

УДК 621.384.3

Л. А. МИХЕЕНКО, М. С. МАМУТА

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

СИСТЕМА ОПТИЧЕСКИ-СОПРЯЖЕННЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ СФЕР И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ ЧАСТЬ 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В статье разработана математическая модель для расчета выходной яркости фотометрических приборов с оптически-сопряженными интегрирующими сферами. Аналитически описан обмен потоков излучения между первичными и вторичными сферами. Установлена и проанализирована зависимость выходной яркости от конструктивных параметров фотометрических приборов.

Ключевые слова: фотометрические приборы, интегрирующие сферы.

L. A. MIKHEENKO, M. S. MAMUTA

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

SYSTEM OF OPTICALLY CONNECTED INTEGRATION SPHERES AND PHOTOMETRIC DEVICES ON ITS BASIS PART 1. MATHEMATICAL MODEL

Mathematical model for output radiance calculation of photometric devices with optically connected integration spheres is developed in the article. Radiation fluxes exchange between primary and secondary spheres is analytically described. Dependence of output radiance from photometric devices constructive parameters is found and analyzed.

Keywords: photometric devices, integration spheres.

Введение

В настоящее время в прецизионной фотометрии все большее распространение получают системы с оптически-сопряженными интегрирующими сферами (СОСИС) – диффузные излучатели [1, 2], оптические ослабители [3, 4], устройства для уменьшения влияния зонной чувствительности приемников излучения [5], фотометры [6], многоходовые кюветы [7, 8], и др. (рис. 1-2). Расчет, анализ и проектирование таких систем производится, как правило, по классическим методикам [9-11], не учитывающих их специфических особенностей, в частности обмена энергии между оптически-сопряженными интегрирующими сферами (ИС), наличия в них большого количества отверстий значительной площади, диафрагм переменного сечения и ряда других. Это приводит как к заметным погрешностям, так и к трудностям выбора наиболее рациональных значений параметров элементов СОСИС.

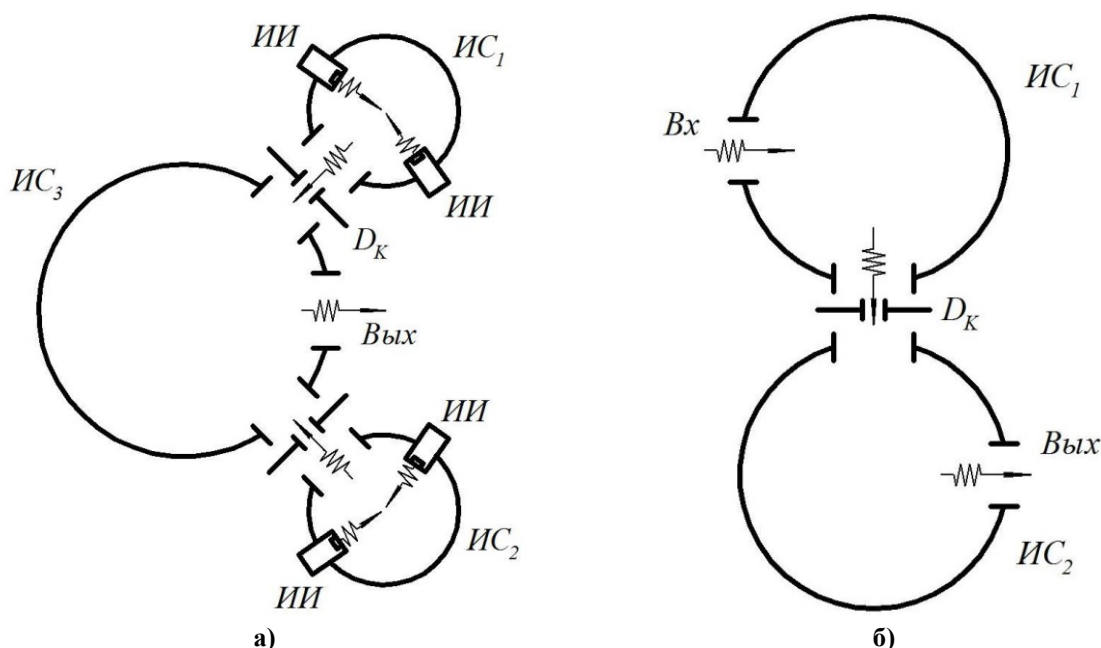


Рис. 1. Фотометрические системы на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер:
а – диффузный излучатель переменной яркости; б – широкодиапазонный ослабитель

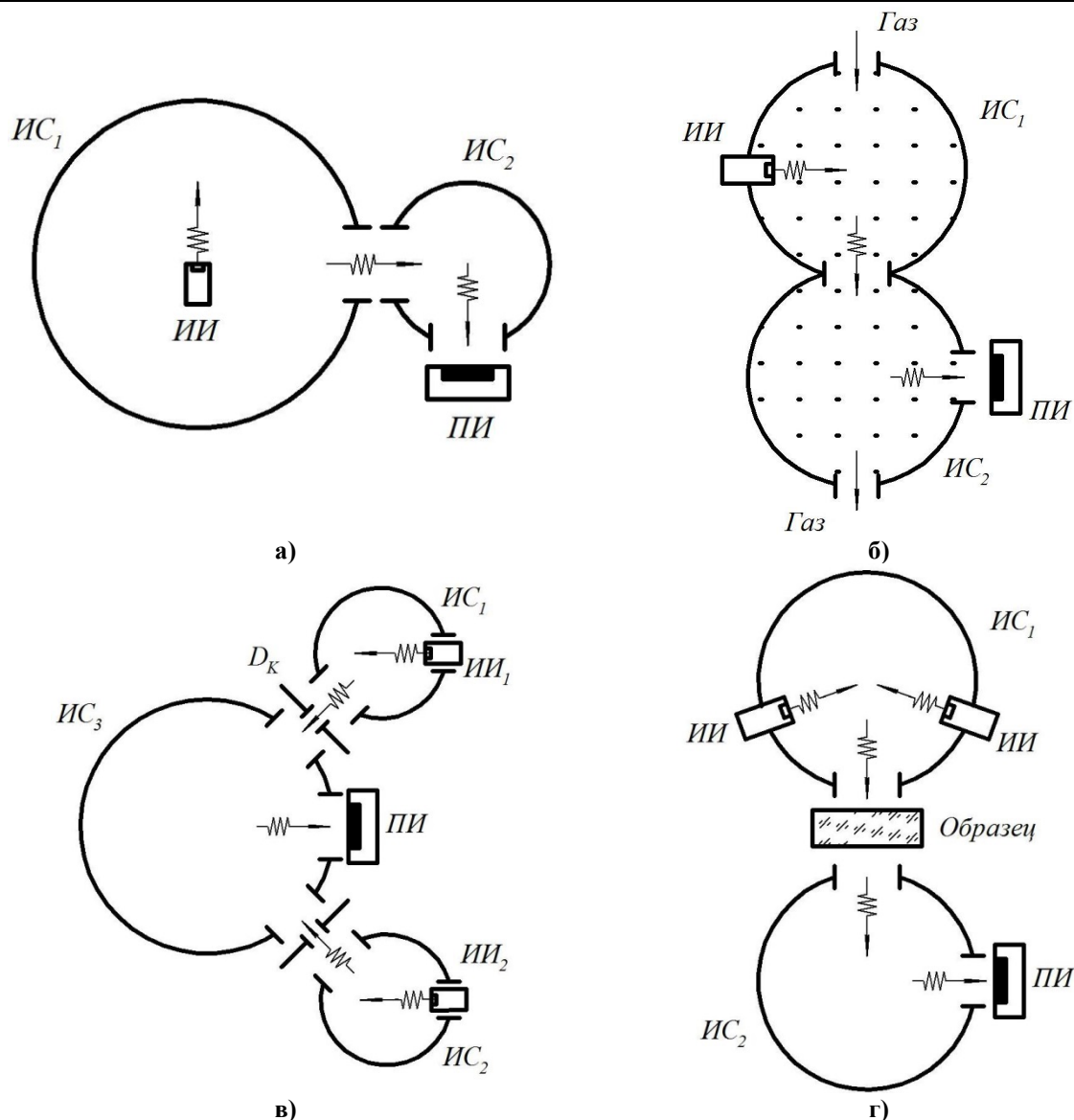


Рис. 2. Фотометрические системы на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер:
 а – устройство для уменьшения неравномерности зонной чувствительности приемника излучения;
 б – многоходовая кювета; в – компаратор источников излучения; г – фотометр для измерения коэффициента пропускания сред с объемным рассеянием

На схемах: ИС – интегрирующая сфера; D_K – калибровочная диафрагма; Вых – выходная апертура; Вх – входная апертура; ИИ – источник излучения; ПИ – приемник излучения.

Целью настоящей работы является разработка нового подхода к теоретическому описанию и анализу СОСИС, учитывающего их специфические особенности.

Работа состоит из двух частей. В первой части рассматривается математическая модель СОСИС, а во второй дается ее энергетический и метрологический анализ применительно к одному из наиболее сложных устройств данного класса – диффузному излучателю переменной яркости.

Математическая модель СОСИС

Обобщенная расчетная схема СОСИС показана на рис. 3.

Излучение от внутренних или внешних источников попадает в одну из ИС, рассеивается в ней и через калибровочную диафрагму поступает в другую ИС, где снова рассеивается и формирует в выходной апертуре яркостное поле L_B . Изменяя величину калибровочной диафрагмы можно регулировать величину этого поля при постоянном спектральном составе излучения и однородности освещения выходной апертуры.

В рассматриваемой модели одна из ИС считается первичной, а вторая, сопряженная с ней, вторичной.

Освещенность внутренней поверхности первичной интегрирующей сферы E_1 определяется выражением [9]:

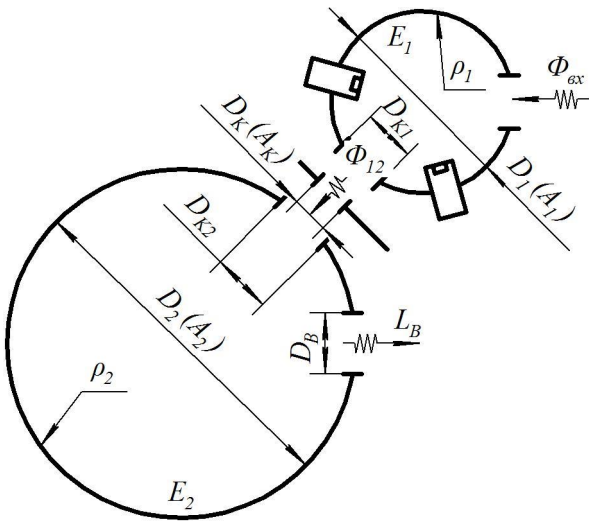


Рис. 3. Обобщенная расчетная схема СОСИС

внешнего потока, поступающего в СОСИС – $\Phi_{ex} = N_{uu} \Phi_{uu}$.

A_{K1} рассчитывается как площадь сферического сегмента:

$$A_{K1} = 2\pi \frac{D_1}{2} \left(\frac{D_1 - \sqrt{D_1^2 - D_{K1}^2}}{2} \right) = \frac{\pi}{2} D_1^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_{K1}}{D_1} \right)^2} \right), \quad (2)$$

где D_{K1} – диаметр калибровочной диафрагмы.

Поток излучения, поступающий из первичной сферы во вторичную Φ_{12} определяется из выражения: $\Phi_{12} = E_1 \cdot A_{K1}$.

Поток излучения, поступающий во вторичную сферу от нескольких первичных сфер, пропорционален суммарной площади всех калибровочных диафрагм и находится аналогично.

Тогда освещенность внутренней поверхности вторичной интегрирующей сферы E_2 будет равна:

$$E_2 = \frac{N_1 \Phi_{12}}{A_2} \frac{\rho_2}{\left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K N_1 - A_B}{A_2} \right)} = \frac{N_1 N_{uu} \Phi_{uu} A_K}{A_1 A_2} \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_{K1}}{A_1} \right) \left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K N_1 - A_B}{A_2} \right)} =$$

$$= \frac{N_1 N_{uu} \Phi_{uu} A_K}{(\pi D_1 D_2)^2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{\pi D_1^2 - A_{K1}}{\pi D_1^2} \right) \left(1 - \rho_2 \frac{\pi D_2^2 - A_K N_1 \frac{\pi}{2} D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_B}{D_2} \right)^2} \right)}{\pi D_2^2} \right)}, \quad (3)$$

где N_1 – количество первичных интегрирующих сфер; A_2 , D_2 – площадь и диаметр вторичной интегрирующей сферы соответственно; ρ_2 – интегральный коэффициент отражения вторичной сферы; $N_1 \cdot A_K$ – суммарная площадь калибровочных диафрагм; A_B , D_B – площадь и диаметр выходной апертуры вторичной сферы соответственно.

Площадь выходной апертуры рассчитывается как площадь сферического сегмента:

$$A_B = 2\pi \frac{D_2}{2} \left(\frac{D_2 - \sqrt{D_2^2 - D_B^2}}{2} \right) = \frac{\pi}{2} D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_B}{D_2} \right)^2} \right).$$

Тогда яркость выходной апертуры, считая вторичную интегрирующую сферу ламбертовским излучателем, определяется выражением:

$$E_1 = \frac{N_{uu} \Phi_{uu}}{\pi D_1^2} \cdot \frac{\rho_1}{1 - \rho_1 \frac{\pi D_1^2 - A_{K1}}{\pi D_1^2}}, \quad (1)$$

где N_{uu} – количество источников излучения в первичной сфере; Φ_{uu} – поток излучения от одного источника излучения; D_1 – диаметр первичной сферы; ρ_1 – интегральный коэффициент отражения поверхности первичной сферы; A_{K1} – площадь выходной апертуры (калибровочной диафрагмы) первичной сферы.

Если в первичной ИС нет источников излучения $N_{uu} \cdot \Phi_{uu}$ выражает величину

$$L_B = \frac{E_2}{\pi} = \frac{N_1 N_{uu} \Phi_{uu} A_K}{\pi A_1 A_2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_{K1}}{A_1}\right) \left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K N_1 - A_B}{A_2}\right)} =$$

$$= \frac{N_1 N_{uu} \Phi_{uu} A_K}{\pi (\pi D_1 D_2)^2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{\pi D_1^2 - A_{K1}}{\pi D_1^2}\right) \left[1 - \rho_2 \frac{\pi D_2^2 - A_K N_1 \frac{\pi}{2} D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_B}{D_2}\right)^2}\right)}{\pi D_2^2}\right]} \quad (4)$$

Спектр излучения СОСИС определяется аналогичным выражением, но с учетом спектральных характеристик источников излучения и покрытий первичной и вторичной сфер – $\Phi_{uu}(\lambda)$, $\rho_1(\lambda)$ и $\rho_2(\lambda)$ соответственно.

Энергетический баланс в СОСИС

Одновременно с излучением потока из первичной сферы во вторичную, происходит обратный процесс – излучение потока из вторичной сферы в первичную. То есть система первичных сфер и вторичная сфера находятся в состоянии постоянного обмена энергией через калибровочные диафрагмы, что, естественно, существенно влияет на формирование суммарного яркостного поля на выходе СОСИС. Рассмотрим этот процесс подробнее, воспользовавшись моделью излучателя, представленной на рис. 4. Для простоты будем считать, что СОСИС состоит из двух сфер – первичной, площадь которой A_1 эквивалентна площадям всех первичных сфер излучателя, и вторичной, с площадью A_2 , сопряженной с первичной через калибровочную диафрагму, площадь которой A_K равна площади всех калибровочных диафрагм. Площадь выходной апертуры СОСИС равна A_B .

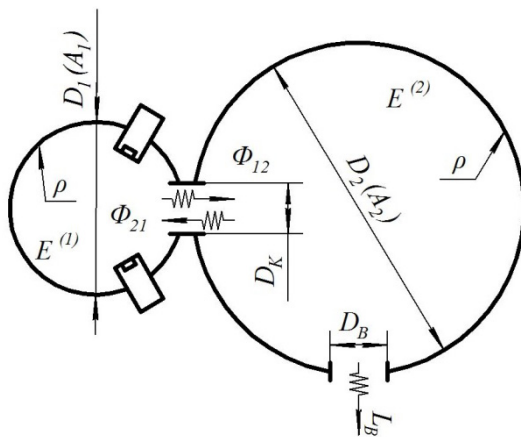


Рис. 4. Модель СОСИС для расчета энергетического баланса

При выводе формул, описывающие энергетический баланс излучателя, будем использовать индекс (1) в обозначениях, относящихся к первичной, и индекс (2) – к вторичной сфере. Сочетание индексов (12) и (21) будут обозначать направление потока излучения из первичной сферы во вторичную и, соответственно, наоборот.

Если Φ – поток, излучаемый источниками излучения в первичной сфере, то ее нулевая освещенность E_0^1 при условии равномерного распределения излучения по поверхности сферы равна:

$$E_0^1 = \frac{\Phi}{A_1} \quad (5)$$

Первая суммарная освещенность первичной сферы E_1^1 , с учетом площади калибровочной диафрагмы A_K находится из выражения [9]:

$$E_1^1 = E_0^1 \frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}}, \quad (6)$$

где ρ – коэффициент отражения внутренней поверхности сфер.

Первичный поток, поступающий из первичной сферы во вторичную $\Phi_1^{(12)}$ через калибровочную диафрагму равен:

$$\Phi_1^{(12)} = E_1^{(1)} A_K = E_0^{(1)} A_K \frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}}. \quad (7)$$

Первая освещенность вторичной сферы, образованная потоком $\Phi_1^{(12)}$ определится из выражения:

$$E_1^{(2)} = \frac{\Phi_1^{(12)}}{A_2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}} = E_0^{(1)} \cdot \frac{A_K}{A_2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}}. \quad (8)$$

Освещенность вторичной сферы формирует поток излучения $\Phi_1^{(21)}$, поступающий из вторичной сферы в первичную:

$$\Phi_1^{(21)} = E_1^{(2)} \cdot A_K = E_0^{(1)} \frac{A_K^2}{A_2} \frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}}. \quad (9)$$

Вторая (дополнительная) освещенность первичной сферы, образованная потоком $\Phi_1^{(21)}$ равна:

$$E_2^{(1)} = \frac{\Phi_1^{(21)}}{A_1} \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} = E_0^{(1)} \frac{A_K^2}{A_1 \cdot A_2} \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}}. \quad (10)$$

Вторичный поток $\Phi_2^{(12)}$, возвращаемый из первичной сферы во вторичную:

$$\Phi_2^{(12)} = E_2^{(1)} \cdot A_K = E_0^{(1)} \frac{A_K^3}{A_1 \cdot A_2} \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \right)^2 \frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}}. \quad (11)$$

Вторая (дополнительная) освещенность вторичной сферы равна:

$$E_2^{(2)} = \frac{\Phi_2^{(12)}}{A_2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}} = E_0^{(1)} \frac{A_K^3}{A_1 \cdot A_2^2} \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \right)^2 \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}} \right)^2. \quad (12)$$

Аналогично, получим:

$$\Phi_2^{(21)} = E_2^{(2)} A_K = E_0^{(1)} \frac{A_K^4}{A_1 \cdot A_2^2} \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \right)^2 \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}} \right)^2, \quad (13)$$

$$E_3^{(1)} = \frac{\Phi_2^{(21)}}{A_1} \frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} = E_0^{(1)} \frac{A_K^4}{A_1^2 \cdot A_2^2} \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \right)^3 \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}} \right)^2, \quad (14)$$

$$\Phi_3^{(12)} = E_3^{(1)} A_K = E_0^{(1)} \frac{A_K^5}{A_1^2 \cdot A_2^2} \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \right)^3 \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}} \right)^2, \quad (15)$$

$$E_3^{(2)} = \frac{\Phi_3^{(12)}}{A_2} \frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2} = E_0^{(1)} \frac{A_K^5}{A_1^2 A_2^3} \left(\frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \right) \left(\frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2} \right)^3, \quad (16)$$

и так до бесконечности.

Полная освещенность вторичной сферы $E_\Sigma^{(2)}$ определится суммой всех освещенностей:

$$\begin{aligned} E_\Sigma^{(2)} &= E_1^{(2)} + E_2^{(2)} + E_3^{(2)} + \dots = \\ &= E_0^{(1)} \frac{A_K}{A_2} \frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2} + E_0^{(1)} \frac{A_K^3}{A_1 A_2^2} \left(\frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \right)^2 \times \\ &\times \left(\frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2} \right)^2 + E_0^{(1)} \frac{A_K^5}{A_1^2 A_2^3} \left(\frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \right)^3 \left(\frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2} \right)^3 + \dots \end{aligned} \quad (17)$$

Вынося множитель $E_0^{(1)} \cdot \frac{A_K}{A_2} \cdot \frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \cdot \frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}$ получаем геометрическую

прогрессию:

$$\begin{aligned} E_\Sigma^{(2)} &= E_0^{(1)} \cdot \frac{A_K}{A_2} \cdot \frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \cdot \frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2} \cdot \left(1 + \frac{A_K^2}{A_1 A_2} \cdot \frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \times \right. \\ &\times \frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2} + \frac{A_K^4}{(A_1 A_2)^2} \cdot \left(\frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2} \right)^2 + \dots \end{aligned} \quad (18)$$

со знаменателем: $\frac{A_K^2}{A_1 A_2} \cdot \frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \cdot \frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}$.

И окончательно, с учетом (8) – (18), получим:

$$E_\Sigma^{(2)} = \frac{\Phi \cdot A_K}{A_1 A_2} \frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2} \frac{1}{1 - \left(\frac{A_K^2}{A_1 A_2} \cdot \frac{1}{1-\rho} \frac{A_1 - A_K}{A_1} \cdot \frac{1}{1-\rho} \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2} \right)}. \quad (19)$$

Величина дополнительной облученности составит:

$$E_{D\Sigma}^{(2)} = E_\Sigma^{(2)} - E_1^{(2)} = E_2^{(2)} + E_3^{(2)} + \dots \quad (20)$$

Произведя суммирование с использованием (8) – (20) и находя сумму геометрической прогрессии по описанной выше процедуре, получим:

$$E_{D\Sigma}^{(2)} = \frac{\Phi_{uv} A_K^3}{A_1^2 \cdot A_2^2} \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \right)^2 \left(\frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}} \right)^2 \times$$

$$\times \frac{1}{1 - \left(\frac{A_K^2}{A_1 A_2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}} \right)}$$
(21)

Чтобы определить вклад дополнительной освещенности в величину выходной яркости СОСИС, разделим (14) на (12). В результате получаем:

$$\frac{E_{D\Sigma}^{(2)}}{E_{\Sigma}^{(2)}} = \frac{A_K^2}{A_1 \cdot A_2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_1 - A_K}{A_1}} \cdot \frac{1}{1 - \rho \frac{A_2 - A_K - A_B}{A_2}}$$
(22)

Очевидно, что величина дополнительной освещенности прежде всего зависит от размеров калибровочной диафрагмы и коэффициента отражения покрытий интегрирующих сфер. Графики, учитывающие эти факторы, представлены на рис. 5.

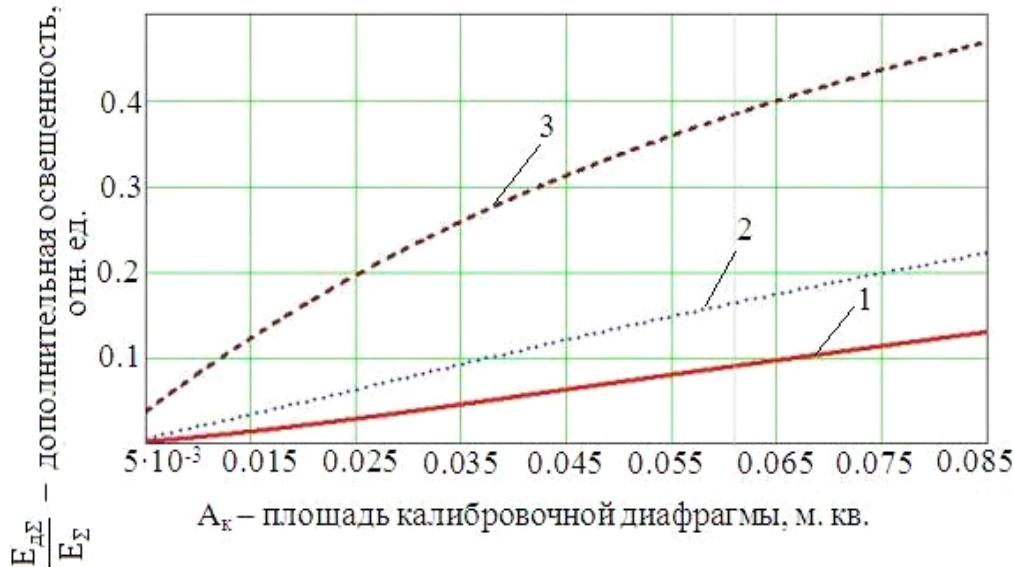


Рис. 5. Графики зависимости величины дополнительной освещенности от размеров калибровочной диафрагмы (для $\rho = 0,9, 0,95, 0,99$): 1 – зависимость $E_{D\Sigma} / E_{\Sigma} (A_K)$ для $\rho = 0,9$; 2 – зависимость $E_{D\Sigma} / E_{\Sigma} (A_K)$ для $\rho = 0,95$; 3 – зависимость $E_{D\Sigma} / E_{\Sigma} (A_K)$ для $\rho = 0,99$

Численная оценка величины дополнительной освещенности, выполненная применительно к прецизионной оптико-электронной системе диффузного излучателя переменной яркости показала, что в наиболее благоприятном случае ($A_K = A_{Kmax}$, $\rho = 0,99$) отношение $\frac{E_{D\Sigma}^{(2)}}{E_{\Sigma}^{(2)}}$ находится в пределах

0,12...0,15, но быстро уменьшается с уменьшением A_K и ρ .

Таким образом, для точного определения выходной яркости СОСИС в режиме максимального раскрытия калибровочных диафрагм предпочтительней использовать выражение (21), а для рабочих оценок, при средних значениях выходной яркости, вполне допустимо пользоваться (17).

Аналогично определяются энергетические параметры других типов СОСИС, но с учетом их специфических особенностей.

Выводы

В работе предложена математическая модель фотометрических приборов на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер, учитывающая их специфические особенности.

Разработанная модель основывается на энергетических и метрологических параметрах СОСИС в зависимости от их конструктивных параметров.

Получены аналитические выражения для расчета выходной яркости СОСИС, которые позволяют учитывать дополнительную облученность вторичной сферы, обусловленную обменом потоков излучения между первичной и вторичной сферами.

Результаты анализа зависимостей показывают, что дополнительная освещенность и соответственно выходная яркость СОСИС зависят в первую очередь от размеров калибровочной диафрагмы и коэффициента отражения покрытий интегрирующих сфер.

Работа может быть полезна специалистам в области оптической радиометрии и фотометрии.

Литература

1. Патент № 58152 Україна, МПК G01J 1/10, G02B 21/06. Випромінювач змінної яскравості на основі сполучених інтегруючих сфер / Міхеєнко Л. А., Гордієнко Ю. О.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – № u201007694; заявл. 18.06.2010; опубл. 11.04.2011, Бюл. №7.
2. Mikheenko L. A. Precise uniform light source based on optically connected integration spheres for optical instrument calibration / L. A. Mikheenko, V. N. Borovytsky // Proceedings of SPIE. – 2011. – Vol. 8154. – pp. 19.1 – 19.9.
3. Патент № 52547 Україна, МПК G01J 1/02. Фотометричний ослаблювач / Міхеєнко Л. А., Білінська І. Ю.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – №u201003426; заявл. 24.03.2010; опубл. 25.08.2010, Бюл. №16.
4. Міхеєнко Л. А. Широкодипазонний ослабител ь оптического излучения / Л. А. Міхеєнко, В. А. Шишкин // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. – 2008. – Вип. 35. – С. 49 – 53.
5. A Guide to Integrating Sphere Theory and Application [Электронный ресурс] /Labsphere. – Режим доступа: <http://labsphere.com>.
6. Павлюков А. К. Фотометры с интегрирующими сферами для исследования материалов / А. К. Павлюков, А. Р. Хамидуялина, Г. К. Холопов, И. Г. Чесова // Оптико-механическая промышленность. – 1988. – №2. – С. 28-30.
7. Патент № 50583 Україна, МПК G01N2 1/61. Газоаналізатор / Міхеєнко Л. А., Вівчарик Є. В.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – № u2002021281; заявл. 15.02.2002; опубл. 15.10.2002, Бюл. №10.
8. Міхеєнко Л. А. Малогабаритна сферична кювета для експрес-аналізу газових сумішей / Л. А. Міхеєнко, С. О. Корніяк // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. – 2003. – №25. – С. 84 – 88.
9. Гуревич М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы). – Л. Энергоиздат. – 1983. – 272 с.
10. Сахновский М. Ю. Об особенностях измерения потока излучения светодиодов с помощью фотометрического шара / М. Ю. Сахновский, С. Г. Гуминецкий, В. Е. Кравцов, В. И. Кузнецов, Л. С. Ловинский, Я. П. Марчук // Оптика и спектроскопия. – 1979. – Т.46. – Вып.3. – С. 515 – 523.
11. Рвачёв В. П. К теории и применению интегрального фотометра для исследования объектов с производными индикатрисами рассеяния / В. П. Рвачёв, М. Ю. Сахновский // Оптика и спектроскопия. – 1965. – Т. 18. – Вып.3. – С. 486 – 494.

References

1. Patent № 58152 Ukrayina, MPK G01J 1/10, G02B 21/06. Vyprominiuvach zminnoi yaskravosti na osnovi spoluchenykh integriuyuchykh sfer / Mikheenko L. A., Gordiienko Yu. O.; zaiavnyk ta patentovlasnyk NTUU «KPI». – № u201007694; zaiavl. 18.06.2010; opubl. 11.04.2011, Biul. №7.
2. Mikheenko L. A. Precise uniform light source based on optically connected integration spheres for optical instrument calibration / L. A. Mikheenko, V. N. Borovytsky // Proceedings of SPIE. – 2011. – Vol. 8154. – pp. 19.1 – 19.9.
3. Patent № 52547 Ukrayina, MPK G01J 1/02. Fotometrychnyi oslabliuvach / Mikheenko L. A., Bilinska I. Yu.; zaiavnyk ta patentovlasnyk NTUU «KPI». – № u201003426; zaiavl. 24.03.2010; opubl. 25.08.2010, Biul. №16.
4. Mikheenko L. A. Shyrokodiapasonnyi oslabitel opticheskoho izlucheniia / L. A. Mikheenko, V. A. Shyshkin // Visnyk NTUU «KPI», seriia Pryladobuduvannia. – 2008. – Vup. 35. – S. 49 – 53.
5. A Guide to Integrating Sphere Theory and Application [Elektronnyi resurs] / Labsphere. – Rezhym dostupa: <http://labsphere.com>.
6. Pavliukov A. K. Fotometry s integriruiushchimi sferami dlia issledovaniia materialov / A. K. Pavliukov, A. R. Khamiduialina, H. K. Kholopov, I. H. Chesova // Optiko-mekhanicheskaia promyshlennost. – 1988. – №2. – S. 28-30.
7. Patent № 50583 Ukrayina, MPK G01N2 1/61. Hazoanalizator / Mikheenko L. A., Vivcharyk Ye. V.; zaiavnyk ta patentovlasnyk NTUU «KPI». – № u2002021281; zaiavl. 15.02.2002; opubl. 15.10.2002, Biul. №10.
8. Mikheenko L. A. Malohabarytna sferychna kiuвета dlia ekspres-analizu hazovykh sumishei / L. A. Mikheenko, S. O. Korniiaka // Visnyk NTUU «KPI», seriia Pryladobuduvannia. – 2003. – №25. – S. 84 – 88.
9. Gurevich M. M. Fotometriya (teoriya, metody i pribory). – L. Energoizdat. – 1983. – 272 s.
10. Sakhnovskiy M. Yu. Ob osobennostyakh izmereniya potoka izlucheniya svetodiodov s pomoshchyu fotometrycheskogo shara / M. Yu. Sakhnovskiy, S. G. Guminetskiy, V. E. Kravtsov, V. I. Kuznetsov, L. S. Lovinskiy, Ya. P. Marchuk // Optika i spektroskopiya. – 1979. – T.46. – Vyp.3. – S. 515 – 523.
11. Rvachev V. P. K teorii i primeneniyu integralnogo fotometra dlya issledovaniya obektov s proizvodnymi indikatrissami rasseyaniya / V. P. Rvachev, M. Yu. Sakhnovskiy // Optika i spektroskopiya. – 1965. – T. 18. – Vyp.3. – S. 486 – 494.

Рецензія/Peer review : 19.5.2015 р.

Надрукована/Printed : 21.6.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією