

УДК 528.7: 629.78

Л.А. МІХЕЄНКО, Ю.О. ГОРДІЄНКО

## ДИФУЗНИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ ЗМІННОЇ ЯСКРАВОСТІ НА ОСНОВІ ОПТИЧНО СПОЛУЧЕНИХ ІНТЕГРУЮЧИХ СФЕР

*Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”  
37, пр. Перемоги, м. Київ, Україна*

**Анотація.** У роботі представлений теоретичний аналіз та експериментальне дослідження точності дифузного випромінювача змінної яскравості (ДВЗЯ) на основі сполучених інтегруючих сфер, а також розроблена методика енергетичного розрахунку дифузного випромінювача по заданим конструктивним параметрам. Приведені рекомендації з конструювання установки дифузного випромінювача для забезпечення необхідної стабільності та достатнього динамічного діапазону по яскравості у його вихідній апертурі.

**Аннотация.** В работе представлен теоретический анализ и экспериментальное исследование точности диффузного излучателя переменной яркости (ДИПЯ) на основе сопряженных интегрирующих сфер, а также разработана методика энергетического расчета диффузного излучателя по заданным конструктивным параметрам. Приведены рекомендации по конструированию установки диффузного излучателя для обеспечения необходимой стабильности и динамического диапазона по яркости в его выходной апертуре.

**Abstract.** The paper represents the theoretical analysis and experimental research of accuracy of the diffusive light source based on an integration sphere. Also there were developed the principles of energetic calculation based on famous constructive parameters. There were given the recommendations dealt with the designing of the diffusive light source in order to provide the necessary stability and dynamic range of brightness in output aperture.

**Ключові слова:** дифузний випромінювач, метрологічне забезпечення, інтегруюча сфера.

**Keywords:** diffusive light source, metrology equipment, integration sphere.

### ВСТУП

Дифузні випромінювачі змінної яскравості (ДВЗЯ) на основі оптично сполучених інтегруючих сфер [1,2] за рахунок високих метрологічних і фотометричних характеристик можуть використовуватися у вимірвальній техніці, наукових дослідженнях, установках для калібрування прецизійних цифрових відеосистем [3,4]. ДВЗЯ забезпечує яскравість вихідної апертури більше ніж  $10^3$  Вт/(ср·м<sup>2</sup>) при величині останньої не менше 0,2 м нерівномірності поля яскравості не більше 0,5 %. Динамічний діапазон таких випромінювачів складає  $10^4 - 10^5$ , а нелінійність характеристики яскравості на виході не перевищує 0,1 % [2,3].

Однак, беручи до уваги високі потенційні можливості таких систем, їх практичне використання, проектування і подальший розвиток утримується недостатнім рівнем теоретичних та експериментальних досліджень, розробкою практичних рекомендацій по конструюванню, підбором елементної бази і метрологічного забезпечення.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задачею роботи є отримання аналітичних залежностей ДВЗЯ спираючись на його теоретичне та експериментальне дослідження, оптимізація його конструктивних параметрів та розробка рекомендацій по проектуванню вимірвальних систем на його основі із заданими фотометричними і метрологічними параметрами.

### КОНСТРУКТИВНА СХЕМА. ОСНОВНІ СПІВВІДНОШЕННЯ ДВЗЯ

Конструктивна схема ДВЗЯ показана на рис. 1. Випромінювач складається із декількох (3..9) первинних інтегруючих сфер малого діаметра зі встановленими в них джерелами випромінювання і

оптично пов'язаних з однією вторинною сферою більшого діаметра, в вихідній апертурі якої безпосередньо формується калібрувальне поле яскравості. В місці оптичного сполучення первинної і вторинної сфер встановлено змінні діафрагми змінного січення, які дозволяють регулювати величину потоку випромінювання, що потрапляє із первинних сфер у вторинну сферу і відповідно змінюють яскравість у вихідній апертурі. За рахунок багатократних відбивань і розсіювання на внутрішніх поверхнях сфер відбувається інтегрування потоку джерел випромінювання і формування достатньо однорідного поля яскравості.

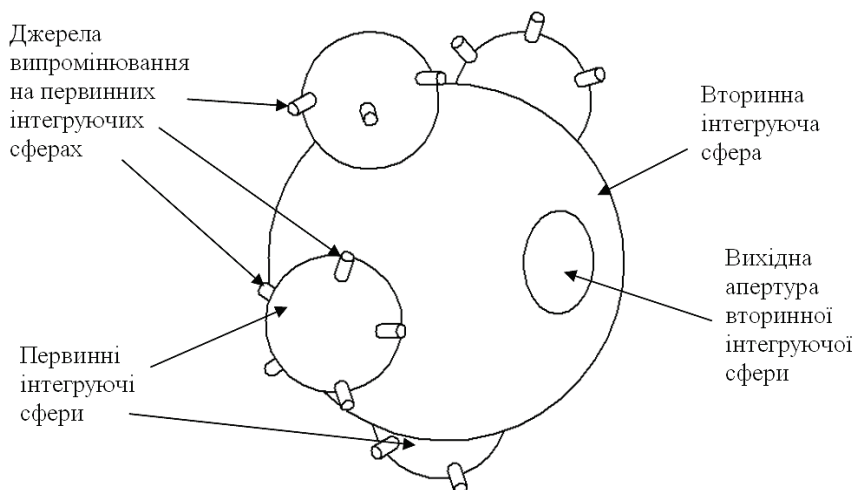


Рис. 1. Конструктивна схема ДВЗЯ

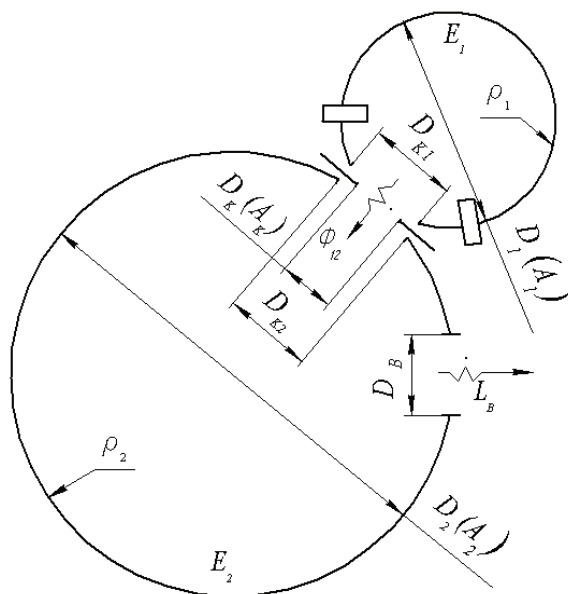


Рис. 2. Розрахункова схема ДВЗЯ

Достатньо повна теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючих сфер розглянута в [5,6], а для інженерного аналізу ДВЗЯ повністю підходить використання наступних спрощених залежностей.

Освітленість внутрішньої поверхні первинної інтегруючої сфери  $E_1$  визначиться виразом:

$$E_1 = \frac{N_{\text{ДВ}} \Phi_{\text{ДВ}}}{\pi D_1^2} \cdot \frac{\rho_1}{1 - \rho_1 \frac{\pi D_1^2 - A_{\text{К1}}}{\pi D_1^2}}, \quad (1)$$

де  $N_{ДВ}$  – кількість джерел випромінювання у первинній сфері;  $\Phi_{ДВ}$  – потік випромінювання від одного джерела випромінювання;  $A_1$ ,  $D_1$  – площа та діаметр первинної сфери відповідно, а зв'язок між ними описується наступним чином:

$$A_1 = 4\pi\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 = \pi D_1^2;$$

$\rho_1$  – інтегральний коефіцієнт відбивання поверхні первинної сфери;  $A_{К1}$  – площа вихідної апертури первинної сфери розраховується як площа сферичного сегменту:

$$A_{К1} = 2\pi \frac{D_1}{2} \left( \frac{D_1 - \sqrt{D_1^2 - D_{К1}^2}}{2} \right) = \frac{\pi}{2} D_1^2 \left( 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_{К1}}{D_1}\right)^2} \right).$$

Потік випромінювання, що надходить із первинної сфери у вторинну  $\Phi_{12}$  визначається за формулою:

$$\Phi_{12} = E_1 \cdot A_K, \quad (2)$$

де  $A_K$  – площа калібрувальної діафрагми між первинною та вторинною інтегруючими сферами.

Далі визначимо освітленість внутрішньої поверхні вторинної інтегруючої сфери  $E_2$ , в яку потрапляє потік від декількох первинних сфер, можна розраховувати по формулі, що аналогічна (1):

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{N_1 \Phi_{12}}{A_2} \cdot \frac{\rho_2}{\left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K \cdot N_1 - A_B}{A_2}\right)} = \\ &= \frac{N_1 N_{ДВ} \Phi_{ДВ} A_K}{A_1 A_2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_{К1}}{A_1}\right) \cdot \left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K \cdot N_1 - A_B}{A_2}\right)} = \\ &= \frac{N_1 N_{ДВ} \Phi_{ДВ} A_K}{(\pi D_1 D_2)^2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{\pi D_1^2 - A_{К1}}{\pi D_1^2}\right) \cdot \left(1 - \rho_2 \frac{\pi D_2^2 - A_K \cdot N_1 - \frac{\pi}{2} D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_B}{D_2}\right)^2}\right)}{\pi D_2^2}\right)}, \quad (3) \end{aligned}$$

де  $N_1$  – кількість первинних сфер, що оптично сполучені із вторинною сферою;  $A_2$ ,  $D_2$  – площа та діаметр вторинної сфери відповідно, а зв'язок між ними описується наступним чином:

$$A_2 = 4\pi\left(\frac{D_2}{2}\right)^2 = \pi D_2^2;$$

$\rho_2$  – інтегральний коефіцієнт відбивання поверхні вторинної сфери;  $N_1 \cdot A_K$  – сумарна площа калібрувальних діафрагм;  $A_B$ ,  $D_B$  – площа та діаметр вихідної апертури вторинної сфери відповідно.

Площа вихідної апертури може бути розрахована як площа сферичного сегмента:

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

Яскравість вихідної апертури знаходиться із виразу [7]:

$$L_B = \frac{E_2}{\pi} = \quad (4)$$

$$= \frac{N_1 N_{ДВ} \Phi_{ДВ} A_K}{\pi A_1 A_2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_{К1}}{A_1}\right) \cdot \left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K \cdot N_1 - A_B}{A_2}\right)} = \quad (5)$$

$$= \frac{N_1 N_{ДВ} \Phi_{ДВ} A_K}{\pi (\pi D_1 D_2)^2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{\pi D_1^2 - A_{К1}}{\pi D_1^2}\right) \cdot \left(1 - \rho_2 \frac{\pi D_2^2 - A_K \cdot N_1 - \frac{\pi}{2} D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_B}{D_2}\right)^2}\right)}{\pi D_2^2}\right)}$$

### ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРВИННИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ ДВЗЯ

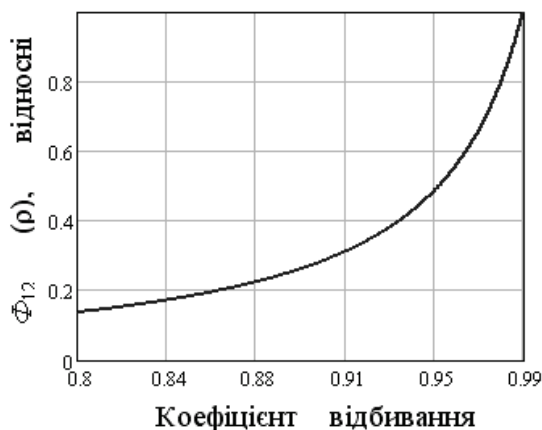
Проаналізуємо отримані вирази із метою отримання основних функціональних залежностей, необхідних для оптимізації конструктивних параметрів ДВЗЯ. Необхідно відмітити, що яскравість вихідної апертури буде визначатися кількістю первинних випромінювачів  $N_1$ , кількістю встановлених в них джерел випромінювання  $N_{ДВ}$ , діаметром випромінювачів  $D_1$  і коефіцієнтом відбиття поверхонь інтегруючих сфер  $\rho_1$  і  $\rho_2$ .

Для визначення оптимального числа джерел випромінювання і первинних випромінюючих сфер введемо коефіцієнт заповнення  $K_3$ , рівний відношенню кількості джерел випромінювання до діаметра первинної сфери:

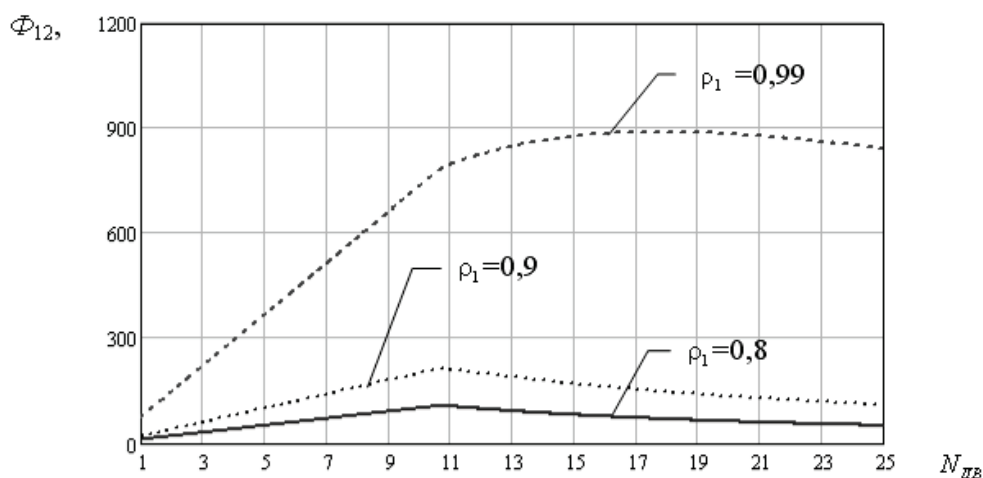
$$K_3 = \frac{N_{ДВ}}{D_1}. \quad (6)$$

Аналіз відомих конструкцій дифузних випромінювачів [8, 9], їх експериментальне і теоретичне дослідження [10] показали, що величина  $K_3$  для випромінювачів із розміщенням джерел випромінювання безпосередньо у вторинній сфері складає 12-16. Враховуючи, що у розглядуваній схемі ДВЗЯ джерела випромінювання винесені із вторинної сфери і безпосередньо вихідне поле яскравості не формують, величину  $K_3$  можна збільшувати до 50..60, але при цьому значно погіршується тепловий режим первинного випромінювача. Із цих міркувань для ДВЗЯ середньої яскравості величину  $K_3$  в залежності від розмірів джерела випромінювання має сенс вибирати в межах 30..50. Враховуючи ці значення  $K_3$ , розглянемо основні енергетичні залежності для первинної сфери, отримані з використанням (1)-(5) і представлені на рис. 3-6.

Відмітимо, перед усього, значне підвищення потоку  $\Phi_{12}$ , що потрапляє у вторинну сферу і, як наслідок, підвищення яскравості у вихідній апертурі ДВЗЯ при підвищенні коефіцієнта відбивання внутрішнього покриття більше ніж 0,90, особливо при малих коефіцієнтах заповнення (рис. 3). Очевидно, що використання традиційних матеріалів типу  $\text{BaSO}_4$  з меншим коефіцієнтом відбивання в ДВЗЯ високої яскравості нераціонально. Більш правильним є використання нових покриттів на основі політетрафторетилену [11], хоча вони і суттєво дорожчі.



а)



б)

Рис. 3. Вплив коефіцієнта відбиття поверхні первинного випромінювача на потік на його виході:  
 а) залежність потоку на виході первинної сфери від коефіцієнта відбиття її поверхні;  
 б) залежність потоку, що потрапляє у вторинну сферу від кількості джерел випромінювання і коефіцієнту відбивання за сталої заповнення  $K_3 = 40$  для діаметру вторинного випромінювача  $D_2 = 1$  м

Представляє інтерес залежність потоку  $\Phi_{12}$  від кількості використаних джерел випромінювання. З однієї сторони збільшення кількості джерел випромінювання призводить до росту цього потоку, а з другої – до збільшення діаметру первинної сфери при постійних коефіцієнті заповнення і відносному отворі  $D_{K1}/D_1$ . В результаті відбувається невеликий ріст корисного потоку, але до тих пір, поки виконується умова  $D_{K1} \leq D_{K2}$ . При  $D_{K1} > D_{K2}$  потік  $\Phi_{12}$  починає падати, так як в умовах він'єтування збільшення діаметра первинної сфери призводить до більш значного зменшення  $\Phi_{12}$ , ніж його ріст за рахунок збільшення кількості джерел випромінювання. Таким чином при проектуванні ДВЗЯ високої яскравості більш доцільно використовувати велику кількість первинних випромінювачів меншого діаметра при тій же або меншій кількості джерел випромінювання і постійному відносному отворі (рис. 4). На практиці значення  $N_1$  складає 5..7, оскільки його подальше збільшення ускладнює конструкцію ДВЗЯ.

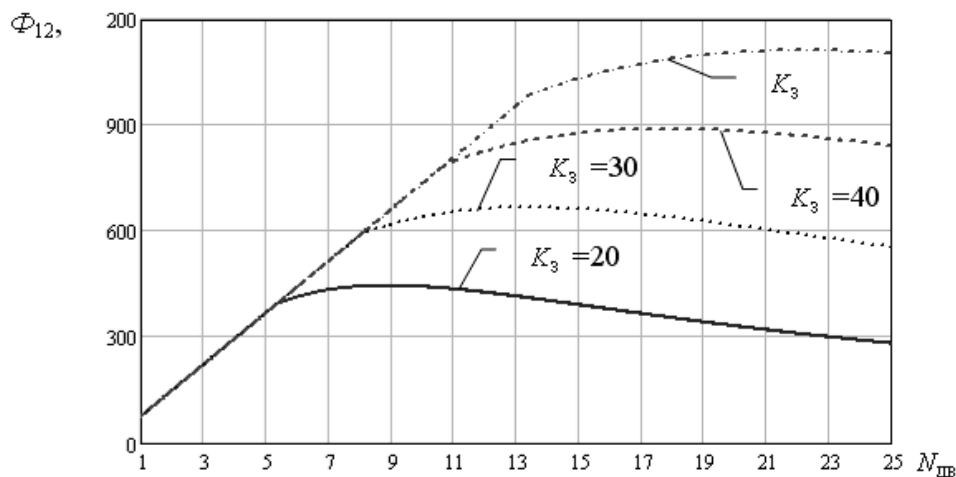


Рис. 4. Залежність потоку, що надходить до вторинної сфери від кількості джерел випромінювання і діаметра первинного випромінювача при  $D_2 = 1$  м

При виборі розмірів апертур (калібрувальних діафрагм) інтегруючих сфер, слід мати на увазі, що зменшення апертури при постійному діаметрі первинної сфери покращує інтегровальні властивості, але зменшує корисний потік. Отримати аналітичний вираз який пов'язує нерівномірність поля яскравості вихідної із відносним отвором випромінювача за рахунок великої кількості факторів, що впливають (відбиваючі властивості балонів джерел випромінювання і арматур, їх форми та розташування, конструкції інтегруючої сфери і т. п.) доволі складно, але експериментальні дослідження [10] показують, що при відношенні  $D_B / D_2 < 1/5$  можна досягнути нерівномірності менше ніж 0,5 %. Ріст відносного отвору суттєво погіршує нерівномірність поля яскравості, але для первинних випромінювачів, які безпосередньо беруть участь в його формуванні, відношення  $D_{K1} / D_1$  можна збільшити до 1/4 і, навіть, до 1/3. По цим же міркуванням вибираються і максимальні розміри калібрувальних діафрагм  $D_K$ .

Для полегшення вибору основних конструктивних елементів ДВЗЯ на рис. 5 показані фотометричні характеристики випромінювача, які отримані з використанням розглянутих залежностей.

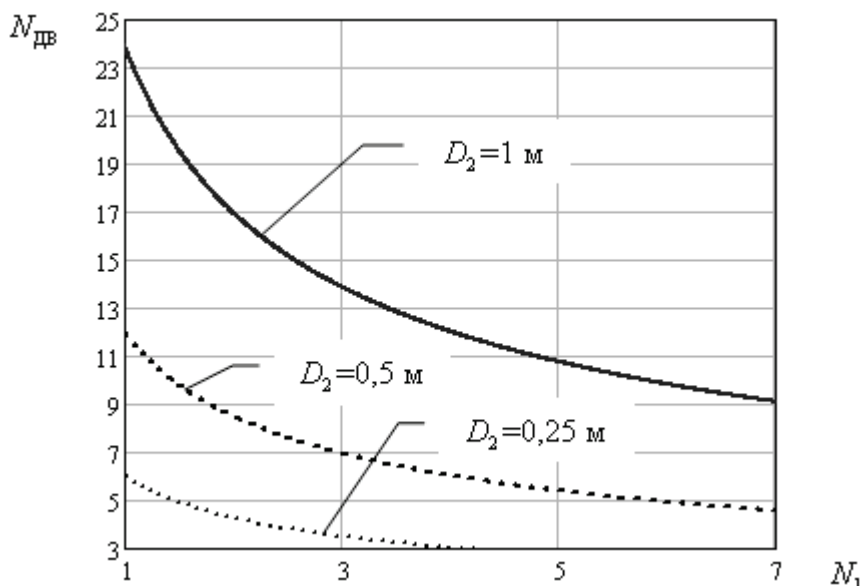


Рис. 5. Залежність загального числа джерел випромінювання ДВЗЯ від кількості первинних сфер при різних діаметрах вторинної сфери

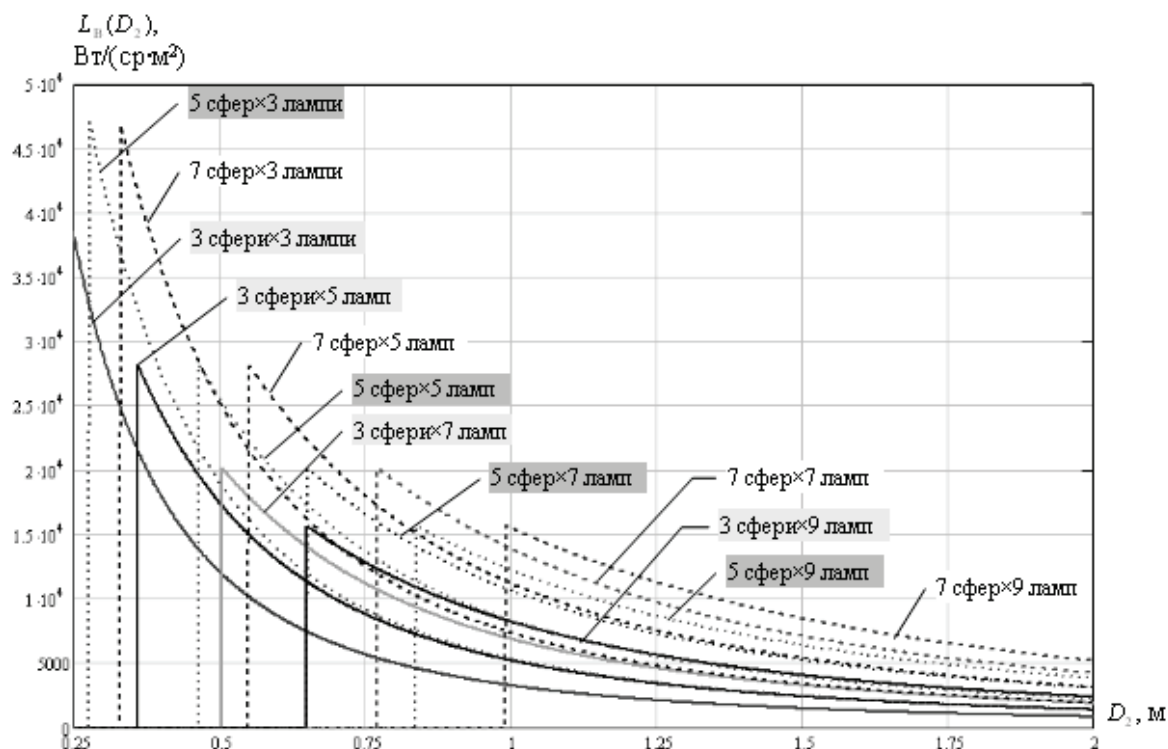


Рис. 6. Залежність яскравості у вихідній апертурі від конструктивних параметрів ДВЗЯ (коефіцієнт заповнення  $K_3=40$ ,  $\rho_1=0,99$  і  $\rho_2=0,99$ )

**ЕЛЕМЕНТНА БАЗА І СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВЗЯ**

Як було показано, найбільш ефективними заходами для підвищення яскравості ДВЗЯ залишаються підвищення коефіцієнта заповнення первинної сфери і збільшення коефіцієнту відбивання внутрішнього покриття. Для підвищення коефіцієнта заповнення необхідно, в свою чергу, використовувати джерела випромінювання з малими габаритами і більшою потужністю. По цьому принципу для використання в ДВЗЯ були підібрані малогабаритні галогенні лампи, параметри яких представлені в табл. 1[12].

У якості покриття для поверхонь інтегруючих сфер доцільно використовувати нові покриття типу “Spectralon” чи “Infragold” [13], спектральні характеристики котрих показані на рис. 7. Там же для порівняння показані спектральні характеристики сірчанокислого барію.

Таблиця 1.

**Параметри галогенних ламп розжарювання**

Тип лампи	Напруга, В	Потужність, Вт	Тривалість горіння, ч	Габаритні розміри (не більше), мм		Світловий потік, лм	Рекомендований коефіцієнт заповнення $K_3$ , шт/м
				Довжина з урахуванням виводів	Діаметр		
КГМ 9-75	9	75	5	45	11	1500	50
КГМ 12-100	12	100	5	44	11	3000	40
КГМ 24-150	24	150	5	47	12,5	5000	40
КГМ 24-250	24	250	5	55	13	8500	30
КГМ 30-300-2	30	300	5	55	15	10000	30

КГМ 36-400	36	400	0 <sup>6</sup>	60	18	14500	20
------------	----	-----	----------------	----	----	-------	----

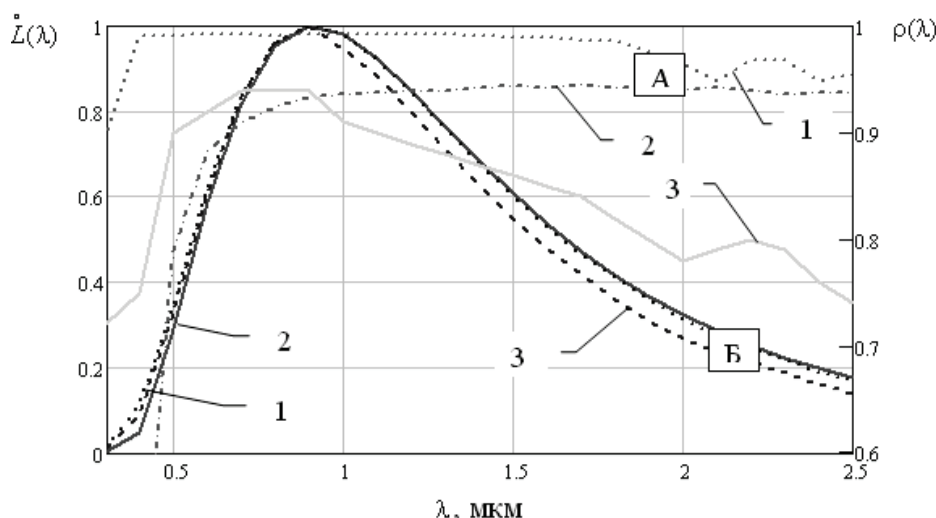


Рис. 7. Спектральні характеристики покриттів (А) і ДВЗЯ (Б) із цими покриттями; 1 – “Spectralon” SRS-99, 2 – “Infragold”, 3 – BaSO<sub>4</sub>. Джерело випромінювання – галогенна лампа з температурою  $T=3200K$

Необхідно відмітити, що в діапазоні 0,4-2,0 мкм інтегральний коефіцієнт відбивання “Spectralon” складає близько 0,99, що дозволяє отримати яскравість вихідної апертури з діаметром 0,25 м на рівні  $0,8-1,2 \cdot 10^3$  Вт/(ср·м<sup>2</sup>).

Для розрахунку спектральних характеристик можна взяти вираз (5) із заміною інтегральних параметрів  $\Phi_{дв}$ ,  $\rho_1$  і  $\rho_2$  на їх спектральні залежності  $\Phi_{дв}(\lambda)$ ,  $\rho_1(\lambda)$  і  $\rho_2(\lambda)$ :

$$L_B = \frac{E_2}{\pi} = \frac{N_1 N_{дв} \Phi_{дв}(\lambda) A_K}{\pi A_1 A_2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \rho_{1N}(\lambda) \frac{A_1 - A_{K1}}{A_1}\right) \cdot \left(1 - \rho_2 \rho_{2N}(\lambda) \frac{A_2 - A_K \cdot N_1 - A_B}{A_2}\right)} =$$

$$= \frac{N_1 N_{дв} \Phi_{дв}(\lambda) A_K \rho_1 \rho_2}{\pi (\pi D_1 D_2)^2 \left(1 - \rho_1 \rho_{1N}(\lambda) \frac{\pi D_1^2 - A_{K1}}{\pi D_1^2}\right) \cdot \left(1 - \rho_2 \rho_{2N}(\lambda) \frac{\pi D_2^2 - A_K \cdot N_1 - \frac{\pi}{2} D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_B}{D_2}\right)^2}\right)}{\pi D_2^2}\right)} \cdot (7)$$

Спектральні характеристики ДВЗЯ, отримані з використанням (7), із вказаними джерелами випромінювання та покриттями показані на рис. 7.

### МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВЗЯ

Основні похибки формування поля яскравості в вихідній апертурі ДВЗЯ пов’язані із деградацією з часом відбиваючих покриттів  $\rho_1$  і  $\rho_2$ , флуктуаціями напруги живлення і, як слідство, зміною випромінюваного потоку  $\Phi_{дв}$ , температурними коливаннями розмірів конструктивних елементів  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_K$ ,  $D_B$ , зміною характеристик середовища всередині інтегруючих сфер і т. п.

Якщо вважати, що ДВЗЯ працює в усталеному режимі, а фактори, що впливають на яскравість в вихідній апертурі вважати статистично незалежними, то похибка установки яскравості у вихідній апертурі, яка обумовлена частковими похибками окремих факторів  $\Delta\Phi_{дв}$ ,  $\Delta\rho_1$ ,  $\Delta\rho_2$ ,  $\Delta D_1$ ,  $\Delta D_2$ ,



$\Delta D_K$  і  $\Delta D_B$  в першому наближенні можна описати виразом, який отримуємо з формули (4) [14]:

$$\frac{\Delta L_B}{L_B} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \Phi_{ДВ}}\right)^2 \left(\frac{\Delta \Phi_{ДВ}}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \rho_1}\right)^2 \left(\frac{\Delta \rho_1}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \rho_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta \rho_2}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_1}\right)^2 \left(\frac{\Delta D_1}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta D_2}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_K}\right)^2 \left(\frac{\Delta D_K}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta D_B}{\bar{L}_B}\right)^2}, \quad (8)$$

де  $\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \Phi_{ДВ}}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \rho_1}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \rho_2}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_1}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_2}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_K}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_B}$  – часткові похідні відносно первинних похибок або їх коефіцієнти впливу на сумарну похибку.

Формули для розрахунку відповідних коефіцієнтів впливу приведені в табл. 2.

При чисельному аналізі сумарної похибки установки яскравості вихідної апертури були використані параметри ДВЗЯ, що розраховувався для калібрування широкоспектральних скануючих пристроїв космічного базування типу "Egypstat – 1" [9] (галогенна лампа КГМ-30-300-2,  $\Phi_{ДВ}=100$  Вт,  $D_1=0,25$  м,  $D_2=1$  м,  $D_K=0,05$  м,  $D_B=0,2$  м,  $N_1=3$ ,  $N_{ДВ}=5$ ).

Відповідні числові значення коефіцієнтів впливу, отриманих для вказаних значень параметрів, представлені в табл. 2, а розраховані по формулі (8) залежності похибки установки яскравості вихідної апертури  $\Delta L/L$  від первинних похибок  $\Delta \Phi_{ДВ}$ ,  $\Delta \rho_1$ ,  $\Delta \rho_2$ ,  $\Delta D_1$ ,  $\Delta D_2$ ,  $\Delta D_K$  і  $\Delta D_B$  показані на рис.8.

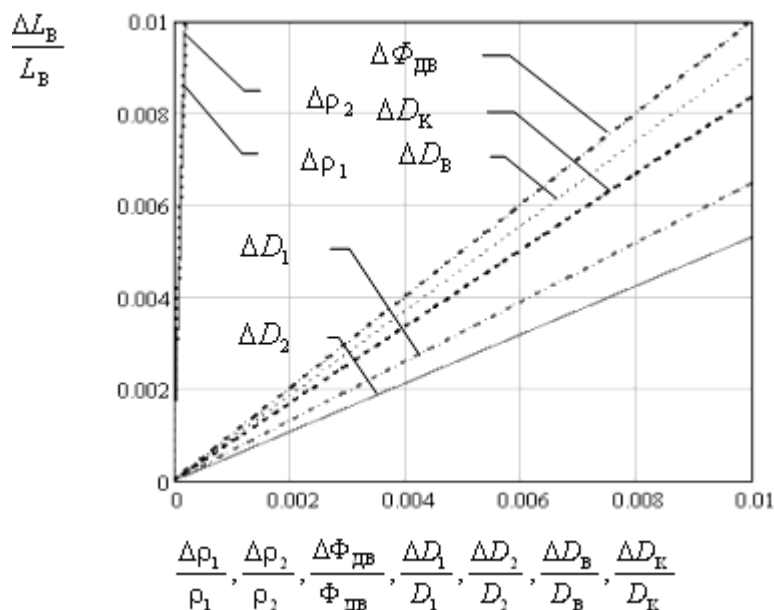


Рис. 8. Залежність похибки установки вихідної яскравості ДВЗЯ від відносних похибок його параметрів

Відзначимо, що найбільший вклад в сумарну похибку вносять похибки внутрішніх покриттів інтегруючих сфер  $\Delta \rho_1$ ,  $\Delta \rho_2$ , нестабільність потоку джерел випромінювання  $\Delta \Phi_{ДВ}$ , зміна діаметра вихідної апертури  $\Delta D_B$  і похибка калібрувальної діафрагми  $\Delta D_K$ . Похибка діаметра первинної і вторинної сфер  $\Delta D_1$  і  $\Delta D_2$  найменше впливають на сумарну похибку, але знехтувати ними не можна. Проаналізуємо вказані похибки найбільш детально.

Нестабільність внутрішнього покриття інтегруючих сфер обумовлена різними факторами: деградацією матеріалу, його гігроскопічністю, запиленістю і т. п.

Таблиця 2.

Коефіцієнти впливу первинних похибок ДВЗЯ

Джерело похибки	Коефіцієнт впливу	Числове знач. коеф. впливу
Нестабільність джерела випромін. $\Delta\Phi_{\text{ДВ}}$	$\frac{\partial L_B}{\partial \Phi_{\text{ДВ}}} = \frac{N_1 N_{\text{ДВ}} \rho_1 \rho_2 A_K}{\pi \cdot A_1 A_2 \cdot \left[ 1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_K}{A_1} \right] \cdot \left[ 1 - \rho_2 \frac{A_2 - N_1 A_K - A_B}{A_2} \right]}$	$34,2 \text{ ср}^{-1} \cdot \text{м}^2$
Нестабільність внутрішнього покриття $\Delta\rho_1$	$\frac{\partial L_B}{\partial \rho_1} = \frac{N_1 N_{\text{ДВ}} \Phi_{\text{ДВ}} \rho_2 A_K A_1}{\pi \cdot (A_1 - \rho_1 A_1 + \rho_1 A_K)^2 \cdot (A_2 - \rho_2 A_2 + \rho_2 N_1 A_K + \rho_2 A_B)}$	$1,74 \cdot 10^5 \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$
Нестабільність внутрішнього покриття $\Delta\rho_2$	$\frac{\partial L_B}{\partial \rho_2} = \frac{N_1 N_{\text{ДВ}} \Phi_{\text{ДВ}} \rho_1 A_K A_1}{\pi \cdot (A_1 - \rho_1 A_1 + \rho_1 A_K) \cdot (A_2 - \rho_2 A_2 + \rho_2 N_1 A_K + \rho_2 A_B)^2}$	$1,6 \cdot 10^5 \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$
Зміна діаметру первинної сфери $\Delta D_1$	$\frac{\partial L_B}{\partial D_1} = 8 \cdot \frac{N_1 N_{\text{ДВ}} \Phi_{\text{ДВ}} \rho_1 \rho_2 A_K D_1 (\rho_1 - 1)}{(\pi \cdot D_1^2 (\rho_1 - 1) - \rho_1 A_K)^2 \cdot (4A_2 - 4\rho_2 A_2 + 4\rho_2 N_1 A_K + 4\rho_2 A_B)^2}$	$-8,86 \cdot 10^3 \text{ Вт}/[(\text{ср} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}]$
Зміна діаметру вторинної сфери $\Delta D_2$	$\frac{\partial L_B}{\partial D_2} = -8 \cdot \frac{N_1 N_{\text{ДВ}} \Phi_{\text{ДВ}} \rho_1 \rho_2 A_K D_2 (\rho_1 - 1)}{(A_1 (\rho_1 - 1) - \rho_1 A_K) \cdot (\pi \cdot D_2^2 (\rho_2 - 1) - 4\rho_2 (N_1 A_K + A_B))^2}$	$-1,8 \cdot 10^3 \text{ Вт}/[(\text{ср} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}]$
Нестабільність калібрувальної апертури $\Delta D_K$	$\frac{\partial L_B}{\partial D_K} = -8 \cdot \frac{N_1 N_{\text{ДВ}} \Phi_{\text{ДВ}} \rho_1 \rho_2 D_K (16 \cdot A_1 A_2 (\rho_2 + \rho_1 - \rho_1 \rho_2 - 1) + 16 \cdot A_1 A_B \rho_2 (\rho_1 - 1) + \pi^2 \cdot D_K^4 \rho_1 \rho_2 N_1)}{(4A_1 - 4\rho_1 A_1 + \pi \rho_1 D_K^2)^2 \cdot (4A_2 - 4\rho_2 A_2 + \pi \cdot \rho_2 N_1 D_K^2 + 4\rho_2 A_B)^2}$	$5,72 \cdot 10^4 \text{ Вт}/[(\text{ср} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}]$
Нестабільність вихідної апертури $\Delta D_B$	$\frac{\partial L_B}{\partial D_B} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{N_1 N_{\text{ДВ}} \Phi_{\text{ДВ}} \rho_1 \rho_2^2 A_K D_B}{\left[ A_1 - \rho_1 (A_1 - A_2) \right] \cdot \left[ A_2 - \rho_2 \cdot \left[ A_2 - N_1 A_K - \frac{1}{2} \pi \cdot D_2^2 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{D_B}{D_2} \right)^2} \right] \right] \right]^2 \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{D_B}{D_2} \right)^2}}$	$-1,6 \cdot 10^4 \text{ Вт}/[(\text{ср} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}]$

Для кожного з використовуваних на практиці покриттів ці фактори проявляються в різній степені, але для більшості традиційних покриттів ( $BaSO_4$ ,  $MgO$ ,  $Al$  і др.) сумарна нестабільність перевищує 0,05 % за годину [5]. Суттєво кращі характеристики мають нові матеріали, особливо на основі політетрафторетилену [13]. В табл. 3 приведені характеристики деградації з часом покриття “Spectralon” SRS-99, яке здатне забезпечити стабільність характеристик навіть при доволі довгій експлуатації з похибкою менше 0,01 %. До того ж ці покриття надійно працюють при великому перепаді температур, що особливо важливо для первинних інтегруючих сфер.

Нестабільність живлення джерел випромінювання призводить до зміни як величини випромінювального потоку так і його спектрального складу.

Таблиця 3.

**Старіння матеріалу “Spectralon” SRS-99**

$\lambda$ , нм	Початковий коефіцієнт відбив.	Коеф. відбив. після витримки		
		1 міс.	4 міс.	1,5 року
400	0,988	0,987	0,988	0,986
450	0,990	0,988	0,988	0,990
500	0,989	0,985	0,987	0,985
550	0,987	0,983	0,987	0,986
600	0,987	0,984	0,988	0,988
650	0,987	0,985	0,988	0,988
700	0,986	0,983	0,988	0,987

Числові значення цих похибок, отриманих для різних величин пульсації живлячої напруги представлені в табл. 4 і дозволяють оцінити їхній вплив в різних випадках [16, 17].

Таблиця 4.

**Похибка джерел випромінювання**

Нестабільність живл., $\pm \overset{\circ}{U} \cdot 100 \%$	Зміщення максимуму СГЕЯ $\pm \Delta\lambda$ , нм	Зміна яскравості $\pm \Delta L_{дв} / L_{дв}$ , %
1	8,1	3,1
0,1	0,8	0,32
0,01	0,08	0,032

Примітка: приведена величина  $\Delta L_{дв} / L_{дв}$  в цьому розділі відноситься тільки до аналізу джерела випромінювання.

Очевидно, що основним методом зменшення розглядуваних похибок є використання високо стабільних джерел живлення та роздільно-групове підключення джерел випромінювання первинних сфер до декількох електрично розв'язаних блоків живлення. Наприклад, живлення джерел випромінювання ДВЗЯ з 15 лампами (групи по 5 ламп) від трьох блоків зменшує похибку установки вихідної яскравості приблизно в 1.7 разів.

Характеристики деяких джерел живлення, які можуть використовуватися з ДВЗЯ представлені в табл. 5 [16-18] і дозволяють чисельно оцінити похибку джерел випромінювання для різних випадків.

Таблиця 5.

**Дані про деякі стабільні джерела живлення для ламп накаливання**

	MPS-3005L-1 фірми “MATRIX”	БП40/30-ПУ фірми “ПУЗАНОВ ЭЛЕКТРОНИКС”	ДЗ6-10-01Ц “Дельта, КП”
Вихідна напруга, В	0 – 30	0 – 40	0 – 36
Струм навантаження, А	0 – 5,0	0 – 30	0,2 – 10
Нестабільність напруги під навантаженням, мВ	$\pm 5$	$\pm 2$	$\pm 7$
Пульсації вихідної напруги не більше, %	$\pm 0,003$	$\pm 0,025$	$\pm 0,05$

Треба зауважити, що стабілізація напруги живлення в межах 0,05% є досить реальною задачею навіть при значному струмі, що споживається лампами ДВЗЯ.

Зміна параметрів конструктивних елементів ДВЗЯ хоч і є, у відносних величинах, суттєвим джерелом похибок (рис. 8), та при правильних виборі матеріалу і конструкторському підході може бути доведена до долів відсотка навіть при доволі жорсткому температурному режимі випромінювача. В табл. 6 приводяться розраховані по коефіцієнтам лінійного температурного розширення відхилення розмірів інтегруючих сфер і калібрувальних діафрагм для різних матеріалів і різних температурних режимів [19].

Таблиця 6.

**Відхилення параметрів конструктивних елементів ДВЗЯ**

	Матеріал	Нагрів $\Delta t, ^\circ\text{C}$	Початкове знач. парам.	Розраховане відхил. парам., %
Первинна сфера	Дюралюміній	100	$D_1 = 0,25 \text{ м}$	0,22
	Латунь			0,19
	Сталь			0,10
Вторинна сфера	Полістирол	50	$D_2 = 1 \text{ м}$	0,40
	Фторопласт			0,12
	Дюралюміній			0,11
Калібрувальна діафрагма	Латунь	100	$D_K = 0,05 \text{ м}$	0,19
	Сталь			0,10
	Інвар (36,1%)			0,009

Очевидно, що ефективне охолодження первинних інтегруючих сфер може суттєво знизити ці похибки. Такий же результат дає використання в ДВЗЯ надяскравих світлодіодів, але спектр їх випромінювання значно вузьчий ніж у ламп накаливання і випромінюваний потік менший.

Асферичність та інші порушення форми інтегруючої сфери мало впливають на зміну вихідної яскравості, носять систематичний характер і можуть бути враховані при калібруванні ДВЗЯ.

На рис. 9 показані залежності похибок установки яскравості у вихідній апертурі від первинних похибок основних елементів ДВЗЯ з урахуванням їх реальних величин, отриманих вище.

При цьому для чіткішого розуміння були використані максимальні значення. Однак, навіть в цьому випадку максимальна похибка установки яскравості не перевищує 1 % , чого достатньо для більшості фотометричних задач.

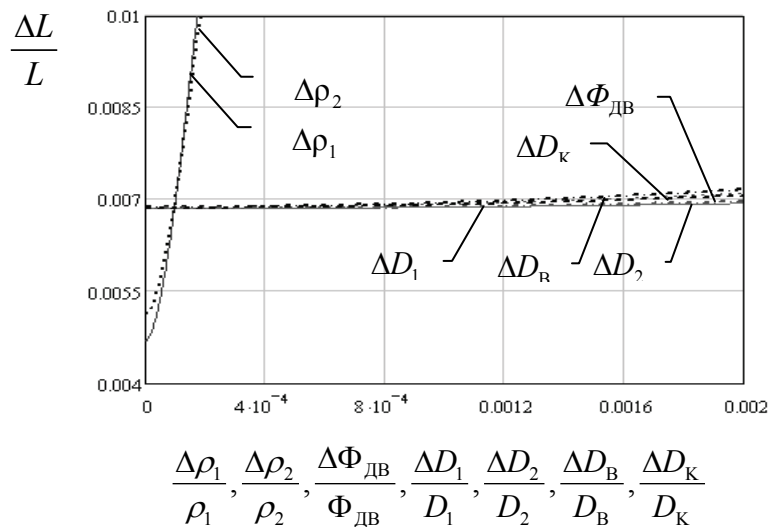


Рис. 9. Залежність похибки установки вихідної яскравості ДВЗЯ від первинних похибок при  $D_K = 0,05 \text{ м}$ ,  $\Phi_{\text{ДВ}} = 100 \text{ Вт}$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = 0,99$ ,  $D_1 = 0,25 \text{ м}$ ,  $D_2 = 1 \text{ м}$ ,  $D_{\text{В}} = 0,2 \text{ м}$ ,  $N_1 = 3$ ,  $N_{\text{ДВ}} = 5$

## ВИСНОВКИ

Розроблена теорія, отримані і проаналізовані основні енергетичні співвідношення ДВЗЯ. Показано, що максимальна яскравість і динамічний діапазон випромінювача забезпечуються, перед

усього, високим коефіцієнтом відбивання внутрішніх поверхонь і великою щільністю установки джерел випромінювання в первинній інтегруючій сфері. З цією метою доцільно збільшувати кількість первинних випромінювачів при обмеженому числі джерел випромінювання.

Розроблені рекомендації по вибору елементної бази ДВЗЯ. Установлено, що використання малогабаритних галогенних ламп покриття типу "Spectralon" дозволяють забезпечити вихідну яскравість вихідної апертури 0,5...1,8 мкм. Проаналізовані метрологічні характеристики ДВЗЯ. Показано, що при використанні рекомендованих параметрів і елементів ДВЗЯ, похибки установки яскравості випромінювача не перевищують 1 %, що є абсолютно достатнім для вирішення більшості сучасних фотометричних задач.

Отримані результати будуть корисні спеціалістам в області прецизійної фотометрії і розробникам апаратури для енергетичної калібрування широкого кола оптико-електронних приладів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 78609 Україна, МПК (2006) G01J 1/10, F21V 9/00. Дифузний випромінювач / Міхеєнко Л. А., Колобродов В. Г., Микитенко В. І., та ін.; патентний власник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – №200504103; заявка 28.04.2005; опубл. 10.04.2007, Бюл. №4. – 2007. – 2 с., 1 іл.
2. Излучатель переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер / Михеєнко Л. А., Боровицкий В. Н. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2006. - №6. – С.61-64.
3. Дифузний випромінювач змінної яскравості для калібрування прецизійних цифрових відео систем / Міхеєнко Л. А., Шишкін В. А.// Наукові вісті НТУУ "КПІ". - 2009. - №1. – С.114-120.
4. Стендова апаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування / Колобродов В. Г., Микитенко В. І., Міхеєнко Л. А.// Наукові вісті НТУУ "КПІ".—2003. - №3.—с. 98-104.
5. Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери / Колобродов В. Г., Микитенко В. І., Міхеєнко Л. А.// Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2005. - №4. – С.106-114.
6. Осветительный канал цифрового оптического микроскопа на базе диффузного излучателя / Михеєнко Л. А., Боровицкий В. Н.// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2006. - С.20-27.
7. Сапожников Р. А. Теоретическая фотометрия. – М.: Энергия, 1977. – 268 с.
8. Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ "Ресурс-01" / Киселев И. А., Коростылев А. Н., Караева М. К. и др.// Исследование Земли из космоса. – 1991. - №2. – С.34-43.
9. Методы и средства измерений энергетических характеристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли / Л. В. Вариченко, В. Г. Колобродов, Я. Е. Ладка, В. И. Микитенко, Л. А. Михеєнко.// Космічна наука і технологія. – 2006. – Т12.№2/3. – С.59-69.
10. Экспериментальное исследование диффузного излучателя на основе интегрирующей сферы / Михеєнко Л. А., Боровицкий В. Н., Гордиенко Ю. А. // Научный журнал "Вісник" НТУУ "КПІ". Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2007. – Вип. 34. – С.60-67.
11. Reflection properties of press polytetrafluorethylene powder / Weidner, Hisia J. J. // J. Opt. Soc. Of Amer. – 1981. – V.71 – P.856-861.
12. Лампы накаливания галогенные / Каталог продукции. – М.: Информэлектро, 1988. – 12 с.
13. Journal "A Guide to Reflectance Coatings and Materials" // Materials and Coatings. – Режим доступу: [http://labsphere.com/data/userFiles/Color%20Standards%20Product%20Sheet\\_5.pdf](http://labsphere.com/data/userFiles/Color%20Standards%20Product%20Sheet_5.pdf). – "Labsphere" company.
14. Кушнир Ф. В. Электрорадиоизмерения. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
15. Исследование точности диффузного излучателя на основе интегрирующей сферы / Михеєнко Л. А., Гордиенко Ю. А.// "Вісник" НТУУ "КПІ". Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2008. – Вип. 35. – С.37-41.
16. Лабораторные трансформаторные источники питания постоянного тока // Каталог продукции. – Режим доступу: <http://www.szmatrix.com/English/product/MPS-3002L.htm>. – ShenZhen Matrix Technology Inc.
17. Лабораторные источники питания // Каталог продукции. – Режим доступу: <http://www.4452.ua.all-biz.info>. – КП "Дельта".
18. Мощные высокостабильные источники постоянного тока // Каталог продукции. – Режим доступу: <http://www.ps.puzanov.ru/product/PS4030.htm>. – "ПУЗАНОВ ЭЛЕКТРОНИКС".
19. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. – М.: изд. Наука, 1972. – С.64, 83.

Надійшла до редакції 17.04.2010р.

**МІХЕСНКО ЛЕОНІД АНДРІЙОВИЧ** – к.т.н, доц. каф. оптичних та оптико-електронних приладів приладобудівного факультету Національного технічного університету України “Київського політехнічного інституту”, м. Київ, Україна.

**ГОРДІЄНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ** – студент каф. оптичних та оптико-електронних приладів приладобудівного факультету Національного технічного університету України “Київського політехнічного інституту”, м. Київ, Україна.