

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ НА ФОТОМЕТРИЧЕСКУЮ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ

А.С. Шерстобитова

Проведен анализ фотометрических погрешностей измерения коэффициентов отражения для различных конструкций интегрирующей сферы. Выполнен расчет освещенности внутри этих сфер, а также на поверхности образца. Рассмотрены факторы, влияющие на погрешность измерения. Установлено, что освещенность на образце остается практически равномерной для всех рассмотренных конструкций сферы. Основная фотометрическая погрешность связана с различием коэффициентов отражения образцов. Использование экрана не создает дополнительной фотометрической погрешности.

Ключевые слова: фотометрическая погрешность, интегрирующая сфера, освещенность, коэффициент отражения, экран.

Введение

Фотометрическая интегрирующая сфера широко используется для измерений оптических характеристик объектов с диффузным отражением и пропусканием света. В большинстве приборов излучатель и фотоприемник располагаются за пределами полости интегрирующей сферы. Анализ фотометрических погрешностей в подобной конструкции сферы проводился ранее, например в [1]. Для повышения эффективности светоотдачи излучателя целесообразно располагать его внутри фотометрической сферы, а сбор отраженного излучения проводить с помощью оптического волокна. При этом необходимо исключить прямое попадание света от излучателя на образец. Это можно обеспечить установкой непрозрачного экрана. Цель настоящей работы состояла в анализе фотометрических погрешностей измерения коэффициентов отражения света для различных конфигураций интегрирующей сферы.

Расчет освещенности

В анализе рассматривались три специально разработанные конструкции фотометрической сферы, показанные на рис. 1. Первая – традиционного типа с внешним осветителем и фотоприемником – не имела экрана (рис. 1, а). Вторая сфера имела осевую симметрию: экран и излучатель располагались вблизи центра сферы (рис. 1, б). В третьей конфигурации осветитель и экран располагались в плоскости большого круга сферы, волоконный жгут – в центре сферы (рис. 1, в).

Сферы имели сходные оптогеометрические характеристики: диаметр полости 70 мм; диаметр входного люка 15 мм; коэффициент отражения поверхности сферы 0,97; коэффициент отражения образца 0,7; диаметр входного люка первой сферы 15 мм; диаметр экрана второй сферы 23 мм; размеры третьей сферы 7,5 × 12,5 мм; для второй и третьей сфер диаметр волоконно-оптического коллектора 1 мм, коэффициент отражения экранов 0,97.

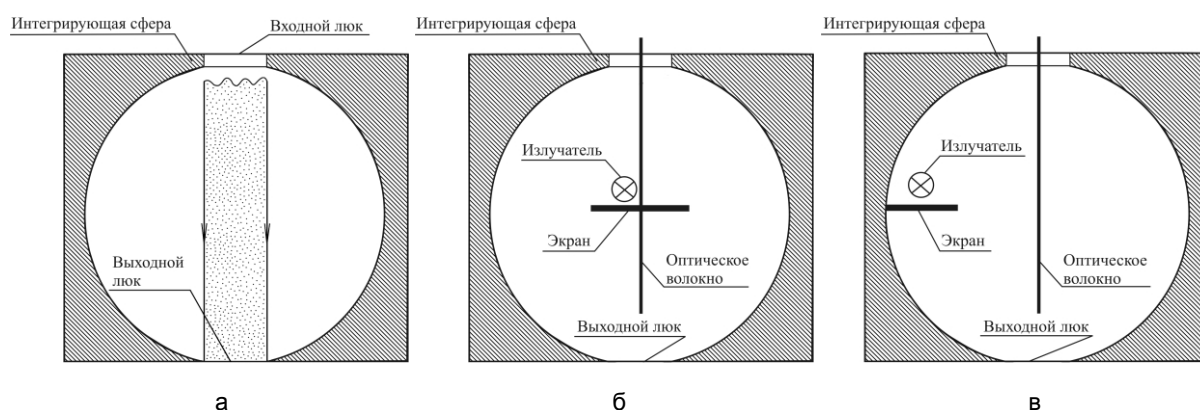


Рис. 1. Конструкции фотометрической интегрирующей сферы: с внешним излучателем (а); с экраном и излучателем вблизи центра (б); с экраном и излучателем в плоскости большого круга (в)

Для анализа фотометрических погрешностей было исследовано распределение освещенности в полости сфер. Предполагалось, что отражение подчиняется закону Ламберта. Освещенность внутри сферы рассчитывалась матричным методом [1–3]. В соответствии с этим методом на внутренней поверхности сферы, а также на поверхностях экрана и образца выделялись кольцевые зоны, которые имели одинаковую освещенность и коэффициент отражения. Обмен излучением между элементами двух зон в точках с координатами Ω_i и Ω_j определялся конфигурационными факторами:

$$G(\Omega_i, \Omega_j) = \frac{\cos(\xi_i) \cdot \cos(\xi_j)}{\pi \cdot \chi^2},$$

где χ – расстояние между точками Ω_i и Ω_j ; ξ_i и ξ_j – углы между направлениями $\Omega_j, \Omega_i, \Omega_i, \Omega_j$ и нормалью к поверхности в точках Ω_i и Ω_j соответственно. Тогда освещенность i -ой зоны можно представить в виде уравнения [1]:

$$E_v(\Omega_i) = E_{v0}(\Omega_i) + \sum_j E_v(\Omega_j) \cdot \rho(\Omega_j) \cdot G(\Omega_i, \Omega_j) \cdot \lambda_j,$$

где E_{v0} – первичная освещенность от источника излучения; $E_v(\Omega_j)$ – освещенность j -зоны; $\rho(\Omega_j)$ – ее коэффициент отражения; λ_j – весовой множитель, определяемый методом интегрирования по поверхности зоны, i и j – индексы зон.

Задача представляется в виде матричного уравнения

$$E_v = (I - M)^{-1} E_{v0},$$

где I – единичная матрица; M – переходная матрица.

Влиянием волоконно-оптического жгута на распределение освещенности в сфере пренебрегалось. Начальная освещенность в сфере принималась за единицу и задавалась в предположении равномерности распределения светового потока на поверхности образца (первая конфигурация сферы) или на верхней поверхности экрана (вторая и третья конфигурации сферы). Поверхности, участвующие в обмене излучением, были разделены на поверхность образца и сферы (первая сфера), поверхность образца, верхнюю и нижнюю части сферы и экрана (вторая и третья сферы). Если обмена излучением между участками не происходило или какие-то зоны перекрывались экраном, то соответствующие конфигурационные факторы считались равными нулю.

Результаты расчетов и экспериментов

На рис. 2 показано вычисленное матричным методом распределение освещенности ($E_v - E_{v0}$) на поверхности сферы и на поверхности образца для трех конфигураций соответственно. Здесь по оси абсцисс приводятся номера колец. На рис. 2, а, видно, что освещенность на стенках сферы и на образце остается равномерной. По рис. 2, б, в, можно заметить, что наибольшую неравномерность освещенности имеет верхняя часть сферы в обеих конструкциях, поскольку на нее падает отраженный от верхней плоскости экрана световой поток. Освещенность же нижней части сферы и поверхности образца остается практически равномерной. Однако сравнение трех конструкций показывает, что с учетом вычета E_{v0} освещенность сферы и образца в конфигурации без экрана в целом ниже, чем освещенности для конфигураций с использованием экрана.

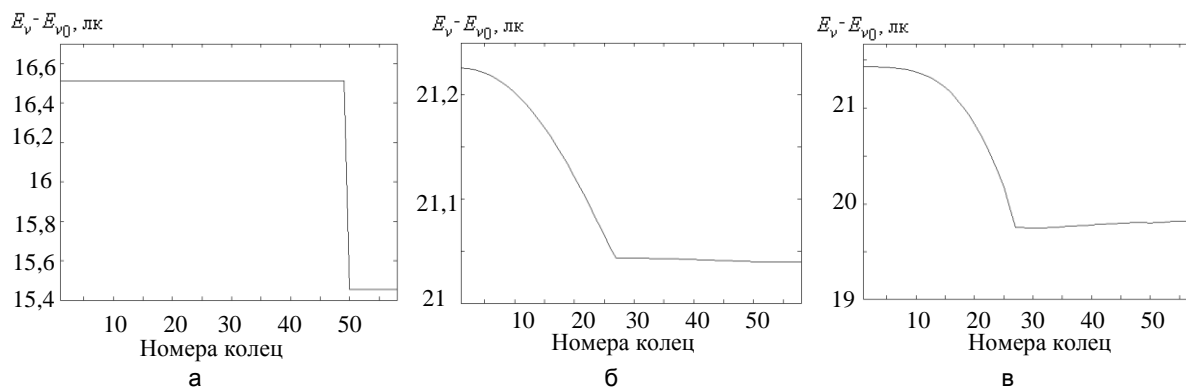


Рис. 2. Расчетные зависимости освещенности от номеров колец: первая сфера (а); вторая сфера (б); третья сфера (в)

При анализе учитывались такие факторы, влияющие на погрешность измерений, как изменение диаметра выходного люка или образца и изменение диаметра экрана. Кроме того, интегрирующая сфера имеет нелинейный отклик освещенности на присутствие образца [4]. Поэтому этот фактор также принимался во внимание.

Размеры экрана варьировались в пределах 10,1–25,5 мм (для третьей сферы ширина экрана оставалась 7,5 мм, изменялась только его длина), а выходного люка – в пределах 11–17 мм. На рис. 3 для каждого кольца показана относительная разность освещенностей второй и третьей интегрирующих сфер с различными размерами экранов при постоянстве других параметров, на рис. 4 показана относительная разность освещенностей трех сфер с различными диаметрами выходных люков, но одинаковыми другими параметрами. Поскольку разница в освещенностях для всех конфигураций интегрирующей сферы

мала, то ни изменение размеров экрана, ни изменение размеров выходного люка или образца не приводят к значительному изменению распределения освещенности.

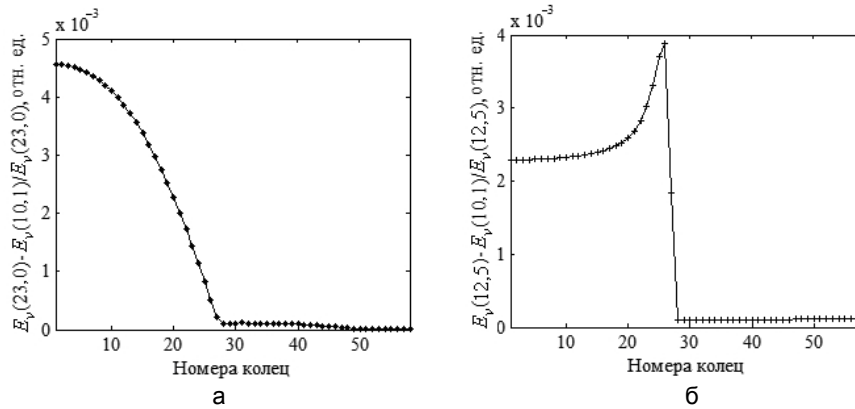


Рис. 3. Зависимости относительной разности освещенностей от номеров колец для различных размеров экранов (23,0 мм и 10,1 мм; 12,5 мм и 10,1 мм): вторая сфера (а); третья сфера (б)

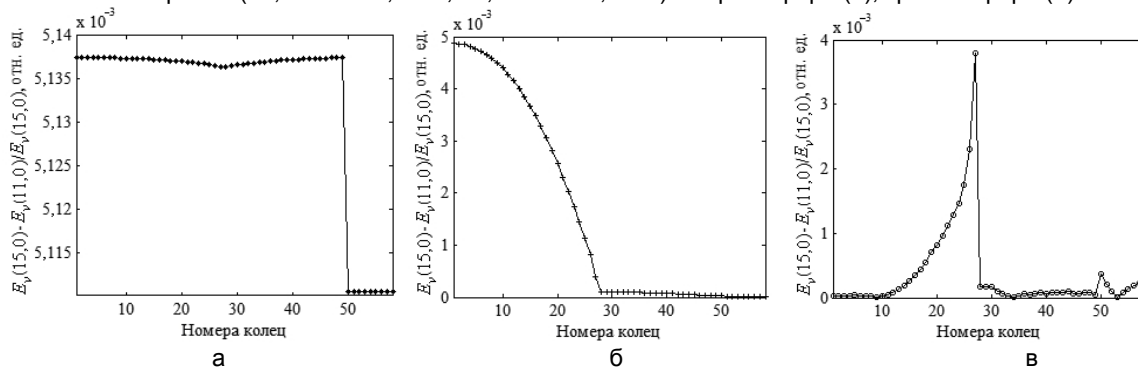


Рис. 4. Зависимости относительной разности освещенностей от номеров колец для различных размеров выходных люков (11,0 мм и 15,0 мм): первая сфера (а); вторая сфера (б); третья сфера (в)

Для проверки влияния на фотометрическую погрешность изменения коэффициентов отражения образцов был выполнен расчет для пяти образцов с коэффициентами отражения в пределах 0,1–1,0. Результаты расчетов показали, что уменьшение коэффициентов отражения образцов приводит к снижению освещенности для всех сфер.

Для экспериментальной проверки расчетных данных использовалось пять образцов с коэффициентами диффузного отражения $\rho = 0,4–0,85$ на длине волны 457 нм, а также эталон МС 22 с коэффициентом отражения $\rho = 0,952$. Измерения проводились в видимом диапазоне длин волн 380–760 нм на лабораторном спектрометре, аналогичном [5], с применением всех трех конструкций интегрирующей сферы. Экспериментальные данные в целом подтвердили результаты расчетов, сходимость результатов измерений находилась на уровне 0,01 для всех исследованных образцов.

На рис. 5 приведены фотометрические погрешности для трех конфигураций интегрирующей сферы в зависимости от коэффициента отражения образца.

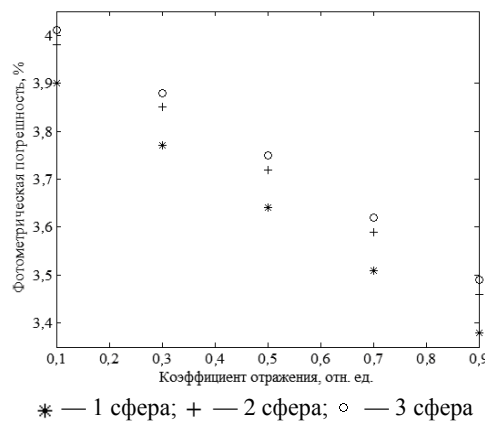


Рис. 5. Зависимости фотометрической погрешности трех конфигураций интегрирующей сферы от коэффициента отражения образца

Основная фотометрическая погрешность обусловлена уменьшением коэффициента отражения образца. Использование экрана во второй и третьей конфигурациях сферы (рис. 1, б, в) как в центре, так и в плоскости большого круга не вносит значительной неравномерности освещенности образца, приводящей к дополнительной фотометрической погрешности. Также неравномерность освещенности в верхней части сферы не влияет на погрешность измерений. Влияние изменения размеров экрана, выходного люка и оптоволоконного коллектора пренебрежимо мало по сравнению с основной фотометрической погрешностью.

Заключение

После проведения расчетов освещенности внутри различных конфигураций интегрирующей сферы и на образце, а также анализа фотометрических погрешностей измерения коэффициентов отражения установлено, что освещенность на образце остается практически равномерной для всех рассмотренных конструкций сферы, а основная фотометрическая погрешность связана с различием коэффициентов отражения образцов. Применение экрана не создает дополнительной фотометрической погрешности.

Литература

1. Tardy H.L. Matrix method for integrating-sphere calculations // Optical Society of America. – 1991. – V. 8. – № 9. – P. 1411–1418.
2. Clare J.F. Comparison of four analytic methods for the calculation of irradiance in integrating spheres // Optical Society of America. – 1998. – V. 15. – № 12. – P. 3086–3096.
3. Альтшулер Е.В., Путилин Э.С. Математическая и программная обработка данных спектрофотометрических измерений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 58. – С. 11–16.
4. Prahl S.A. Inverse adding-doubling for optical property measurements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.omlc.ogi.edu/software/iad>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 21.09.2010).
5. Белов Н.П., Яськов А.Д., Грисимов В.Н. Лабораторный спектрометр для исследования коэффициента отражения и определения параметров цветности диффузно отражающих объектов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 7. – С. 74–78.

Шерстобитова Александра Сергеевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, ashev87@mail.ru