

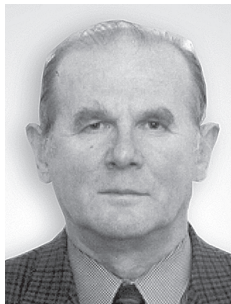
4. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання спектральних, інтегральних і редукованих коефіцієнтів спрямованого пропускання, дзеркального та дифузного відбиття в діапазоні довжин хвиль від 0,2 мкм до 25,0 мкм: ДСТУ 7122:2009. — [Чинний від 2011-01-01]. — К.: Держспоживстандарт України.
5. *Бронштейн И.Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. — М.: Наука, 1981. — 720 с.
6. *Тихонов А.Н.* Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Арсеньев. — М.: Наука, 1986. — 288 с.
7. *Купко А.Д.* Влияние аппаратной функции монохроматора на точность спектрометрических измерений / А.Д. Купко // Украинський метрологічний журнал. — 2000. — № 4. — С. 57–61.
8. Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик: ГОСТ 23198–94. — [Дата введения 1996-01-01]. — Минск: Изд-во стандартов, 1994. — 121 с. — (Межгосударственный стандарт).
9. *Тиходеев П.М.* Световые измерения в светотехнике (фотометрия) / П.М. Тиходеев. — Л.—М.: Гл. ред. энергетич. лит.-ры, 1936. — 465 с.
10. *Купко А.Д.* Метрологическое обеспечение световых измерений в Украине / А.Д. Купко, Л.А. Назаренко // Светотехника. — 2001. — № 5.— С. 38–40.
11. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP), Chinese Academy of Sciences (CAS). Accepted Article Preview: Tomi Pulli Advantages of white LED lamps and new detector. technology in photometry / Tomi Pulli, Timo Donsberg, Tuomas Poikonen, Farshid. Manoocheri, Petri Karha, and Erkki Ikonen // Received 12 December 2014; revised 22 May 2015; accepted 27 May 2015; accepted article preview 1 June 2015.

УДК 628.98

МЕЗОПІЧНА ФОТОМЕТРІЯ

Л.А. Назаренко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова (ХНУМГ)

Т. В. Можаровська, аспірант ХНУМГ, м. Харків



Л.А. Назаренко



Т. В. Можаровська

Показано систему мезопічної фотометрії як нову базу для проектування систем вуличного та дорожнього освітлення. Описано скотопік/фотопік (S/P) відношення, що є показником кількості енергії в короткохвильовій області спектра джерела світла. Наведено способи визначення функції спектральної світлової ефективності для присмеркової фотометрії. Відзначено необхідність подальшого вдосконалення системи мезопічної фотометрії.

The system of mesopic photometry as a new basis for the design of street and road lighting has been reported. Scotopic/photopic (S/P) ratio, which is the measure of the amount of energy in the short-spectrum light source have

been described. The method to determining the function of spectral efficiency for twilight photometry has been presented. The needs for further improvement of mesopic photometry have been noted.

Крім добре відомих денного і нічного існує ще один режим зору, який займає проміжне положення між фотопічним та скотопічним зором і називається мезопічним (присмерковим). Рівні яскравості присмеркового діапазону типові для вуличного освітлення у нічний час або у приміщеннях з аварійним чи охоронним освітленням.

Довгий час не існувало узгодженого Комітетом Міжнародної комісії з освітлення (МКО) методу оцінки візуальної ефективності джерел світла в цьому діапазоні. В 90-х рр. минулого століття було запропоновано підхід, який ставив метою забезпечити узгодження з існуючою фотометричною теорією. Шукана функція повинна відповідати денній та нічній функціям спектральної чутливості ока на границях присмеркового діапазону. Основною перешкодою при розробці системи присмеркового зору є надзвичайна складність зорового апарату людини. Спектральна чутливість ока визначається не тільки яскравістю, але й розміром, часом адаптації,

місцеположенням об'єкта в зоровому полі, його контрастом із фоном і швидкістю реакції. При зміні будь-якого параметра змінюються ефективність зорової системи і здатність виконувати поставлене завдання.

Публікація МКО системи мезопічної фотометрії [1] закінчила більш ніж 70-річні дебати відносно базових функцій, які повинні бути використані при виконанні фотометричних вимірювань у мезопічній області.

Цей розвиток має головні імплікації для продуктів, спроектованих для застосувань, які зустрічаються в мезопічному режимі, найважливішими з яких є освітлення вулиць та доріг уночі. Публікація МКО системи дозволяє оптимізувати спектральний розподіл потужності освітлення для досягнення високої мезопічної світлової ефективності. Використання світлодіодних світильників у цьому плані викликано тим фактом, що багато білих світлодіодів мають сильну блакитну рису, а отже, і вище S/P відношення та можливість "підстроювати" спектральні характеристики, наприклад, за допомогою комбінації світлодіодів різного кольору.

Фотопічний зір – це зорове сприйняття об'єктів людським оком при високому рівні зовнішньої освітленості (наприклад, при денному світлі). Фотопічний режим зору працює при яскравості, що перевищує 3 кд/м².

Скотопічний зір – це зорове сприйняття об'єктів людським оком при низькому рівні зовнішньої освітленості (наприклад, уночі). Скотопічний режим зору відповідає рівню яскравості, меншому за 0,03 кд/м². Існує ще один режим зору, який займає проміжне положення між фотопічним та скотопічним зором і називається мезопічним. Цей режим відповідає яскравості в інтервалі 0,03...3 кд/м² (рис. 1).

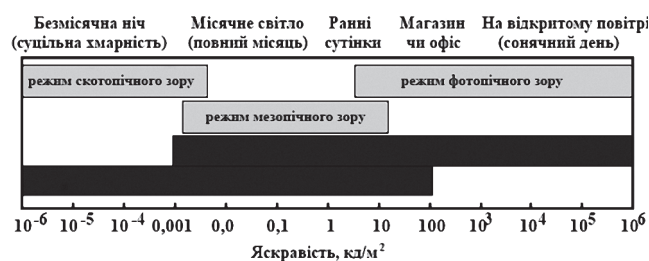


Рис. 1. Приблизні діапазони, що відповідають різним режимам зору

Через роки МКО визначив кілька спектральних функцій світлової ефективності, кожна із яких відноситься до певних умов (рис. 2). Найбільш широко використовуваними з них є [2]:

- 2-градусна фотопічна спектральна функція світлової ефективності $V(\lambda)$, яка застосовується до "високих" світлових рівнів, де людське бачення домінується активністю колбочок у ретині, палички відносно пасивні, колірне розпізнавання і можливість розпізнавати деталі у візуальному полі є хорошими;

- скотопічна спектральна функція світлової ефективності $V'(\lambda)$, яка застосовується до "низьких" світлових рівнів, коли активними є тільки палички, візуальна гострота зору є бідною, а розпізнавання кольорів неможливе.

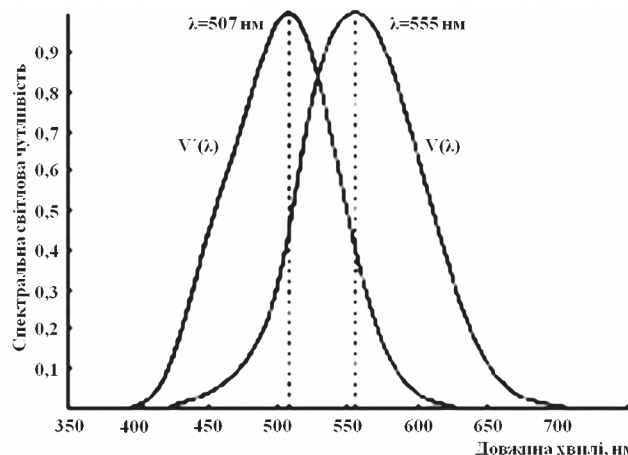


Рис. 2. Фотопічна і скотопічна спектральні функції світлової ефективності

Між фотопічними і скотопічними умовами чутливість ока змінюється швидко в залежності від характеристик (рівня і спектрального розподілу) освітлення, що використовується, зсунутих у напрямку блакитних довжин хвиль, якщо рівень світла зменшується. Це мезопічна область, яка може бути охарактеризована використанням МКО мезопічної фотометрії відповідно до документа CIE 191-2010 [1]. За цією системою відповідна функція спектральної світлової ефективності $V_{mes}(\lambda)$ визначається як

$$M(m)V_{mes}(\lambda) = m \cdot V(\lambda) + (1 - m) \cdot V'(\lambda) \quad (1)$$

для $0 \leq m \leq 1$, де коефіцієнт адаптації m визначається яскравістю і спектральними характеристиками поля візуальної адаптації, а $M(m)$ – така нормуюча функція, що $V_{mes}(\lambda)$ в максимумі дорівнює одиниці. Для адаптації яскравостей у 5 кд/м² або вище $m=1$, а для адаптації яскравості в 0,005 кд/м² або нижче $m=0$.

Корисним показником кількості енергії в короткохвильовій області спектра джерела світла є скотопик/фотопик (S/P) відношення. Відношення S/P обчислюють діленням скотопічного вихідного сигналу джерела світла (наприклад, світлового потоку, освітленості, яскравості) на відповідний фотопічний зважений сигнал, і це є властивістю спектрального розподілу потужності незалежно від світлового рівня.

Оскільки відповідно до рекомендацій МКО (1978), де говориться, що всі світлові ефективності при 555 нм еквівалентні без огляду на функцію світлової ефективності, з якої це виведено, S/P відношення рівноенергетичного спектра має значення приблизно 2,26.

Порівняння S/P відношення однієї лампи з другою дозволяє їх ранжувати в термінах їхніх скотопічних вихідних сигналів. Відношення також корисні в ранжуванні світлових джерел для позаосового бачення за мезопічних світлових рівнів.

Фотометричні та радіометричні величини взагалі відрізняються одна від одної використанням слів “світловий” і “радіаційний” відповідно (тобто сила світла – luminous intensity, сила випромінювання – radiant intensity, світловий потік – luminous flux, радіаційний потік – radiant flux), винятком із цього правила є величина освітленості (фотометричний еквівалент радіометричній величині опроміненості) і яскравість (фотометричний еквівалент радіометричній величині яскравості – radiance).

Проте для фотометричних величин несуттєво просто використовувати прикметник “світловий”, важливо також, що використовується функція спектральної світлової ефективності. Якщо функцію спектральної ефективності не позначено, то вважається, що застосовується функція $V(\lambda)$, але кваліфікуюче значення “фотопік” повинно бути використане. Для величин, що використовують функцію $V(\lambda)$, повинно бути використане позначення “скотопік”. У випадку величин, оцінюваних за системою МКО для мезопічної фотометрії, функція спектральної світлової ефективності може бути визначена таким чином:

- визначається значення коефіцієнта адаптації m , тобто $m = 0,2$;
- визначається фотопічна адаптаційна яскравість $L_{V, \text{adapt}}$ і S/P відношення поля адаптації R_{SP} тобто $L_{V, \text{adapt}} = 0,2$ і $S/P = 2,2$, а $R_{SP} = 2,2$.

Символи, які використовуються для різних фотометричних величин, повинні ясно відрізняти вагові функції, що використовуються. Символи для радіометричних величин диференціюються від таких для фотометричних величин через використання позначення “e”. Проте у випадку символів для фотометричних величин використання єдиного символу несуттєве, оскільки веде до непорозуміння.

Для фотопічних величин символ I використовується разом із позначенням v для позначення оцінок, що пов’язані з функцією $V(\lambda)$, тобто I_v .

Для скотопічних величин символ I використовується разом із позначенням v для позначення оцінок, що використовують функцію $V'(\lambda)$, тобто I'_v .

Для величин, оцінюваних із використанням МКО системи для мезопічної фотометрії, використовуються індекси mes і m . Так, наприклад, $I_{mes}(0,2)$ вказує, що сила світла, оцінена за МКО системою, для мезопічної фотометрії має коефіцієнт адаптації $m=0,2$.

Для величин, оцінюваних із використанням МКО системи для мезопічної фотометрії, умови адаптації можуть альтернативно бути задані у формі $L_{V, \text{adapt}} R_{SP}$ де $L_{V, \text{adapt}}$ і R_{SP} – S/P відношення, тобто $I_{mes}(0,3;2,0)$ вказує силу світла, оцінювану з вико-

ристанням МКО системи для мезопічної фотометрії з полем адаптації, що має фотопічну яскравість у $0,3$ кд/м² і S/P відношення $2,0$.

Для величин, оцінюваних із використанням інших стандартизованих функцій ефективності, $V_s(\lambda)$, S – це показник, що визначає відповідну функцію.

Так, наприклад, це означає, що сила світла, оцінювана з використанням МКО функції стандартного спостерігача з кутом спостереження в 100° , $V_{10}(\lambda)$, визначається як I_{10} .

Відзначимо, що Міжнародне бюро мір та ваг опублікувало рекомендацію щодо кандели [3] за таким твердженням: “Визначення кандели застосовується рівною мірою для фотопічного, скотопічного і мезопічного бачення”.

Для практичного використання системи мезопічної фотометрії необхідно знати або виміряти фотопічну та скотопічну яскравості поля адаптації, що тоді дозволяє знайти значення коефіцієнта m і визначити відповідну функцію спектральної ефективності $V_{mes}(\lambda)$. Проте очевидна простота цього наближення маскує, що потенційно найбільш проблемним аспектом використання системи на практиці є саме те, що означає “поле адаптації”. Розглянемо оточення типового автомобільного руху. Яскравість у цій ситуації далека від однорідної. Необхідно розглянути багато різних аспектів, таких, як:

- розмір і форма повної візуальної сцени, яка є найбільш важливою в термінах умов візуальної адаптації;
- розміщення центра критичної області у візуальній сцені (вона буде обернено залежати від того, де фіксується увага водія);
- чи матимуть яскраві джерела світла зовні критичної області суттєвий вплив на візуальну адаптацію;
- чи впливає зміна яскравості всередині критичної області на адаптацію, та чи має значення середня яскравість;
- що впливає на часову зміну яскравості (наприклад, світло від фар зустрічних автомобілів) та як швидко око адаптується до змін яскравості.

Ці теми розглянуто МКО у документах TC-1 “Implementation of CIE 191 mesopic photometry in outdoor lighting” і TC 2-65 “Photometric measurements in the mesopic range”.

В останні роки було проведено багато досліджень щодо впливу спектрального розподілу освітлення на міські та пішоходні області, звідки випливає, що освітлення на дорогах житлових кварталів повинно служити двом головним цілям:

- забезпечувати середовище, безпечне як для пішоходів, так і для водіїв. Це означає, що пішоходи повинні мати змогу розрізняти перешкоди (тротуарні камені та ін.) на своєму шляху, а водії повинні мати змогу бачити пішоходів, що йдуть стороною дороги;

а також модифікування програм для забезпечення проектування освітлення для мезопічних застосувань, що дозволить обчислювати мезопічні величини. Незважаючи на ці складності, метрики для характеристик освітлювальних продуктів (включаючи світлодіоди) для мезопічних застосувань є дуже прямими: всю необхідну інформацію може бути забезпечено просто встановленням фотопічного світлового потоку і S/P відношення.

На додаток, важливо пам'ятати, що характеристика відповідно до системи мезопічної фотометрії не є достатньою для забезпечення освітлення високої якості. Інші аспекти, такі як хороше колірне передавання і мінімізація блиску, також є критичними.

Наступні метрики, що ґрунтуються на цих розглядах, повинні вважатися мінімально необхідними для правильної характеристики освітлювальних продуктів (включаючи світлодіоди) для мезопічних застосувань:

- відповідна фотопічна величина, як правило, фотопічний світловий потік;
- S/P відношення;
- індекс колірної передавання;
- кутовий розподіл світла (включаючи кутовий розподіл, виражений у термінах S/P відношення і колірної передавання, якщо спектральний розподіл потужності змінюється з кутом).

Розроблена система присмеркового сприйняття призначена для широкого спектра завдань і допоможе вирішити такі важливі завдання, як проектування дорожнього і аварійного освітлення.

Система узгоджується з розробленими раніше системами денного і нічного світла. Залишається ще проблема у визначенні процедур вимірювання. Вона зараз вирішується.

Необхідно відзначити, що система не підходить для візуальної характеристики в завданнях, де діють такі обмеження:

- 1) осьовий зір (на всьому діапазоні застосовується світлова функція для денного зору);
- 2) високі колірні контрасти між об'єктом та фоном;
- 3) візуальна оцінка яскравості (наприклад, розпізнавання облич).

Список літератури

1. Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) 191: 2010. Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance. – Vena: CIE, 2010. – 49 p. (Міжнародна комісія з освітлення (МКО) 191: 2010. Рекомендована система для мезопічної фотометрії, що ґрунтується на візуальному виконанні. – Відень: МКО, 2010. – 49 с.).
2. Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) S010/E:2004. Photometry – The CIE system of physical photometry. – Vena: CIE, 2004. – 18 p. (Міжнародна комісія з освітлення (МКО) 191: 2010. Фотометрія – МКО система фізичної фотометрії. – Відень: МКО, 2010. – 18 с.).
3. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). The International System of Units (SI) 8th edition. – Gaithersburg: BIPM, 2006. – 88 p. (Міжнародне бюро мір та ваг (МБМВ). Міжнародна система одиниць (СІ). – 8-ме видання. – Гейтерсбург: МБМВ, 2006. – 88 с.).
4. Institution of Lighting Professionals (ILP). PLG03 Lighting for subsidiary roads: using white light sources to balance energy efficiency and visual amenity. – UK: ILP, 2012. (Інститут професіоналів з освітлення. PLG03. Освітлення для допоміжних доріг: використання джерел білого світла для збалансування енергетичних ефективностей і візуальних зручностей. – Велика Британія, 2012).