

5. Chen, X. et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials / X. Chen et al. // Physical Review E. – 2004. – Vol. 70, №1. – P. 016608.
6. García-Meca, C. et al. Double-negative polarization-independent fishnet metamaterial in the visible spectrum. / C. García-Meca et al. // Optics letters. – 2009. – Vol. 34, №10. – P. 1603–1605.
7. Nikolaenko, A.E. et al. Carbon Nanotubes in a Photonic Metamaterial / A.E. Nikolaenko et al. // Physical Review Letters. – 2010. – Vol. 104, №15. – P. 153902
8. Penciu, R.S. et al. Magnetic response of nanoscale left-handed metamaterials / R.S. Penciu et al. // Physical Review B. – 2010. – Vol. 81, №23. – P. 1–11.

*Надійшла до редакції  
10 травня 2014 року*

© Зосик О.М., 2014

УДК 528.7, 629.78

## МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФУЗНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА ЗМІННОЇ ЯСКРАВОСТІ

*Міхеєнко Л. А., Анікієнко Н. В.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
м. Київ, Україна*

*В статті розглянуто проблему покращення метрологічних характеристик дифузного випромінювача змінної яскравості на законі зворотних квадратів. Запропоновано схему дифузного випромінювача, де в ролі джерела випромінювання використовується матриця з галогенних ламп, а в якості розсіювача – матоване кварцове скло. Представлена математична модель дифузного випромінювача з матричним джерелом випромінювання. По приведеній математичній моделі зроблені розрахунки основних вихідних характеристик дифузного випромінювача з матричним джерелом випромінювання та проведений аналіз результатів.*

**Ключові слова:** *дифузний випромінювач змінної яскравості, матричне джерело випромінювання.*

### **Введення**

Калібрувальні дифузні випромінювачі змінної яскравості (ДВЗЯ) є одними з основних елементів сучасної прецизійної радіометрії. Вони широко використовуються при вимірюванні енергетичних характеристик приймачів випромінювання, калібруванні фотометричного обладнання, атестації оптико-електронних вимірювальних приладів [1-3]. Однак, незважаючи на останні досягнення в цьому напрямку, існуючі ДВЗЯ не повною мірою задовольняють вимогам сучасної оптичної метрології. У першу чергу це стосується завдань радіометричного калібрування багатоелементних приймачів випромінювання і пристроїв на їх основі [4,5]. Водночас, основними проблемами відомих ДВЗЯ є недостатня інтегральна яскравість, малий динамічний діапазон її зміни, недостатня ефективна апертура, вузький спектральний діапазон і ряд інших [6,7].

### **Постановка задачі**

Метою цієї роботи є поліпшення метрологічних характеристик одного з кращих приладів розглянутого класу - ДВЗЯ, заснованого на законі зворотних квадратів (ЗЗК), шляхом використання матричних джерел випромінювання (ДВ) і нових типів розсіювачів на базі кварцового матованого скла.

### Структурна схема і математична модель ДВЗЯ

Структурна схема ДВЗЯ, побудована на ЗЗК, представлена на рис. 1. Вона складається з матричного випромінювача, складеного з чотирьох галогенних ламп розжарювання і розсіювача з молочного або матового скла. Відстань від випромінювача до розсіювача можна змінювати у великих межах, внаслідок чого змінюється освітленість внутрішньої сторони розсіювача (зі сторони випромінювача) і яскравість його зовнішньої сторони, зверненої до споживача.

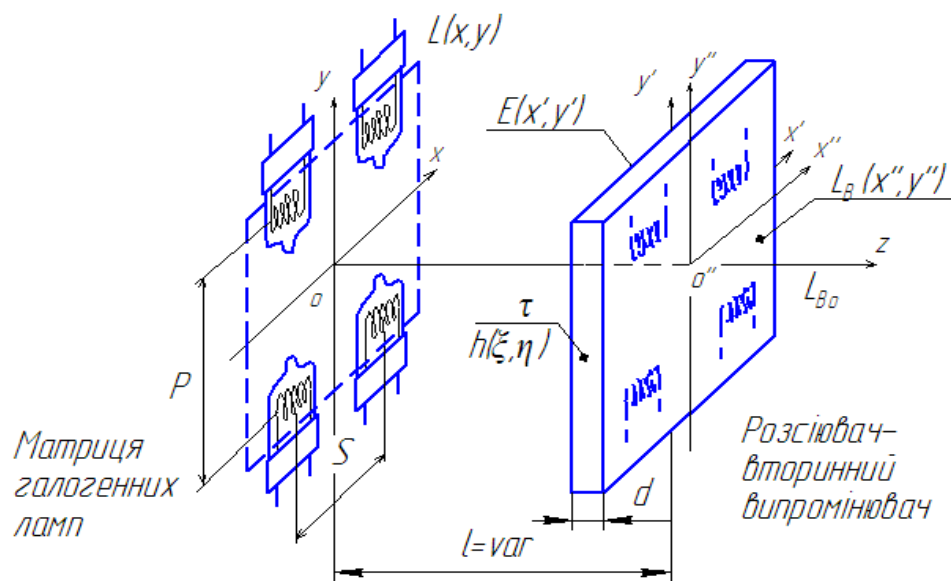
Досить повна теорія ДВЗЯ на основі ЗЗК наведена в [7,8]. Відзначимо тільки, що розподіл вихідної яскравості ДВЗЯ  $L_B = f(x'', y'')$  визначається в результаті згортки функції, що описує розподіл освітленості на внутрішній поверхні розсіювача  $E(x', y')$  і функції розсіювання точки  $h(\xi, \eta)$  або лінії  $h(\xi)$  (для одновимірного випадку) розсіювача:

$$L_B(x'', y'') = L_B[E(x', y'), h(\xi, \eta), \tau] = \frac{\tau}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x' - \xi, y' - \eta) h(\xi, \eta) d\xi d\eta. \quad (1)$$

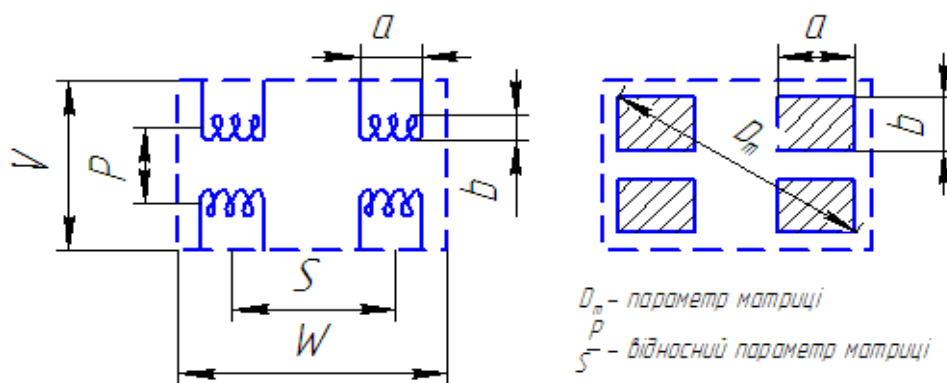
Спектральна характеристика випромінювача залежить від спектральної характеристики джерела випромінювання і спектральної характеристики пропускання розсіювача, а інтегральна яскравість ДВЗЯ в центрі визначається яскравістю джерела випромінювання, відстанню від джерела випромінювання до розсіювача і коефіцієнтом пропускання останнього. Зазвичай при розрахунках приймають, що в межах малих тілесних кутів індикатриси джерела випромінювання і розсіювача є ламбертівськими [2, 8], що достатньо для приблизної оцінки інтегральної яскравості ДВЗЯ.

При визначенні функції  $E(x', y')$  можна прийняти, що тіло розжарення галогенної лампи є прямокутником з розмірами  $a \times b$  (рис. 1), що, як було показано в [7,9], справедливо для деяких типів таких джерел випромінювання. Так як матриця складається з чотирьох галогенних ламп, площа матриці  $W \times V$  розбивається на чотири прямокутники, одна з вершин яких розташовується на початку системи координат  $X'O'Y'$ . Тоді, використовуючи методичку, описану в [2,8,9], формула для розрахунку освітленості точки поверхні розсіювача, розташованого на відстані  $l$  від такого прямокутника має вигляд:

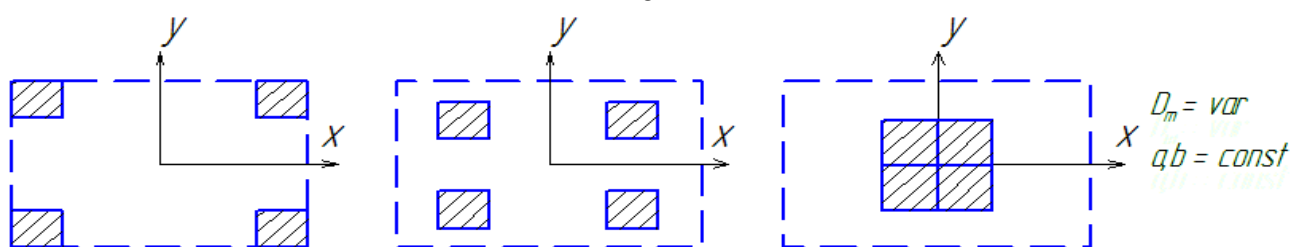
$$E(x) = \frac{L}{2} \cdot \left[ \left( \frac{a+x}{\sqrt{l^2 + (a+x)^2}} \cdot \arctg \frac{b+y}{\sqrt{l^2 + (a+x)^2}} + \frac{b+y}{\sqrt{l^2 + (b+y)^2}} \cdot \arctg \frac{a+x}{\sqrt{l^2 + (b+y)^2}} \right) - \left( \frac{a+x}{\sqrt{l^2 + (a+x)^2}} \cdot \arctg \frac{y}{\sqrt{l^2 + (a+x)^2}} + \frac{y}{\sqrt{l^2 + y^2}} \cdot \arctg \frac{a+x}{\sqrt{l^2 + y^2}} \right) - \left( \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}} \cdot \arctg \frac{b+y}{\sqrt{l^2 + x^2}} + \frac{b+y}{\sqrt{l^2 + (b+y)^2}} \cdot \arctg \frac{x}{\sqrt{l^2 + (b+y)^2}} \right) + \left( \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}} \cdot \arctg \frac{y}{\sqrt{l^2 + x^2}} + \frac{y}{\sqrt{l^2 + y^2}} \cdot \arctg \frac{x}{\sqrt{l^2 + y^2}} \right) \right]. \quad (2)$$



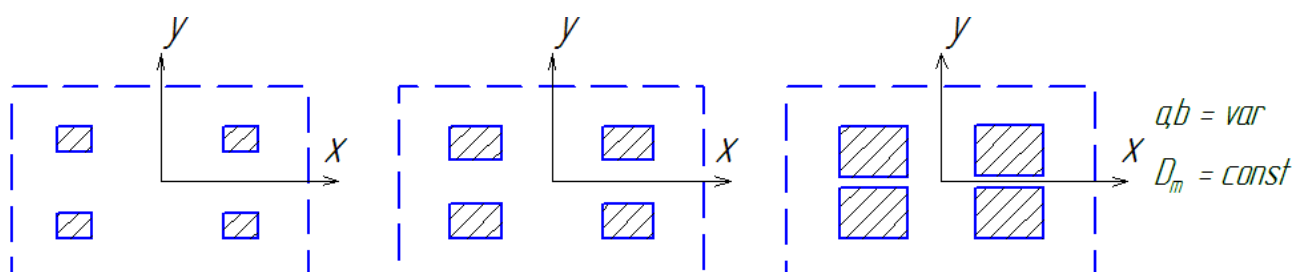
а



б



в



г

Рис. 1. ДВЗЯ з використанням матриці з галогенних ламп: а - структурна схема ДВЗЯ; б - параметри матриці; в, г - можливі положення елементів матриці та їх розмірів

При розрахунку освітленості на початку системи координат  $X'O'Y'$  досить освітленість, отриману за формулою (2), збільшити в чотири рази. Для розрахунку освітленості точки, яка зміщена відносно початку системи координат  $X'O'Y'$ , необхідно додати значення освітленостей від чотирьох прямокутників, розрахованих за формулою (2). При цьому слід враховувати, що при зміщенні точки відносно початку системи координат  $X'O'Y'$  змінюються і розміри прямокутників, на які розбита площа матриці.

Значення функції розсіювання лінії для молочного і матового стекл були визначені в [10]. Там же для апроксимації ФРЛ була запропонована гаусоїдаль-

на апроксимація  $h(\xi) = e^{-\left(\frac{\xi}{t}\right)^2}$  з параметрами  $t = 1.9$  для молочного і  $t = 0.25$  для матового скла. Спектральні характеристики пропускання молочного і матового стекл наведені в [10]. Обчислення виразів (1) - (2) проводилися з використанням програми MathCAD.

### Аналіз дифузного випромінювача

Основні результати чисельного аналізу запропонованого ДВЗЯ показані на рис. 2-11. На них представлені залежності:

- розподілу яскравості по перетину матриці галогенних ламп КГМ 48-1000 при різних значеннях параметра  $D_m$  та розміру одного елемента;
- розподілу освітленості на внутрішній поверхні розсіювача і яскравості на його зовнішній поверхні при різних відстанях від матриці випромінювачів;
- величини лінійної зони розподілу яскравості на зовнішній поверхні розсіювача при використанні молочного і матованого кварцового скла;
- яскравості на виході ДВЗЯ для різних довжин хвиль і різних типів розсіювачів.

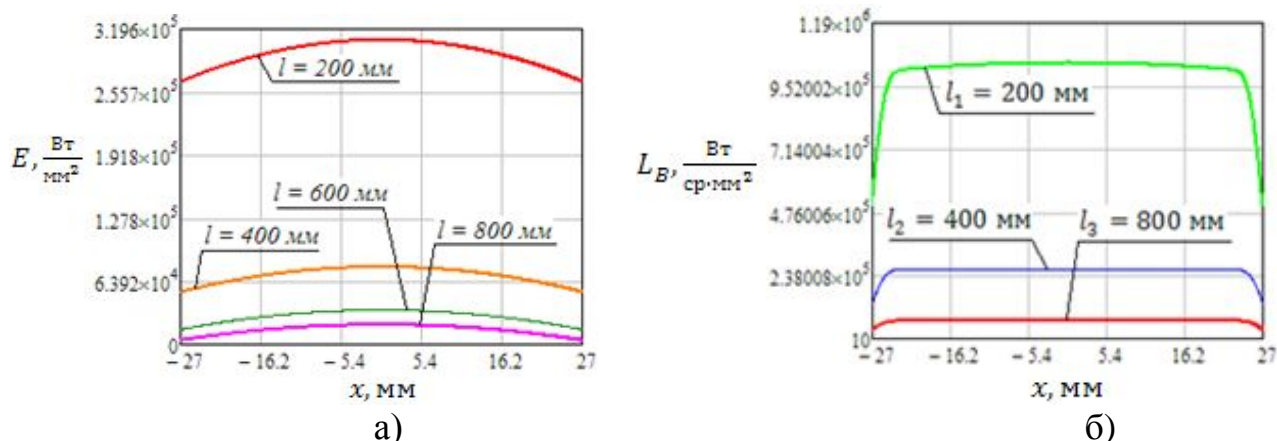


Рис. 2. Залежність розподілу: а – освітленості на внутрішній стороні розсіювача від відстані  $l$  від джерела випромінювання (матриця з галогенних ламп КГМ 48-1000 з розмірами тіла розжарення  $12.7 \times 7.5$  мм і параметром  $D_m = 52.6$  мм); б – вихідної яскравості по поверхні розсіювача з молочного скла від відстані до джерела випромінювання (матриця з галогенних ламп КГМ 48-1000, параметр  $D_m = 52.6$  мм)

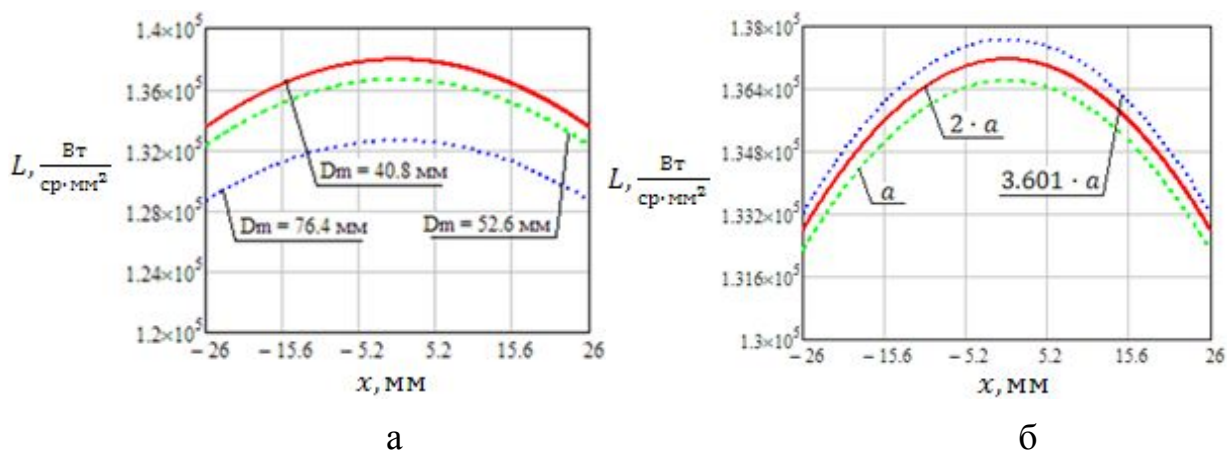


Рис. 3. Розподіл яскравості по перетину розсіювача: а – при різних значеннях параметра  $D_m$ ; б – залежно від розміру елемента матриці при однаковому значенні параметра  $D_m = 52.6$  мм

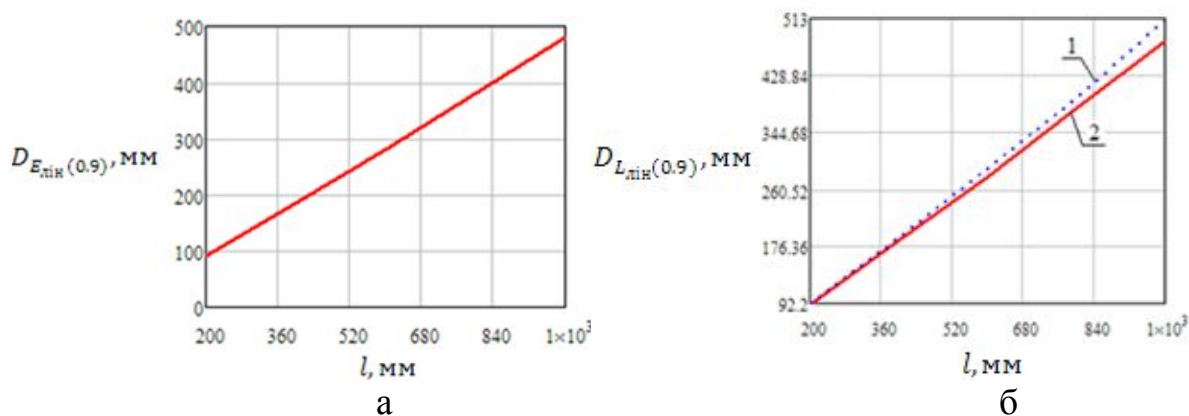


Рис. 4. Залежність величини лінійної зони: а – освітленості  $D_{E_{\text{лін}}}$  на рівні  $0.9 \cdot E_{\text{max}}$  від відстані  $l$  до джерела випромінювання (матриця з галогенних ламп КГМ 48-1000, параметр  $D_m = 52.6$  мм); б – яскравості  $D_{L_{\text{лін}}}$  на зовнішній стороні розсіювача (на рівні  $0.9 \cdot L_{\text{max}}$ ) від відстані до випромінювача при використанні молочного (1) і матованого кварцового скла (2)

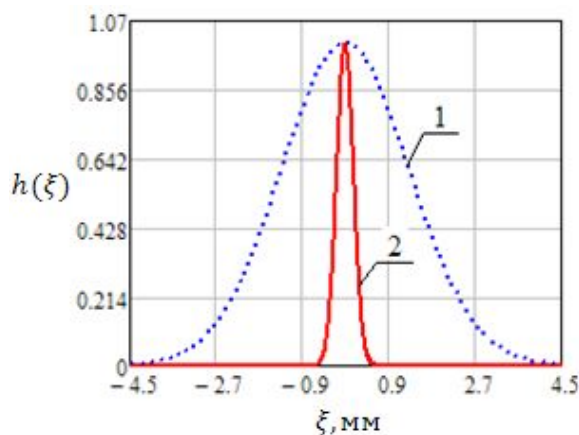


Рис. 5. Функції розсіювання лінії молочного (1) і матованого кварцового скла (2)

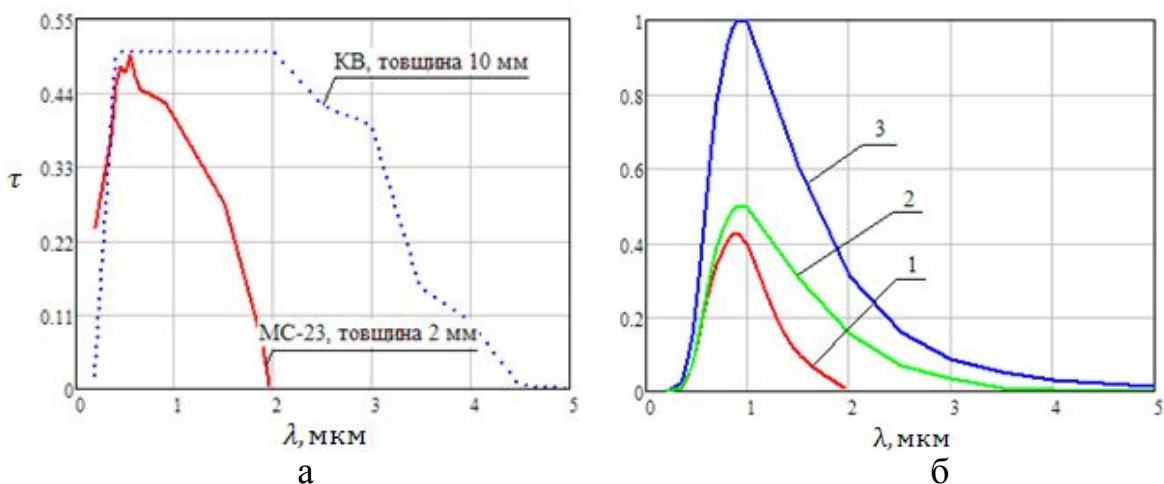


Рис. 6. Спектральні характеристики: а – розсіювача з матованого кварцового скла марки KV і молочного скла марки MS-23; б – ДВЗЯ з використанням молочного скла марки MS-23 (1), матованого кварцового скла марки KV (2) і спектральна характеристика (залежність світимості від довжини хвилі  $M(\lambda)$ ) галогенної лампи (3)

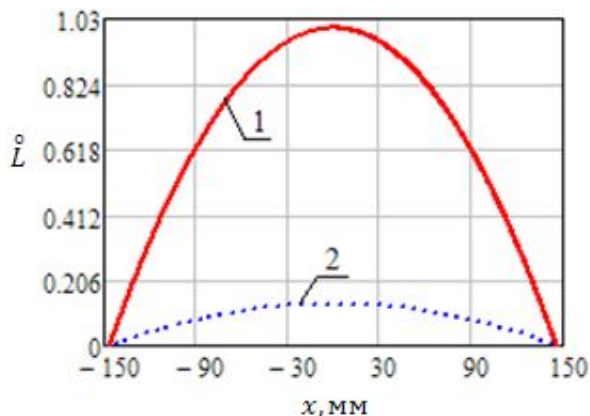


Рис. 7. Нормована залежність розподілу яскравості по поверхні розсіювача з молочного (1) і матованого кварцового скла (2) при відстані  $l$  до джерела випромінювання 200 мм

### Обговорення результатів

Аналіз отриманих результатів показав:

- на збільшення лінійної зони розподілу яскравості на поверхні розсіювача найбільше впливає параметр  $D_m$  матриці. Вплив розмірів окремих елементів матриці менш істотний;

- величина лінійної зони розподілу освітленості на внутрішній поверхні розсіювача і яскравості на його зовнішній поверхні практично лінійно залежить від відстані до матричного ДВ;

- хоча функція розсіювання лінії

матованого кварцового скла істотно вужча аналогічної характеристики молочного скла, розподіл яскравості на поверхні розсіювача майже не змінюється;

- використання матованого кварцового скла доцільно при необхідності розширення спектрального діапазону ДВЗЯ в ближню інфрачервону область спектру.

### Висновки

Запропоновані в роботі методи підвищення метрологічних характеристик ДВЗЯ на ЗЗК за рахунок використання матричного ДВ з чотирьох галогенних ламп і розсіювача з матованого кварцового скла дозволили:

- забезпечити величину лінійної зони розподілу яскравості (на рівні 0.9 від максимального значення) при розташуванні розсіювача поблизу матричного

джерела випромінювання не менше 92 мм і не менше 275 мм на відстанях понад 600 мм. При цьому величина яскравості в центральній зоні розсіювача склала не менше  $1.366 \cdot 10^{11} \frac{Вт}{ср \cdot м^2}$  в першому, і  $1.544 \cdot 10^{10} \frac{Вт}{ср \cdot м^2}$  в другому

випадку, що істотно вище аналогічних параметрів при використанні одиночної галогенною лампи.

- розширити спектральний діапазон ДВЗЯ до 0.2 - 5 мкм (на рівні 0.1 від максимального значення), у той час як спектральний діапазон ДВЗЯ при використанні молочного скла складає 0.3 - 2 мкм.

Отримані результати показують можливість створення системи радіометричного калібрування широкого класу високоапертурних оптико-електронних вимірювальних приладів, що працюють у видимій і ближній інфрачервоній областях спектру.

### **Література**

1. Воропай Е. С. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения / Е. С. Воропай, П. А. Торпачев. – Минск: Университетское, 1988. – 223 с.
2. Эпштейн М. И. Измерения оптического излучения в электронике. – М.: Радио и связь, 1990. – 254 с.
3. Измерение параметров приемников оптического излучения ; под ред. Л. Н. Курбатова, Н. В. Васильченко. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
4. Колобродов В. Г. Стендова апаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних приладів космічного базування / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Л. А. Міхеєнко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2003. – №3. – С. 98 – 104.
5. Міхеєнко Л. А. Абсолютизація вимірювань енергетичних характеристик багатоелементних приймачів випромінювання і пристроїв на їх основі / Міхеєнко Л. А. // Приладобудування 2007: підсумки і перспективи: науково-технічна конференція, 24 – 25 квітня 2007 р., НТУУ «КПІ»: тези доп. – К.: 2007. – С. 70 – 71.
6. Микитенко В. І. Дослідження та вибір схеми каліброваного випромінювача зі змінною яскравістю для прецизійної фотометрії / В. І. Микитенко, Л. А. Міхеєнко, Л. А. Петрущенко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2006. – № 31. – С. 156 – 163.
7. Міхеєнко Л. А. Теория и расчет диффузного излучателя переменной яркости на законе обратных квадратов / Л. А. Міхеєнко, В. Н. Боровицкий // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2006. – № 1. – С. 73 – 80.
8. Міхеєнко Л. А. Фізико-математична модель випромінювача з розсіюючим елементом / Л. А. Міхеєнко, А. В. Коваленко // Вісник НТУУ «КПІ». – Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2008. – Вип. 36. – С. 31 – 37.
9. Міхеєнко Л. А. Вторичный эталон яркости на базе галогенной лампы накаливания / Л. А. Міхеєнко, В. Н. Боровицкий // Технология и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. – 2008. – № 3 (75). – С. 61–64.
10. 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.

*Надійшла до редакції  
10 квітня 2014 року*

© Міхеєнко Л. А., Анікієнко Н. В., 2014