

*М.Ю. Сахновський, А.О. Карачевцев, О.М.Козаков, В.Г. Житарюк*  
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

## **ІНТЕГРУЮЧА СФЕРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЛЬОРОВИХ ПАРАМЕТРІВ НЕСАМОСВІТНИХ ДИФУЗНО-РОЗСІЮЮЧИХ ОБ'ЄКТІВ**

*У даній роботі представлені можливості визначення кольорових координат несамосвітних об'єктів спектрофотометричним методом який базується на вимірюваннях спектральних коефіцієнтів дифузного відбивання в геометрії і коефіцієнтів яскравості.*

*Ключові слова: коефіцієнт яскравості, кольорові координати, спектральні коефіцієнти, дифузне відбивання.*

*In this paper presents the possibility of determining color coordinates of notglow objects of spectrophotometric method based on measurements of spectral coefficients of diffuse reflection in geometry of brightness coefficients.*

*Keywords: coefficient of brightness, color coordinates, spectral coefficients, diffuse reflectance.*

Сьогодні існує велика практична необхідність визначення кольорових координат  $X, Y, Z$  несамосвітних об'єктів в різних галузях науки і техніки: поліграфія, медицина, сільське господарство та ін. Зручний для проведення таких вимірювань є спектрофотометричний метод [1, 2], який базується на вимірюваннях спектральних коефіцієнтів дифузного відбивання в геометрії  $0/d$  і коефіцієнтів яскравості в геометрії  $d/0$ . При цьому кути опромінення та спостереження не повинні перевищувати  $8^\circ$ . При відомих значеннях спектральних коефіцієнтів дифузного відбивання  $\rho_{0/d}(\lambda)$  та коефіцієнтів яскравості  $\beta_{0/d}(\lambda)$  координати кольору визначаються наступним стандартним виразом:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} \varphi(\lambda) \bar{a}_i(\lambda) b(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де:  $\varphi(\lambda)$  – спектральний розподіл енергії джерела світла;  $\bar{a}_i(\lambda)$  – стандартні функції координат кольору ( $\bar{a}_x(\lambda)$ ,  $\bar{a}_y(\lambda)$ ,  $\bar{a}_z(\lambda)$ );  $b(\lambda) \equiv \rho_{0/d}(\lambda)$ , або  $b(\lambda) \equiv \beta_{0/d}(\lambda)$ .

Таким чином визначення кольорових координат  $X, Y, Z$  відбитого об'єктом випромінювання від заданого джерела світла (із стандартним розподілом) зводиться до спектральних вимірювань коефіцієнтів дифузного відбивання та

яскравості. В роботах [3, 4] нами було показано, що вимірювання спектральних коефіцієнтів  $\rho_{0/d}(\lambda)$  та  $\beta_{0/d}(\lambda)$  можна здійснити із високою точністю (за рахунок введення систематичних поправок) використовуючи інтегруючу сферу як приставку до подвійного монохроматора.

Згідно фотометрії:

$$\rho_{0/d}(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega=2\pi} \beta(\vec{r}_o, \vec{r}) \cos \theta d\Omega,$$

$$\beta_{0/d}(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega=2\pi} \beta(\vec{r}_o, \vec{r}) \cos \theta_0 d\Omega_0.$$

де  $\beta(\vec{r}_o, \vec{r})$  – коефіцієнт яскравості зразка для заданих напрямків опромінення та розсіювання, які визначаються одиничними векторами  $r_o, \vec{r}$ ;  $d\Omega, d\Omega_0$  – елементарні тілесні кути розсіювання та опромінення.

Поправки, які забезпечують достатньо високу точність вимірювання вищезгаданих спектральних коефіцієнтів враховують наступні фактори: втрати відбитого від зразка випромінювання на технологічних отворах сфери, відхилення властивостей внутрішнього покриття сфери від ідеального розсіювача, непостійність кутової чутливості фотоприймача в межах кутів падіння  $0^\circ \div 90^\circ$ . Конструкція інтегруючої сфери повинна забезпечити незмінність присутності усіх діючих поверхонь при вимірюваннях сигналів приймача.

Вимірювання коефіцієнтів дифузного відбивання коефіцієнтів дифузного відбивання  $\rho_{0/d}(\lambda)$  зводиться до вимірювання двох сигналів фотоприймача при монохроматизованих пучках, направлених на зразок або на стінку сфери (метод Тейлора), див рис. 1.

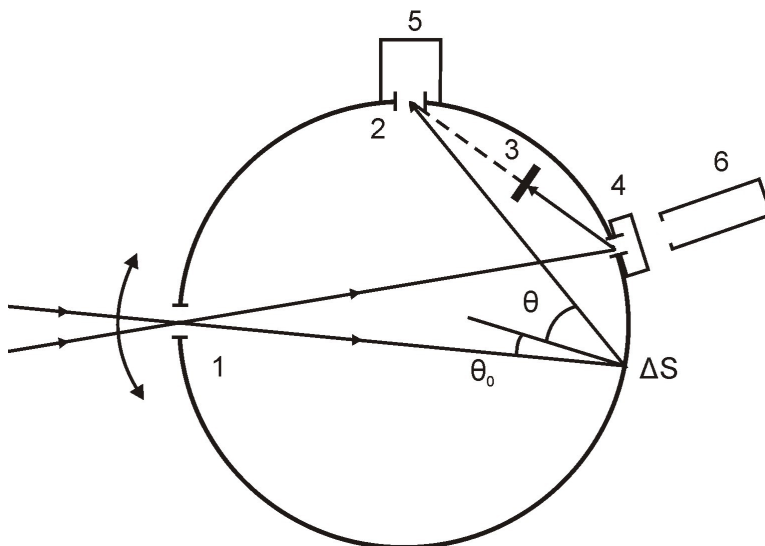


Рис. 1. Принципова схема вимірювання коефіцієнта дифузного відбивання в геометрії  $0/d$ .

1 – вхідний отвір площею  $\Delta S_1$ , 2 – вихідний отвір  $\Delta S_2$ , 3 – екран, що перекриває перше відбивання променя від зразка від попадання на фотоприймач, 4 – зразок, 5 – фотоприймач, 6 – додаткова циліндрична порожнина для визначення не сфокусованої долі опромінюючого пучка на зразок.

Конструктивно інтегруюча сфера має діаметр 180 мм із діаметром вхідного і вихідного отворів  $\sim 22$  мм. Освітлення зразка та незаекранованого елемента  $\Delta S$  здійснюється поворотом сфери на кут  $\sim 8^\circ$  навколо вісі, розташованої в площині вхідного отвору і перпендикулярної до малюнку. Це забезпечує незмінність інтенсивностей опромінюючих пучків при вимірюваннях.

Визначення долі несфокусованої частини пучка на зразок стає актуальним при малих значеннях його коефіцієнта відбивання. Для цього використовується циліндрична порожнина діаметром 50 мм і довжиною 30 см із коефіцієнтом чорноти  $\sim 10^{-4}$ .

Сфера із середини покрита фарбою  $\text{BaSO}_4$ , виготовленою на основі полівінілового спирту [5]. Покриття має високе значення коефіцієнта дифузного відбивання в спектральному діапазоні 380 – 760 нм ( $\rho_{\min} = 94\%$ ,  $\lambda = 380$  нм,  $\rho_{\min} = 96,8\%$ ,  $\lambda = 720$  нм), що забезпечує значення світлосили (ефективності) сфери не рівні  $\sim 10\%$ .

Таким чином вимірювання коефіцієнта відбивання  $\rho_{0/d}(\lambda)$  зводиться до зняття двох сигналів фотоприймача при освітленні зразка вузьконаправленим пучком ( $N_1$ ) та стінки сфери ( $N_2$ ) в таке місце, коли екран 3 не затіняє фотоприймач. Абсолютне значення коефіцієнта дифузного відбивання визначиться відношенням двох сигналів:

$$\rho(\alpha) = \frac{N_1 (1 + \gamma)}{N_2 (1 - \alpha)}, \quad (3)$$

де: поправка  $\alpha$  враховує втрати світлового потоку на технологічних отворах сфери, поправка  $\gamma$  враховує відхилення властивостей внутрішнього покриття від ідеального розсіювача та кутової чутливості фотоприймача від косинусної залежності. Згідно [3] значення  $\alpha$  визначається виразом:

$$\alpha = \frac{\beta(\theta_0, \theta) \cdot \Delta S_2}{S \cdot \rho(\theta_0)}, \quad (4)$$

де  $\beta(\theta_0, \theta)$  – спектральний коефіцієнт яскравості зразка для кутів падіння  $\theta_0$  і відбивання  $\theta$  в напрямку на центр вхідного отвору,  $\rho(\theta_0)$  – коефіцієнт відбивання зразка при куті падіння  $\theta_0$ . Для зразків із високою дифузністю  $\alpha = \frac{\Delta S_1}{S} \approx 0,004$ .

Для зразків із довільною індикатрисою розсіяння значення  $\beta(\theta_0, \theta)$ , необхідна для визначення поправки  $\alpha$ , може бути визначено методом описаним в роботі [5].

Поправка  $\gamma$  згідно роботи [3], визначається виразом:

$$\gamma = \left[ \frac{\beta(\theta_0, \theta) \cdot \sigma(\theta)}{\bar{\sigma} \rho_{c,d}} (1 - \rho') + \frac{\rho'_c \cdot \rho_c(\theta_0)}{\rho_{c,d}} - 1 \right], \quad (5)$$

де  $\beta(\theta_0, \theta)$  – коефіцієнт яскравості внутрішнього покриття сфери кутів  $\theta_0, \theta$  (кути зображені на рис.1);

$\rho'$  – ефективний коефіцієнт відбивання сфери;

$\rho_c(\theta_0)$  – коефіцієнт відбивання покриття сфери для кута падіння  $\theta_0$  (в околі елемента  $\Delta S$ );

$\rho_{c,d}$  – коефіцієнт відбивання внутрішнього покриття сфери при дифузному опроміненні;

$\sigma(\theta)$  – значення відносної кутової чутливості фотоприймача при куті падіння  $\theta$ ;

$\bar{\sigma}$  – усереднене значення відносної кутової чутливості фотоприймача в межах кутів  $0^\circ - 90^\circ$ .

Значення коефіцієнтів відбивання та яскравості внутрішнього покриття, необхідних для розрахунку поправки  $\gamma$  наведено в роботах [4, 5].

Наприклад при застосування фото помножувача (ФЕП-38), прикритого молочним склом (для покращення його “косинусності”),  $\sigma(\theta) = \sigma(45^\circ) = 0,934$ ,  $\bar{\sigma} = 0,964$  і для довжини хвилі  $\lambda = 650 \text{ нм}$  поправка  $\gamma = 0,0035$ .

Розглянемо метод вимірювання коефіцієнта яскравості  $\beta(d/\lambda)$ .

Нехай монохроматизованих пучок випромінювання через вхідний отвір 1 освітлює елемент  $\Delta S$  внутрішньої поверхні сфери (рис.2).

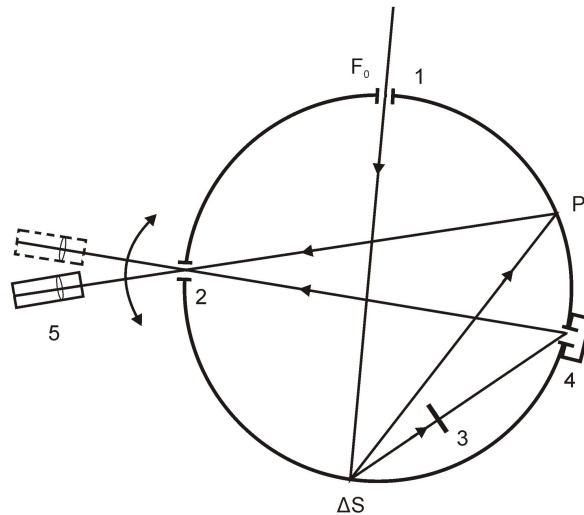


Рис.2. Визначення коефіцієнта яскравості  $\beta_{d/\lambda}(\lambda)$  на ІШФ абсолютним методом.

Перед вхідним отвором 2 знаходиться приймальна система 5, яка зображає поверхню зразка з допомогою об’єктива на фотоприймач.

При повороті приймальної системи появляється можливість зображення на фотоприймач ділянки сфери в околиці точки  $P$ , яка не перекрита екраном 3. Сам зразок освітлюється рівномірною яскравістю з усіх напрямків в межах тілесного кута  $2\pi$ , яка створюється за рахунок багаторазових відбивань ШПФ.

Вимірювання коефіцієнта яскравості зразка абсолютним методом зводиться до вимірювання двох сигналів  $N_1$  і  $N_2$ , які відповідно отримуються при зображенні на приймач зразка або ділянки сфери в околиці точки  $P$  (див. рис.2). Значення коефіцієнта яскравості визначається аналогічним виразом (3):

$$\beta_{d/0}(\lambda) = \frac{N_1 (1 + \gamma)}{N_2 (1 - \alpha)}, \quad (6)$$

тут поправка  $\alpha$  враховує наявність технологічних отворів та поглинаючих елементів на поверхні сфери, поправка  $\gamma$  враховує відмінність властивостей внутрішнього покриття від ідеального розсіювача [4]:

$$\alpha = \frac{\sum_j (1 - \rho_j) \Delta S_j \beta(\theta_{0j}, 0^\circ)}{S \cdot \beta(d/0)}, \quad (7)$$

$$\gamma = (1 - \rho'_c) \left[ \frac{\beta_c(\theta_0, \theta) \cdot \beta_c(\theta, 0^\circ)}{\rho'_c \cdot \rho_c} - 1 \right] - \rho'_c \left( 1 - \frac{\rho_c}{\rho_{c,d}} \right), \quad (8)$$

де  $\beta_c(\theta_0, \theta) \cdot \beta_c(\theta, 0^\circ)$  – коефіцієнти яскравості внутрішнього покриття сфери, які відповідають умові відбивання від елемента  $\Delta S$  в напрямку точки  $P$  та від елемента  $\Delta S$  в напрямку фотоприймача,  $\rho_c$  – коефіцієнт відбивання покриття сфери в геометрії  $d/d$  (дифузне освітлення – дифузне відбивання).

Розрахунок поправок  $\alpha$ ,  $\gamma$  для інтегруючої сфери пофарбованою  $\text{BaSO}_4$  на основі ПВС із вищезгаданою геометрією отворів дає такі значення:  $\alpha$  для діапазону 380 – 760 нм складає величину  $\sim 0,0075$  (зразок із високою дифузністю);  $\gamma$  - відповідно 0,0005 – 0,001.

Таким чином при введенні поправок  $\alpha$ ,  $\gamma$  метод інтегруючої сфери дозволяє здійснювати вимірювання коефіцієнта дифузного відбивання  $\rho(0/d)$  та коефіцієнта яскравості  $\beta(d/0)$  із невиключеною систематичною помилкою, що не перевищує 0,1 %. Із врахуванням випадкової складової похибки загальна похибка вимірювань може складати величину  $\leq 0,2$  %.

При проведенні вищезгаданих вимірювань вищезгаданих величин відносним методом, конструкція інтегруючої сфери повинна допускати одночасну присутність на її поверхні досліджуваного та еталонного зразків, які повинні бути за екрановані від вхідного отвору (вимірювання  $\rho(0/d)$ ), або від елемента  $\Delta S$  (вимірювання  $\beta(d/0)$ ). В той же час при відносних вимірюваннях введення поправок також стає

необхідним, якщо оптичні властивості досліджуваного зразка та еталонного зразка істотно відрізняються.

Таким чином вимірювання на інтегруючій сфері вищезгаданих спектральних коефіцієнтів [6] дає можливість визначати кольорові параметри  $X, Y, Z$  дифузнорозсіюючих об'єктів та знаходити інтервальні значення похибок їх експериментального визначення.

1. Д.Б. Джад, Г. Вышецкий. *Цвет в науке и технике*. М. : Мир 1987. – 296 с.
2. Домасев М., Гнатюк С., *Цвет: Управление цветом, цветовые расчёты и измерения*. – Спб : Питер, 2009. – 224 с.
3. М.Ю. Сахновський. *О возможностях использования интегрального шарового фотометра в измерениях диффузного отражения по абсолютной методике*. – *Оптика и спектроскопия*, – 1987. т.62.
4. Проценко В.А., Сахновський М.Ю., Сербуков Я.М. *Интегрирующая сфера для измерений коэффициентов отражения и яркости*. – *Оптика и спектроскопия*. – 1990, т.69, в.3, с. 1162-1166.
5. Кунецкий М.Г., Гуминецкий С.Г., Сахновский М.Ю., Котик А.Ф. *Исследования яркости покрытий из краски на основе  $\text{BaSO}_4$* . – *Оптико-мех. промышленность* – 1981. – №6. с. 3-4.
6. Сахновский М.Ю., Кунецкий М.Г. *Лабораторный комплекс для метрологического обеспечения измерений абсолютных значений коэффициентов отражения и яркости*. – *Тезы докладов VII Всесоюзной научно-технической конференции “Фотометрия и метрологическое обеспечение”*, М. : ВНИИОФИ, 1988, с. 139.