

К. т. н. Л. А. МИХЕЕНКО, к. т. н. В. Н. БОРОВИЦКИЙ

Украина, г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»
E-mail: volodymyr_borovytsky@iss.org.ua

Дата поступления в редакцию
01.02.2008 г.

Оппонент В. Г. ЮРЬЕВ
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ВТОРИЧНЫЙ ЭТАЛОН ЯРКОСТИ НА БАЗЕ ГАЛОГЕННОЙ ЛАМПЫ С РАССЕИВАТЕЛЕМ

Представлены результаты исследования пространственных характеристик яркостного поля, формируемого галогенной лампой с рассеивателем.

В последнее время для калибровки прецизионных фотометрических приборов (ФП) по яркости наиболее часто используются ленточные светоизмерительные лампы с телом накала в виде вытянутой прямоугольной площадки [1, 2]. Наряду с очевидными преимуществами, такие излучатели имеют серьезные недостатки — неравномерность распределения яркости по телу накала и изменение этого распределения в процессе эксплуатации [2]. Это значительно затрудняет использование ленточных ламп для калибровки линеек и матриц, т. е. ФП с многоэлементными приемниками излучения (МПИ). Кроме этого, ленточные лампы не производятся в Украине, а парк находящихся в эксплуатации эталонных излучателей на их основе значительно уменьшился и устарел.

В связи с этим все более актуальной становится задача замены ленточных ламп другими излучателями с улучшенными метрологическими характеристиками и доступными украинским потребителям. В частности, как наиболее перспективные, рассматриваются галогенные лампы [3]. Серьезным недостатком таких излучателей является дискретная структура тела накала, образованного отдельными витками спирали, что, естественно, препятствует их использованию для калибровки ФП и МПИ. Выходом из этого положения может быть использование совместно с галогенными лампами рассеивателей из молочного стекла, высокие метрологические характеристики которых подтверждены многочисленными исследованиями [4, 5].

Целью настоящей работы является исследование пространственных характеристик яркостного поля, формируемого системой «спиральное тело накала галогенной лампы — молочный рассеиватель» и разработка рекомендаций по проектированию, аттестации и эксплуатации таких излучателей при калибровке ФП с МПИ.

Формирование яркостного поля рассеивателем из молочного стекла

При работе галогенной лампы совместно с рассеивателем из молочного стекла первичным излучате-

лем является тело накала лампы, а вторичным — наружная поверхность молочного стекла. Рассмотрим математическую модель такой системы, воспользовавшись схемой на рис. 1.

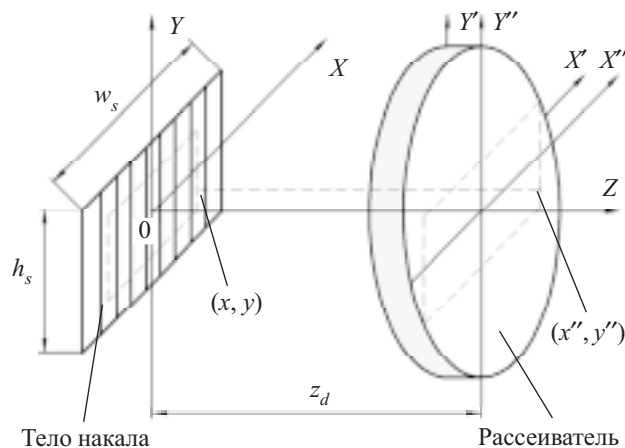


Рис. 1. Схема системы «спиральное тело накала галогенной лампы — молочный рассеиватель»

Распределение яркости по поверхности тела накала в системе координат XYZ описывается функцией $L_1(x, y)$:

$$L_1(x, y) = L_s \cdot f_s(x, y, w_s, h_s, \Delta x, \Delta y) \quad (1)$$

где L_s — максимальная величина яркости тела накала излучателя;
 x, y — координаты в плоскости тела накала;
 w_s, h_s — соответственно ширина и высота тела накала;
 $\Delta x, \Delta y$ — размеры рабочей зоны излучателя;
 $f_s(x, y, w_s, h_s, \Delta x, \Delta y)$ — двумерная нормированная функция, которая описывает распределение яркости по плоскости тела накала.

Распределение освещенности на внутренней (обращенной к источнику излучения) поверхности рассеивателя в системе координат $X'Y'Z'$ определяется выражением:

$$E_2(x', y') = E_2(x', y', L_1(x, y), z_s, \tau_s, \tau_z), \quad (2)$$

где $E_2(x', y')$ — распределение освещенности по внутренней плоскости рассеивателя как функция координат точки на поверхности рассеивателя (x', y') (рис. 1);
 z_s — расстояние между плоскостью тела накала и рассеивателем;

τ_s — коэффициент пропускания колбы лампы;
 τ_z — коэффициент пропускания среды между телом накала и рассеивателем.

Методика и формулы расчета освещенности, которая создается зоной прямоугольной формы, известны [6, 7]. Оптические передаточные свойства рассеивателя определяются его функцией рассеяния точки (ФРТ) $h_o(x'', y'')$ и коэффициентом пропускания τ_d . Тогда, считая рассеиватель вторичным ламбертовским излучателем [5, 8], распределение яркости на его внешней поверхности в системе координат (x'', y'', z'') можно описать следующим образом [8]:

$$L_2(x'', y'') = L_2(E_2(x', y') \cdot h_o(x'', y'') \cdot \tau_d) = \frac{\tau_d}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_2(x', y') \cdot h_o(x'' - x', y'' - y') \cdot dx' \cdot dy', \quad (3)$$

т. е. для определения $L_2(x'', y'')$ необходимо выполнить операцию свертки между функцией $E_2(x', y')$ и ФРТ рассеивателя $h_d(x'', y'')$.

Для вытянутых тел накала можно ограничиться рассмотрением одномерного случая — свертки распределения освещенности и функции рассеяния линии (ФРЛ) рассеивателя. Тогда формула (3) преобразуется к следующему виду:

$$L_2(x'', y'') = L_2(x'') = \frac{\tau_p}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_2(x') \cdot h_d(x'' - x') \cdot dx' \quad (4)$$

где τ_p — коэффициент пропускания рассеивателя.

Математическое описание тела накала излучателя

Для получения однородного яркостного поля, эквивалентного формируемому ленточным излучателем, необходимо использовать галогенные лампы с плотной навивкой спирали, образующие в плане прямоугольник. Кроме этого, с целью достижения максимальной стабильности, необходимо выбирать излучатели с большой продолжительностью горения и апертурой, обеспечивающей оптимальный температурный режим системы «тело накала — колба лампы». С этих позиций для дальнейших исследований были отобраны галогенные лампы типа КГМ и КГМН,

а также распространенные в Украине лампы фирмы Philips, характеристики которых представлены в табл. 1. Размеры рабочей зоны указаны для внешней поверхности рассеивателя из стекла МС-23 толщиной 4 мм, который установлен вплотную к колбе лампы. Неравномерность яркости в рабочей зоне не превышает 0,5%.

Тело накала таких ламп может быть представлено параллелепипедом, образованным нитью накала толщиной d_s (рис. 2). Как правило, $d_s \approx 0,5p_s$, где p_s — шаг навивки. Размеры параллелепипеда составляют соответственно $w_s \times h_s \times z_s$.

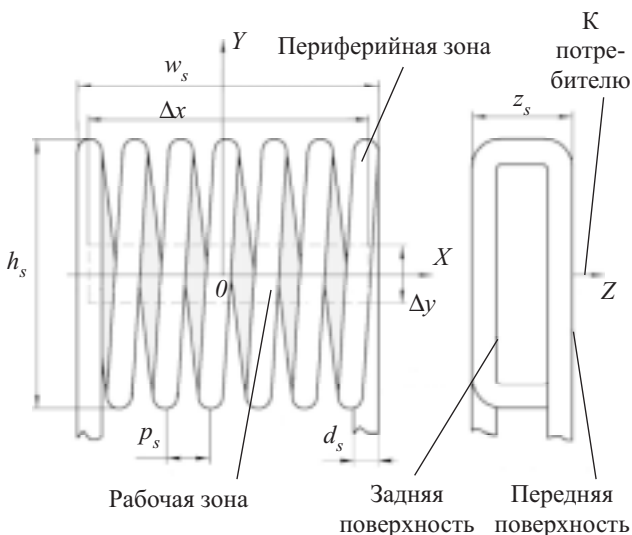


Рис. 2. Модель тела накала излучателя

Экспериментально было установлено, что вклад передней (по отношению к потребителю) и задней поверхностей тела накала в форму и величину яркостного поля, формируемого лампой, существенно различаются как качественно, так и количественно. Передняя поверхность обеспечивает 60—80% излучаемого потока и формирует дискретное яркостное поле с периодом, равным периоду навивки. Задняя поверхность создает фон, который накладывается на излучение передней поверхности. При этом наблюдается эффект «выравнивая» яркости, наиболее заметный в той области рабочей зоны излучающей повер-

Таблица 1

Параметры галогенных ламп

Тип лампы	Мощность, Вт	Напряжение питания, В	Световой поток, лм	Срок службы, ч	Габаритные размеры, мм	Размеры тела накала, мм	Размеры рабочей зоны, мм
КГМН12-20-2	20	12	315	2000	31×Ø10	1,0×2,8	5,2×14,8
КГМН12-50-2	50	12	950	2000	40×Ø12	1,2×3,2	6,0×16,8
КГМН15-150	150	15	4100	50	50×Ø12	3,0×2,0	16×10,4
КГМ12-40	40	12	720	130	45×Ø10,5	1,5×3,0	8,0×16
КГМ12-100-2	100	12	1800	350	47×Ø11	2,3×4,0	12×20
КГМ30-300-2	300	30	9000	55	55×Ø15	3,5×6	18,4×30
Philips Capsule PRO -50	50	12	950	100	44×Ø12	2,0×3,8	10×20
Philips Capsule PRO-100	100	12	2200	100	44×Ø12	2,0×3,8	10×20

Коэффициенты пропускания молочных стекол различных марок

Толщина по оси, мм	МС-12	МС-13	МС-19	МС-23
1	0,36	0,78	—	0,68
2	0,27	0,68	0,91	0,61
3	—	—	—	0,53
4	—	—	0,86	0,46
5	—	—	0,82	—
6	—	—	0,82	—
7	—	—	—	—
8	—	—	0,79	—

хности, где промежутки между нитями накала частично заполняются проекциями нитей задней поверхности. Очевидно, что эта зона является наиболее благоприятной при работе излучателя в качестве эталона яркости.

На рис. 3 показано распределение яркости в разных сечениях нити накала лампы Philips 7023 100W GY6.35 (размеры в мм: $w_s=3,8$, $h_s=2,0$, $z_s=0,9$, $d_s=0,18$, $p_s=0,38$), полученное экспериментально.

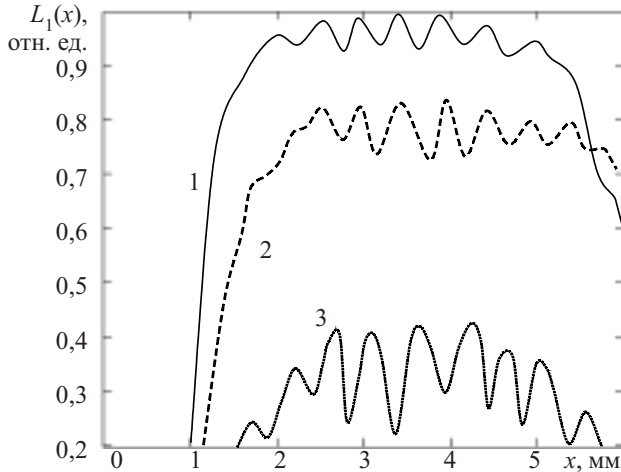


Рис. 3. Распределение яркости по сечению тела накала: 1 — центральная (рабочая) зона; 2 — область на границе рабочей зоны; 3 — периферийная зона

Измерение осуществлялось сканированием тела накала фотоэлектрическим микроскопом [11] с приведенным к поверхности излучателя полем зрения $\varnothing 5$ мкм и шагом сканирования 10 мкм.

Полученные результаты показывают, что с точностью, достаточной для инженерной практики, функцию $f_s(x, y, w_s, h_s, \Delta x, \Delta y)$, описывающую распределение яркости по сечению OX в центральной (рабочей) зоне, можно аппроксимировать модулем синусоиды с периодом, равным двойному периоду наводки плюс постоянная составляющая, учитывающая фоновое излучение. Математически эту функцию можно записать в следующем виде:

$$f_s(x, y, w_s, h_s, \Delta x, \Delta y) = \begin{cases} L_s \left(c_s \left| \cos \left(\frac{\pi}{p_s} x \right) + (1 - c_s) \right. \right), & |x| \leq \frac{w_s}{2}, |y| \leq \frac{h_s}{2}; \\ 0, & |x| > \frac{w_s}{2}, |y| > \frac{h_s}{2}, \end{cases} \quad (5)$$

где c_s — контраст яркости тела накала на фоне постоянной составляющей, $0 \leq c_s \leq 1$.

Математическое описание рассеивателя оптического излучения

В качестве рассеивателя эталонного излучателя могут использоваться молочные стекла марок МС-12, МС-13, МС-19, но наилучшими метрологическими характеристиками обладает стекло МС-23 [4, 12]. В табл. 2 приведены интегральные коэффициенты пропускания τ_d молочных стекол различной

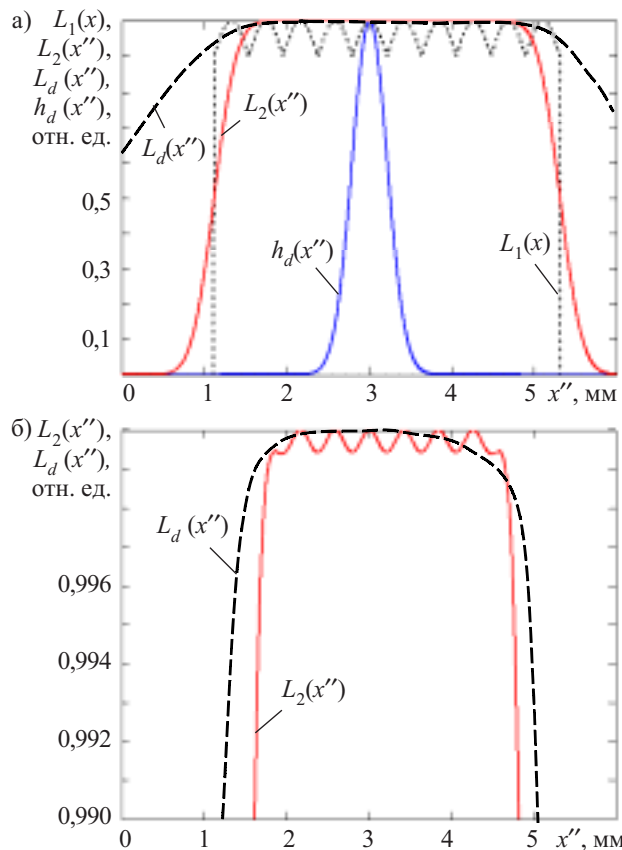


Рис. 4. Графики функции распределения яркостного поля вторичного излучателя и ФРЛ, нормированные по максимальному значению и рассчитанные при $c_s=0,1$, а также измеренное распределение яркости в плоскости рассеивателя $L_d(x'')$ в диапазонах от 0 до 1 (а) и от 0,99 до 1 (б)

толщины, а на рис. 4 — спектральные характеристики стекла МС-23, которые могут использоваться при расчетах [12].

Функции рассеяния линии молочных стекол в справочной литературе не приводятся и были ранее определены экспериментально [11]. Для инженерных расчетов вполне приемлемой является аппроксимация функцией Гаусса с нулевым средним значением [8, 11]:

$$h_d(x'') = \sqrt{\frac{-\ln(h_t)}{\pi}} \cdot \frac{\exp\left(\ln(h_t) \cdot \left(\frac{y''}{t_d}\right)^2\right)}{t_d} = \sqrt{\frac{-\ln(h_t)}{\pi}} \cdot \frac{1}{t_d} \cdot h_T^{(y''/t_d)^2}, \quad (6)$$

где t_d — полуширина линии рассеяния на уровне h_p , равном половине максимального значения ФРЛ (параметр измерен экспериментально и составляет 0,25 мм для молочного стекла МС-23 и 1,9 мм для матового стекла [11]).

Отметим, что увеличение толщины стекла увеличивает рассеяние, но снижает яркость, поэтому на практике следует выбирать компромиссное значение t_d .

В общем случае коэффициенты пропускания рассеивателя также зависят от координат точки (x'', y'') , однако, как показали экспериментальные исследования, для большинства современных молочных стекол этой неравномерностью можно пренебречь и считать коэффициент пропускания τ_d постоянной величиной, т. е. $\tau_d(x'', y'') = \tau_d = \text{const}$.

Математическое моделирование вторичного эталона яркости

Численный анализ полученных выражений был проведен для галогенных ламп Philips 7023 в комбинации с молочным стеклом марки МС-23, толщиной 3 мм, расположенным на расстоянии 7,5 мм от тела накала (т. е. практически вплотную к колбе). Результаты математического моделирования, полученные при помощи математического пакета MathCAD по формулам (1)–(6), и результат экспериментального измерения распределения яркости представлены на рис. 4. Анализ полученных результатов показывает, что предложенный математический аппарат позволяет рассчитать распределение яркости вторичного эталона, при этом расхождение с экспериментальными результатами не превышает 0,2%. Это дает основание рекомендовать предложенную методику для инженерных расчетов прецизионных протяженных излучателей, включая эталонные излучатели с различными источниками излучения и рассеивателями, с целью получения заданных параметров вторичного яркостного поля рассеивателя.

Метрологическая аттестация эталона яркости

Учитывая высокую однородность яркостного поля, формируемого рассеивателем в пределах весьма значительной зоны, для метрологической аттестации излучателя целесообразно использовать один из лучших отечественных яркомеров типа ТЕС 0693 фир-

мы “Тензор” [13]. При этом отпадает необходимость точного расположения излучателя относительно фотометрической головки яркомера, а введение поправки к расстоянию между излучателем и головкой не требует ни точной локализации рассеивателя, ни отсчетной плоскости приемника яркомера. Кроме этого, высокая линейность ТЕС 0693 дает возможность производить аттестацию с различными уровнями яркости, а постоянство градуировки яркомера в течение длительного времени (нескольких лет) делает требования к стабильности галогенных ламп менее жесткими [3].

Эксплуатация опытного экземпляра эталонного излучателя показала возможность использования его для калибровки практически всех типов МПИ, при этом погрешность переноса единицы яркости не превысила 7% во всем диапазоне в течение года, т. е. в пределах паспортного времени непрерывной работы галогенной лампы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- ГОСТ 8.195-89. Государственная поверочная схема для средств измерения спектральной плотности энергетической яркости в диапазоне длин волн 0,2–2,5 мкм.
- Воропай Е. С., Торпачев П. А. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения. — Минск: Университетское, 1988.
- Купко А. О., Назаренко Л. А. Метрологическое обеспечение световых измерений на Украине // Светотехника. — 2001. — № 5. — С. 38–40.
- Машковская Т. Я., Хазанов В. С., Шкляева М. А. и др. К метрологии белых пластинок // Светотехника. — 1987. — № 2. — С. 18–19.
- Войшвилло Н. А., Блинова Л. Д. Угловое распределение света, прошедшего через оптически толстые слои светорассеивающих стекол // Оптико-механическая промышленность. — 1978. — № 2. — С. 29–32.
- Мешков В. В. Осветительные установки. — М.: Энергия, 1972.
- Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н. Теория и расчет диффузного излучателя переменной яркости на законе обратных квадратов // Вимірjувальна та обчислювальна техніка в технологiчних процесах. — 2006. — № 1. — С. 73–80.
- Иванов Л. П. Оптика рассеивающих сред. — Минск: Наука и техника, 1969.
- Лампы накаливания галогенные. Электротехника СССР. Информэлектро, 1988.
- Каталог галогенных ламп компании Philips/ Guildford: Philips Lightning ИК, 2006.
- Михеенко Л. А., Коваленко А. В. Дослідження характеристик розсіювання молочного і матового скла // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. — 2007. — Вип. 33. — С. 36–41.
- Урысон Б. В., Черинов О. А., Шульженко Л. П. и др. Спектральные коэффициенты яркости молочных стекол // Светотехника. — 1988. — № 3. — С. 4–6.
- Столяревская Р. И. Методы исследования метрологических характеристик. Приборы для измерения световых величин // Светотехника. — 1988. — № 6. — С. 21–26.