



УСТАНОВКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА РОЗСІЮВАННЯ ОБ'ЄКТИВІВ У ВІДПОВІДНОСТІ ДО НОВОГО МЕТОДУ ЙОГО ВИЗНАЧЕННЯ

С.Ф. Камінський, заступник начальника відділу казенного підприємства спеціального приладобудування "Арсенал" (КП СГБ "Арсенал"), м. Київ

М.І. Лихоліт, доктор технічних наук, доцент, директор – головний конструктор КП СГБ "Арсенал", м. Київ
В.М. Тягур, кандидат технічних наук, заступник начальника комплексу – начальник відділення КП СГБ "Арсенал", м. Київ



С.Ф. Камінський

М.І. Лихоліт

В.М. Тягур

Запропоновано до складу установки для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктивів за новим методом ввести додаткові елементи, що забезпечило значне зменшення довжини установки (в 10–20 разів) та дозволило вперше розділити коефіцієнт розсіювання об'єктива на дві складові розсіювання світла: на елементах конструкції об'єктива і при проходженні світла: через оптичні елементи об'єктива. Проведено порівняння результатів вимірювання на новій та на стандартизованій установках для різних об'єктивів, отримано допустиму розбіжність даних, чим підтверджується можливість використання установки значно меншої довжини.

It is offered to introduce the supplementary elements to the apparatus constitution for the determination of the scattering coefficient of lenses by the new method which has provided the considerable reduction of the apparatus length (10–20 times) and enabled for the first time to divide the scattering coefficient of lens into two components such as on the elements on the lens construction and during the light transmitting by the optical elements of lens. The comparison of the measurement results for the different kinds of lenses using new and standardized apparatuses is made, and obtained data discrepancy is acceptable, therefore the possibility of application of the lens with considerably smaller length is confirmed.

У статті [1] запропоновано нові метод і установку для визначення коефіцієнта розсіювання довгофокусних об'єктивів з великими вхідними отворами, що в порівнянні зі стандартизованими методом і установкою [2] забезпечують зменшення габаритів фотометричної кулі та відносної похибки вимірю-

вання, дозволяють спростити склад установки та розширити функціональні можливості контролю, а також анонсовано напрямок подальшої роботи – пошук шляхів зменшення розміру установки.

Результатом проведеної роботи стало доповнення складу установки новими елементами, а саме запропоновано між об'єктивом, що контролюється, та діафрагмою фотоелектричного приймача, концентрично з нею, вставляти додаткову діафрагму (або непрозорий екран), яка (який) може виводитися за межі променів, що розповсюджуються від об'єктива до діафрагми фотоелектричного приймача. Додаткова діафрагма (екран) повинна (повинен) мати такий діаметр отвору (діаметр), щоб відношення цього діаметра до відстані між фокальною площиною об'єктива і додатковою діафрагмою (екраном) було рівним відносному отвору об'єктива.

Додаткова діафрагма (екран) може виконуватися рухомою (рухомим) з можливістю її (його) переміщення уздовж заднього фокального відрізка об'єктива на таку відстань від діафрагми фотоелектричного приймача, на якій відношення діаметра отвору додаткової діафрагми (діаметра екрана) до відстані між нею (ним) і фокальною площиною об'єктива буде рівним відносному отвору об'єктива. При цьому повинна бути забезпечена можливість виведення додаткової діафрагми (екрана) за межі променів, які розповсюджуються від об'єктива до діафрагми фотоелектричного приймача, на краях інтервалу переміщення. Схему установки з додатковою діафрагмою (екраном) наведено на рис. 1.

Введення до складу установки додаткової діафрагми або непрозорого екрана дозволяє визначати як значення коефіцієнта розсіювання C , так і його складові C_1 , C_2 і C_3 (див. рис. 2, 3) за такими формулами:

- при використанні діафрагми (рис. 2):

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = \frac{E'_1 - E'_3}{E'_2} + \frac{(E'_2 - E'_4) - (E'_1 - E'_3)}{E'_2} + \frac{E'_4 - E'_3}{E'_2} = \frac{E'_2 - E'_3}{E'_2} = \frac{E'_1 - E'_3}{E'_2} + \left(1 - \frac{E'_1}{E'_2}\right),$$

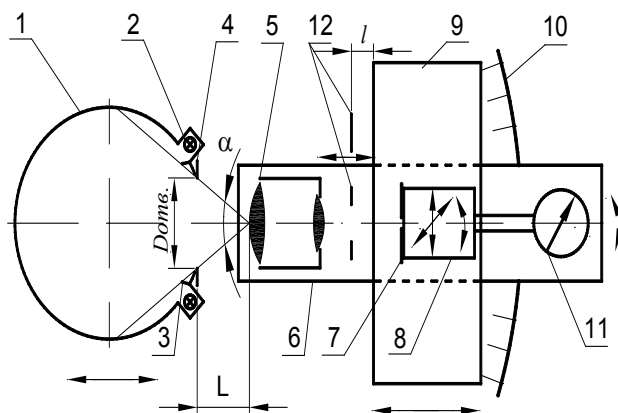


Рис. 1. Схема установки для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктивів за новим методом: 1 – фотометрична куля; 2 – джерело світла; 3 – заслінки; 4 – діафрагма кулі; 5 – об'єктив, що контролюється; 6 – поворотний важіль; 7 – діафрагма фотоприймача; 8 – фотоприймач; 9 – направляюча переміщення фотоприймача; 10 – горизонтальний лімб поворотного пристрою (вертикальний лімб не показано); 11 – вимірювальний прилад; 12 – додаткова діафрагма (екран)

причому

$$C_1 = \frac{E'_1 - E'_3}{E'_2}; \quad C_1 + C_2 = \frac{E'_2 - E'_4}{E'_2} = 1 - \frac{E'_4}{E'_2};$$

$$C_2 + C_3 = 1 - \frac{E'_1}{E'_2},$$

де C_1 та C_2 – складова, що створюється променями, які знаходяться за межами кутової апертури об'єктива, при $L = L_{\max}$ та її приріст при зміні L від L_{\max} до L_{\min} відповідно; C_3 – приріст складової, що створюється променями, які знаходяться в межах кутової апертури об'єктива, при зміні L від L_{\max} до L_{\min} , причому на відстанях $L_{\max} \geq 29D_{\text{отв}}$ він нехтовно малий; E'_1, E'_2, E'_3, E'_4 – опроміненості, які створюються об'єктивом у його фокальній площині при $L = L_{\max}, L = L_{\min}$ і виведеній діафрагмі (E'_1, E'_2) та при $L = L_{\max}, L = L_{\min}$ і введеної діафрагмі (E'_3, E'_4);

• при використанні екрана (рис. 3):

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = \frac{E'_3}{E'_2} + \frac{E'_4 - E'_3}{E'_2} +$$

$$+ \frac{(E'_2 - E'_1) - (E'_4 - E'_3)}{E'_2} = \frac{E'_3 + (E'_2 - E'_1)}{E'_2} =$$

$$= \frac{E'_3}{E'_2} + \left(1 - \frac{E'_1}{E'_2}\right),$$

причому

$$C_1 = \frac{E'_3}{E'_2}; \quad C_1 + C_2 = \frac{E'_4}{E'_2}; \quad C_2 + C_3 = 1 - \frac{E'_1}{E'_2},$$

де E'_1, E'_2, E'_3, E'_4 – опроміненості, які створюються об'єктивом у його фокальній площині при

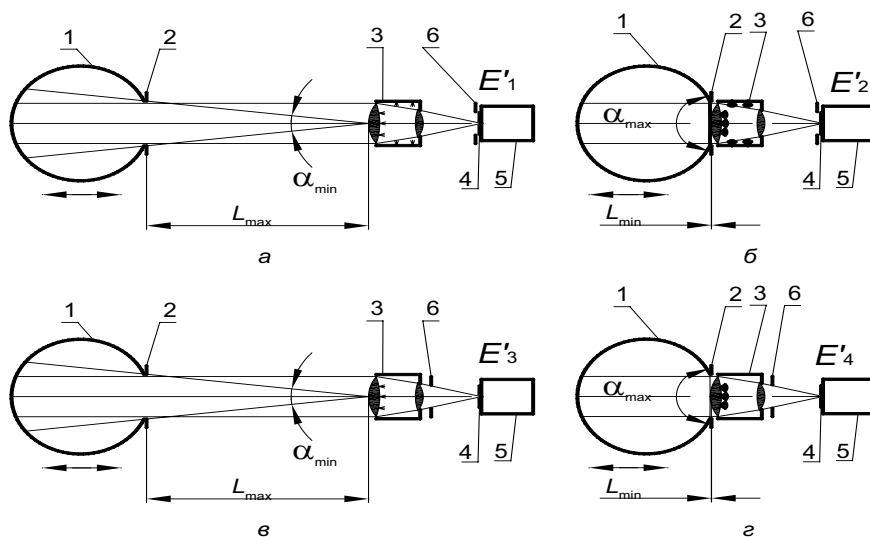


Рис. 2. Схеми взаємного розташування елементів установки з додатковою діафрагмою при вимірюванні кожної з опроміненостей E'_1 (а), E'_2 (б), E'_3 (в), E'_4 (г): 1 – фотометрична куля (напівкуля); 2 – діафрагма кулі; 3 – об'єктив, що контролюється; 4 – діафрагма фотоприймача; 5 – фотоприймач; 6 – додаткова діафрагма

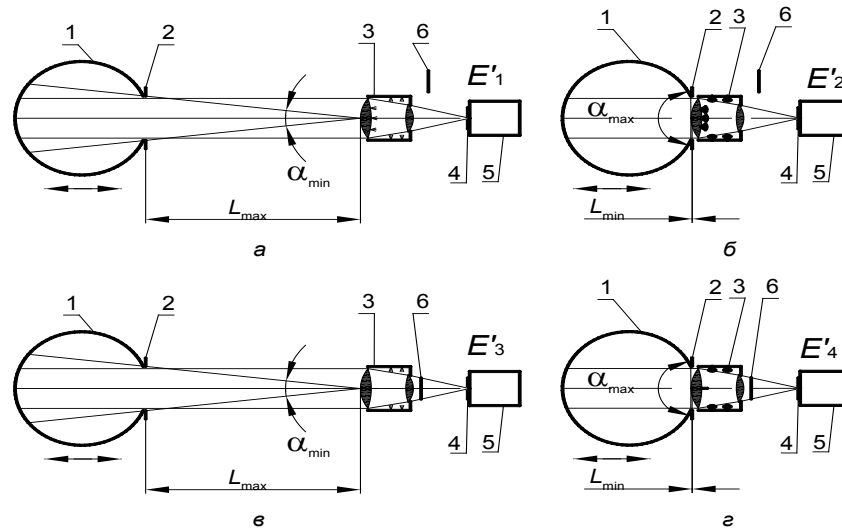


Рис. 3. Схеми взаємного розташування елементів установки з непрозорим екраном при вимірюванні кожної з опроміненостей E'_1 (а), E'_2 (б), E'_3 (в), E'_4 (г): 1 – фотометрична куля (напівкуля); 2 – діафрагма кулі; 3 – об'єктив, що контролюється; 4 – діафрагма фотоприймача; 5 – фотоприймач; 6 – непрозорий екран

$L = L_{max}$, $L = L_{min}$ і виведеному екрані (E'_1 , E'_2) та при $L = L_{max}$, $L = L_{min}$ і введеному екрані (E'_3 , E'_4).

З наведених формул видно, що складова C_1 залежить від значення L_{max} і зменшується при його збільшенні, а сума складових $C_2 + C_3$ при цьому збільшується, тому на досить великій відстані L_{max} значенням складової C_1 можна знехтувати. Тоді формули для визначення коефіцієнта розсіювання C при використанні діафрагми чи екрана перетворюються у формулу визначення коефіцієнта розсіювання C без використання діафрагми чи екрана [1], а відстань L_{max} відповідно буде не меншою $29D_{отв.}$. Навпаки, при зменшенні L_{max} складова C_1 збільшується, а сума складових $C_2 + C_3$ зменшується. Якщо при цьому сума складових $C_1 + C_2 + C_3$ буде змінюватися досить повільно, то можна буде виконувати вимірювання коефіцієнта розсіювання C при значно менших відстанях L_{max} . У зв'язку з цим слід звернути увагу на те, що значення $C_1 + C_2$ не залежить від значення L_{max} , а значення C_3 від L_{max} залежить і зменшується при зменшенні L_{max} . Відповідно буде зменшуватися і розраховане значення коефіцієнта розсіювання C , тобто буде збільшуватися похибка його вимірювання, тому що до бюджету похибок розрахованого значення коефіцієнта розсіювання C додається похибка, значення якої дорівнює значенню зміни складової C_3 при зміні відстані L від $L_{max} \geq 29D_{отв.}$ до L'_{max} . Цією похибкою можна знехтувати, якщо, у відповідності до критерію неістотної похибки [3], її значення буде втричі менше від значення відносної похибки вимірювання коефіцієнта розсіювання C . Так, при відносній похибці вимірювання коефіцієнта розсіювання C 10 % зміна складової C_3 не повинна перевищувати 3,3 % від значення коефіцієнта розсіювання C .

Використання додаткової діафрагми або непрозорого екрана дозволяє отримувати залежність від кутового розміру джерела випромінювання α не тільки коефіцієнта розсіювання C , а також і його складових C_1 , C_2 і C_3 . При цьому, як показали експериментальні дослідження об'єктів, складова C_3 значно менша від $C_1 + C_2$ (в 4...9 разів). При $C \leq 0,3$ і при відносному впливі складової C_3 на коефіцієнт розсіювання C , що не перевищує $0,25$, $C_3 \leq 0,3 \cdot 0,25 = 0,075$. Припустимо, що відстань $L'_{max} = 2,9D_{отв.}$, тобто в 10 разів менша за L_{max} . При зміні відстані L від $L'_{max} = 2,9D_{отв.}$ до $L_{min} = 0$, що відповідає зміні кутового розміру джерела випромінювання від $\alpha = 20^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ та тілесного кута засвічення вхідного отвору об'єктива, що контролюється, від $\Omega = 2\pi[1 - \cos(\alpha/2)] = 2\pi(1 - \cos 10^\circ) = 0,096$ ср до $\Omega = 2\pi(1 - \cos 90^\circ) = 2\pi = 6,28$ ср відповідно [4], стрімкість зміни складової C_3 в залежності від зміни Ω дорівнює $C_3/\Delta\Omega = 0,075/(6,28 - 0,096) = 0,012$ відн. од./ср. Через те що складова C_3 змінюється пропорційно зміні Ω , то при зміні відстані L від $L_{max} = 29D_{отв.}$ до $L'_{max} = 2,9D_{отв.}$ і зміні відповідно Ω від 0,00096 до 0,096 ср, тобто на 0,095 ср, складова C_3 зміниться на $0,012 \cdot 0,095 = 0,00114$ відн. од., тобто на $0,00114 \cdot 100 \% / 0,3 = 0,38 \%$. При цьому допустима зміна складової C_3 в $3,3/0,38 = 8,7$ разу більша, що дозволяє ще більше зменшити L_{max} за умови відсутності інших похибок.

Бюджет похибок при визначенні коефіцієнта розсіювання C за новим методом [1] включає 6 відносних похибок, а саме:

- похибку від зміни складової C_3 при зміні відстані L від $L_{max} = 29D_{отв.}$ до $L'_{max} = 2,9D_{отв.}$;
- похибку рівномірності яскравості в межах кутової апертури α_{max} ;

- похибку світлового потоку ламп, що визначається похибкою напруги живлення ламп;
- похибку вимірювального приладу;
- похибку відхилення від лінійності системи “фотоелектричний приймач – вимірювальний прилад”;

- похибку, викликану яскравістю темного фону, на якому знаходиться світлий вихідний отвір джерела випромінювання.

Новий метод визначення коефіцієнта розсіювання C дозволяє зробити відносну похибку рівномірності яскравості в межах кутової апертури α_{\max} домінуючою над іншими похибками для того, щоб виключно нею зумовлювалася відносна похибка визначення коефіцієнта розсіювання C [1]. При цьому сума всіх інших відносних похибок не повинна перевищувати третини від відносної похибки рівномірності яскравості в межах кутової апертури α_{\max} [3].

Вимоги до всіх інших відносних похибок задовольнити значно легше, ніж вимоги до похибки рівномірності яскравості в межах кутової апертури α_{\max} , при цьому між ними відсутній кореляційний зв'язок [3]. Тому при знаходженні їх геометричної суми (при їх квадратичному підсумовуванні) при припущенні, що їх значення однакові, кожна з них повинна бути в $3 \cdot \sqrt{5} = 6,7$ разу меншою від похибки рівномірності яскравості в межах кутової апертури α_{\max} , а отже, і від похибки визначення коефіцієнта розсіювання C . Тоді зміна складової C_3 при зміні відстані L від $L_{\max} = 29D_{\text{отв}}$ до $L'_{\max} = 2,9D_{\text{отв}}$, як і кожна з інших 4 похибок, при відносній похибці вимірювання коефіцієнта розсіювання C 2,5...10 % не повинна перевищувати $(2,5...10)/6,7 = 0,38...1,5$ %. З попередньої оцінки вона становить 0,38 %. Це означає, що при похиб-

ці визначення коефіцієнта розсіювання C , більший за 2,5 %, відстань L'_{\max} може бути ще меншою, ніж $2,9D_{\text{отв}}$, а саме, допустимим для неї є значення $1,5D_{\text{отв}}$. при похибці визначення коефіцієнта розсіювання C , не меншій за 10 %. Очевидно, що для зменшення відносної похибки визначення коефіцієнта розсіювання C до значень, що менші за 2,5 %, потрібно збільшувати відстань L'_{\max} для зменшення похибки від зміни складової C_3 та зменшувати відповідно всі інші похибки.

Зазначимо, що при використанні додаткової діафрагми відносна похибка вимірювання наближується до її значення для варіанта установки без додаткової діафрагми чи екрана [1] завдяки тому, що динамічні діапазони значень опроміненостей, які створюються об'єктивом у його фокальній площині та досягають фотоелектричного приймача, в них близькі. Відповідно близькі динамічні діапазони значень показів вимірювального приладу, і при найбільшому значенні коефіцієнта розсіювання $C = 0,3$ вони не перевищують 1,4, тому похибка відхилення від лінійності системи “фотоелектричний приймач – вимірювальний прилад” буде нехтовно малою як для установки без додаткової діафрагми, так і для установки з додатковою діафрагмою.

Навпаки, при використанні непрозорого екрана похибка відхилення від лінійності системи “фотоелектричний приймач – вимірювальний прилад” буде більшою, тому що динамічний діапазон значень показів вимірювального приладу при найменшому значенні коефіцієнта розсіювання $C = 0,01$ становить 100, і нею не можна нехтувати. Тому при використанні непрозорого екрана значення відносної похибки вимірювання коефіцієнта розсіювання C буде більшим за її значення при використанні додаткової діафрагми.

Таблиця 1

Параметри об'єктива		Спектральний діапазон, мкм	Діафрагма або екран	Установка										Відносне відхилення, %
				з додатковою діафрагмою (непрозорим екраном)								стандартизована		
D: f'	f', мм			Покази вимірювального приладу, пропорційні E'_1, E'_2, E'_3, E'_4				Коефіцієнт розсіювання та його складові, %						
				N_1	N_2	N_3	N_4	C_1	C_2	C_3	C	C		
1:4,5	230	0,4...0,8	д	685	691	650	654	5,1	0,29	0,58	5,9	6,8	-13	
1:4,5	230	0,4...0,8	е	679	685	32	34	4,7	0,29	0,58	5,6	6,8	-18	
1:4,5	230	0,4...1,2	д	547	559	516	525	5,5	0,54	1,6	7,7	9,0	-14	
1:5,6	250	0,4...1,2	д	287	304	233	248	17,8	0,66	4,9	23,4	20,8	13	
1:11	250	0,4...1,2	д	101	107	76	80	23,4	1,87	3,7	29	26,8	8,2	

Таблиця 2

Параметри об'єктива		Спектральний діапазон, мкм	Діафрагма або екран	Коефіцієнт розсіювання і його складова, %		Відносний вплив, % (C_3/C)·100
D: f'	f' , мм			C_3	C	
1:4,5	230	0,4...0,8	д	0,58	5,9	9,8
1:4,5	230	0,4...0,8	е	0,58	5,6	10,4
1:4,5	230	0,4...1,2	д	1,6	7,7	20,8
1:5,6	250	0,4...1,2	д	4,9	23,4	20,9
1:11	250	0,4...1,2	д	3,7	29	12,8

У табл. 1 наведено результати вимірювань коефіцієнта розсіювання в центрі поля зору двох об'єктивів (YASHICA JAPAN D: $f' = 1:4,5$, $f' = 230$ мм; Теллар-5 D: $f' = 1:5,6$ і $1:11$, $f' = 250$ мм) на установці з додатковою діафрагмою (непрозорим екраном) у порівнянні з результатами вимірювання коефіцієнта розсіювання цих об'єктивів у центрі поля зору на стандартизованій установці. Вимірювання проводилися із введенням і виведенням додаткової діафрагми або екрана у двох спектральних діапазонах при $L_{\max} = 240$ мм на установці з діаметром фотометричної кулі $D_{\kappa} = 600$ мм, діаметром її вихідного отвору $D_{\text{отв.}} = 83$ мм, діаметром коліматорного об'єктива $D_{\kappa.о.} = 60$ мм.

При використанні додаткової діафрагми (екрана) значення відносного відхилення результатів вимірювань двома методами становить ± 18 %, що при відносній похибці вимірювання кожним із методів ± 10 % менше границь допустимого відхилення (± 20 %). При цьому значення відносного відхилення результатів вимірювань при використанні

додаткової діафрагми становить ± 14 %, а значення відносного відхилення результату вимірювань при використанні екрана – 18 %.

У табл. 2 наведено результати розрахунків відносного впливу на коефіцієнт розсіювання C його складової частини C_3 на основі їх значень, що наведено в табл. 1.

Відносний вплив C_3 на C змінюється в досить широких межах 9,8...21 %, що не дозволяє знехтувати складовою C_3 , тому що її відносне значення може бути більше від відносної похибки вимірювання коефіцієнта розсіювання C або дорівнювати їй.

Якщо додаткова діафрагма (екран) може рухатися уздовж заднього фокального відрізка об'єктива, що контролюється, то її (його) переміщують із заданим кроком від початкового місця її (його) знаходження (біля діафрагми фотоелектричного приймача) до місця, в якому відношення її (його) діаметра до відстані між фокальною площиною об'єктива і нею (ним) дорівнює відносному отвору об'єктива та на кілька кроків далі. На кожно-

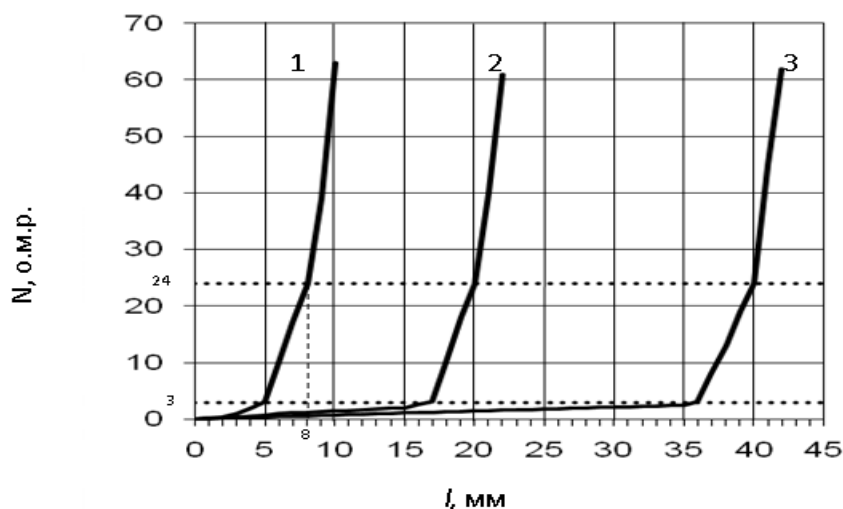


Рис. 4. Результати вимірювань залежності показів N вимірювального приладу від відстані l при вимірюванні коефіцієнта розсіювання в центрі поля зору для об'єктива D: $f' = 1:4$ $f' = 210$ мм при використанні екранів різних діаметрів: 2 мм (1), 5 мм (2) та 10 мм (3)

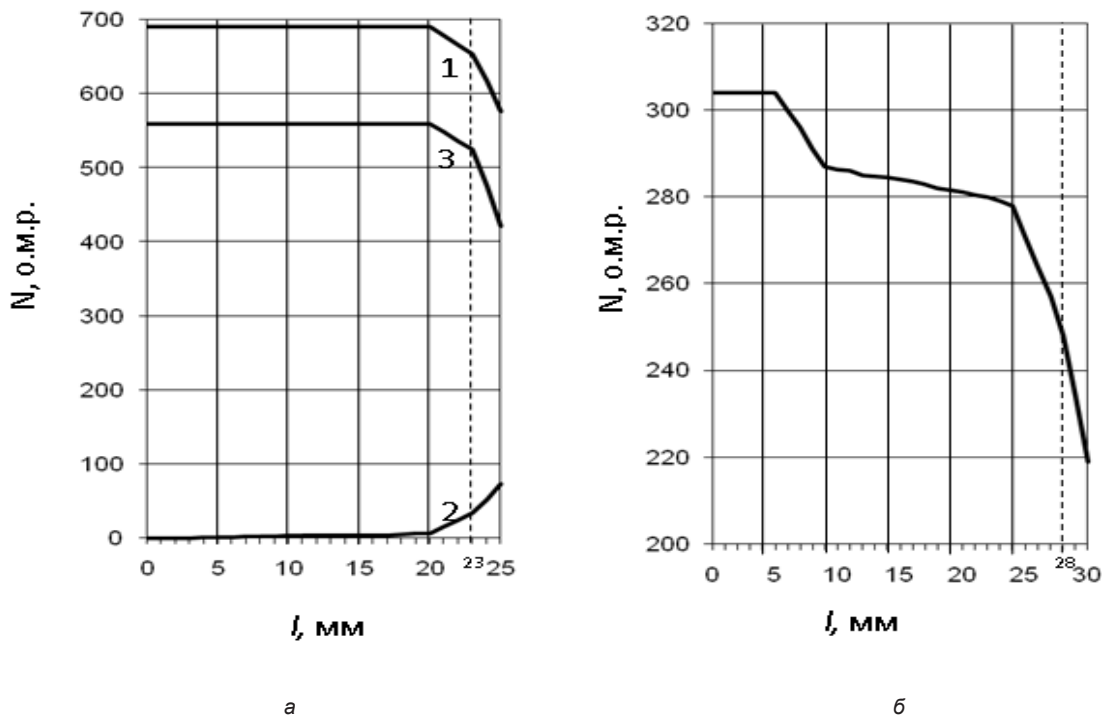


Рис. 5. Результати вимірювань залежності показів N вимірювального приладу від відстані l при вимірюванні коефіцієнта розсіювання в центрі поля зору для об'єктів: а – YASHICA JAPAN D: $f' = 1:4,5$, $f' = 230$ мм при використанні додаткової діафрагми (1) і (3) або екрана (2); б – Телеар-5 D: $f' = 1:5,6$, $f' = 250$ мм при використанні додаткової діафрагми

му кроці реєструють значення E'_4 та відстань l від діафрагми фотоелектричного приймача. Будують графік залежності E'_{4i} від l_i . За формою (структурою) графіка визначають кількість розсіюючих конструктивних елементів об'єктива, порядок їх розташування уздовж оптичної осі об'єктива та відносні значення їх коефіцієнтів розсіювання відносно один одного.

Якщо вивести діафрагму (екран) за межі променів, які розповсюджуються від об'єктива до діафрагми фотоелектричного приймача, та зареєструвати значення E'_2 , то значення сум складових $(C_1 + C_2)_i$ коефіцієнта розсіювання C можна розрахувати за формулами:

- при використанні діафрагми –

$$(C_1 + C_2)_i = 1 - \frac{E'_{4i}}{E'_2};$$

- при використанні екрана –

$$(C_1 + C_2)_i = \frac{E'_{4i}}{E'_2}.$$

Якщо побудувати графік залежності сум складових $(C_1 + C_2)_i$ від l_i , то можна визначити значення коефіцієнтів розсіювання кожного із розсіюючих конструктивних елементів об'єктива, що контролюється.

Якщо значення l_i перерахувати в значення діючого кута поля зору β_i фотоелектричного приймача:

$$\beta_i = 2 \arctg(d_{\text{д.д.}} / 2 l_i),$$

де $d_{\text{д.д.}}$ – внутрішній діаметр додаткової діафрагми (діаметр екрана), то графік потрібно будувати у вигляді залежності сум складових $(C_1 + C_2)_i$ від β_i .

На рис. 4 і 5а, б наведено результати вимірювань залежності показів N_i вимірювального приладу, які пропорційні значенням E'_{4i} , від l_i , при вимірюванні коефіцієнта розсіювання в центрі поля зору для трьох об'єктів (D: $f' = 1:4$, $f' = 210$ мм; YASHICA JAPAN D: $f' = 1:4,5$, $f' = 230$ мм; Телеар-5 D: $f' = 1:5,6$ і $1:11$, $f' = 250$ мм). Вимірювання проводилися у двох спектральних діапазонах на установці з $D_{\text{к.о.}} = 600$ мм, $D_{\text{отв.}} = 83$ мм, $D_{\text{к.о.}} = 60$ мм при $L = L_{\text{min}}$.

На рис.4 наведено залежність для об'єктива D: $f' = 1:4$, $f' = 210$ мм при використанні екрана. Спектральний діапазон 0,4...0,8 мкм, діаметр діафрагми фотоелектричного приймача 1,6 мм, діаметр екрана 2 мм (1), 5 мм (2) та 10 мм (3). Відношення діаметра екрана до відстані l між фокальною площиною об'єктива і екраном дорівнює відносному отвору об'єктива у другій точці перелому, коли l приймає значення 8 мм (1), 20 мм (2) і 40 мм (3), – $2:8 = 1:4$, $5:20 = 1:4$ і $10:40 = 1:4$. Значення N у другій точці перелому однакове для всіх трьох за-

лежностей, тобто не залежить від діаметра екрана, що використовується при вимірюваннях, із чого випливає, що і визначений на основі цих значень N коефіцієнт розсіювання об'єктива від нього не залежить. Через те що точок перелому дві, об'єктив має один розсіюючий конструктивний елемент, від якого розсіяні промені поширюються за межами вихідної апертури об'єктива.

На рис. 5а наведено залежність для об'єктива YASHICA JAPAN D: $f' = 1:4,5$, $f' = 230$ мм при використанні додаткової діафрагми (1) або екрана (2). Спектральний діапазон – 0,4...0,8 мкм, діаметр діафрагми фотоелектричного приймача – 0,5 мм, діаметр додаткової діафрагми – 5 мм, діаметр екрана – 5 мм. На рис. 5а також наведено залежність (3), яку одержано при діаметрі діафрагми фотоелектричного приймача 0,03 мм, діаметрі додаткової діафрагми 5 мм, спектральному діапазоні 0,4...1,2 мкм і при збільшенні у 10 разів чутливості вимірювального приладу в порівнянні із залежностями (1) та (2). Відношення діаметра діафрагми (екрана) до відстані ℓ між фокальною площиною об'єктива і діафрагмою (екраном) дорівнює відносному отвору об'єктива у другій точці перелому, коли ℓ набуває значення 23 мм, – $5:23 \approx 1:4,5$ і не змінюється при зміні діаметра діафрагми фотоелектричного приймача. Через те що точок перелому дві, об'єктив має один розсіюючий конструктивний елемент, від якого розсіяні промені поширюються за межами вихідної апертури об'єктива.

На рис. 5б наведено залежність для об'єктива Теллар-5 D: $f' = 1:5,6$, $f' = 250$ мм при використанні додаткової діафрагми. Спектральний діапазон – 0,4...1,2 мкм, діаметр діафрагми фотоелектричного приймача – 0,03 мм, діаметр додаткової діафрагми – 5 мм. Відношення діаметра діафрагми до відстані ℓ між фокальною площиною об'єктива і діафрагмою дорівнює відносному отвору об'єктива в четвертій точці перелому, коли ℓ набуває значення 28 мм, – $5:28 = 1:5,6$. Через те що точок перелому чотири, об'єктив має три розсіюючих конструктивних елементи, від яких розсіяні промені поширюються за межами вихідної апертури об'єктива. Це і є причиною того, що коефіцієнт розсіювання у нього в 3 рази більший, ніж в об'єктива YASHICA JAPAN (у відповідності до табл. 1 $23,4/7,7 = 3$). Значення тангенса кута нахилу відрізка ламаної лінії пропорційне значенню коефіцієнта розсіювання конкретного конструктивного елемента, а положення відрізка відносно інших відрізків та початку координат дозволяє ідентифікувати цей розсіюючий конструктивний елемент об'єктива, що конче потрібно при розробці та відпрацюванні нових високоякісних об'єктів, а також при їх виготовленні. Так, в об'єктиві Теллар-5 із трьох розсіюючих конструктивних елементів найбільший коефіцієнт розсіювання має третій конструктивний елемент, а найменший – другий, якщо відлік вести вздовж оптичної осі об'єктива в напрямі до його вхідного отвору.

У реальних оптичних системах контраст зображення зменшується через дифракційні явища, наявність абераций оптичної системи, попадання на зображення стороннього світла, яке є частиною всього світлового потоку, що пройшов оптичну систему, але не взяв участі в побудові зображення предмета. Джерелами стороннього світла в оптичній системі є самі оптичні поверхні завдяки частковому відбиванню від них світла навіть за умови їх старанного просвітлення, а також виколки, подряпини, пузири, звиліни, сліди недочистки, погано зафарбовані крайки лінз, бокові грані призм і внутрішні поверхні механічних оправ об'єктива через відбивання або відхилення ними променів світла від заданого розрахункового ходу. Таким чином, кожна з опроміненостей E'_1, E'_2, E'_3, E'_4 складається з кількох складових:

- при використанні діафрагми (рис. 2) –

$$E'_1 = E_A + E_{Omin} + E_{Mmin};$$

$$E'_2 = E_A + E_{Omax} + E_{Mmax};$$

$$E'_3 = E_A + E_{Omin};$$

$$E'_4 = E_A + E_{Omax},$$

де E_A – опроміненість, яка створюється об'єктивом у його фокальній площині променями, що знаходяться в межах його робочої апертури і не змінили заданого розрахункового ходу; E_{Omax} і E_{Omin} – опроміненості, які створюються у фокальній площині об'єктива променями, що знаходяться в межах його робочої апертури і були розсіяні оптичними елементами, при $L = L_{min}$ та $L = L_{max}$ відповідно; E_{Mmax} і E_{Mmin} – опроміненості, які створюються у фокальній площині об'єктива променями, що знаходяться за межами його робочої апертури і були розсіяні елементами конструкції, при $L = L_{min}$ та $L = L_{max}$ відповідно;

- при використанні екрана (рис. 3) –

$$E'_1 = E_A + E_{Omin} + E_{Mmin};$$

$$E'_2 = E_A + E_{Omax} + E_{Mmax};$$

$$E'_3 = E_{Mmin}; \quad E'_4 = E_{Mmax}.$$

Тоді для реальних оптичних систем значення коефіцієнта розсіювання C і його складових C_1, C_2 і C_3 як при використанні діафрагми, так і при використанні екрана будуть визначатися за одними й тими самими формулами:

$$\begin{aligned} C &= C_1 + C_2 + C_3 = \frac{E_{Mmin}}{E_A + E_{Omax} + E_{Mmax}} + \\ &+ \frac{E_{Mmax} - E_{Mmin}}{E_A + E_{Omax} + E_{Mmax}} + \frac{E_{Omax} - E_{Omin}}{E_A + E_{Omax} + E_{Mmax}} = \\ &= \frac{E_{Mmax} + E_{Omax} - E_{Omin}}{E_A + E_{Omax} + E_{Mmax}} = \\ &= \frac{E_{Mmin}}{E_A + E_{Omax} + E_{Mmax}} + \left(\frac{E_{Mmax} - E_{Mmin} + E_{Omax} - E_{Omin}}{E_A + E_{Omax} + E_{Mmax}} \right), \end{aligned}$$

причому

$$C_1 = \frac{E_{Mmin}}{E_A + E_{Omax} + E_{Mmax}};$$

$$C_1 + C_2 = \frac{E_{Mmax}}{E_A + E_{Omax} + E_{Mmax}};$$

$$C_2 + C_3 = \frac{E_{Mmax} - E_{Mmin} + E_{Omax} - E_{Omin}}{E_A + E_{Omax} + E_{Mmax}}.$$

Ці формули відображають фізичну природу коефіцієнта розсіювання C та його складових C_1 , C_2 і C_3 і не залежать, як і фізична природа цих складових, від методів та засобів їх вимірювання. При розгляді останніх формул стає очевидним те, що сума $C_1 + C_2 = C_M$ є складовою коефіцієнта розсіювання C , викликану розсіюванням світла на поверхні внутрішніх механічних оправ об'єктива, а $C_3 = C_O$ – складовою коефіцієнта розсіювання C , викликану розсіюванням світла, що виникає при проходженні світлового потоку через оптичні елементи об'єктива при $L = L_{min}$, зменшеною на її значення при $L = L_{max}$. При цьому, знаючи опроміненості E'_1 , E'_2 , E'_3 , E'_4 , можна легко розрахувати значення C , C_M і C_O за формулами:

- при використанні діафрагми –

$$C = \frac{E'_2 - E'_3}{E'_2}; \quad C_M = \frac{E'_2 - E'_4}{E'_2} = 1 - \frac{E'_4}{E'_2};$$

$$C_O = \frac{E'_4 - E'_3}{E'_2};$$

- при використанні екрана –

$$C = \frac{E'_3 + (E'_2 - E'_1)}{E'_2}; \quad C_M = \frac{E'_4}{E'_2};$$

$$C_O = \frac{(E'_2 - E'_1) - (E'_4 - E'_3)}{E'_2}.$$

Отже, при використанні діафрагми (екрана) вперше з'являється можливість розділити коефіцієнт розсіювання C об'єктива на складову, викликану розсіюванням світла на елементах конструкції об'єктива, і на складову, викликану розсіюванням світла, що виникає при проходженні світлового потоку через оптичні елементи об'єктива, а це має дуже важливе значення для контролю якості дослідних (експериментальних) об'єктивів при їх розробці та для контролю якості об'єктивів у процесі їх виробництва.

Автори отримали патент України на винахід [5], дія якого поширюється на інформаційні матеріали, що викладені в [1] та в цій статті.

Висновки

Для зменшення довжини установки [1] запропоновано доповнити склад установки новим еле-

ментом – додатковою діафрагмою або непрозорим екраном, яка (який) може вводитися та виводитися. Діаметр отвору додаткової діафрагми (діаметр екрана) такий, що відношення цього діаметра до відстані між фокальною площиною об'єктива і додатковою діафрагмою (екраном) дорівнює відносному отвору об'єктива. Додаткова діафрагма (екран) може бути рухомою (рухомим) із можливістю її (його) переміщення уздовж заднього фокального відрізка об'єктива. Вказані зміни складу установки дозволили:

1) зменшити значення $L_{max} = 29D_{отв.}$ до $L'_{max} = 1,5D_{отв.}$ при відносній похибці вимірювання коефіцієнта розсіювання C не менше 10 % і до $L'_{max} = 2,9D_{отв.}$ при значенні цієї похибки не менше 2,5 %;

2) вперше розділити коефіцієнт розсіювання C об'єктива на складові: C_M , викликану розсіюванням світла на елементах конструкції об'єктива, і C_O , викликану розсіюванням світла, яке виникає при проходженні світлового потоку через оптичні елементи об'єктива, що має дуже важливе значення для контролю якості дослідних (експериментальних) об'єктивів при їх розробці та для контролю якості об'єктивів у процесі їх виробництва;

3) визначати як значення коефіцієнта розсіювання C об'єктива, так і його складові C_1 , C_2 , C_M , C_O ;

4) отримувати залежність від кутового розміру джерела випромінювання α не тільки коефіцієнта розсіювання C об'єктива, а також і його складових C_1 , C_2 , C_M , C_O ;

5) визначати кількість розсіюючих конструктивних елементів об'єктива, порядок їх розташування уздовж оптичної осі об'єктива та значення їх коефіцієнтів розсіювання завдяки переміщенню додаткової діафрагми (екрана) уздовж заднього фокального відрізка об'єктива.

Показано, що при використанні додаткової діафрагми відносна похибка вимірювання коефіцієнта розсіювання C наближується до її значення для варіанта установки без додаткової діафрагми чи екрана, а при використанні непрозорого екрана значення відносної похибки вимірювання коефіцієнта розсіювання C буде більшим за її значення при використанні додаткової діафрагми.

Виведено формули розрахунку коефіцієнта розсіювання C та його складових C_1 , C_2 , C_M , C_O , які відображають їх фізичну природу і не залежать, як і їх фізична природа, від методів та засобів їх вимірювання.

Наведено результати вимірювання коефіцієнта розсіювання у центрі поля зору двох об'єктивів на установці з додатковою діафрагмою (непрозорим екраном) у порівнянні з результатами вимірювання коефіцієнта розсіювання цих об'єктивів у центрі поля зору на стандартизованій установці [2].

Наведено результати вимірювання залежності показів вимірювального приладу від відстані між додатковою діафрагмою або екраном і діафрагмою

фотоелектричного приймача при вимірюванні коефіцієнта розсіювання у центрі поля зору для трьох різних об'єктів.

Напрямок подальшої роботи – оцінка нерівномірності яскравості фотометричної кулі в межах кутової апертури α_{\max} при різних діаметрах вихідного отвору $D_{\text{отв}}$ та пошук шляхів її зменшення.

Список літератури

1. Камінський С.Ф. Новий метод визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів / С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Український метрологічний журнал. – 2013. – № 3. – С. 27–32.
2. Объективы для кино- и фотоаппаратов. Метод определения коэффициента рассеяния: ГОСТ 24724-81. – [Дата введения 1982-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 13с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
3. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1976. – 432 с.
4. Гуревич М.М. Введение в фотометрию / М.М. Гуревич. – Л.: Энергия, Ленингр. отд., 1968. – 244 с.
5. Пат. 103242 UA. Пристрій для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів та виробів на їх основі і спосіб його використання / В.М. Тягур, С.Ф. Камінський, М.І. Лихоліт. – Опубл. 2013, Бюл. № 18.