



УДК 681.7: 681.785.47

## НОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА РОЗСІЮВАННЯ ОБ'ЄКТИВІВ

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

**М.І. Лихоліт,** доктор технічних наук, доцент, директор – головний конструктор КП СПБ "Арсенал", м. Київ

**В.М. Тягур,** кандидат технічних наук, заступник начальника комплексу – начальник відділення КП СПБ "Арсенал", м. Київ



С.Ф. Камінський

М.І. Лихоліт

В.М. Тягур

*Запропоновано нові метод і установку для визначення коефіцієнта розсіювання довгофокусних об'єктивів з великими вхідними отворами, що забезпечують значне зменшення габаритів фотометричної кулі та відносної похибки вимірювання, дозволяють спростити склад установки та розширити функціональні можливості контролю. Проведено порівняння результатів вимірювання коефіцієнта розсіювання за стандартизованим та новим методами, отримано допустиму розбіжність даних, чим підтверджується можливість застосування нового методу.*

*A new method and apparatus for determination of the light scattering coefficient of long focal-length lens with large entrance pupil diameter, which provide considerable reduction of photometric sphere dimensions, measurement relative error reduction, apparatus simplification and expand control functional capabilities, are offered. The comparison of results of the light scattering coefficient measurement using standardized and new methods is made, and the obtained data discrepancy is acceptable, therefore the possibility of the new method application is confirmed.*

Методи визначення коефіцієнта розсіювання об'єктивів визначаються стандартами [1–5], дія яких поширюється як на проєкційні та знімальні об'єктиви, так і на об'єктиви для спостереження (візуальні та з фотоприймачами), що входять до складу фотографічних, кінознімальних, аерофотографічних і телевізійних апаратів та камер (у подальшому –

виробів). Цю роботу присвячено методу та апаратурі для визначення коефіцієнта розсіювання знімальних об'єктивів і об'єктивів для спостереження, а також виробів на їх основі. Стандартизований метод визначення коефіцієнта розсіювання таких об'єктивів та виробів [3–5] базується на порівнянні опроміненостей  $E_1$  та  $E_2$  у зображенні чорного (не самовипромінюючого) предмета ( $E_1$ ), що розташований на рівномірно опроміненому білому фоні, і в зображенні цього фону ( $E_2$ ). Опроміненості вимірюють фотоелектричним способом. Коефіцієнт розсіювання  $C$  виробу визначається відношенням опроміненості  $E_1$  до опроміненості  $E_2$ :

$$C = \frac{E_1}{E_2}.$$

До складу метрологічного обладнання для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктивів за стандартизованим методом має входити фотометрична куля з джерелами світла і коліматорним об'єктивом, імітатор чорного предмета, фотоприймач та вимірювальний прилад. Зображення чорного предмета та зображення фону мають створюватися об'єктивом, коефіцієнт розсіювання якого визначають, та коліматорним об'єктивом. Світловий діаметр коліматорного об'єктива має бути більший від діаметра вхідного отвору об'єктива, що контролюється, не менше ніж на 10 %, його відносний отвір – не більше 1:5, а фокусна відстань має дорівнювати внутрішньому діаметру фотометричної кулі, у вихідному отворі якої і знаходиться коліматорний об'єктив. Внутрішня поверхня фотометричної кулі має бути рівномірно освітлена джерелами світла, повинна мати високий коефіцієнт відбиття світла і використовується як рівномірно яскравий білий фон. На протилежній від вихідного отвору стороні внутрішньої поверхні фотометричної кулі знаходиться отвір, через центр якого проходить оптична вісь коліматорного об'єктива і за яким встановлено імітатор чорного предмета. Яскравість чорного предмета має бути не більше 0,001 яскравості внутрішньої поверхні фотометричної кулі. Відносна похибка визначення

коефіцієнта розсіювання за вказаними стандартами не перевищує 10 %.

Для космічних досліджень, зокрема, для систем дистанційного зондування Землі, застосовуються високоякісні довгофокусні об'єктиви з великою входною апертурою. Фокусна відстань таких об'єктів  $f' = 1000 \dots 12000$  мм, діаметр входної зіниці  $D = 200 \dots 1500$  мм. У відповідності до стандартів [3–5], при  $D = 1500$  мм світловий діаметр коліматорного об'єктива повинен бути 1650 мм, а його фокусна відстань, а отже, і внутрішній діаметр фотометричної кулі – 8250 мм. Виготовлення фотометричної кулі таких розмірів з коліматорним об'єктивом та імітатором чорного предмета, як і її експлуатація, потребує значних витрат та пов'язана зі значними технологічними та експлуатаційними труднощами.

Найбільший відомий діаметр фотометричної кулі, що використовується для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів, – 5000 мм [6]. Ця куля входить до складу установки для вимірювання світлорозсіювальних властивостей оптичних систем ФС-5000 (НИИКИ ОЭП, м. Сосновий Бор, Росія) і призначена для вимірювання коефіцієнтів розсіювання великогабаритних (діаметр входної зіниці – до 1500 мм) довгофокусних оптичних систем у видимій і ближній ІЧ-ділянці спектра. Коефіцієнт розсіювання коліматорного об'єктива кулі ФС-5000 – 2,8%, світловий діаметр – 1560 мм, фокусна відстань – 4985 мм, тобто його відносний отвір – 1:3,2, що більше, ніж дозволяють діючі стандарти (не більше 1:5). Зрозуміло, що це спричинено виключно намаганням зменшити габарити фотометричної кулі навіть за рахунок недотримання вимог стандартів.

Мета цієї роботи – пропозиція та обґрунтування іншого, відмінного від стандартизованого, методу визначення коефіцієнта розсіювання великогабаритних довгофокусних об'єктів, який забезпечує зменшення габаритів фотометричної кулі і, відповідно, витрат на виготовлення та експлуатацію установки для визначення коефіцієнта розсіювання таких об'єктів без збільшення похибки визначення їх коефіцієнта розсіювання.

Новий метод визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів та виробів базується на порівнянні опроміненостей у фокальній площині об'єктива виробу при опроміненні його входного отвору джерелом випромінювання при двох положеннях джерела випромінювання відносно входного отвору об'єктива, тобто при двох значеннях кутового розміру  $\alpha$  вихідного отвору джерела випромінювання з центра входного отвору об'єктива виробу. Кутовий розмір  $\alpha$  змінюється завдяки зміні відстані  $L$  між вихідним отвором джерела випромінювання та входним отвором об'єктива виробу від найбільшого  $\alpha_{\max}$ , що не більше  $180^\circ$ , до найменшого  $\alpha_{\min}$ , що не менше  $30'$ . Вихідний отвір джерела випромінювання має бути не менше ніж на 10 % більший за входний отвір об'єктива виробу і повинен мати рівномірну яскравість у межах кутової апертури, що не менше кутового розміру  $\alpha_{\max}$ . Опроміненості вимірюють, як і в стандартизованому методі, фотоелектричним способом. Коефіцієнт розсіювання  $C$  об'єктива виробу за новим методом – це відношення різниці опроміненостей у фокальній площині об'єктива виробу  $E'_2 - E'_1$  до опроміненості  $E'_2$ :

$$C = \frac{E'_2 - E'_1}{E'_2} = 1 - \frac{E'_1}{E'_2},$$

де  $E'_2$  – опроміненість у фокальній площині об'єктива виробу при опроміненні його входного отвору джерелом випромінювання, що має кутовий розмір  $\alpha_{\min} < \alpha \leq \alpha_{\max}$  на відстані  $L_{\max} > L \geq L_{\min}$  відповідно;  $E'_1$  – опроміненість у фокальній площині об'єктива виробу при опроміненні його входного отвору джерелом випромінювання, що має кутовий розмір  $\alpha_{\min}$  на відстані  $L_{\max}$ .

При мінімальній відстані  $L_{\min} = 0$  ( $\alpha = \alpha_{\max}$ ) у фокальній площині об'єктива створюється опроміненість  $E'_2$  з найбільшим вкладом розсіяних оптичними елементами та елементами конструкції об'єктива променів (рис. 1а), а при максимальній відстані  $L_{\max}$  ( $\alpha = \alpha_{\min}$ ) – опроміненість  $E'_1$  з найменшим вкладом розсіяних променів (рис. 1б).

При цьому значення  $L_{\max}$  має визначатися за формулою

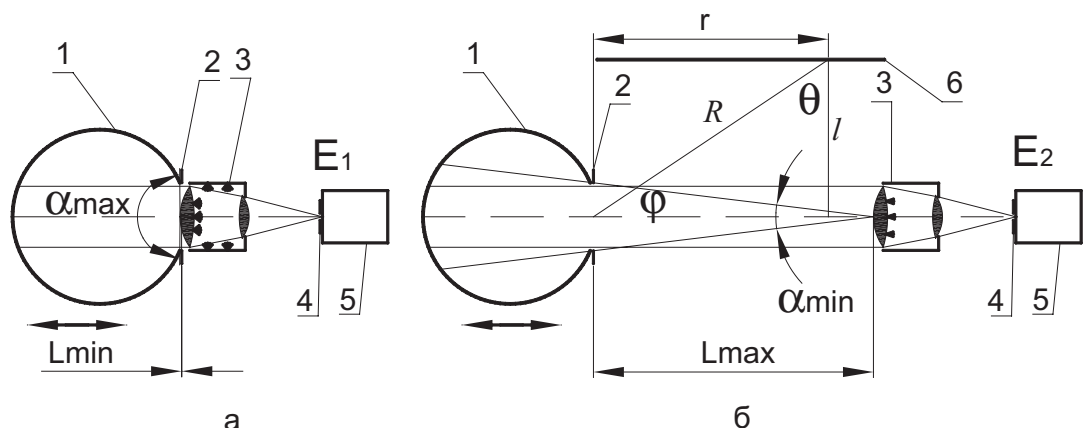


Рис. 1. Схеми розташування елементів установки для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів за новим методом при вимірюванні значень  $E'_1$  та  $E'_2$ : 1 – фотометрична куля; 2 – діафрагма кулі; 3 – об'єктив, що контролюється; 4 – діафрагма фотоприймача; 5 – фотоприймач; 6 – захисна завіса

$$L_{\max} \geq D_{\text{отв}} / 2 \operatorname{tg}(\alpha_{\min} / 2),$$

де  $D_{\text{отв}}$  – діаметр вихідного отвору джерела випромінювання (отвору діафрагми фотометричної кулі);  $\alpha_{\min}$  – найменший кутовий розмір вихідного отвору джерела випромінювання з центра вхідного отвору об'єктива виробу.

Кутовий розмір  $\alpha_{\min}$ , як і кутовий розмір чорного предмета в стандартизованій установці [3–5], повинен бути не менше  $30'$  і не більше  $2^\circ$  для всіх об'єктивів, кут поля зору яких  $4^\circ$  і більше, та не більше половини кута поля зору об'єктива виробу для об'єктивів з меншим кутом поля зору. Таким чином,  $L_{\max} \geq 29D_{\text{отв}}$ , і при великих  $D_{\text{отв}}$  відстань  $L_{\max}$  буде досить значною.

Діаметр діафрагми фотоприймача розраховується за формулою, що подібна формулі для розрахунку розміру зображення чорного предмета стандартизованої установки [5]:

$$\begin{aligned} d_{\text{ф.п.}} &\leq 0,7 \cdot 2f'(D_{\text{отв}} - D) / 2L_{\max} = \\ &= 0,7(1 - D / D_{\text{отв}}) \cdot 2f' \operatorname{tg}(\alpha_{\min} / 2), \end{aligned}$$

де  $D$  та  $f'$  – діаметр вхідного отвору та задня фокусна відстань об'єктива виробу відповідно.

При виконанні вимірювань стандартизованим методом без використання коліматорного об'єктива і новим методом з використанням того самого обладнання при  $L = L_{\min}$  значення  $E_2$  та  $E_2'$  будуть вимірюватися в однакових умовах одним і тим же обладнанням. Очевидно, що їх значення будуть однаковими ( $E_2 = E_2'$ ), тому що кожна із цих опроміненостей створюється при опроміненні вхідного отвору об'єктива виробу одним і тим же джерелом випромінювання, що має кутовий розмір  $\alpha_{\max}$ . Опроміненість  $E_1$  створюється розсіяним в об'єктиві виробу світлом при опроміненні його вхідного отвору тим самим джерелом випромінювання, але без частини  $\alpha_{\min}$  кутового розміру, і тепер воно має кутовий розмір  $\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ , де  $\alpha_{\min}$  – кутовий розмір чорного предмета в стандартизованій установці. Опроміненість  $E_1'$  при виконанні вимірювань за новим методом створюється при опроміненні вхідного отвору об'єктива виробу тим же джерелом випромінювання, що і при вимірюванні значення  $E_2'$ , але при  $L = L_{\max}$ , коли воно має кутовий розмір  $\alpha_{\min}$ , який дорівнює кутовому розміру чорного предмета в стандартизованій установці. Тому різниця опроміненостей  $E_2' - E_1'$  – це опроміненість, що створюється розсіяним в об'єктиві виробу світлом при опроміненні його вхідного отвору джерелом випромінювання, що має кутовий розмір  $\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ , а це означає що  $E_2' - E_1' = E_1$ . У цьому випадку результати вимірювання коефіцієнта розсіювання  $C$  стандартизованим і новим методами без урахування їх похибок вимірювання будуть однаковими, тобто можна записати

$$C = \frac{E_2' - E_1'}{E_2'} = \frac{E_1}{E_2'}$$

Перевага нового методу в тому, що  $E_1'$  має значення, близьке до значення  $E_2'$ , і тим ближче до нього, чим менше значення  $C$ , тоді як значення  $E_1$  тим

менше, а значить, тим більше відрізняється від  $E_2$ , чим менше значення  $C$ . Зрозуміло, що динамічний діапазон значень  $E_2'$  та  $E_1'$  значно менший динамічного діапазону значень  $E_2$  та  $E_1$ , тому похибки вимірювання  $E_2'$  та  $E_1'$ , а відповідно, і похибка знаходження  $E_2' - E_1'$ , значно менша від похибки вимірювання значення  $E_1$  завдяки значному зменшенню впливу відхилень від лінійності системи “фотоелектричний приймач – вимірювальний прилад” і впливу її шумів.

Вкладом розсіяних променів при відстані  $L_{\max}$  можна знехтувати. Так, при дифузному характері розсіювання променів на елементах розсіювання, які знаходяться на поверхні та всередині оптичних і на поверхні конструктивних елементів об'єктива, вклад розсіяних променів залежить від тілесного кута  $\Omega$  засвічення вхідного отвору об'єктива виробу і при його зменшенні теж пропорційно зменшується. При зміні  $L$  від  $L_{\min}$  до  $L_{\max}$  ( $\alpha$  від  $\alpha_{\max}$  до  $\alpha_{\min}$ ) тілесний кут  $\Omega$  значно зменшується, тому що залежить від  $\alpha - \Omega = 2\pi(1 - \cos(\alpha/2))$  [7], і при  $\alpha_{\max} = 180^\circ$   $\Omega_{\max} = 2\pi$ , а при  $\alpha_{\min} = 2^\circ$   $\Omega_{\min} = 0,0003\pi$ , тобто зменшується в 6666 разів. Проте, якщо вклад розсіяних променів (коефіцієнт розсіювання об'єктива) при  $L_{\min} = 0$  становить  $C$ , то при  $L = L'_{\max} < L_{\max}$  вклад розсіяних променів, при похибці вимірювання не більше 10 %, як у стандартизованій установці, повинен бути не більше  $(C \cdot 0,1) / 3 = C / 30$ , щоб ним можна було знехтувати за критерієм неістотної похибки [8]. Таким чином, достатньо, щоб при зміні  $L$  від  $L_{\min}$  до  $L'_{\max}$  вклад розсіяних променів зменшився в 30 разів. Тому відстань  $L'_{\max}$  буде значно менша  $L_{\max}$ , але це суттєво не вплине на похибку вимірювання  $C$ . Через те що значення  $C$  в різних об'єктивах різні і швидкість зменшення вкладу розсіяних променів при збільшенні  $L$  теж різна, то і значення  $L'_{\max}$  для них будуть різні. Очевидно, що найменша швидкість зменшення вкладу розсіяних променів при збільшенні  $L$  буде в об'єктивах, які мають найменше значення  $C$ , тобто для них значення  $L'_{\max}$  будуть найбільші. Для такого об'єктива і слід визначити  $L'_{\max}$  і в подальшому при вимірюванні значень  $C$  замість  $L_{\max} = 29D_{\text{отв}}$  слід використовувати  $L'_{\max}$ , завдяки чому довжина установки стане меншою.

На точність вимірювання коефіцієнта розсіювання впливає і яскравість поверхонь, що знаходяться в межах тілесного кута  $\Omega_{\max}$  та поза межами тілесного кута  $\Omega_{\min}$  при відстані  $L = L_{\max}$  ( $L'_{\max}$ ), тобто поверхонь стін, стелі, підлоги та предметів, що освітлюються вихідним отвором фотометричної кулі, або поверхонь захисних екранів чи завіс, якщо вони використовуються. Яскравість цих поверхонь – це яскравість темного фону, на якому знаходиться світлий вихідний отвір джерела випромінювання. Для зменшення їх яскравості значення їхніх коефіцієнтів відбиття повинні бути малими, а відстані до них від вихідного отвору джерела випромінювання – достатньо великими. Якщо ці поверхні дифузно відбиваючі, то їх яскравість  $B$  у залежності від їх освітленості  $E$  визначається виразом [9]



Таблиця 1

Г, м	V/B <sub>0</sub> , відн. од.	(V/B <sub>0</sub> ) <sub>ср</sub> , відн. од.	Г, м	V/B <sub>0</sub> , відн. од.	(V/B <sub>0</sub> ) <sub>ср</sub> , відн. од.
0,0	0,0000	—	7,0	0,000087	0,0020
0,3	0,0078	0,0039	8,0	0,000059	0,0018
0,6	0,0100	0,0059	9,0	0,000041	0,0017
0,9	0,0085	0,0066	10,0	0,000030	0,0015
1,2	0,0062	0,0065	11,0	0,000023	0,0014
1,5	0,0044	0,0062	12,0	0,000018	0,0013
1,8	0,0031	0,0057	13,0	0,000014	0,0012
2,1	0,0022	0,0053	14,0	0,000011	0,0011
2,4	0,0016	0,0049	15,0	0,0000091	0,0010
2,7	0,0012	0,0045	16,0	0,0000075	0,00098
3,0	0,00093	0,0042	17,0	0,0000063	0,00093
3,3	0,00072	0,0039	18,0	0,0000053	0,00088
3,6	0,00057	0,0036	19,0	0,0000045	0,00083
3,9	0,00046	0,0034	20,0	0,0000038	0,00079
4,2	0,00037	0,0032	21,0	0,0000033	0,00076
4,5	0,00031	0,0030	25,0	0,0000020	0,00066
4,8	0,00026	0,0029	30,0	0,0000011	0,00057
5,1	0,00022	0,0027	35,0	0,00000072	0,00050
5,4	0,00018	0,0026	40,0	0,00000048	0,00044
5,7	0,00016	0,0025	45,0	0,00000034	0,00040
6,0	0,00014	0,0024			

$$V = \frac{\rho E}{\pi},$$

де  $\rho$  – коефіцієнт відбиття поверхні.

Освітленість  $E$ , яку створює вихідний отвір джерела випромінювання, що має яскравість  $B_0$  та площу  $S$ , на невеликій ділянці поверхні, що знаходиться від нього на відстані  $R$ , визначається виразом [7]

$$E = B_0 \frac{S \cos \varphi}{R^2} \cos \theta,$$

де  $\varphi$  – кут між перпендикуляром до площини вихідного отвору джерела випромінювання та напрямом з його центра на центр згаданої ділянки поверхні;  $\theta$  – гострий кут між тим же напрямом та перпендикуляром до поверхні цієї ділянки.

Максимальний вплив яскравості  $B$  на вимірювання коефіцієнта розсіювання буде, коли кути  $\varphi$  і  $\theta$  будуть кутами прямокутного трикутника з гіпотенузою  $R$  (рис. 1б):

$$\cos \varphi = \frac{r}{R}, \quad \cos \theta = \frac{l}{R}, \quad R^2 = r^2 + l^2,$$

де  $r$  – прилеглий до кута  $\varphi$  катет прямокутного трикутника;  $l$  – прилеглий до кута  $\theta$  катет прямокутного трикутника.

Після виконання необхідних перетворень

$$V = \frac{\rho B_0 S}{\pi} \cdot \frac{r \cdot l}{(r^2 + l^2)^2}.$$

При круглomu вихідному отворі джерела випромінювання  $S = \pi D_{\text{отв}}^2 / 4$  і тоді

$$V = \frac{\rho B_0 D_{\text{отв}}^2}{4} \cdot \frac{r \cdot l}{(r^2 + l^2)^2}.$$

При зміні  $r$  яскравість  $V$  буде найбільшою при  $r = l / \sqrt{3}$ , коли  $\varphi = 60^\circ$  і  $\theta = 30^\circ$ :

$$V_{\text{max}} = \frac{3\sqrt{3} \cdot D_{\text{отв}}^2 \cdot \rho B_0}{64 l^2}.$$

Для того щоб, наприклад,  $V_{\text{max}} \leq 0,01 B_0$  при найбільшому  $D_{\text{отв}} = 1,5$  м потрібно забезпечити  $\rho / l^2 \leq 0,055$ . Оскільки можливі значення  $\rho \geq 0,03$ , то при  $\rho = 0,03$  потрібно, щоб значення  $l \geq 0,74$  м.

При заданих  $\rho$ ,  $B_0$ ,  $D_{\text{отв}}$  і  $l$  значення  $V$  залежить тільки від значень  $r$ . При  $r = 0$   $V = 0$ , а при збільшенні  $r$  яскравість  $V$  поступово збільшується до максимального значення  $V_{\text{max}}$ , потім поступово зменшується і наближається до нуля при великих значеннях  $r$ . У табл. 1 як приклад наведено результати розрахунку значень відношення  $V/B_0$  для різних відстаней  $r$  при  $D_{\text{отв}} = 1,5$  м,  $l = 1$  м і  $\rho = 0,055$ , тобто для випадку, коли  $V_{\text{max}} = 0,01 B_0$ , а також результати розрахунку середніх значень  $(V/B_0)_{\text{ср}}$  для інтервалу  $r$  від 0 до  $r$ .

З табл. 1 видно, що при  $r = 0,9$  м значення  $(V/B_0)_{\text{ср}} = 0,0066$  є найбільшим, і тому що  $V_{\text{max}}/B_0 = 0,01$ , найбільше значення  $(V/B_0)_{\text{ср}} = 0,66(V_{\text{max}}/B_0)$ . При  $r = 25$  м значення  $(V/B_0)_{\text{ср}} = 0,00066$ , тобто зменшується в 10 разів відносно свого найбільшого значення.

При  $r = L_{\text{max}} = 29 D_{\text{отв}}$  значення  $V_{\text{ср}} \approx 0,0004 B_0$ , тобто середня яскравість  $V_{\text{ср}}$  темного фону буде такою малою відносно яскравості  $B_0$  світлого вихідного отвору джерела випромінювання, що не зможе вплинути на похибку вимірювання коефіцієнта розсіювання. При зменшенні значень  $D_{\text{отв}}$  зменшується (за рахунок зменшення  $V$ ) значення  $(V/B_0)_{\text{ср}}$ . Таким чином, для розглянутого прикладу  $\rho$  може мати і більші значення, але при цьому будуть більші значення  $V_{\text{max}}/B_0$  і  $(V/B_0)_{\text{ср}} = V_{\text{ср}}/B_0$ , де  $V_{\text{ср}}$  – середнє значення яскравості  $V$  для інтервалу  $r$  від 0 до  $r$ . Їх можна зменшити, якщо збільшити значення  $l$  відповідно до збільшення  $\rho$ .

Щоб оцінити найбільше допустиме значення  $V_{\text{ср}}/B_0$ , ми розглянули його вплив на результат вимірювання коефіцієнта розсіювання  $C$ . Розрахунки показали, що потрібно забезпечити  $V_{\text{ср}}/B_0 \leq 1/180$ , при цьому вклад розсіяних променів, що визначає значення  $L'_{\text{max}}$ , повинен бути не більше  $C / 180$ . Таким чином, значення  $V_{\text{ср}}/B_0$  може бути в 6,7 разу більшим від значення  $V_{\text{ч.п.}}/B_{\text{б.ф.}} \leq 1/1000$  для стандартизованого методу, де  $V_{\text{ч.п.}}$ ,  $V_{\text{б.ф.}}$  – яскравості чорного предмета та рівномірно яскравого білого фону відповідно.

Розрахунки також показали, що вплив методичної похибки при зменшенні коефіцієнта розсіювання  $C$ , тобто при проведенні контролю більш якісних об'єктів, при використанні стандартизованого методу збільшується, і при  $V_{\text{ч.п.}}/B_{\text{б.ф.}} = 1/1000$  може виконуватися контроль тільки тих об'єктів, які мають  $C \geq 0,03$ , а при використанні нового методу вплив методичної похибки залишається незмінним при зміні  $C$  і значення  $C$  може бути як завгодно малим. Таким чином, можливість проведення контролю

якісних об'єктів обмежена можливістю досягнення менших значень  $B_{ч.п.} / B_{б.ф.}$  для стандартизованого методу, а для нового методу таке обмеження відсутнє.

Можна визначити коефіцієнти розсіювання об'єктива для різних значень кутового розміру  $\alpha$ , змінюючи  $\alpha$  шляхом зміни відстані  $L$  від  $L_{\min}$  до  $L_{\max}$  з кроком  $\Delta L$ , і побудувати графік залежності коефіцієнта розсіювання  $C$  від  $L$  або від  $\alpha$ . Графік матиме вигляд ламаної лінії, причому коефіцієнт розсіювання  $C$  при зміні відстані  $L$  від  $L_{\min}$  до  $L_{\max}$  буде зменшуватися від  $C_{\max}$  до нуля. За графіком можна визначити кількість розсіюючих елементів конструкції об'єктива – кількість ділянок ламаної лінії (порядок їх розташування вздовж головної осі об'єктива відповідає порядку слідування ділянок ламаної лінії при зміні  $L$  від  $L_{\max}$  до  $L_{\min}$ ) та вклад кожного з них у коефіцієнт розсіювання об'єктива  $C_{\max}$  за зміною кута нахилу ділянок ламаної лінії.

Новий метод не потребує використання коліматорного об'єктива і спеціального імітатора чорного предмета. Таким чином, знято обмеження на діаметр вхідного отвору об'єктива виробу у відношенні до внутрішнього діаметра фотометричної кулі, яке накладається в стандартах [3–5] шляхом обмежень на відносний отвір коліматорного об'єктива. Ця обставина дозволяє зменшити внутрішній діаметр фотометричної кулі до 5 разів відносно діючих стандартів (з  $5,5D$  до  $1,1D$ ). Так, за стандартизованим методом світловий діаметр коліматорного об'єктива має бути не менше  $1,1D$ , його відносний отвір – не більше  $1:5$ , тому його фокусна відстань повинна бути не менше  $5,5D$ , а внутрішній діаметр фотометричної кулі повинен дорівнювати фокусній відстані, тобто теж має бути не менше  $5,5D$ . За новим методом вихідний отвір джерела випромінювання, в якості якого може використовуватися фотометрична куля, має бути не менше  $1,1D$  і повинен мати рівномірну яскравість у межах кутової апертури, що не менше кутового розміру  $\alpha_{\max}$  (для дистанційного зондування Землі з космосу  $\alpha_{\max} \leq 140^\circ$ ). Таким чином, за умови забезпечення необхідної рівномірності яскравості її внутрішній діаметр може бути близький до діаметра її вихідного отвору, тобто може майже дорівнювати йому ( $1,1D$ ) тому що відсутні будь-які інші обмеження. У цьому випадку як джерело випромінювання може використовуватися і напівкуля. Так, при  $D = 1500$  мм внутрішній діаметр напівкулі може бути  $1,1D = 1650$  мм, а не  $5,5D = 8250$  мм для внутрішнього діаметра фотометричної кулі за діючими стандартами.

Для оцінки необхідної рівномірності яскравості в межах кутової апертури  $\alpha_{\max}$  були зроблені відповідні розрахунки, які показали, що відносна похибка визначення коефіцієнта розсіювання  $C$  прямо пропорційна відносній похибці рівномірності яскравості в межах кутової апертури  $\alpha_{\max}$  як для нового, так і для стандартизованого методів. Отже, що стосується впливу рівномірності яскравості в межах кутової апертури  $\alpha_{\max}$ , то обидва методи рівноцінні і вимагають

рівномірності яскравості не гірше  $3,3\%$ , щоб її впливом на результат визначення коефіцієнта розсіювання  $C$  з похибкою не більше  $10\%$  можна було знехтувати за критерієм неістотної похибки. Проте, на відміну від стандартизованого методу, новий метод дозволяє зробити відносну похибку рівномірності яскравості домінуючою над іншими похибками. У цьому випадку відносна похибка визначення коефіцієнта розсіювання буде зумовлюватися виключно відносною похибкою рівномірності яскравості в межах кутової апертури  $\alpha_{\max}$  і її значення може бути близьким до  $10\%$ .

Схему установки для реалізації нового методу наведено на рис. 2. Поворотний важіль має можливість повертатися навколо вертикальної і горизонтальної осей в межах кутів поля зору об'єктива. Поперечна горизонтальна направляюча та тримач фотоелектричного приймача забезпечують можливість переміщення приймача в горизонтальному та у вертикальному напрямках у межах лінійного поля зображення об'єктива виробу та вздовж поворотного важеля. Тримач фотоелектричного приймача забезпечує також можливість поворотів фотоелектричного приймача навколо вертикальної і горизонтальної осей. Все це забезпечує можливість проводити контроль у довільній точці поля зору об'єктива, а також дає змогу контролювати позаосьові об'єктиви та об'єктиви з ламаною оптичною віссю, конструкцію корпусу яких виконано несиметричною. Відстань між діафрагмою отвору кулі та вхідним отвором виробу можна змінювати вздовж довільного головного променя об'єктива виробу від  $L_{\min}$  до  $L_{\max}$  при встановленні центра діафрагми фотоелектричного приймача в довільну точку лінійного поля зображення об'єктива виробу, суміщенні перпендикуляра з центра діафрагми фотоелектричного приймача з цим головним променем та відповідним поворотом поворотного важеля навколо вертикальної і горизонтальної осей до суміщення цього головного променя з перпендикуляром з центра діафрагми кулі.

У табл. 2 наведено результати вимірювання коефіцієнта розсіювання в центрі поля зору трьох

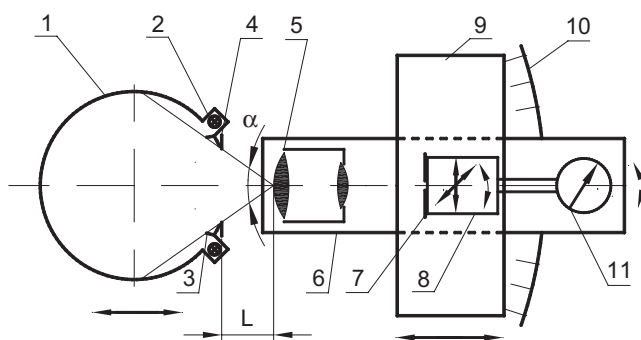


Рис. 2. Схема установки для визначення коефіцієнта розсіювання об'єктивів за новим методом: 1 – фотометрична куля; 2 – джерело світла; 3 – заслінки; 4 – діафрагма кулі; 5 – об'єктив, що контролюється; 6 – поворотний важіль; 7 – діафрагма фотоприймача; 8 – фотоприймач; 9 – направляюча переміщення фотоприймача;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

Параметри об'єктива		Спектр. діапазон, мкм	Новий метод			Стандартизований метод			Відн. відхилення, %
$D:f'$	$f'$ , мм		$N_1-N_{01}$	$N_2-N_{02}$	$C$ , відн. од.	$N_1-N_{01}$	$N_2-N_{02}$	$C$ , відн. од.	
1:4	210	0,4...0,8	487	515	0,054	35	474	$0,074 - 0,012 = 0,062$	-13
1:4,5	230	0,4...0,8	650	691	0,059	51	636	$0,08 - 0,012 = 0,068$	-13
1:4,5	230	0,4...1,2	516	559	0,077	56	550	$0,102 - 0,012 = 0,09$	-14
1:5,6	250	0,4...1,2	232	304	0,234	63	290	$0,22 - 0,012 = 0,208$	13
1:11	250	0,4...1,2	76	107	0,29	27	96	$0,28 - 0,012 = 0,268$	8,2

*Примітка:* 0,012 – коефіцієнт розсіювання коліаторного об'єктива.

об'єктів для фотоапаратів: 1)  $D:f' = 1:4$ ,  $f' = 210$  мм; 2) YASHICA JAPAN  $D:f' = 1:4,5$ ,  $f' = 230$  мм; 3) “Телеар-5”  $D:f' = 1:5,6$  і  $1:11$ ,  $f' = 250$  мм – на макеті установки, що використовує новий метод визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів та виробів на їх основі в центрі поля зору, в порівнянні з результатами вимірювання коефіцієнта розсіювання цих об'єктів у центрі поля зору у відповідності до діючих стандартів. Вимірювання проводилися з використанням установки з діаметром кулі  $D_k = 600$  мм,  $D_{отв} = 83$  мм та діаметром коліаторного об'єктива  $D_{к.о.} = 60$  мм при максимальних відносних отворах об'єктів, причому контроль об'єктива YASHICA JAPAN виконувався у двох спектральних діапазонах, а контроль об'єктива “Телеар-5” виконувався і при його діафрагмуванні до мінімального відносного отвору.

Значення відносного відхилення результатів вимірювань двома способами не перевищують  $\pm 14\%$ , що менше границь допустимого відхилення  $\pm 20\%$  при відносних похибках вимірювання кожним із методів не більше  $\pm 10\%$ .

### Висновки

Запропоновано новий метод визначення коефіцієнта розсіювання об'єктів та виробів на їх основі і установку для його реалізації, що в порівнянні зі стандартизованою установкою забезпечує:

- 1) зменшення внутрішнього діаметра фотометричної кулі до 5 разів;
- 2) можливість зменшення відносної похибки вимірювання завдяки відсутності в бюджеті похибок похибки вимірювання коефіцієнта розсіювання коліаторного об'єктива, а також завдяки значному зменшенню впливу відхилень від лінійності системи “фотоелектричний приймач – вимірювальний прилад” і впливу її шумів;
- 3) зниження вимоги до яскравості темного фону порівняно з вимогою до яскравості чорного предмета в 6,7 разу;
- 4) спрощення складу установки, тому що новий метод не потребує використання коліаторного об'єктива і спеціального імітатора чорного предмета;
- 5) розширення функціональних можливостей контролю: можливість визначати кількість розсіюючих конструктивних елементів об'єктива, порядок їх розташування вздовж оптичної осі об'єктива

та вклад кожного з них у значення коефіцієнта розсіювання об'єктива;

б) зняття обмежень на нижню межу діапазону вимірювання значень коефіцієнтів розсіювання об'єктів, яка становить 0,03 у стандартизованому методі;

7) зниження вимог до рівномірності освітлення внутрішньої поверхні фотометричної кулі джерелами світла (рівномірності яскравості в межах кутової апертури  $\alpha_{max}$ ) без збільшення відносної похибки визначення коефіцієнта розсіювання  $C$  або зменшення цієї похибки з 10 до 4 % пропорційно поліпшенню рівномірності яскравості в межах кутової апертури  $\alpha_{max}$ .

Напрямок подальшої роботи – пошук шляхів зменшення відстані  $L'_{max}$ , від якої залежить довжина установки.

### Список літератури

1. Объективы диапроекторные. Метод измерения коэффициента рассеяния: ОСТ 3-4205-79. – [Дата введения 1980-01-01]. – 1979. – (Отраслевой стандарт).
2. Объективы кинопроекторные. Технические условия: ГОСТ 3840-79. – [Дата введения 1981-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 9 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
3. Приборы телескопические. Метод измерения коэффициента пропускания и рассеяния: ОСТ 3-3210-75. – [Дата введения 1978-07-01]. – 1976. – (Отраслевой стандарт).
4. Объективы для изделий общей техники. Методы измерения коэффициента рассеяния: ОСТ ВЗ-4774-80. – 1980. – (Отраслевой стандарт).
5. Объективы для кино- и фотоаппаратов. Метод определения коэффициента рассеяния: ГОСТ 24724-81. – [Дата введения 1982-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 13 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
6. <http://www.niiki.ru/pages/n-k-isp-opt.html>.
7. Гуревич М.М. Введение в фотометрию / М.М. Гуревич. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-е, 1968. – 244 с.
8. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1976. – 432 с.
9. Апенко М.И. Физическая оптика / М.И. Апенко, Н.П. Гвоздева. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.