

## АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 528.7, 629.78

Л. А. Міхєєнко<sup>1</sup>  
М. О. Пугіна<sup>1</sup>

### РОБОЧИЙ ЕТАЛОН ЯСКРАВОСТІ НА БАЗІ ІНТЕГРУВАЛЬНОЇ СФЕРИ З РОЗСІЮВАЧЕМ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

*Досліджено радіометричні і метрологічні характеристики робочого еталона енергетичної яскравості і спектральної щільності енергетичної яскравості на базі дифузного випромінювача, що складається з інтегрувальної сфери і розсіювача із молочного чи матового скла, встановленого у вихідній апертурі. Проаналізовано вплив основних компонентів на остаточний показник яскравості еталона (з урахуванням середовища всередині інтегрувальної сфери). Проведено метрологічний аналіз, виявлено залежність відносної похибки встановлення яскравості від первинних похибок та похибку яскравості вихідної апертури в залежності від нестабільності основних елементів робочого еталона яскравості. Розроблено рекомендації щодо конструювання еталона яскравості.*

**Ключові слова:** оптична радіометрія, еталон яскравості, дифузний випромінювач, енергетичні характеристики, метрологічні характеристики.

#### Вступ

Найчастіше під час радіометричного калібрування протяжних випромінювачів використовуються енергетична яскравість (ЕЯ) і спектральна щільність енергетичної яскравості (СЩЕЯ), тому розробка еталонних випромінювачів, що відтворюють ці величини, є важливою і актуальною задачею [1].

Наразі для зберігання і передачі одиниць ЕЯ і СЩЕЯ використовуються, в основному, моделі абсолютно чорних тіл (державні еталони) і світловимірювальні стрічкові лампи (робочі еталони і зразкові засоби вимірювань) [1]. Разом з відомими перевагами таких випромінювачів, вони мають і серйозні недоліки — висока вартість (в першу чергу, моделей чорних тіл), нерівномірність розподілу яскравості по тілу розжарювання, зміна цього розподілу в процесі експлуатації, мала величина робочої зони (в межах декількох міліметрів) обмежений термін служби (в основному стрічкової лампи). Крім того, моделі чорних тіл і стрічкові лампи в Україні не виробляються, а парк, що знаходиться в експлуатації, значно зменшується і морально застарів. Заміна стрічкових ламп галогенними [2] вирішує вищезазначені проблеми тільки частково, через дискретну структуру тіла розжарювання, утвореного окремими витками спіралі та значну неоднорідність сформованого поля яскравості, що має, до того ж, малі розміри.

*Мета роботи* — дослідження радіометричних і метрологічних характеристик робочого еталона ЕЯ і СЩЕЯ на базі дифузного випромінювача (ДВ), який складається з інтегрувальної сфери (ІС) та розсіювача з молочного або матового скла, що встановлюється у вихідній апертурі.

#### Характеристики поля яскравості дифузного випромінювача

Конструктивну схему робочого еталона яскравості показано на рис. 1. Робочий еталон складається з інтегрувальної сфери, з нанесеним на її внутрішній поверхні розсіювальним покриттям, вихідної апертури з розсіювачем і розташованих по колу джерел випромінювання. Для усунення прямого попадання випромінювання від джерел у вихідну апертуру, використовуються розсіювальні екрани.

У загальному випадку, СЩЕЯ розсіювача, встановленого у вихідній апертурі дифузного випромінювача на основі інтегрувальної сфери  $L_B(\lambda)$ , описується виразом [3]

$$L_B(\lambda) = \tau_p(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \frac{\rho_n(\lambda) \cdot \Phi_n(\lambda)}{\Theta} \left[ \frac{\pi \eta(\varphi, \nu)}{\Theta} + \frac{\rho(\lambda) A_{C\Phi}}{1 - \rho A_{C\Phi}} \right], \quad (1)$$

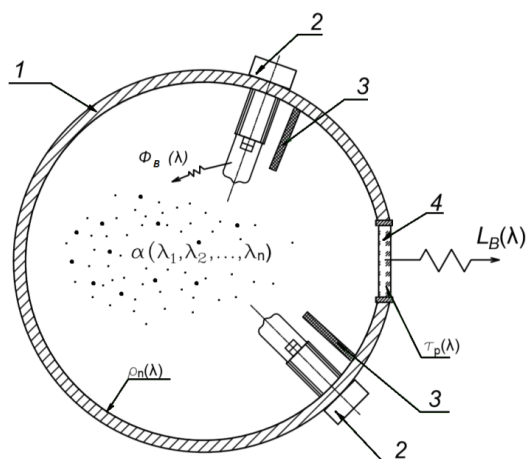


Рис. 1. Конструктивна схема еталона яскравості:

1 — інтегральна сфера; 2 — джерело випромінювання; 3 — екран; 4 — розсіювач

Як випливає з (1), найбільше впливають на СЩЕЯ спектральні характеристики внутрішнього покриття IC і розсіювача. На сьогодні для внутрішнього покриття IC найчастіше використовується пресований сірчаноокислий барій [6] і нові матеріали на основі політетрафторетилену — спектралон, інфраголд та ін. [7; 8]. Спектральні характеристики сірчаноокислого барію і спектралона показані на рис. 2. Там же показані відносні спектральні характеристики молочного скла МС-23 і матованого кварцового скла [9—11], які найчастіше використовуються як розсіювальні елементи.

Поглинання випромінювання внутрішнім середовищем IC при описі дифузних випромінювачів на базі IC, зазвичай, не враховується, але для еталонних випромінювачів воно є суттєвим. Це поглинання має смуговий характер і проявляється, в основному, в ближній інфрачервоній області спектра. Для оцінки впливу поглинання внутрішнім середовищем IC була використана методика, описана в [12—13]. При цьому послаблення випромінювання на певній довжині хвилі визначалося з коефіцієнтом  $K_{\tau_c}^{\circ}$ , що свідчить про відносне зменшення коефіцієнта пропускання середовища IC порівняно з «порожньою» інтегральною сферою

$$K_{\tau_c}^{\circ} = \frac{\tau_c(\alpha_{\lambda} C = \alpha_{\lambda_i} C_i)}{\tau_c(\alpha_{\lambda} C = 0)} = \frac{1 - \rho}{1 - \rho(1 - 2\alpha_{\lambda} C R_{C\Phi})}, \quad (2)$$

де  $\alpha_{\lambda}$  — коефіцієнт поглинання випромінювання компонентом середовища на певній довжині хвилі;  $C$  — концентрація цього компонента в IC.

У табл. 1 представлені основні атмосферні гази, що впливають на поглинання випромінювання в IC і їх фотометричні характеристики, а на рис. 3 — графіки спектральних характеристик пропускання середовища IC з урахуванням описаного явища.

Таблиця 1

Газ	Довжина хвилі поглинання, мкм	Концентрація $C$ , відн. од.	Коефіцієнт поглинання $\alpha$ , 1/м
H <sub>2</sub> O (I)	1,94	0,2...2,5	1
H <sub>2</sub> O (II)	1,45	0,2...2,5	0,26
CO <sub>2</sub>	2,69	0,0314	0,0531
CO	4,66	0,0017	0,0232
CH <sub>4</sub>	3,31	0,0002	0,0162

На основі (1) і (2) розраховані відносні спектральні характеристики випромінювача у разі використання як джерел випромінювання галогенних ламп з робочою температурою 3000 К і різними

типами покриттів (сірчаноокислий барій і спектралон) і матеріалами розсіювачів (молочне і матоване кварцове скло). Відповідні графіки показані на рис. 4.

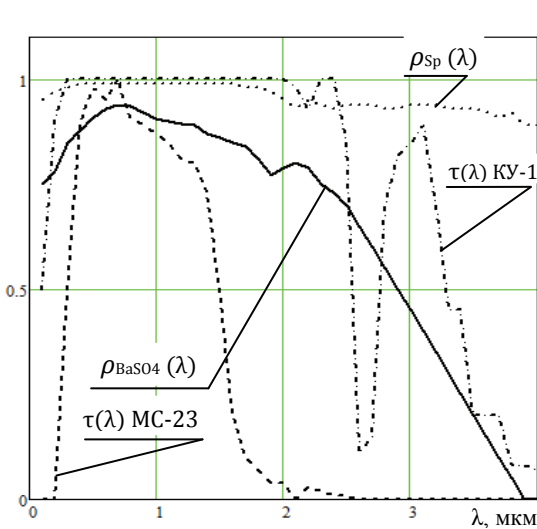


Рис. 2. Спектральні характеристики покриття ІС і матеріалів розсіювача

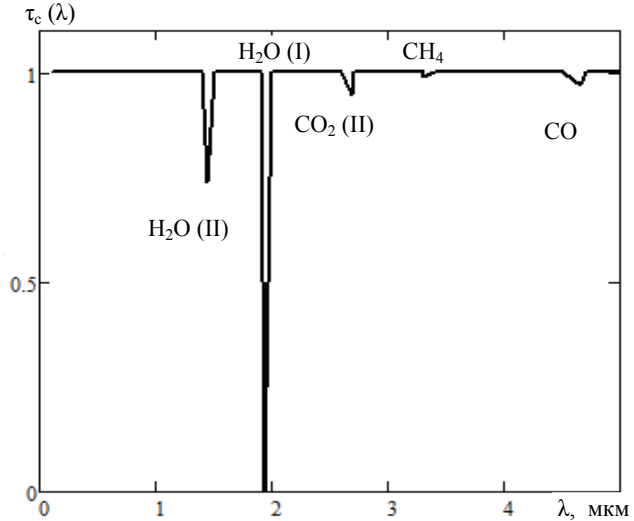


Рис. 3. Спектральні характеристики пропускання середовища ІС при її заповненні атмосферними газами. Концентрація газів вказана в табл. 1

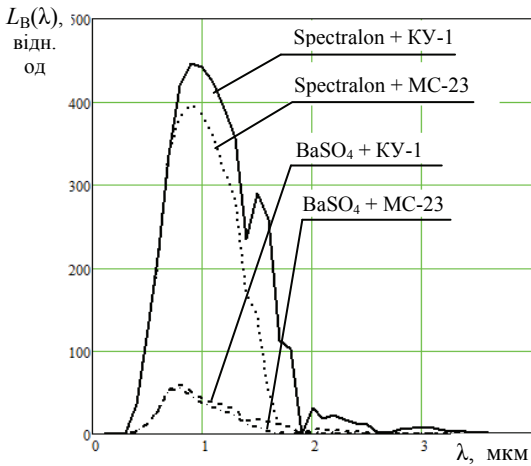


Рис. 4. Спектральні характеристики еталона енергетичної яскравості (СЦЕЯ) з використанням різних типів покриття поверхні і розсіювачів та з урахуванням поглинання випромінювання внутрішнім середовищем ІС. Температура тіла розжарювання випромінювача — 3000 К

Як випливає з графіків, використання спектралона і матованого кварцового скла дозволяє забезпечити спектральний діапазон еталонного випромінювача більше 0,3...4,5 мкм (за рівнем 0,1), а з використанням традиційних матеріалів — сірчаноокислого барію і молочного скла, цей діапазон звужується до 0,3...2,6 мкм. Зауважимо також, що й інтегральна яскравість випромінювача з використанням нових матеріалів значно підвищується у порівнянні з традиційними.

Поглинання випромінювання газами внутрішнього середовища ефективно на довжинах хвиль 1,45...2,69 мкм (пари води і вуглекислого газу). Поглинанням випромінювання іншими компонентами можна знехтувати.

### Метрологічний аналіз

Проаналізуємо основні похибки установки енергетичної яскравості (СЦЕЯ) в еталонному випромінювачі, скориставшись виразом (1).

Вважаючи всі складові величини незалежними, відносна похибка установки яскравості вихідної апертури

$\Delta L_B / L_B$ , зумовлена частковими похибками окремих факторів —  $\Delta \tau_p$ ,  $\Delta \tau_c$ ,  $\Delta \rho_n$ ,  $\Delta \Phi_B$ ,  $\Delta R_{C\Phi}$ ,  $\Delta R_B$  (де  $\Delta R_B$  — похибка радіуса вихідної апертури) і приймаючи  $\eta(\varphi, \nu) = 1$  (тобто, вважаючи розсіювання випромінювання внутрішньою поверхнею ІС ламбертовим випромінювачем) може бути описана виразом [14, 15]:

$$L_B = \frac{\Delta L_B}{L_B} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \tau_p}\right)^2 \left(\frac{\Delta \tau_p}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \tau_c}\right)^2 \left(\frac{\Delta \tau_c}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \rho_n}\right)^2 \left(\frac{\Delta \rho_n}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \Phi_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta \Phi_B}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial R_{C\Phi}}\right)^2 \left(\frac{\Delta R_{C\Phi}}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial R_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta R_B}{\bar{L}_B}\right)^2} \quad (3)$$

В (3) доданки є квадратами відносних первинних похибок з їх частковими похідними — коефіцієнтами впливу первинних похибок. Відповідні вирази для коефіцієнтів впливу отримуємо з урахуванням (1) і (2). Вони представлені в табл. 2.

Коефіцієнти впливу первинних похибок

Джерело похибки	Коефіцієнт впливу	Числове значення
Нестабільність джерела випромінювання $\Delta\Phi_B$ , Вт	$\frac{\partial \bar{L}}{\partial \Phi_B} = \frac{\rho \tau_p \tau_c}{\pi^2 [4R_{сф}^2 - \rho(4R_{сф}^2 - R_B^2)]}$	$28,62 \text{ ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$
Деградація внутрішнього покриття $\Delta\rho$ , відн. од.	$\frac{\partial \bar{L}}{\partial \rho} = \frac{4\Phi_B R_{сф}^2 \tau_p \tau_c}{\pi^2 [4R_{сф}^2 - \rho(4R_{сф}^2 - R_B^2)]^2}$	$3,6 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$
Зміна радіуса кривизни інтегруючої сфери $\Delta R_{сф}$ , м	$\frac{\partial \bar{L}}{\partial R_{сф}} = -\frac{8\rho \Phi_B R_{сф} (1-\rho) \tau_p \tau_c}{\pi^2 [4R_{сф}^2 - \rho(4R_{сф}^2 - R_B^2)]^2}$	$-9,05 \cdot 10^4 \text{ Вт}/[(\text{ср} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}]$
Зміна радіуса вихідний апертури $\Delta R_B$ , м	$\frac{\partial \bar{L}}{\partial R_B} = -\frac{2\rho^2 \Phi_B R_B \tau_p \tau_c}{\pi^2 [4R_{сф}^2 - \rho(4R_{сф}^2 - R_B^2)]^2}$	$-2,9 \cdot 10^4 \text{ Вт}/[(\text{ср} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}]$
Нестабільність коефіцієнта пропускання розсіювача $\Delta\tau_p$ , відн. од.	$\frac{\partial \bar{L}}{\partial \tau_p} = \frac{\rho \Phi_B \tau_c}{4\pi^2 R_{сф}^2 + \pi^2 \rho (R_B^2 - 4R_{сф}^2)}$	$4,7 \cdot 10^3$
Нестабільність поглинання внутрішнього середовища інтегруючої сфери $\Delta\tau_c$ , відн. од.	$\frac{\partial \bar{L}}{\partial \tau_c} = \frac{\rho \Phi_B \tau_p}{4\pi^2 R_{сф}^2 + \pi^2 \rho (R_B^2 - 4R_{сф}^2)}$	$3,8 \cdot 10^3$

Під час чисельного аналізу похибок робочого еталона яскравості використані такі параметри  $R_{сф} = 75$  мм,  $R_B = 15$  мм; покриття сірчаноокислим барієм з  $\rho_n = 0,897$  і спектраломом з  $\rho_n = 0,994$ ,  $\tau_p = 0,79$  для молочного скла МС-23 (2 мм) і  $\tau_p = 0,99$  для матованого кварцового скла; джерело випромінювання — 5 галогенних ламп типу КГМ з сумарним випромінюваним потоком 130 Вт.

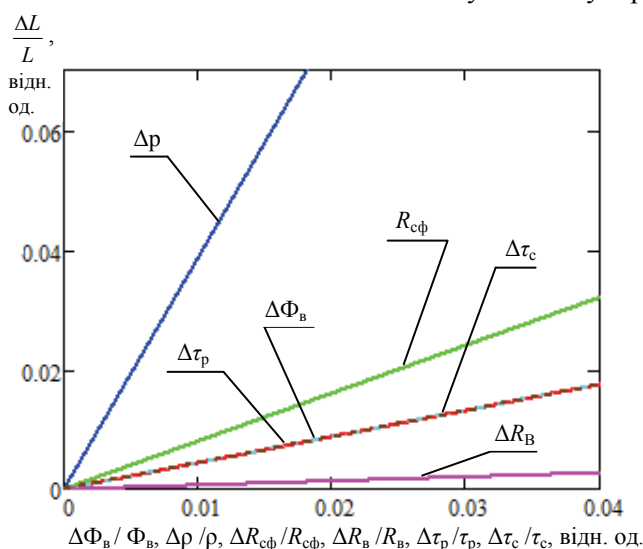


Рис. 5. Залежність відносної похибки встановлення яскравості від первинних похибок

Відповідні числові значення коефіцієнтів впливу, отриманих для вказаних значень параметрів, показані в табл. 2, а на рис. 5 показані залежності відносної похибки яскравості вихід-

ної апертури  $L$  від величини первинних похибок. З рис. 5 випливає, що найбільший вплив на сумарну похибку має нестабільність внутрішнього покриття ІС. Як показали наші дослідження та аналіз літератури [3—6], ця нестабільність зумовлена різними факторами: деградацією матеріалу, його гігроскопічністю, запиленням і т. д. Для кожного із застосовуваних на практиці покриттів ці фактори проявляються по-різному, але в середньому можна вважати, що навіть найдовговічніші покриття з пресованого сірчаноокисло-го барію не можуть забезпечити стабільність краще, ніж 0,03 % на годину. У цьому плані найперспективнішими є покриття з політетраф-

торетилу, що забезпечують поєднання гарних оптичних характеристик з високою стабільністю, але їх застосування в Україні дуже обмежене.

Зміна розмірів інтегрованої сфери хоча і є, у відносних величинах, істотним джерелом загальної похибки за абсолютною величиною не перевищує часток відсотка навіть у досить жорсткому температурному режимі еталона. Примусове охолодження випромінювача знижує цю похибку до 0,1...0,2 %. Асферичність та інші порушення форми інтегрованої сфери носять систематичний характер і враховуються при калібруванні еталона.

Значним джерелом похибки вихідної яскравості є нестабільність джерел випромінювання. Тут варто розрізняти короточасну складову, викликану, в основному, перепадами напруги живлення і довготривалу, зумовлену вигорянням тіла розжарювання, деградацією матеріалу колби і осадженням вольфраму на її внутрішній поверхні. Короточасну нестабільність можна істотно (до десятих часток відсотка) зменшити, застосуванням еталонних блоків живлення (наприклад, типу БП-120,

МТКС-15, МТКС-30) та підключенням груп ламп до різних джерел живлення. Довготривала нестабільність враховується періодичним калібруванням і визначається точністю еталонного випромінювача. Ще менший вплив чинить нестабільність вихідної апертури і нестабільність розсіювача (менше 0,1 %) і ними можна знехтувати.

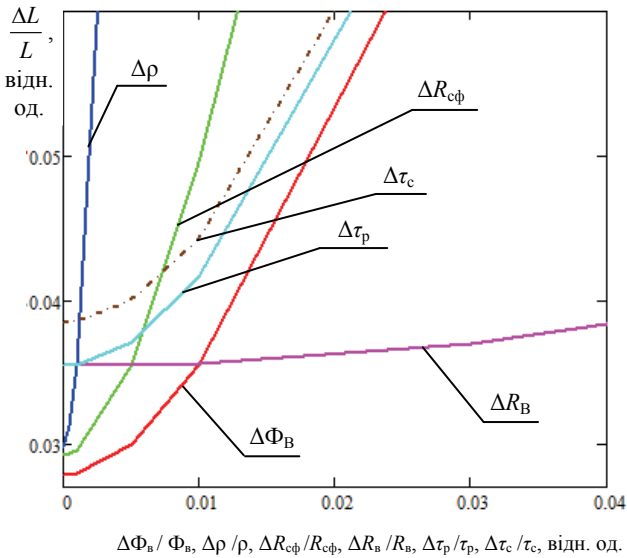


Рис. 6. Похибка яркості вихідної апертури залежно від нестабільності основних елементів еталона

лізовані вище, а рекомендовані для еталона галогенні лампи розжарювання наведено в табл. 3 [17]. У їх виборі основна увага приділялася мінімальним габаритам колби і тіла розжарювання, тривалості горіння, наближення форми фотометричного тіла рівноярковому випромінювачу.

Таблиця 3

Тип лампи	Напруга живлення, В	Електрична потужність, Вт	Випромінюваний потік, Вт	Тривалість роботи, год.	Габарити, мм	
					довжина	діаметр колби
КГМ 9-100	9	100	30,9	300	44	12
КГМ 12-100-5	12	100	25,75	2000	44	13
КГМ 24-100-1	24	100	61,8	2000	44	12
КГМ 12-100	12	100	30,9	85	44	11,5
КГМ 24-300	24	300	87,55	150	55	15

Параметри деяких типів еталонних випромінювачів, розрахованих з урахуванням наведених рекомендацій, подані в табл. 4

Таблиця 4

Діаметр ІС, мм	100	150	200
Діаметр вихідної апертури, мм	20	30	40
Покриття ІС	Сірчаноокислий барій		
	Спектралон		
Тип джерела випромінювання	КГМ 12-100-5	КГМ 12-100-5	КГМ 24-100-1
Кількість і сумарний потік джерел випромінювання, Вт	3	5	5
	78	130	310
Матеріал розсіювача	Молочне скло МС-23 (2 мм)		
	Кварцове матове скло КУ-1		
Вихідна яркість, Вт/ср*м <sup>2</sup> BaSO <sub>4</sub> + МС-23 / Спектралон + КУ-1	1706	1236	1695
	40166	30386	40951
Спектральний діапазон, мкм (по рівню 0,1) BaSO <sub>4</sub> + МС-23 / Спектралон + КУ-1	0,3...2,6		0,3...4,5

## Висновки

Запропоновано та досліджено еталонний випромінювач на базі інтегровальної сфери з розсіювачем для відтворення одиниць енергетичної яскравості і спектральної щільності енергетичної яскравості.

Показано, що з використанням покриттів інтегровальної сфери з політетрафторетилену і розсіювачів з матованого кварцового скла випромінювач забезпечує роботу в спектральному діапазоні не вужче 0,3...4,5 мкм (за рівнем 0,1), а інтегральні значення яскравості за використання малогабаритних галогенних ламп становлять приблизно  $40 \cdot 10^3$  Вт / ср · м<sup>2</sup> (за умови інтенсивного охолодження інтегруючої сфери) в межах вихідної апертури 20...40 мм, відповідно. При цьому похибка відтворення енергетичної яскравості становить 0,2...0,3 %. Використання сірчаноокислого барію зменшує вихідну яскравість до  $(1,2...1,7) \cdot 10^3$  Вт / ср · м<sup>2</sup>, а спектральний діапазон до 0,3...2,6 мкм.

За своїми метрологічними характеристиками випромінювач може бути використаний в повірочних схемах передачі енергетичної яскравості і спектральної щільності енергетичної яскравості як еталон або зразковий засіб вимірювання.

Результати роботи будуть цікаві фахівцям в області прецизійної оптичної радіометрії та метрології.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Единая система государственных эталонов энергетической фотометрии когерентного и некогерентного оптического излучения / [А. Ф. Котюк, В. С. Панасюк, Л. Н. Соломонов и др.] // Измерительная техника. — 1976. — № 3. — С. 17—24.
2. Купко А. О. Метрологическое обеспечение световых измерений на Украине / А. О. Купко // Светотехника. — 2001. — № 5. — С. 38—40.
3. Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Л. А. Міхеєнко, Л. А. Петрущенко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 4. — С. 106—114.
4. Об особенностях измерения потока излучения светодиодов с помощью фотометрического шара / [М. Ю. Сахновский, С. Г. Гуминецкий, В. Е. Кравцов и др.] // Оптика и спектроскопия. — 1979. — Т. 46, вып. 3. — С. 515—523.
5. 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. XVIII, вып. 3. — С. 486—494.
6. Кунецкий М. Г. Исследование коэффициентов яркости покрытий из краски на основе BaSO<sub>4</sub> / М. Г. Кунецкий // ОМП. — 1981. — № 6. — С. 3—4.
7. A Guide to Integrating Sphere Theory and Application. Labsphere. [Электронный ресурс] // Labsphere. — Режим доступа : <http://labsphere.com>.
8. Гуминецкий С. Г. Спектрофотометрические свойства покрытия из материала «Полихром 1» / С. Г. Гуминецкий, Л. С. Ловинский, Я. П. Мачук // ОМП. — 1990. — № 2. — С. 19—21.
9. Weidner V. R. Reflection properties of pressed polytetrafluorethylene powder / V. R. Weidner, J. J. Hisia // J. Opt. Soc. Of Amer. — 1981. — No. 71. — P. 856—861.
10. Войшвило Н. А. Новое стекло для рассеивания направленного проходящего излучения / Н. А. Войшвило // ОМП. — 1971. — № 5. — С. 40—43.
11. Спектральные коэффициенты яркости молочных стекол / Б. В. Урысон, О. А. Черинов, Л. П. Шульженко, М. И. Эпштейн // Светотехника. — 1988. — № 3. — С. 4—6.
12. Міхеєнко Л. А. Дослідження характеристик розсіювання молочного і матового скла / Л. А. Міхеєнко, А. В. Коваленко // Вісник НТУУ «КПІ». — Серія «Приладобудування». — 2007. — № 33. — С. 36—41.
13. Вульфсон К. С. Об интегрирующей сфере с объемным светопоглощением / К. С. Вульфсон, Л. Ш. Черняк // Светотехника. 1976. — № 6.
14. 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.
15. Кушнир Ф. В. Электрорадиоизмерения / Ф. В. Кушнир. — Л. : Энергоиздат, 1983. — 320 с.
16. Міхеєнко Л. А. Исследование точности диффузного излучателя на основе интегрирующей сферы / Л. А. Міхеєнко, Ю. А. Гордиенко // Вісник НТУУ «КПІ». — Серія «Приладобудування». — 2008. — Вип. 35. — С. 37—41.
17. Міхеєнко Л. А. Экспериментальное исследование диффузного излучателя на основе интегрирующей сферы / Л. А. Міхеєнко, В. Н. Боровицкий, Ю. А. Гордієнко // Вісник НТУУ «КПІ». — Серія «Приладобудування». — 2007. — Вип. 34. — С. 60—68.
18. Лампы накаливания // Электроника СССР. — М. : Информэлектро. — 1988. — 26 с.

Рекомендована кафедрою екології та екологічної безпеки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.03.2015.

**Міхеєнко Леонід Андрійович** — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри оптичних та оптико-електронних приладів;

**Пугіна Марія Олександрівна** — студентка приладобудівного факультету, e-mail: [mawa.pugina@gmail.com](mailto:mawa.pugina@gmail.com).  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

L. A. Mikheienko<sup>1</sup>

M. O. Puhina<sup>1</sup>

## Working standard of brightness based on integrating sphere with diffuser

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

*The research deals with radiometric and metrological characteristics of the working standard of brightness and power spectral density of energy brightness based on diffuse emitter, which consists of integrating sphere and the lens of milk or frosted glass, which is set in the original aperture. The influence of the main components of the final standard brightness index (including environment inside the integrating sphere) is analyzed. A metrological analysis revealed the dependence of relative error of setting the brightness of the original error and the error output aperture brightness depending on the instability of the main elements of the standard brightness. The recommendations on the design of standard of brightness are developed.*

**Keywords:** optical radiometry, standard brightness, diffuse radiator, power characteristics, metrological characteristics.

*Mikheienko Leonid A.* — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Optical and Optoelectronic Devices;

*Puhina Mariia O.* — Student, e-mail: mawa.puhina@gmail.com

Л. А. Михеенко<sup>1</sup>

М. А. Пугина<sup>1</sup>

## Рабочий эталон яркости на базе интегрирующей сферы с рассеивателем

<sup>1</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

*Рассмотрены исследования радиометрических и метрологических характеристик рабочего эталона энергетической яркости и спектральной плотности энергетической яркости на базе диффузного излучателя, который состоит из интегрирующей сферы и рассеивателя из молочного или матового стекла, установленного в исходной апертуре. Проанализировано влияние основных компонентов на окончательный показатель яркости эталона (с учетом среды внутри интегрирующей сферы). Проведен метрологический анализ, выявлена зависимость относительной погрешности установки яркости от первичных погрешностей и погрешность яркости исходной апертуры в зависимости от нестабильности основных элементов эталона яркости. Разработаны рекомендации по конструированию эталона яркости.*

**Ключевые слова:** оптическая радиометрия, эталон яркости, диффузный излучатель, энергетические характеристики, метрологические характеристики.

*Михеенко Леонид Андреевич* — д-р техн. наук, профессор кафедры оптических и оптико-электронных приборов;

*Пугина Мария Александровна* — студент приборостроительного факультета, e-mail: mawa.puhina@gmail.com