функцию (8), и максимальный радиус мишени Rt_{\max} подлежат затем определению в результате двумерного поиска в прямоугольнике $0.5 \leq R/r_{\max} \leq 0.8$, $2 \leq Rt/r_{\max} \leq 2.5$.

Среднее значение освещенности мишени и средняя квадратичная неравномерность освещенности выражаются соответственно в виде

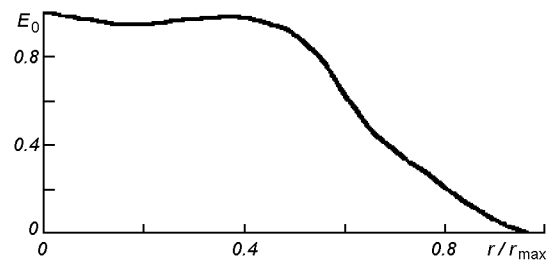


Рис. 1. Распределение относительной освещенности по радиусу мишени

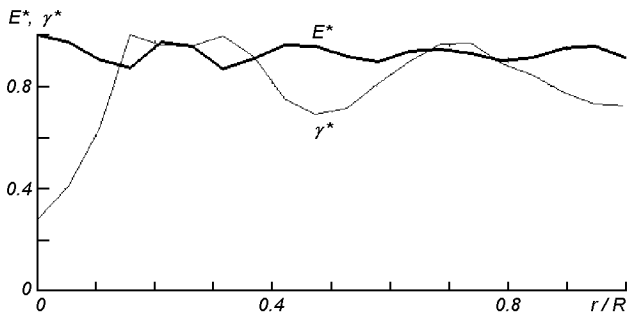


Рис. 2. Распределение освещенности по радиусу в референтной плоскости

$$E_{\text{med}} = (\pi R t^2)^{-1} \iint_{x^2 + y^2 \leq R t^2} E(x, y) dx dy,$$

$$\overline{\Delta E} = \sqrt{(\pi R t^2)^{-1} \iint_{x^2 + y^2 \leq R t^2} (E(x, y) - E_{\text{med}})^2 dx dy}.$$

На рис. 2 приведены распределения освещенности $E^*(\rho) = E(\rho)/E_{\text{max}}(\rho)$ и угла расходимости пучка $\gamma^*(\rho) = \gamma(\rho)/\gamma_{\text{max}}(\rho)$ в зависимости от радиуса мишени $\rho = r/Rt$, $\gamma_{\text{max}}(\rho) \approx 4^\circ$.

Поверхность мишени радиуса $Rt = 1000$ мм разбивалась на $M = 20$ колец, так что общее число ячеек размером 50×50 мм равно 1200. Освещенности $E(r_k, \varphi)$ проинтегрированы по углу $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ в каждом k -м кольце плоскости мишени ($k = 1, \dots, 20$). Расчетное значение среднего квадратичного отклонения освещенности от среднего значения $\overline{\Delta E} \approx \pm 8 \%$.

1. Андрейчук О. Б., Малахов Н. Н. Тепловые испытания космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1982.— 143 с.
2. Гаврилов Р. В., Меленевский Ю. А., Конохов С. Н. и др. Стенд для тепловакуумных испытаний космических аппаратов // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.— С. 42—46.
3. Кислов А. М., Романенко В. Г. Применение метода Монте-Карло для расчета молекулярных и лучистых потоков в системах сложной конфигурации. — Харьков, 1980.— 36 с.—(Препринт / АН УССР. ФТИНТ; № 12-80).
4. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г. И. Петрова. — М.: Машиностроение, 1971.—382 с.
5. Разработка пакета программ с автоматизированной системой формирования оптико-геометрических моделей для расчета теплообмена КА МС-1-ТК-ТВ: Научно-техн. отчет / А. М. Кислов, В. Г. Романенко — Харьков: СКТБ ФТИНТ НАНУ, 2000.—120 с.
6. Рымов А. И. Имитатор солнечного излучения // Светотехника.—1989.—9.—С. 4—6.
7. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло. — М.: Наука, 1973.—312 с.
8. Bartera R. E., Riise H. N., Miller C. G. Solar Simulators at the Jet Propulsion Laboratory // Appl. Opt.—1970.—9, N 5.— P. 1068—1074.
9. Brinkmann P. W. The European large space simulator comes into operation // ESA Bull.—1987.—50.—P. 19—23.

COMPUTER SIMULATION OF RADIANT FLUXES IN SOLAR SIMULATORS

R. V. Gavrilov, A. M. Kislov, V. G. Romanenko

We developed a technique for computer simulation of radiant transfer process in mirror-lens optical systems of solar simulators. In the given area of the reference plane of a solar simulator the distribution of irradiance and its non-uniformity as well as average irradiance and maximal angle of divergence of beam are calculated. Our results of calculation of the simulator with multi-modular optical system are presented.