

## МЕЗОПІЧНА ФОТОМЕТРІЯ ТА ВУЛИЧНЕ ОСВІТЛЕННЯ

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

**Т. В. Можаровська,** аспірант ХНУМГ ім. О.М. Бекетова

**В.С. Чернець,** кандидат технічних наук, доцент ХНУМГ ім. О.М. Бекетова



Л. А. Назаренко



Т. В. Можаровська



В.С. Чернець

*Описано можливість поліпшення візуальних характеристик для водіння та можливість зменшення енергоспоживання за умови імплементації мезопічної фотометрії у вуличне освітлення. Розглянуто важливість урахування поверхневого відбиття дорожнього полотна при проектуванні систем дорожнього освітлення.*

*The possibility of improving the visual properties for driving and reducing energy consumption provided implementation of mesopic photometry in street lighting is described. The importance of taking into account the roadway surface reflection in the design of road lighting systems is considered.*

### Вступ

Публікація Міжнародною комісією з освітлення (МКО) системи для мезопічної (присмеркової) фотометрії “Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance” [1] завершила майже 70 — річні дебати відносно вагових функцій, які б могли використовуватися під час проведення фотометричних вимірювань у мезопічній області. Це викликало велику кількість робіт, присвячених дослідженню впливу спектрального розподілу енергії випромінювання на зір за відповідного присмеркового зору в умовах освітлення, що дозволяє краще оцінити освітлення в нічний час доби.

Освітлення необхідне як для забезпечення безпеки вулиць для людей, так і для створення вра-

ження цієї безпеки. У житлових районах потребується, щоб вулиці здавалися яскраво освітленими, оскільки з безпекою люди пов'язують світлість. Емпіричні дані показують, що освітлення робить важливий внесок у відчуття безпеки місця і тому підвищення рівня освітленості приводить до посилення відчуття безпеки. Крім того, перцептивні фактори включають до себе зоровий комфорт, який можна визначити як приємне оточення і відсутність блискавості.

У безпеку руху роблять внесок такі фактори, як здатність помічати тротуарні перешкоди, візуально орієнтуватися і розпізнавати обличчя інших людей на відстані, достатній для запобігання зіткнень.

### Основна частина

Зовнішній освітлювальний дизайн включає використання різних метрик, таких як освітленість (в люксах — лк), яскравість (в канделах на метр квадратний — кд/м<sup>2</sup>), рівень видності [2] та інші пов'язані одиниці.

Функція фотопічної світлової ефективності  $V(\lambda)$ , визначена МКО, ґрунтується на результатах, проведених при відносно високих рівнях світла (наприклад, яскравості  $\sim 10$  кд/м<sup>2</sup>).

Інша функція — функція скотопічної світлової ефективності  $V'(\lambda)$  — описує спектральну чутливість паличкових фоторецепторів у ретині. Паличкова система максимально чутлива до світла при 507 нм. МКО дала визначення люмену як психофізичної

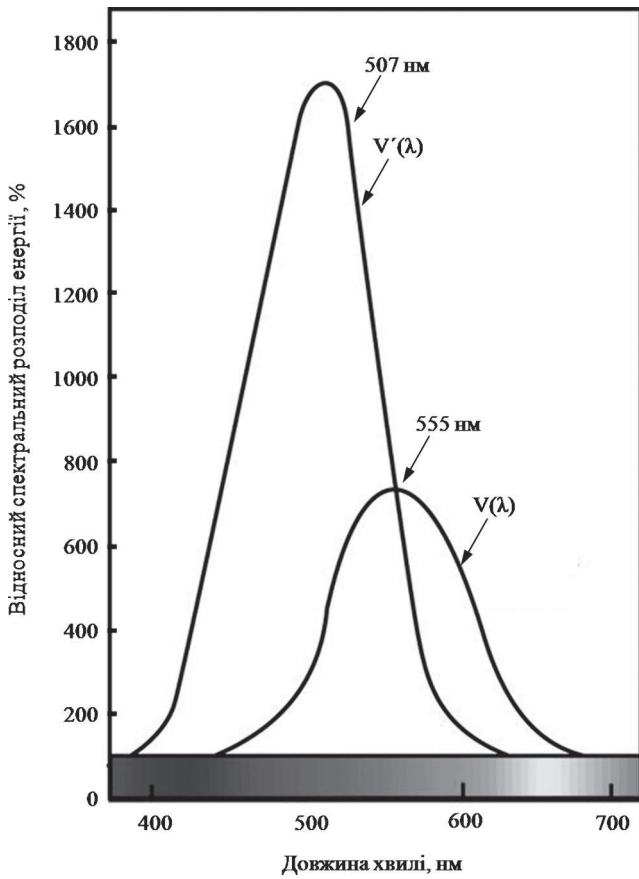


Рис. 1. Графічне позначення визначення люмена за МКО

одиниці кількості світла, і за визначенням 1 Вт на 555 нм відповідає 683 лм скотопічної функції. Таким чином, скотопічна функція світлової ефективності має більше пікове значення, ніж фотопічна функція, досягаючи максимуму при 1700 лм/Вт швидше, ніж 683 лм/Вт як результат певних вимог від 683 лм на 555 нм (рис. 1). Вище пікове значення функції скотопічної чутливості є результатом визначення люмена (CIE, 1978) і не повинно бути сплутане з природженою відмінністю чутливостей між паличками і колбочками.

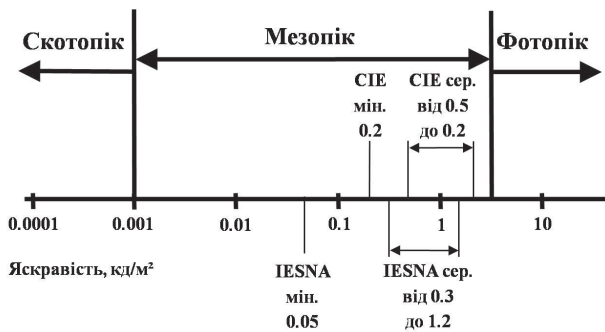


Рис. 2. Точки переходу між скотопічною, мезопічною і фотопічною яскравостями при дорожньому освітленні

На рис. 2 графічно показано точки переходу між скотопічною, мезопічною і фотопічною яскравостями при дорожньому освітленні за рекомендаціями МКО (CIE) [1] та Світлотехнічного товариства Північної Америки (IESNA) [3].

Нова функція мезопічної світлової ефективності  $V_{MES}(\lambda)$  знаходиться за формулою

$$V_{MES}(\lambda, m) = \frac{1}{M(m)} \{mV(\lambda) + (1-m)V'(\lambda)\},$$

де  $M(m)$  — нормуюча функція;  $m$  — параметр, що приймає значення від 0 до 1 (рис. 3).

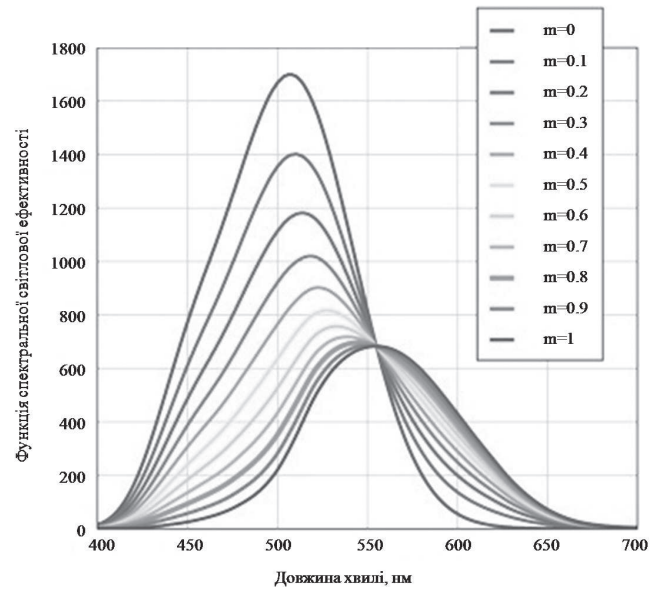


Рис. 3. Функції спектральної світлової ефективності

На рис. 3 наведено функції спектральної світлової ефективності, де корисним показником для класифікації кількості короткохвильової енергії від джерел світла є скотопік/фотопік (S/P) відношення, відкрите Бірманом у 1992 р. [4]. S/P-відношення визначається діленням скотопічнозваженого вихідного сигналу джерела (наприклад, світлового потоку, яскравості) на відповідно фотопічнозважений вихід, і це є властивістю спектрального розподілу потужності незалежно від рівня світла. Згідно з вимогами МКО, що світлова ефективність при 555 нм еквівалентна незалежно від функції світлової ефективності, від якої вона виводиться, S/P-відношення рівноенергетичного спектра має значення приблизно 2,26, скоріше ніж 1, яке б могло бути S/P-відношенням, якщо б піки скотопічної і фотопічної світлових ефективностей були нормалізовані за їх максимальними значеннями. Тоді S/P відношення однієї із ламп з іншою дає можливість їх ранжувати в термінах їхнього скотопічного виходу. Відношення також корисні в ранжуванні джерел світла для бокового зору на мезопічних рівнях.

В табл. 1 наведено фотометричні і колориметричні властивості деяких звичайних джерел світла [3] і розраховано відношення S/P.

S/P — це характеристика джерел світла, що показує вплив спектра джерел світла на роботу нічного зору. Чим вище S/P-фактор, тим ефективніше діє джерело на фоторецептори нічного зору. Це означає, що для створення одного й того ж рівня яскра-

Фотометричні і колориметричні властивості деяких звичайних джерел світла

Джерело світла	Потужність лампи	Фотопік люмен	Скотопік люмен	Світловіддача	S/P-відношення	Координати кольору за CIE1931 для 2 <sup>о</sup> спостерігача		Коригована кольорова температура	Індекс кольоропередачі
						x	y		
D65 (CIE сонце+небо)	–	–	–	–	2,46	0,313	0,329	6503	100
Рівноенергетичний спектр	–	–	–	–	2,26	0,333	0,323	5454	93
3000 К F32T8 флуорисцентна	32	2950	3745	92	1,27	0,443	0,409	2929	85
3500 К F32T8 флуорисцентна	32	2950	4405	92	1,49	0,407	0,393	3479	86
4100 К F32T8 флуорисцентна	32	2950	4790	92	1,82	0,305	0,290	3966	84
5000 К F32T8 флуорисцентна	32	2950	5797	92	1,67	0,344	0,365	5070	87
6500 К F32T8 флуорисцентна	32	2950	6143	87	2,19	0,316	0,345	6222	85
Тепла біла F32T8 флуорисцентна	34	2700	2730	79	1,01	0,436	0,406	2865	50
Холодна біла F32T8 флуорисцентна	34	2650	3908	79	1,47	0,377	0,383	4191	58
7500 К F32T8 флуорисцентна	40	2000	4961	60	2,48	0,303	0,318	7420	93
A 19 лампа розжарювання	60	850	1158	14	1,39	0,451	0,408	2515	100
Натрієва лампа високого тиску	100	2600	5688	96	0,80	0,529	0,411	1965	16
3000 К Металогалогенна лампа	100	8000	11852	86	1,36	0,429	0,283	2994	87
4000 К Металогалогенна лампа	100	8200	14842	82	1,81	0,373	0,371	4106	92

вості за допомогою джерел світла з різним спектром може бути потрібна різна кількість енергії.

На рис. 4 показано графічний приклад розрахунку S/P-фактора для нічного і денного зору.

Площа спектрального розподілу світлодіода (СД) для нічного зору в 2,23 рази більша за площу для денного зору. Для прикладу, S/P-фактор натрієвої лампи знаходиться в межах 0,63...0,64.

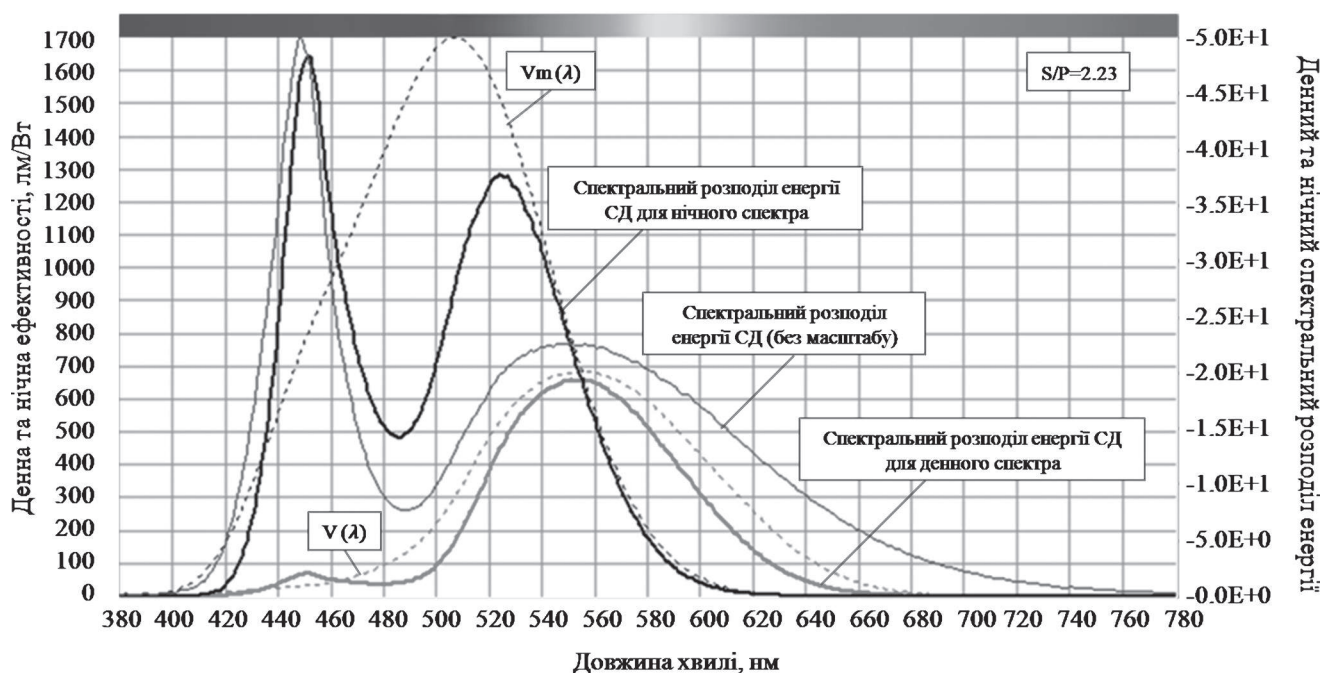


Рис. 4. Спектральний розподіл енергії світлодіода Cree та його спектральні ефективності для нічного  $V_m(\lambda)$  і денного зору  $V(\lambda)$

Множник світлової ефективності  $L_{MES}/L$  визначається відношенням присмеркової яскравості  $L_{MES}$ , взятої для певного рівня денної яскравості  $L$ , до величини цієї яскравості. Це, по суті, ваговий коефіцієнт, який показує, у скільки разів збільшується або зменшується візуальна ефективність джерела світла в умовах присмеркового зору.

Різні виробники СД приводять дані щодо відносного розподілу енергії в залежності від довжини хвилі за температури  $+25\text{ }^\circ\text{C}$ . На рис. 5 наведено приклади трьох різних спектрів світлодіодів серії XP-G (Cree) для трьох діапазонів корельованих кольорних температур  $T_{кол}$ : 2600...3700 К, 3700...5000 К, 5000...10000 К. На графіках видно, що розподіл енергії для різних  $T_{кол}$  різний.

Спектр СД залежить від багатьох параметрів: типу кристала, його температури, кута спостереження і умов. Звернемо увагу, що всі світлодіоди мають два максимуми приблизно в тих же діапазонах, що й криві спектральної чутливості ока для нічного і денного зору. Тому СД як джерела світла можуть бути ефективними в будь-яких установках освітлення.

Результати досліджень [5] говорять про те, що спектральний розподіл ефективності випромінювання лампи може впливати на просторову світлість в області присмеркового зору. Дві серії експериментів передбачали одночасну оцінку ламп у стоячих кабінах. У цих експериментах як опорна використовувалася натрієва лампа високого тиску (НЛВТ), і з нею порівнювалися компактна люмінесцентна лампа (КЛЛ) та металогалогенна лампа двох типів (МГЛ1 і МГЛ2). При зіставленні полів порівняння в одній із кабін встановлювалося одне із трьох опорних значень освітленості (2,0; 7,5; 15,0 лк), і спостерігачі ранжували освітленість у другій кабіні до того часу, доки кабіни не виглядали за можливості рівнояскравими.

Тобто, зіставлення світлостей виконувалося створенням в одній із кабін одного із трьох опорних значень освітленості (2,0; 7,5; 15,0 лк) і забезпеченням за допомогою другого стимулу певного рівня освітленості. За рівністю освітленостей при використанні КЛЛ, МГЛ1 і МГЛ2 освітлення було значно більш яскравим у порівнянні з НЛВТ (табл. 2).

Таблиця 2

Результати експериментів з урівнювання світлостей: відношення усереднених освітленостей за рівністю світлостей [6]

Опорна освітленість, лк	Відношення середніх освітленостей		
	КЛЛ/НЛВТ	МГЛ1/НЛВТ	МГЛ2/НЛВТ
2,0	0,694	0,729	0,679
7,5	0,718	0,733	0,724
15,0	0,732	0,724	0,738

Говорячи про дорожнє освітлення, слід згадати такий важливий елемент установки дорожнього освітлення, як дорожнє полотно. Сучасне дорожнє покриття не нормується за світлотехнічними характеристиками. Для більшості типів дорожніх покриттів спектральний коефіцієнт відбиття залежить від довжини хвилі. Відповідно до вимірювань, проведених Екріасом і його колегами в 2008 р. [7], спектральні коефіцієнти відбиття більшості виміряних зразків дорожнього полотна мають мінімальні значення в короткохвильовій частині спектра і збільшуються в бік довгохвильової. Звичайно спектральний коефіцієнт відбиття дорожнього полотна залежить від його складу. Наприклад, при використанні білих домішок він може зсунути в бік коротких хвиль.

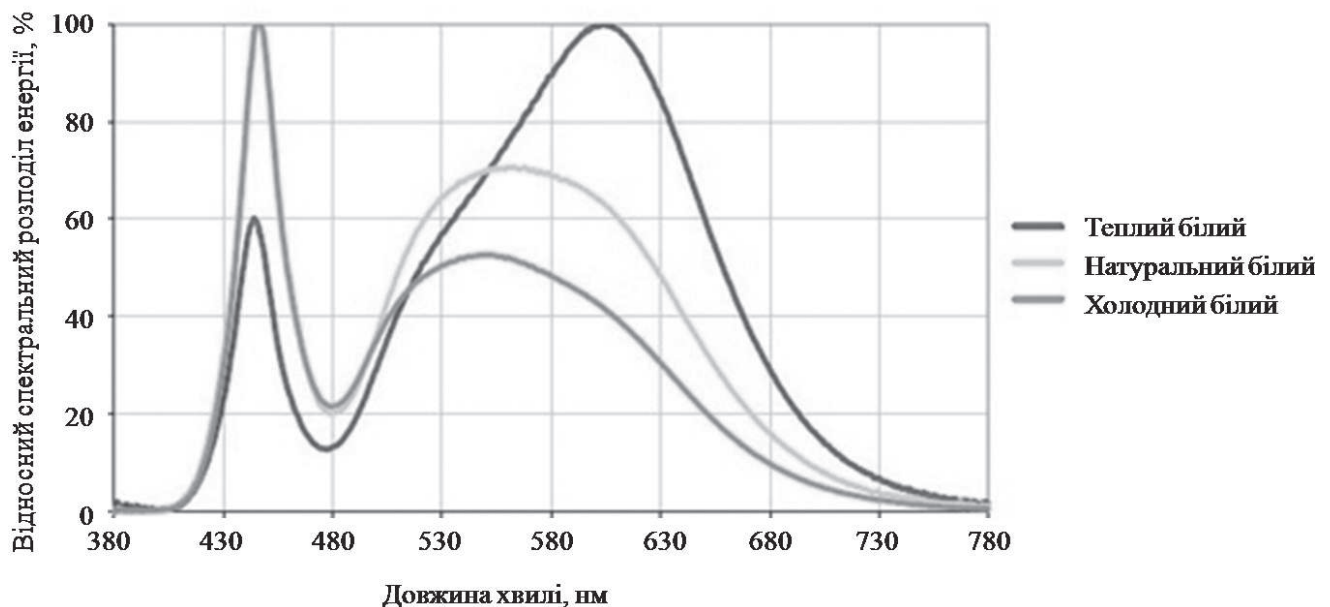


Рис. 5. Відносний спектральний розподіл білих світлодіодів серії XP-G (Cree)

Знаючи спектральні характеристики застосовуваних джерел світла, ці дані можна було б застосувати при розробці нових видів полотен, що дозволили б досягти нового рівня освітленості з точки зору поліпшення як якості, так і його ефективності та економичності.

Яким би ефективним світильник не був, якщо полотно більшою мірою відбиває світло в тій області, де чутливість ока мала, то неможливо говорити про максимальну ефективність використання світлового потоку в цілому.

Співробітники центру "Lighting Research Center" [8] провели дослідження за темою "Демонстрація і оцінка можливості мезопічного вуличного освітлення", мета якого полягала в тому, щоб відповісти на ці питання за допомогою експериментальних освітлювальних установок. На основі даних дослідження можна зробити такі висновки.

Як заміна вуличних світильників на основі НЛВТ-ламп рекомендуються джерела білого світла, налаштовані на умови присмеркового зору з високим коефіцієнтом S/P. Колірна температура цих джерел світла повинна становити близько 6500 К, а світлова віддача — 65...70 лм/Вт.

За низьких значень яскравості в 0,1 кд/м<sup>2</sup> економія електроенергії може досягати 40...50%. При більш високих значеннях яскравості в 0,3 кд/м<sup>2</sup> економія електроенергії становитиме близько 30 %.

55-ватна індукційна освітлювальна система при 6500 К є енергоефективною заміною 100-ватного вуличного НЛВТ-світильника і повинна розглядатися як нова освітлювальна установка. Її також можна вважати заміною існуючої 100-ватної НЛВТ-системи для вуличного освітлення.

70-ватна МГЛ-установка не може вважатися хорошою заміною системи вуличного освітлення на основі 100-ватної НЛВТ, головним чином через те, що має мінімальні переваги в порівнянні з НЛВТ-системою.

Як заміну НЛВТ-світильників можна розглядати білі світлодіоди.

Для визначення необхідної потужності ламп при заміні існуючих світильників рекомендується вико-

ристовувати мезопічну фотометричну систему, яка дозволяє виконати розрахунки з урахуванням коефіцієнтів S/P. Для нових освітлювальних установок організація IESNA розробила рекомендації за рівнем яскравості світла в залежності від типу освітлюваної вулиці. Для існуючих освітлювальних систем розрахунок яскравості виконується шляхом вимірювання освітленості і відбиваючої здатності поверхні дороги. Одержані значення яскравості вводяться в мезопічну фотометричну систему, щоб визначити параметри повної системи, яка забезпечує еквівалентне зорове сприйняття освітлюваних об'єктів і призначена для заміни існуючої установки.

Комітетом Інституту професіонального освітлення (Institution of Lighting Professionals, UK) запропоновано нову систему освітлення житлових доріг, яка дозволяє зменшити рівні освітленості в залежності від типу ламп [5]. Зменшення освітленості характеризується використанням мезопічної системи МКО, проте зменшення застосовується при використанні ламп із загальним індексом кольоропередачі  $R_a \geq 60$ . Табл. 3 ілюструє, як можуть бути подані ці рекомендації.

Таблиця може бути зроблена з меншими інтервалами S/P, якщо цього потребує для імплементація пакетів комп'ютерних програм освітлювального дизайну. Також можуть бути забезпечені інші значення освітленостей. Проте для більшості ситуацій лінійна інтерполяція табульованих значень є прийнятною, якщо дані потребуються для проміжних S/P-відношень або значень освітленості.

Наприклад, якщо для дорожніх і транспортних умов за європейським стандартом EN13201-2 "Освітлення доріг. Частина 2: Вимоги до продуктивності" визначається клас SE5, для якого стандартною фотопічною освітленістю є 7,5 лк, то коли натрієва лампа низького тиску (S/P~0,23;  $R_a \sim 0$ ) або НЛВТ (S/P~0,6;  $R_a \sim 20$ ) будуть використовуватися для дизайну, освітленість могла б залишатися 7,5 лк: низькі значення  $R_a$  для цих ламп не дозволяють розглядати пониження освітленості. Проте, якщо будуть використовуватися білі МГЛ (S/P~1,2;  $R_a \sim 80$ ), освітленість може бути зменшеною до 6,2 лк.

Таблиця 3

Пропонована характеристика фотопічної освітленості в S класі

S клас	Фотопічна освітленість (лк), $R_a \geq 60$	Фотопічна освітленість (лк) при $R_a \geq 60$ згідно з S/P-коефіцієнтом ламп												
		0,23	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
S1	15,0	15,0	14,3	14,0	13,6	13,4	13,1	12,8	12,6	12,3	12,1	11,8	11,6	11,4
S2	10,0	10,0	9,4	9,1	8,9	8,6	8,4	8,1	7,9	7,6	7,5	7,3	7,1	6,9
S3	7,5	7,5	6,9	6,7	6,4	6,2	6,0	5,9	5,6	5,5	5,3	5,1	5,0	4,9
S4	5,0	5,0	4,5	4,3	4,1	3,9	3,8	3,6	3,5	3,4	3,3	3,1	3,1	2,9
S5	3,0	3,0	2,6	2,4	2,3	2,2	2,1	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5
S6	2,0	2,0	1,6	1,6	1,4	1,4	1,3	1,3	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9

## Висновки

Імплементація мезопічної системи МКО у вуличне освітлення продемонструвала можливість поліпшення візуальних характеристик і зменшення енергоспоживання.

Важливою характеристикою джерел світла стає S/P-відношення, яке повинне бути внесене в перелік обов'язкових характеристик, які мають надавати виробники. У зв'язку із цим повинні переглядатися і комп'ютерні програми освітлювального проекту.

Використання мезопічної системи фотометрії МКО потребує припущення про поверхневі відбиття дорожнього полотна для зв'язку яскравості (на якій базується система) і освітленості.

Актуальним напрямком стандартизації освітлення в Україні є не власна гармонізація стандартів, а активна участь у міжнародній співпраці в цьому напрямку, оскільки зараз в усьому світі ведеться перегляд існуючих норм і правил освітлення з урахуванням останніх досліджень.

## 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) 95: 1992. Contrast and Visibility.— Vena.: CIE, 1992.— 52 p. (Міжнародна комісія з освітлення (МКО) 95: 1992. Контраст і видимість.— Відень.: МКО, 1992.— 52 с.).
3. Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) TM-12-06: 2006. Spectral Effects of Lighting on Visual Performance at Mesopic Light Levels.— New York: IESNA, 2006.— 15 p. (Світлотехнічне товариство Північної Америки (IESNA) TM-12-06: 2006. Спектральні ефекти освітлення на візуальну продуктивність при мезопічних рівнях освітленості.— Нью-Йорк: IESNA, 2006.— 15 с.).
4. Berman S. M. Energy Efficiency Consequences of Scotopic Sensitivity / S. M. Berman // Journal of the Illuminating Engineering Society.— 1992.— № 21(1).— P. 3–14. (Бірман С. М. Наслідки скотопічної чутливості щодо енергоефективності / С. М. Бірман // Журнал Світлотехнічного повариства.— 1992.— № 21(1).— С. 3–14).
5. Fotios S. Proposed UK guidance for lighting in residential roads / S. Fotios, T. Goodman // Lighting Research and Technology.— 2012.— № 44(1).— P. 69–83. (Фотіос С. Пропоновані норми Великобританії для освітлення доріг / С. Фотіос, Т. Гудман // Світлові дослідження та технології.— 2012.— № 44 (1).— С. 69–83).
6. Fotios S. Lighting for subsidiary streets: investigation of lamps of different SPD. Part 2: Brightness./ S. Fotios, C. Cheal // Lighting Research and Technology.— 2007.— № 39(3).— P. 233–249. (Фотіос С. Освітлення допоміжних вулиць: дослідження ламп різного SPD. Ч. 2: Яскравість. / С. Фотіос, К. Чіал // Світлові дослідження та технології.— 2007.— № 39(3).— С. 233–249).
7. Effects of pavement lightness and colour on road lighting performance / Aleksanteri Ekrias, Anne-Mari Ylinen, Marjukka Eloholma, Liisa Halonen // Proceedings of the CIE International Symposium on Road Surface Photometric Characteristics: Measurement Systems and Results, 9–10 July 2008.— Torino, 2008.— P. 8. (Ефекти щільності та кольору дорожнього покриття на продуктивність вуличного освітлення / Алексантері Екріас, Анн-Марі Ілінен, Марьюкка Елохолма, Ліза Халонен // Праці Міжнародного симпозіуму МКО з фотометричних характеристик дорожньої поверхні: Системи і результати вимірювань, 9–10 липня 2008.— Турин, 2008.— С. 8).
8. Mesopic Street Lighting Demonstration and Evaluation. Final Report. [Electronic resource].— Access mode: <http://www.lrc.rpi.edu/researchAreas/pdf/GrotonFinalReport.pdf>. (Демонстрація та оцінка мезопічного вуличного освітлення [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.lrc.rpi.edu/researchAreas/pdf/GrotonFinalReport.pdf>).