

УДК 621.315

**О. О. Сіробаба**, асп.,  
**С. С. Овчинников**,  
 докт. техн. наук  
 Харківська національна  
 академія міського  
 господарства

## **МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ЯСКРАВОСТІ НА ОСНОВІ ФІЗІОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗОРОВОГО АНАЛІЗАТОРА**

Зовнішнє освітлення сучасного міста є основним елементом його впорядкування. Установки зовнішнього освітлення різного функціонального призначення створюють унікальний образ міста в темний час доби, формуючи світлове середовище, що забезпечує безпеку і емоційне задоволення мешканців і гостей мегаполісу. Основними нормованими параметрами зовнішнього освітлення є яскравість й освітленість дорожнього полотна. Відповідно до стандарту рівні яскравості дорожнього полотна визначаються в межах 0,2 - 1,6 кд/м<sup>2</sup> залежно від категорії вулиці [1]. Рівні яскравості для зовнішнього освітлення приймаються спираючись на відбиваючі властивості поверхні асфальту в суху погоду, тобто за нормальних умов. Згідно проведеним в 2007р. вимірам рівнів яскравості дорожнього полотна створюваних різними освітлювальними установками, розподіл яскравості істотно змінюється залежно від різних погодних умов [2]. Наприклад, у дощову погоду яскравість ділянки поверхні дороги із дзеркальним відбиттям у напрямку лінії зору водія збільшується в порівнянні з яскравістю за нормальних умов, тоді як яскравість ділянок у темній області дорожнього полотна зменшується. Зростаюча нерівномірність яскравості полотна приводить до погіршення умов видимості. При цьому рівень середньої яскравості мокрого полотна зростає. У сніжну погоду яскравість дорожнього полотна може бути в кілька разів більше, ніж за нормальних умов. Отже, для всіх погодних умов діапазон яскравості оточення не виходить за межі в 0,01 - 5 кд/м<sup>2</sup> і відноситься до області функціонування присмеркового зору.

Проте сьогодні, при оцінці зовнішнього освітлення, використовують світлові величини, встановлені для світлоадаптованого ока. Для цього застосовують нормалізовану функцію відносної спектральної світлової ефективності випромінювання для денного зору  $V(\lambda)$ . При малих рівнях яскравості функція відносної спектральної світлової ефективності випромінювання для зорового апарату зазнає значні зміни в порівнянні з денним зором [3]. Величина найбільш інформативна в присмерковому діапазоні адаптації зору – еквівалентна яскравість  $L_{ек}$ , також базується на функції відносної спектральної світлової ефективності випромінювання, але для присмеркового зору  $V_{ек}(\lambda, L_{ек})$ . Складність використання функції  $V_{ек}(\lambda, L_{ек})$

для розрахунку еквівалентної яскравості полягає в залежності самої функції  $V_{ек}(\lambda, L_{ек})$  від  $L_{ек}$ . Зміст поняття еквівалентної яскравості полягає в тому, що вона характеризує присмеркову світлову ефективність випромінювання, стосовно стандартного випромінювання. Під стандартним мається на увазі випромінювання абсолютного чорного тіла з температурою 2046 К.

Еквівалентна яскравість визначається за формулою [2]:

$$L_{ек} = K_{\max}(L_{ек}) \cdot \int l_e(\lambda) V_{ек}(\lambda, L_{ек}) d\lambda, \quad (1)$$

де

$$K_{\max}(L_{ек}) = 683 \cdot \frac{\int I_e^0(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int I_e^0(\lambda) V_{ек}(\lambda, L_{ек}) d\lambda} \quad (2)$$

$K_{\max}(L_{ек})$  - функція спектрального складу еталонного випромінювача й еквівалентної яскравості,

$l_e(\lambda)$  - спектральна щільність енергетичної яскравості випромінювання досліджуваного ДС,  $I_e^0(\lambda)$  - спектральна щільність яскравості випромінювання зразкового ДС.

Існуючі методи розрахунку еквівалентної яскравості, що засновані на методі ітерацій інтегралу (1) та використання номограм, є трудомісткими та морально застарілими, через що вони не одержали широкого застосування в практиці світлотехнічного проектування. Крім того, створення вимірювального приладу зі спектральною чутливістю, що змінюється від рівня яскравості, є практично нерозв'язним завданням. Ця обставина диктує необхідність у розробці методики інженерного розрахунку еквівалентної яскравості, що дозволяє швидко й з достатньою точністю визначити її рівень при світлотехнічному проектуванні та методів її вимірювання.

Нами розроблений метод розрахунку еквівалентної яскравості [3], в якій функція  $V_{ек}(\lambda, L_{ек})$ , моделюється з використанням елементарних нормалізованих функцій ефективності випромінювання для трьох кольоросприймаючих рецепторів людини.

Розроблювальний метод полягає в поданні функції еквівалентної яскравості наступним виразом:

$$V_{ек}(\lambda, L_{ек}) = K_1(L_{ек})S_1(\lambda) + \dots + K_n(L_{ек})S_n(\lambda) \quad (3)$$

Оскільки в процесі зорового сприйняття беруть участь 4 типи рецепторів, очікується, що число додатків не буде перевищувати цю цифру.

За результатами теоретичних досліджень нами було доведено, що при апроксимації  $V_{ек}(\lambda, L_{ек})$  як суперпозиції нормалізованих кривих відносно спектральної світлової ефективності для денного  $V(\lambda)$  й нічного  $V'(\lambda)$  зору, похибка при розрахунку еквівалентної яскравості, що створюється різноспектральними ДС може досягати 25% (Рис.1).

$$V_{ек}(\lambda, L_{ек}) = K_1(L_{ек})V(\lambda) + K_2(L_{ек})V'(\lambda), \quad (4)$$

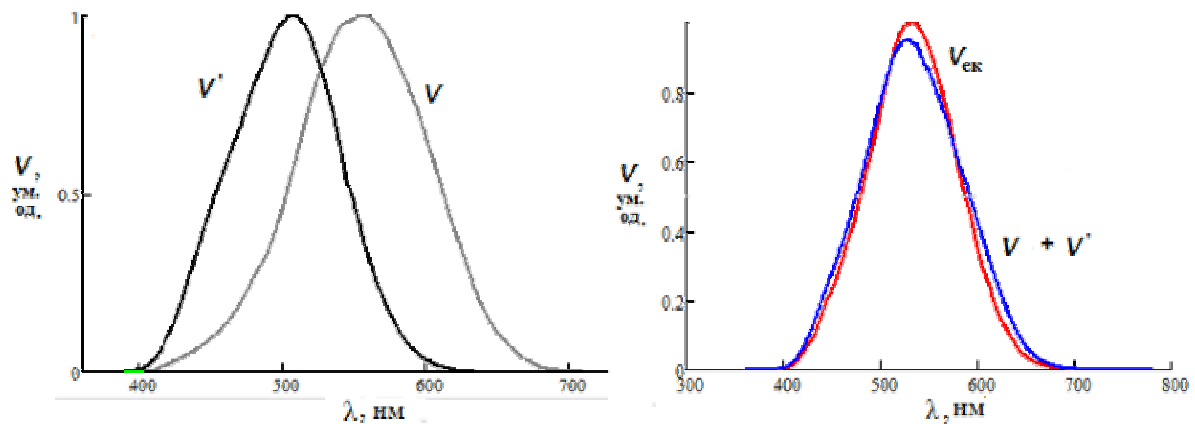


Рис. 1. Моделювання  $V_{ек}(\lambda, L_{ек})$  на основі  $V(\lambda)$  та  $V'(\lambda)$ .

Подальший аналіз причини похибки, що проводився спираючись на результати сплайн апроксимації, довів, що зменшення відносної чутливості трьох кольоросприймаючих аналізаторів відбувається нелінійно і непропорційно (Рис. 2). На рисунку коефіцієнти  $K_1$ - $K_4$  відображують відповідно вклад К, З, С рецепторів та паличкового апарату зору у відчуття світлоти. Отримані функції пояснюють залежності відносних чутливостей світлосприймаючих аналізаторів людини від еквівалентної яскравості. Такий підхід значно відрізняється від спроб інших дослідників описувати функцію  $V_{ек}(\lambda, L_{ек})$  формальними математичними формулами, як це, наприклад, було зроблено у [4, 5].

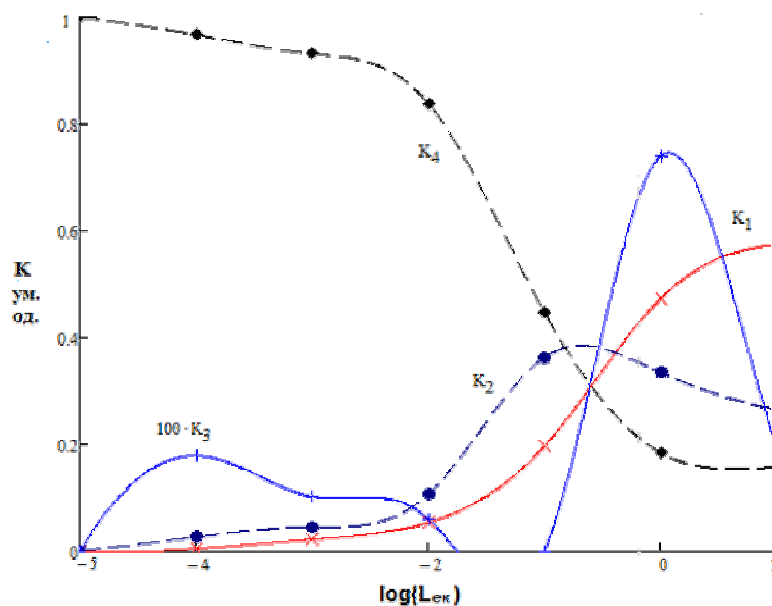


Рис. 2. Функція вкладу світлових рецепторів у відчуття світлоти.

Оскільки користуватися колориметричною системою КЗС для розрахунків не досить зручно, було прийнято рішення переходу до розрахунку еквівалентної яскравості з використанням колориметричної системи XYZ. Слід зазначити, що можна використовувати й інші колориметричні системи, бо всі вони побудовані на особливостях світлосприймаючого апарату людини. Порівняльний аналіз різноманітних колориметричних систем показав, що найбільш ефективним є застосування колориметричної системи XYZ, так як при цьому апроксимацію функції

$V_{ек}(\lambda, L_{ек})$  можна провести з найбільшою точністю, використовуючи функції  $V'(\lambda), V(\lambda)$  та  $\bar{x}(\lambda)$  нормалізованих МКО.

Для подальшого уточнення апроксимації нами отриманий вираз:

$$V_{ек}(\lambda, L_{ек}) = K_1(L_{ек})V(\lambda) + K_2(L_{ек})V'(\lambda) + K_3(L_{ек})\bar{x}(\lambda), \quad (5)$$

де  $\bar{x}(\lambda)$  - питома координата кольору  $X$  колориметричної системи XYZ.

Нами були визначені функції  $f(L_{ек}), K_1(L_{ек}) - K_3(L_{ек})$ .

Для отримання кінцевої формули перетворимо (1):

$$L_{ек} = K_{\max}(L_{ек}) \cdot \int l_e(\lambda) [K_1(L_{ек})V(\lambda) + K_2(L_{ек})V'(\lambda) + K_3(L_{ек})\bar{x}(\lambda)] d\lambda$$

$$L_{ек} = K_{\max}(L_{ек}) \cdot \left[ \int l_e(\lambda) K_1(L_{ек}) V(\lambda) d\lambda + \int l_e(\lambda) K_2(L_{ек}) V'(\lambda) d\lambda + \int l_e(\lambda) K_3(L_{ек}) \bar{x}(\lambda) d\lambda \right]$$

$$L_{ек} = K_{\max}(L_{ек}) \cdot \left[ K_1(L_{ек}) \int l_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda + K_2(L_{ек}) \int l_e(\lambda) V'(\lambda) d\lambda + K_3(L_{ек}) \int l_e(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \right]$$

В результаті отримуємо:

$$L_{ек} = K_{\max}(L_{ек}) \cdot [K_1(L_{ек})L_{\delta} + K_2(L_{ек})L_{\eta} + K_3(L_{ек})X'] \quad (6)$$

де  $L_{\delta}, L_{\eta}, X'$  - ефективні потоки випромінювання (св.Вт/Вт), що розраховуються за нормалізованими кривими МКО  $V(\lambda), V'(\lambda), \bar{x}(\lambda)$  відповідно. Під світловим ватом варто розуміти ефективний потік випромінювання без обліку максимальної світлової чутливості.

Функції коефіцієнтів  $K_1(L_{ек}), K_2(L_{ек}), K_3(L_{ек})$  визначені з використанням регресійного аналізу в середовищі Mathcad (Рис. 3) і в діапазоні  $L_{ек} = 10^{-2} \dots 10$  кд/м<sup>2</sup> представлені виразами:

$$K_1(L_{ек}) = 0,033(\log L_{ек})^3 - 0,091(\log L_{ек})^2 + 0,073 \log L_{ек} + 0,985$$

$$K_2(L_{ек}) = 0,1(\log L_{ек})^2 - 0,194L_{ек} + 0,1$$

$$K_3(L_{ек}) = -0,0412(\log L_{ек})^3 - 0,025(\log L_{ек})^2 + 0,105 \log L_{ек} - 0,0568$$

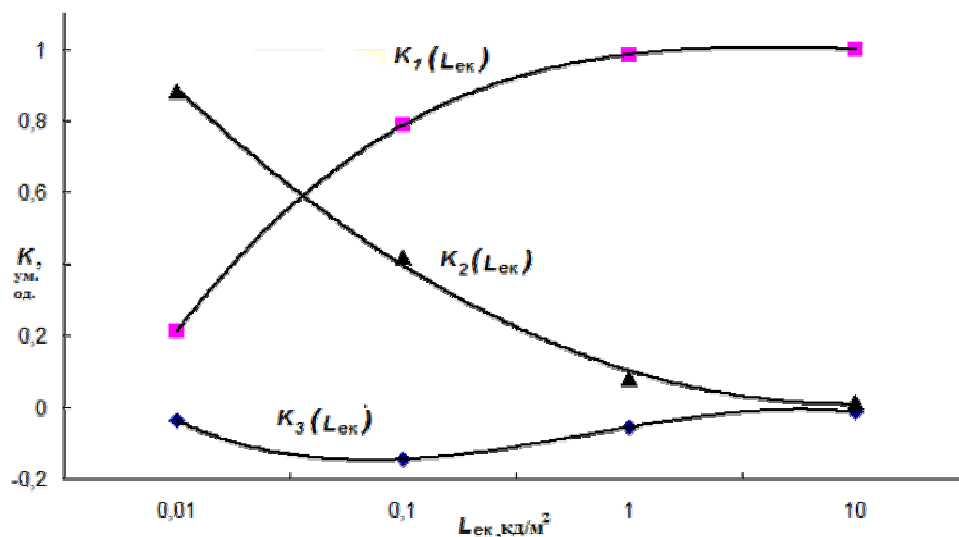


Рис. 3. Функції коефіцієнтів  $K_1(L_{ек}), K_2(L_{ек}), K_3(L_{ек})$ .

Особливістю методики є фізіологічна обґрунтованість функції спектральної світлової ефективності випромінювання в діапазоні малих яскравостей. Використання такої функції апроксимації дає можливість за координатами кольору та фотометричною яскравістю ДС визначити еквівалентну яскравість, яка адекватно

відображує рівень зорового сприйняття в умовах зовнішнього освітлення. Для реальної оцінки ефективності ДС в зовнішньому освітленні (в умовах присмеркового зору) нами проведено порівняння еквівалентної яскравості дорожнього покриття для різних рівнів фотометричної яскравості. В таблиці 1 наведені результати розрахунку еквівалентної яскравості дорожнього покриття за різних умов адаптації до стандартної яскравості.

**Таблиця 1**

**Еквівалентної яскравість дорожнього покриття за різних умов адаптації**

Яскравість стандартна	ДНаТ	МГЛ	СД Golden Dragon		
			3500K	5600K	6500K
0,01	0,0138	0,0066	0,0129	0,0177	0,0191
0,1	0,114	0,066	0,113	0,136	0,144
0,2	0,178	0,223	0,221	0,257	0,27
0,4	0,367	0,435	0,432	0,488	0,51
0,8	0,751	0,851	0,848	0,931	0,96
1,0	0,945	1,06	1,05	1,15	1,18
1,6	1,53	1,67	1,67	1,78	1,82
5,0	4,92	5,09	5,08	5,23	5,28

Рисунок 4 ілюструє значну розбіжність світлової ефективності для розглянутих ДС (1 – ДнаТ, 2 – МГЛ, 3 – СД 3500К, 4 – СД 5600К, 5 – СД 6500К), що відкриває перспективи більш раціонального використання світлової енергії.

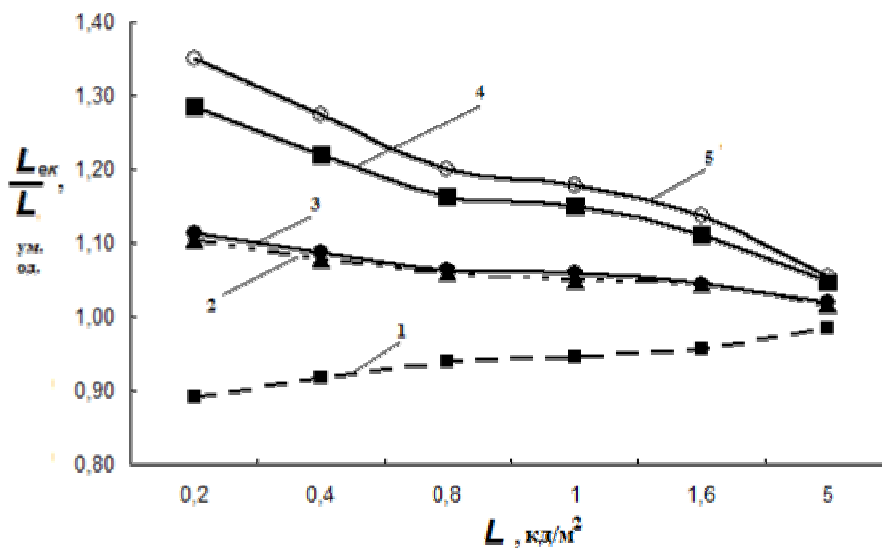


Рис. 4. Ефективність ДС для присмеркового зору

За результатами проведеного аналізу виразно просліджується, що ефективність випромінювання для присмеркового зору значно відрізняється від ефективності випромінювання для денного зору. Це дозволяє точніше оцінити переваги одних ДС над іншими, що надзвичайно важливо в наш час, коли розробляються нові типи ДС. При порівнянні світлової віддачі ДС для присмеркового зору чітко видно, що для ДнаТ вона знижується більш ніж на 8% в порівнянні зі світловою віддачею для денного зору, в той час як для СД 6500К вона підвищується більше ніж на 25% для рівня яскравості 0,4 кд/м<sup>2</sup>.

Проведений порівняльний аналіз дозволяє сформулювати основні висновки:

1. Встановлено, що найбільш ефективним представленням функції спектральної світлової ефективності для присмеркового зору є апроксимація з використанням трьох функцій нормалізованих МКО: функції спектральної світлової ефективності для нічного  $V'(\lambda)$  та денного  $V(\lambda)$  зору та координати кольору  $\bar{x}$  колориметричної системи XYZ.
2. Розроблена методика розрахунку еквівалентної яскравості, яка дозволяє спростити оцінку світлової ефективності ДС в умовах їх використання в зовнішньому освітленні.
3. На основі розробленої методики можлива розробка фотоелектричних приладів для вимірювання еквівалентної яскравості.

#### Список літератури:

1. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.
2. Viikary M. Modeling spectral sensitivity at low light levels based on mesopic visual performance. / Viikary M., Ekrias A., Eloholma M., Halonen L. // Clinical Ophthalmology. – 2008. - № 2(1).
3. Серобаба, А. А. Изменение спектральной световой эффективности излучения при уменьшении яркости как результат перестройки взаимодействия световоспринимающих рецепторов. / А. А. Серобаба, С. С. Овчинников // Светотехника и электроэнергетика. – 2010. - №1. - С. 4-10.
4. Adrian W., Visibility of targets: Model for calculation. // Lighting Res. Technol. – 1989. - №21: pp. 181-188.
5. He Y., System of Mesopic Photometry. / He Y., Bierman A., Rea M., // Lighting Res. Technol. – 1998. – №30: pp. 175-81.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЯРКОСТИ НА ОСНОВЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА

А.А. Серобаба, С.С. Овчинников

*В статье приводятся основные принципы методики расчета эквивалентной яркости, которая основана на физиологических особенностях зрительного аппарата человека. Использование разработанной методики позволяет получать результаты, которые точнее характеризуют эффективность источников света в установках наружного освещения, в сравнении с результатами, получаемыми по стандартным методикам. Алгоритм расчета приведенной методики обеспечивает возможность разработки фотоэлектрических приборов для измерения эквивалентной яркости.*

#### METHOD OF EQUIVALENT BRIGHTNESS CALCULATION ON BASE OF VISUAL ANALYZER PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS

A.A. Serobaba, S.S. Ovchinnikov

*Basic principles of method of equivalent brightness calculation which is based on the physiological characteristics of human visual apparatus are presented in the article. The use of the designed method allows to get consequences which more precisely characterize efficiency of sources of light in the options of outward illumination, what consequences, designed on standard methods. The algorithm of calculation of the resulted method is provided by the capability of development of photo-electric devices for determination of equivalent brightness.*