УДК 628.98

doi: https://doi.org/10.15407/iopt.2022.57.101

[1]Л.А. Назаренко, [1]К.І. Суворова, [2]М.В. Гур'єв

СПЕКТРАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ПОТУЖНОСТІ СВІТЛОДІОДІВ ТА ПРИСМЕРКОВА ФОТОМЕТРІЯ

Бурхливий розвиток освітлювальних технологій, який спостерігається в останні десятиріччя, безумовно, пов'язаний з широким впровадженням світлодіодних джерел світла. Разом з тим, якщо на перших порах відзначалася енергоефективність світлодіодів, то зараз на порядку денному стає використання певних спектральних характеристик таких джерел. При цьому розширюються методи й засоби фотометрії, крім фотопічної і скотопічної розвивається й мезопічна фотометрія. Стандарти освітлення, що базуються на фотопічній функції світлової ефективності, не повністю охоплюють візуальні сприйняття. Тому актуальним є визначення характеристик, пов′язаних з присмерковою фотометрією, що розглядається в роботі.

Фактично мова йде про нову парадигму освітлення – перехід від використання єдиної функції світлової ефективності – фотопічної, до мультифункціоналу, коли застосовується та чи інша функція світлової ефективності, що продиктована конкретним світловим завданням і при цьому нормується відповідними світловими стандартами. Завдяки такій методології можливе підвищення ефективності не буквальним зниженням електроспоживання, а врахуванням в тому числі спектральних характеристик джерел світла. Якщо зважати ще й на появу нового розподілу – функції подавлення мелатоніну, що стала основою циркадної фотометрії, то саме такий підхід і сприятиме вирішенню актуальної задачі людино-центричного освітлення.

Важливим представляється нормування джерел світла за S/P-фактором для мінімізації споживання електричної енергії та підвищення зорової ефективності. Відношення S/P є зручним і простим способом характеризації спектрального складу випромінювання, які забезпечують різні джерела світла. Саме вплив будь-якого спектрального розподілу яскравості на мезопічні фотометричні величини може бути охарактеризований S/P величиною. Можливість обчислення S/P-фактора для будь-якого джерела світла, а також проведення дослідження широко розповсюджених джерел світла є дуже важливим.

Одержані результати можуть бути основою для розроблення нових стандартів дорожнього і зовнішнього освітлення.

Ключові слова: світлодіодні технології, мезопічна функція, фотопічна та скотопічна функції, спектральні характеристики, фотометрія, стандарти освітлення.

1. ВСТУП

Публікація Міжнародною комісією з освітлення (МКО) системи для присмеркової (мезопічної) фотометрії [1] дала поштовх для розвитку нових типів візуальних ефектів освітлення. Нові системи присмеркової фотометрії викликали велику кількість робіт, присвячених дослідженню впливу спектрального складу випромінювання на зір в умовах мезопічного освітлення. Особливості сприйняття людиною світла в таких умовах стимулюють дослідження спектральних розподілів випромінювання джерел світла і особливо світлодіодних з їхніми унікальними можливостями. При цьому виникають актуальні задачі імплементації вказаної системи, що потребує визначення як S/P-фактора (Scotopic/Photopic) джерела світла, так і можливості обчислення фотометричних характеристик за мезопічних умов освітлення.

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Ідея присмеркової фотометрії базується на нашому знанні про роботу ока. Світло фокусується кришталиком на сітківку, на якій знаходяться два типи фоторецепторів, що сприяють баченню – палички і ковбочки. Палички чутливі до дуже низьких рівнів освітленості, а також вносять свою частку у периферійний зір. Ковбочки виявляють колір і бувають трьох типів, мають чутливість в різних спектральних діапазонах, зосереджені в центрі сітківки і відповідають за гостроту зору.

Око має великий динамічний діапазон сприйняття рівнів освітленості (>10^6), воно може працювати за яскравого світла і ефективно стає лічильником фотонів в дуже тьмяному світлі.

За яскравого світла (>5 кд/м^2) око працює в фотопічній області і має спектральну характеристику, показану на рис. 1. Майже всі фотометричні стандарти базуються на фотометричній функції світлової ефективності V(λ), визначеної МКО [1,2].

За низьких рівнів освітленості (<0,001 кд/м^2) зір людини працює в скотопічній області. Скотопічна функція світлової ефективності V'(λ) описує спектральну чутливість фоторецепторів ретини, які називаються паличками. V'(λ) описує спектральну чутливість візуальної системи при скотопічних рівнях освітленості для всіх візуальних задач і відчуттів.

Діапазон яскравостей, до яких адаптується око між фотопічним та скотопічним діапазонами, називається мезопічним.

Публікація МКО системи для мезопічної (присмеркової) фотометрії «Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance» [3] завершила майже 70 – річні дебати відносно вагових функцій, які б могли використовуватися під час проведення фотометричних вимірювань у мезопічній області, що призвело до появи великої кількості робіт, присвячених дослідженню впливу спектрального складу випромінювання на зір за присмеркового зору в умовах освітлення, які дозволяють краще оцінити освітлення в нічний час доби [4-9].

Штучне освітлення необхідне як для забезпечення безпеки людей, так і для відчуття цієї безпеки. Житлові райони потребують яскравого освітлення вулиць, оскільки з безпекою люди пов’язують світлість. Емпіричні дані показують, що освітлення робить важливий внесок у відчуття безпеки місця і тому підвищення рівня освітленості призводить до підсилення відчуття безпеки. Крім того, перцептивні фактори включають в 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.

На рис. 2 графічно показано точки переходу між скотопічною, мезопічною і фотопічною яскравостями при дорожньому освітленні за рекомендаціями МКО та Світлотехнічного товариства Північної Америки (IESNA) [10].

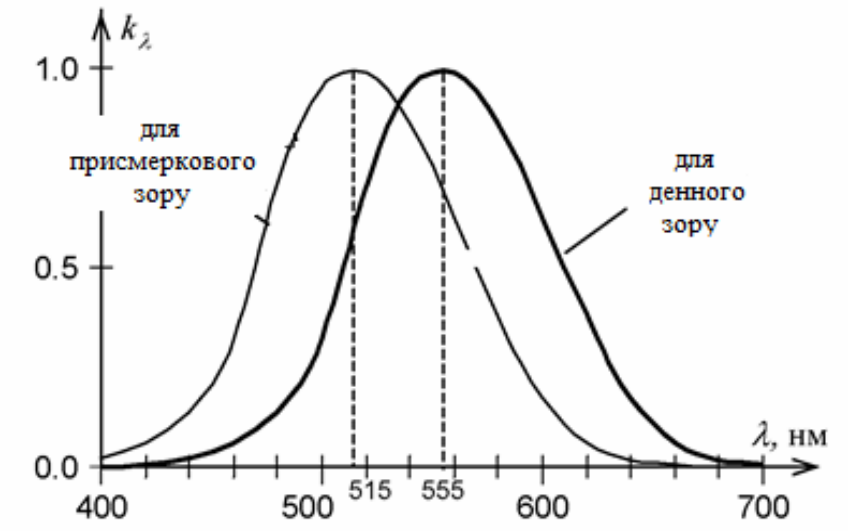

Рис. 1.Фотопічна V(λ) та скотопічна V'(λ) функції світлової ефективності.

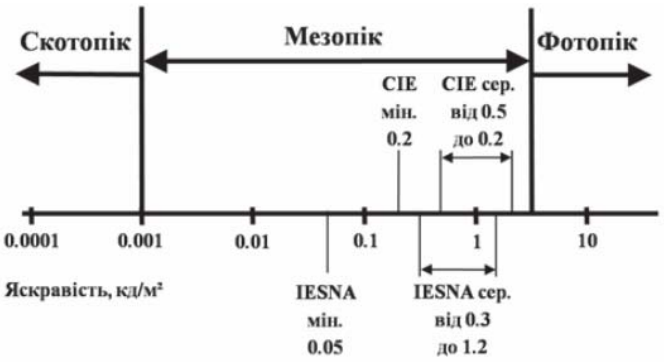

Рис. 2. Зони переходу між скотопічною, мезопічною і фотопічною яскравостями при дорожньому освітленні.

Функція мезопічної світлової ефективності $V_{mes}(\lambda)$ знаходиться за формулою:

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

де M(m) – нормуюча функція така, що максимальне значення V_{mes} дорівнює 1;
m – параметр, що приймає значення від 0 до 1.

Наприклад, при m=0 $V_{mes} \rightarrow V'(\lambda)$,
при m=1 $V_{mes} \rightarrow V(\lambda)$.

Якщо $L_{mes} \geq 5{,}0$ кд/м^2, тоді m=1;
якщо $L_{mes} \leq 0{,}005$ кд/м^2, тоді m=0.

Щоб визначити будь-яку мезопічну величину (яскравість, світловий потік тощо), необхідно ітераційним методом визначити коефіцієнт m. Він залежить від візуальної адаптації ока, яка змінюється в залежності від яскравості поля адаптації та спектральних характеристик адаптаційного поля (S/P відношення, R_{SP}):

$$L_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(555)}\int L_e(\lambda)V_{mes}(\lambda)dx, \quad (2)$$

$L_e(\lambda)$ – яскравість джерела світла;
L_{mes} – мезопічна яскравість.

Для обчислення m і L_{mes} використовують ітераційний метод за наступною схемою:

$$m_0 = 0.5$$

$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)}L_p + (1-m_{(n-1)})L_s(683/1700)}{m_{(n-1)} + (1-m_{(n-1)})(683/1700)}$$

Повторювати доки m сходиться

$$m_n = 0.7670 + 0.3334\log_{10}(L_{mes,n}) \quad (3)$$

Таблиці, представлені у [1], дають значення m і L_{mes} як функції фотопічної яскравості і S/P відношення джерела світла ($R_{SP}=L_s/L_p$).

Інші мезопічні величини можуть бути обчислені на основі адаптаційного коефіцієнта m:

$$Q_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(555)} \frac{1}{M(m)} \left[m \int Q(\lambda) V(\lambda) dx + (m-1) \int Q(\lambda) V'(\lambda) dx \right], \tag{4}$$

$$Q_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(555) M(m)} \left[m Q_p + (m-1) Q_S \right], \tag{5}$$

$$Q_{mes} = \frac{m Q_P + (1-m) Q_S \left(\frac{683}{1700} \right)}{m + (1-m) \left(\frac{683}{1700} \right)}, \tag{6}$$

У відповідності з визначенням в системі SI кандели, світлова ефективність монохроматичного випромінювання на довжині хвилі 555 нм завжди є 683 лм/Вт. Скотопічна функція світлової ефективності має пікове значення 1700 лм/Вт (рис. 3) для монохроматичного випромінювання на довжині хвилі 507 нм. На рис. 4 наведено функції спектральної світлової ефективності мезопічного діапазону.

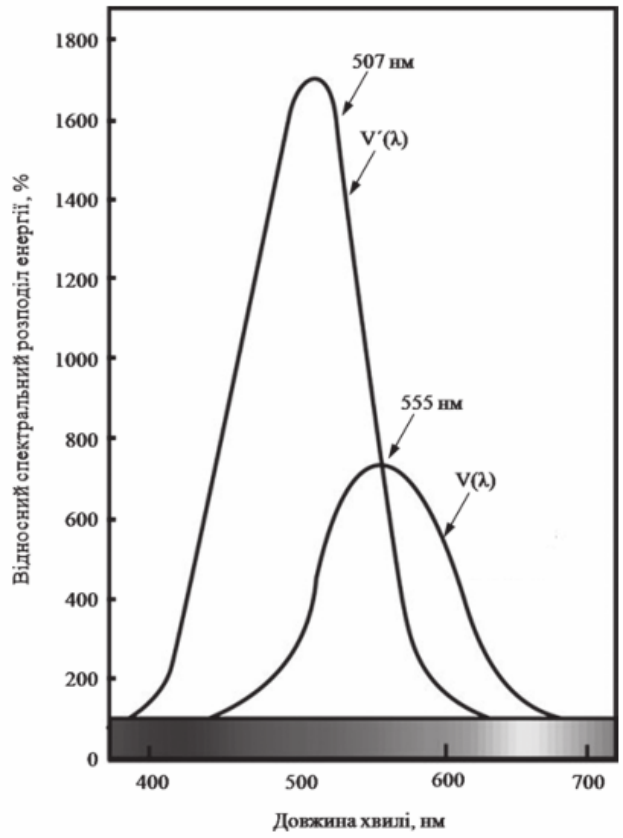

Рис. 3. Графічне позначення визначення люмена за МКО.

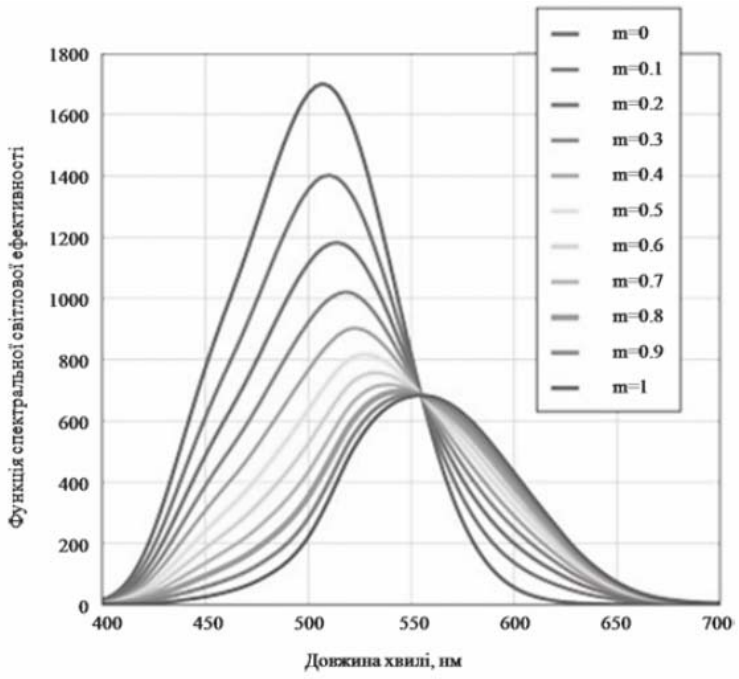

Рис. 4. Функції спектральної світлової ефективності мезопічного діапазону.

Відкрите Берманом у 1992 р. [11] 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 сигналу.

Формула для розрахунку S/P-відношення має вигляд:

$$\frac{S}{P} = \frac{K_m' \int_0^\infty \phi_{e\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^\infty \phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

Згідно з вимогами МКО, світлова ефективність при λ= 555 нм однозначна, незалежно від функції світлової ефективності, від якої вона виводиться, S/P-відношення рівноенергетичного спектра має значення приблизно 2,26.

Значення S/P є характеристикою 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 яскравості за допомогою джерел світла з різним спектром може бути потрібна різна кількість енергії. Відношення S/P є зручним і простим способом характеризації спектрального складу випромінювання, що забезпечують різні джерела світла. Саме вплив будь-якого спектрального розподілу яскравості на мезопічні фотометричні величини може бути охарактеризований S/P величиною.

Чим вище S/P-фактор, тим ефективніше джерело світла діє на фоторецептори нічного зору. Це означає, що для створення одного і того ж рівня яскравості за допомогою джерел світла з різним спектром може бути потрібна різна енергія.

Результати експериментів по зрівнюванню світлоти базуються на відношенні усереднених освітленостей за рівністю відчуття світла [8], наведені в таблиці 1, де показана можливість покращення візуальних характеристик і зменшення енергоспоживання для компактної люмінесцентної лампи(CFL),натрієвої лампи високого тиску (HPS) і металогалогенної лампи (MHL).

Таблиця 1. Результати експериментів по зрівнюванню світлоти.

Опорна освітленість, лк	Відношення середніх освітленостей		
	CFL/ HPS	MHL1/ HPS	MHL2/ HPS
2,0	0,694	0,729	0,679
7,5	0,718	0,733	0,724
15,0	0,732	0,724	0,738

В зв'язку з цим відношення S/P стає важливим для характеризації джерел світла і повинно бути обов'язковою характеристикою освітлювального приладу, що викликає необхідність розроблення методу розрахунку фактора S/P за відомим спектральним розподілом джерела світла.

При цьому доцільно використовувати таблицю значень функції світлової ефективності для денного, нічного зору, приведеного в таблиці 2.

$V_{mh}(\lambda)$ і $V_{ml}(\lambda)$ представляють дві спектральні чутливості за мезопічних рівнів світла.

$V_{mh}(\lambda)$ для m=0,44;

$V_{ml}(\lambda)$ для m=0,12.

На рис. 5 показана залежність функції світлової ефективності від рівня освітленості в мезопічній фотометрії в абсолютній світловій ефективності для спектрів світлодіода (LED) і натрієвої лампи високого тиску (HPS).

Якщо рівень освітленості знижується, спектральна ефективність світлодіодного випромінювання підвищується у порівнянні з HPS джерелом.

Для низьких рівнів освітленості використовується лише скотопічний зір, мезопічний тип зору характерний при штучному нічному зовнішньому освітленні, як ілюструється на рис. 6.

Таким чином, з практичної точки зору, мезопічна фотометрія може бути використана при виборі джерел світла для мінімізації використання електричної енергії за будь-яких описаних рівнів яскравості.

Таблиця 2. Функції світлової ефективності.

λ(нм)	V(λ)	V'(λ)	$V_{mh}(\lambda)$	$V_{ml}(\lambda)$	λ(нм)	V(λ)	V'(λ)	$V_{mh}(\lambda)$	$V_{ml}(\lambda)$
380	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	**560**	0.9952	0.3288	0.7388	0.4359
390	0.0001	0.0022	0.0015	0.0021	**570**	0.9522	0.2076	0.6357	0.3167
400	0.0004	0.0093	0.0064	0.0088	**580**	0.8702	0.1212	0.5354	0.2251
410	0.0012	0.0348	0.0238	0.0329	**590**	0.7572	0.0655	0.4393	0.1583
420	0.0040	0.0966	0.0664	0.0912	**600**	0.6311	0.0332	0.3519	0.1119
430	0.0116	0.1998	0.1390	0.1890	**610**	0.5031	0.0159	0.2735	0.0793
440	0.0230	0.3281	0.2303	0.3109	**620**	0.3811	0.0074	0.2041	0.0557
450	0.0380	0.4550	0.3226	0.4319	**630**	0.2651	0.0033	0.1407	0.0370
460	0.0600	0.5670	0.4086	0.5398	**640**	0.1750	0.0015	0.0925	0.0238
470	0.0910	0.6760	0.4973	0.6460	**650**	0.1070	0.0007	0.0564	0.0143
480	0.1391	0.7930	0.6002	0.7620	**660**	0.0610	0.0003	0.0321	0.0081
490	0.2081	0.9040	0.7101	0.8750	**670**	0.0320	0.0002	0.0168	0.0042
500	0.3231	0.9820	0.8221	0.9629	**680**	0.0170	0.0001	0.0089	0.0022
510	0.5031	0.9970	0.9262	1.0000	**690**	0.0082	0.0000	0.0043	0.0011
520	0.7101	0.9350	0.9932	0.9683	**700**	0.0041	0.0000	0.0022	0.0005
530	0.8622	0.8110	0.9901	0.8714	**710**	0.0021	0.0000	0.0011	0.0003
540	0.9542	0.6500	0.9311	0.7321	**720**	0.0011	0.0000	0.0006	0.0001
550	0.9952	0.4810	0.8401	0.5787	**730**	0.0005	0.0000	0.0003	0.0001

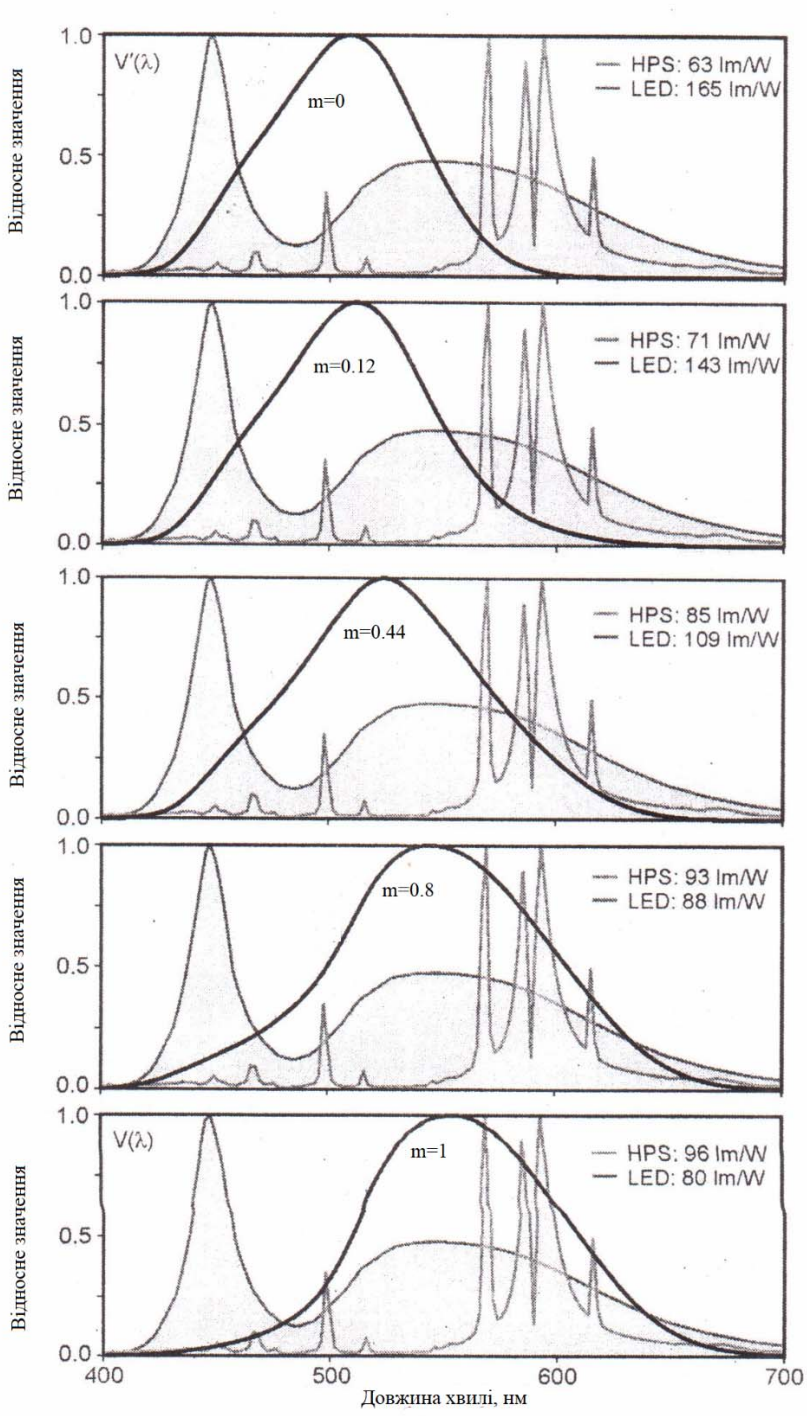

Рис. 5. Функції світлової ефективності, які використовуються в мезопічній системі фотометрії з відносними спектральними розподілами потужності двох джерел світла- 6500 К LED і HPS.

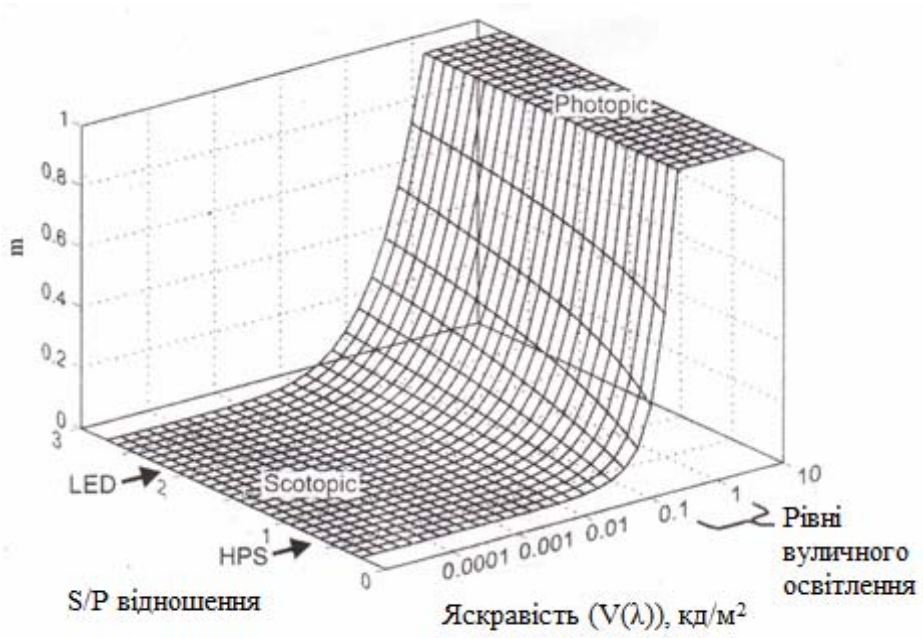

Рис. 6. Мезопічна система фотометрії показує перехід (m) від скотопічної до фотопічної, відображена як функція фотопічної яскравості: (кд/м^2) і спектральна яскравість джерела світла, яка характеризується відношенням (S/P). Також показані S/P значення для двох джерел світла -6500 K LED і HPS.

Актуальним напрямом стандартизації освітлення є гармонізація (перегляд) стандартів. Це пов'язано з тим, що освітлювальні стандарти базуються на фотопічній функції світлової ефективності V(x), які в дійсності не повністю охоплюють можливості візуального сприйняття [12,13]. Функція V(x) була визначена завдяки фізичним дослідженням, проведеним у 1920 рр. В цих ранніх дослідженнях використовувалися їхні фовеа для бачення малого, 2° поля світла. Фовеа є малою областю ретини, яка відповідає так званому центральному баченню і має найвищу густину найвищої просторової роздільної здатності (гостроти).

В дійсності, тільки ковбочкові фоторецептори знаходяться в фовеа, і серед них більшістю є ковбочки довгохвильової (L) і середньохвильової(S) чутливості ковбочки, короткохвильової(M) чутливості ковбочки майже відсутні в центральному фовеа.

В зв'язку з цим фотопічна функція світлової ефективності є марною для деяких застосувань. Наприклад, застосовуючи і нормуючи фотопічну функцію для хірургії, ми максимізуємо переваги освітлення для такого використання, в той же час мінімізуючи втрати електричної енергії. Якщо ми використовуємо фотопічну функцію для освітлення паркінгу, ми не в змозі максимізувати потенційні переваги, які могли б забезпечити освітлення для даного застосування і без необхідності втрачаємо електричну енергію.

Таким чином, використання мезопічних функцій спектральної світлової ефективності для певних застосувань дає певні переваги для освітлення.

Наведемо нижче процедуру обчислення мезопічної яскравості за даним розподілом яскравості і S/P-відношенням джерела - R_{sp}.

1. Визначення фотопічної адаптаційної яскравості $L_{v,adapt}$ на основі проведення усереднення в адаптаційному полі даного розподілу яскравості.
2. Визначення скотопічної адаптаційної яскравості за залежністю $L_{S,adapt} = L_{v,adapt} \cdot R_{sp}$.
3. Обчислення мезопічної адаптаційної яскравості $L_{mes,adapt}$ і адаптаційного коефіцієнта m ітераційними кроками, використовуючи (2) та (3).
4. Обчислення мезопічного фактора підсилення (F_{mes} ($L_{v,adapt}$; R_{sp}), який визначається відношенням мезопічної адаптаційної яскравості і фотопічної адаптичної яскравості.

Для перетворення фотопічної яскравості до мезопічної яскравості необхідно помножити фотопічну яскравість на мезопічний фактор підсилення.

Альтернативно можна також визначити L_{mes} і m CIE 191-2010 Apendix, використовуючи таблиці та спектри [12] розповсюджених джерел світла і обчислений їхній S/P фактор (рис. 7).

В системі одиниці СІ фотометричні величини є похідними від сили світла, вираженої в канделах.

Кандела – це сила світла в заданому напрямку від джерела монохроматичного випромінення частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, яке має інтенсивність випромінення в цьому напрямку. 1/683 Вт·ср$^{-1}$ є важливою сталою, що з'єднує фізичну фотометрію і оптичну радіометрію. Основний наслідок з визначення сили світла полягає в тому, що світлова ефективність випромінення за довжини хвилі 555 нм є К=683 лм/Вт.

Фотопічна яскравість, кд/м^2

	m_2							
	S/P	0,01	0,03	0,1	0,3	1	3	4,5
LPS ~	0,25		0,1542	0,3830	0,5644	0,7538	0,9225	0,9841
	0,35		0,1804	0,3920	0,5688	0,7558	0,9230	0,9842
	0,45	0,0000	0,1992	0,4000	0,5730	0,7576	0,9235	0,9843
HPS ~	0,55	0,0190	0,2140	0,4073	0,5770	0,7594	0,9240	0,9844
	0,65	0,0459	0,2265	0,4139	0,5808	0,7612	0,9245	0,9845
	0,75	0,0655	0,2373	0,4201	0,5844	0,7629	0,9249	0,9846
	0,85	0,0812	0,2468	0,4258	0,5878	0,7646	0,9254	0,9846
	0,95	0,0943	0,2553	0,4311	0,5911	0,7662	0,9258	0,9847
	1,05	0,1057	0,2631	0,4361	0,5942	0,7678	0,9263	0,9848
MH warm	1,15	0,1157	0,2702	0,4408	0,5972	0,7693	0,9267	0,9849
white ~	1,25	0,1247	0,2767	0,4452	0,6001	0,7708	0,9272	0,9850
	1,35	0,1329	0,2828	0,4494	0,6029	0,7723	0,9276	0,9851
	1,45	0,1404	0,2885	0,4534	0,6056	0,7737	0,9280	0,9852
	1,55	0,1473	0,2939	0,4573	0,6082	0,7751	0,9284	0,9853
	1,65	0,1538	0,2990	0,4609	0,6107	0,7764	0,9289	0,9853
	1,75	0,1598	0,3038	0,4645	0,6131	0,7778	0,9293	0,9854
	1,85	0,1654	0,3083	0,4678	0,6155	0,7791	0,9297	0,9855
	1,95	0,1708	0,3126	0,4711	0,6178	0,7803	0,9301	0,9856
	2,05	0,1758	0,3168	0,4742	0,6200	0,7816	0,9304	0,9857
	2,15	0,1806	0,3207	0,4772	0,6221	0,7828	0,9308	0,9857
	2,25	0,1852	0,3245	0,4801	0,6242	0,7840	0,9312	0,9858
MH day-	2,35	0,1895	0,3282	0,4830	0,6263	0,7852	0,9316	0,9859
light ~	2,45	0,1937	0,3317	0,4857	0,6283	0,7863	0,9319	0,9860
	2,55	0,1977	0,3351	0,4883	0,6302	0,7875	0,9323	0,9860
	2,65	0,2015	0,3383	0,4909	0,6321	0,7886	0,9327	0,9861
	2,75	0,2052	0,3415	0,4934	0,6339	0,7896	0,9330	0,9862

а)

Фотопічна яскравість, кд/м^2

	L_{mes} S/P	0,01	0,03	0,1	0,3	1	3	4,5
LPS ~	0,25	0,0025	0,0145	0,0705	0,2467	0,9130	2,9265	4,4782
	0,35	0,0035	0,0174	0,0750	0,2545	0,9253	2,9367	4,4812
	0,45	0,0045	0,0198	0,0793	0,2620	0,9373	2,9468	4,4842
HPS ~	0,55	0,0057	0,0220	0,0834	0,2693	0,9492	2,9568	4,4872
	0,65	0,0069	0,0239	0,0873	0,2764	0,9608	2,9666	4,4901
	0,75	0,0079	0,0258	0,0911	0,2833	0,9722	2,9763	4,4929
	0,85	0,0088	0,0275	0,0947	0,2901	0,9835	2,9859	4,4958
	0,95	0,0096	0,0292	0,0983	0,2967	0,9945	2,9953	4,4986
	1,05	0,0104	0,0308	0,1017	0,3032	1,0054	3,0046	4,5014
MH warm white ~	1,15	0,0111	0,0323	0,1051	0,3096	1,0161	3,0139	4,5041
	1,25	0,0118	0,0338	0,1083	0,3158	1,0267	3,0230	4,5068
	1,35	0,0125	0,0353	0,1115	0,3220	1,0371	3,0319	4,5095
	1,45	0,0132	0,0367	0,1147	0,3280	1,0473	3,0408	4,5122
	1,55	0,0138	0,0381	0,1178	0,3339	1,0575	3,0496	4,5148
	1,65	0,0145	0,0395	0,1208	0,3398	1,0674	3,0582	4,5174
	1,75	0,0151	0,0408	0,1238	0,3455	1,0773	3,0668	4,5200
	1,85	0,0157	0,0421	0,1267	0,3512	1,0870	3,0753	4,5225
	1,95	0,0163	0,0434	0,1295	0,3568	1,0966	3,0836	4,5250
	2,05	0,0169	0,0446	0,1324	0,3623	1,1060	3,0919	4,5275
	2,15	0,0174	0,0459	0,1352	0,3677	1,1154	3,1001	4,5299
	2,25	0,0180	0,0471	0,1379	0,3731	1,1246	3,1082	4,5323
MH day-light ~	2,35	0,0185	0,0483	0,1406	0,3784	1,1338	3,1162	4,5347
	2,45	0,0191	0,0495	0,1433	0,3836	1,1428	3,1241	4,5371
	2,55	0,0196	0,0506	0,1459	0,3888	1,1517	3,1319	4,5395
	2,65	0,0201	0,0518	0,1485	0,3939	1,1605	3,1396	4,5418
	2,75	0,0207	0,0529	0,1511	0,3989	1,1693	3,1473	4,5441

б)

Рис. 7а). Значення адаптаційного коефіцієнта m і б) L_{mes} мезопічної системи як функції фотопічної яскравості і відношення S/P джерела світла.

Це застосовується для фотопічного K_m (555), скотопічного K'_m (555) і також присмеркового (мезопічного) зору, коли точки будь-якої кривої світлової ефективності випромінення (рис. 4) мають однакові значення K''_m (555), тобто:

K(555)=K′(555)=K″(555)=683 лм/Вт. (8)

Для розрахунку максимального значення світлової ефективності випромінення для присмеркового зору K''_m для різних адаптацій яскравості може бути використано визначення спектральної світлової ефективності:

$$\frac{\Phi_{лм}}{P} = \frac{[683 лм/Вт \int_\lambda V(\lambda)P(\lambda)dx]}{[\int_\lambda P(x)dx]}, \quad (9)$$

З виразу (9) для монохроматичного випромінення витікає:

$$V'(\lambda) = \frac{K'(\lambda)}{K'_m(\lambda)}, V''(\lambda) = \frac{K'(\lambda)}{K''_m(\lambda)}. \quad (10)$$

Для K'_m відповідно K''_m і довжини хвилі λ=555 нм відповідні рівняння можуть бути записані як:

$$K_m^{'} = \frac{683}{V^{'}(555)}, K_m^{''} = \frac{683}{V^{''}(555)}. \quad (11)$$

Значення спектральної світлової ефективності V′(λ) відповідно V″(λ) для довжини хвиль визначаються з кривих спектральної світлової ефективності V′(λ) відповідно V″(λ) (рис. 8) [14,15].

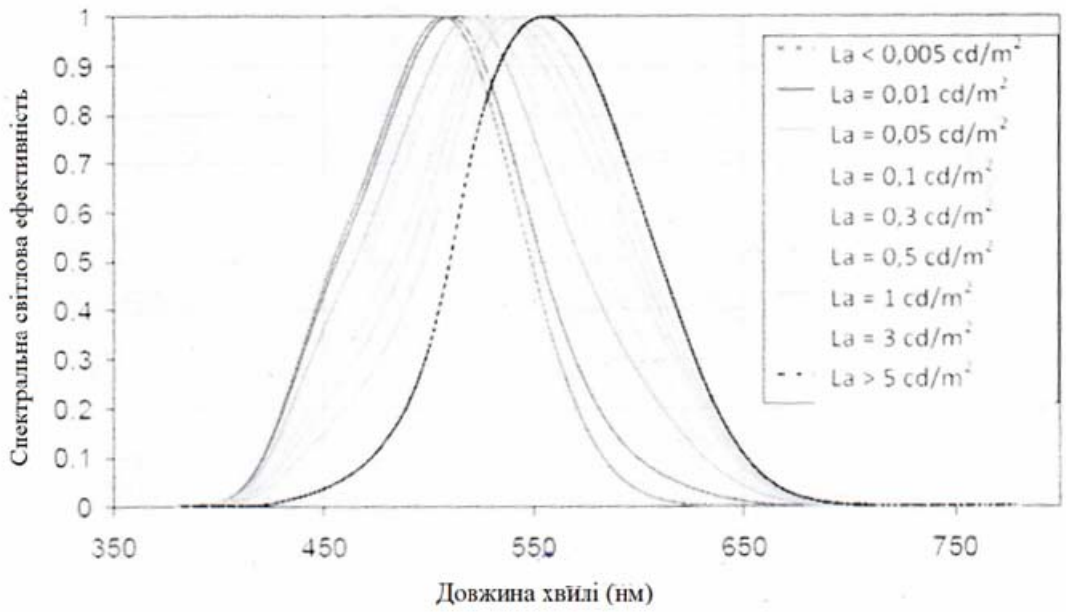

Рис. 8. Функції спектральної світлової ефективності для відбору яскравостей.

Наприклад, значення $K_m^{'}$, коли V′(555)=0,40176 [1] є:

$$K_m^{'} = \frac{683}{V^{''}(555)} = \frac{683}{0{,}401766} = 1700 \left(\frac{\text{лм}}{\text{Вт}}\right). \quad (12)$$

Така ж процедура може бути застосована для визначення мезопічного $K_{m,e}^{''}$. Наприклад, для рівня адаптації 0,1 кд/м^2, значення спектральної світлової ефективності на довжині хвилі λ=555 нм складає V″(555)=0,78492 і значення максимальної світлової ефективності випромінення є:

$$K_{m,e=0,1}^{''} = \frac{683}{V_{m,e=0,1}^{''}(555)} = 780 \left(\frac{\text{лм}}{\text{Вт}}\right). \quad (13)$$

За значенням спектральної світлової ефективності V″(λ) і максимальної світлової ефективності випромінення для $K_{m,e}^{''}$ можливо обчислити спектральний розподіл світлової ефективності випромінення за наступним рівнянням:

$$K^{''}(\lambda) = K_{m,e}^{''}(\lambda). \quad (14)$$

На рис. 9 показаний спектральний розподіл світлової ефективності випромінення для вибраної адаптації яскравості в мезопічному діапазоні.

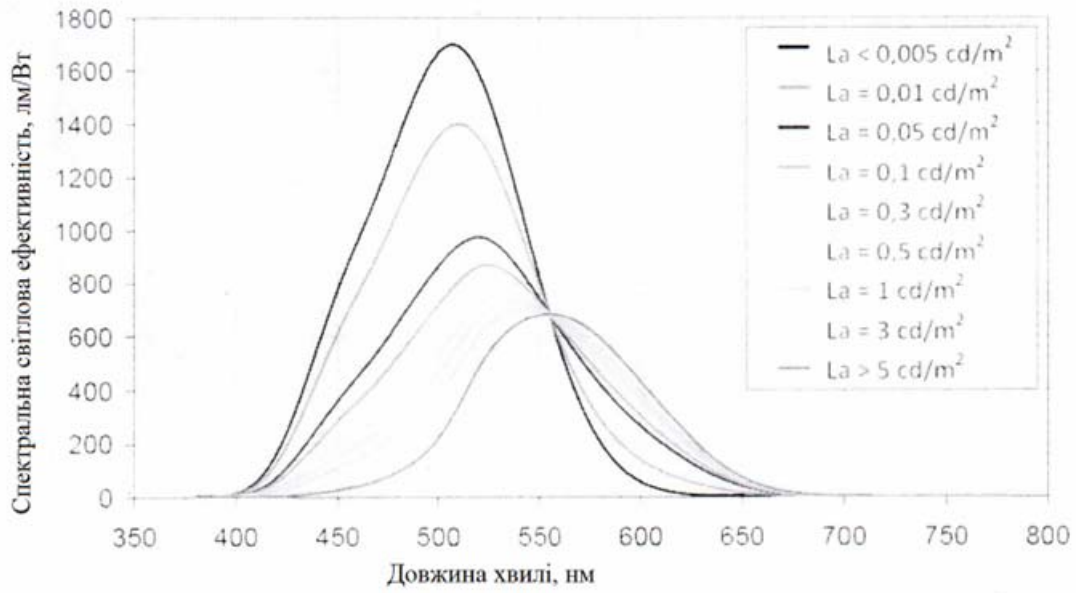

Рис. 9. Спектральна світлова ефективність за вибраної адаптації яскравості.

3. ВИСНОВКИ

Використання мезопічної системи фотометрії має велику перспективу при виборі джерел світла для мінімізації споживання електричної енергії і підвищення зорової ефективності. Зважаючи на це, необхідно для визначення потужності освітлювальних систем при заміні світильників виконувати обчислення з урахуванням коефіцієнта S/P. Введення цієї характеристики (S/P) як нормативної для кожного джерела світла, може допомогти в ранжуванні джерела світла з точки зору візуальної ефективності. Розумний вибір спектральних характеристик джерел світла може призвести до поліпшення візуальної продуктивності при мезопічних рівнях освітленості. Можливість обчислення S/P-фактора для будь-якого джерела світла, а також проведення дослідження широко розповсюджених джерел світла є дуже важливим.

Широке впровадження мезопічної системи фотометрії в інженерну практику припускає актуальність розроблення методів розрахунку фотометричних характеристик за мезопічних рівнів освітленості (світловий потік, яскравість тощо).

Результати роботи можуть служити основою для перегляду рекомендацій (стандартів) дорожнього і зовнішнього освітлення.

[1]L.A. Nazarenko, [1]K.I. Suvorova, [2]M.V. Guryev

SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF LEDS AND POUCH PHOTOMETRY

The rapid development of lighting technologies, which has been observed in recent decades, is definitely connected with the widespread introduction of LED light sources. At the same time, if in the early days the energy efficiency of LEDs was noted, now the use of certain spectral characteristics of such sources is on the agenda. At the same time, methods and means of photometry are expanding, in addition to photopic and scotopic, mesopic photometry is also developing. Lighting standards based on the photopic function of light efficiency do not fully cover visual perception. Therefore, it is relevant to determine the characteristics related to twilight photometry, which is considered in the paper.

In fact, we are talking about a new lighting paradigm - a transition from the use of a single function of light efficiency - photopic, to a multifunctional one, when one or another function of light efficiency is used, which is dictated by a specific lighting task and at the same time is regulated by the corresponding light standards. Thanks to this

methodology, it is possible to increase efficiency not by literally reducing power consumption, but by taking into account the spectral characteristics of light sources. If we also take into account the emergence of a new distribution - the response curve of melatonin suppression, which has become the basis of circadian photometry, then this approach will contribute to solving the current problem of human-centric lighting.

It is important to regulate light sources according to the S/P factor in order to minimize the consumption of electrical energy and increase visual efficiency. The S/P ratio is a convenient and simple way of characterizing the spectral composition of the radiation provided by various light sources. It is the influence of any spectral distribution of brightness on mesopic photometric values that can be characterized by the S/P value. The ability to calculate the S/P factor for any light source, as well as to conduct a survey of widely distributed light sources, is very important.

Keywords LED technologies, mesopic function, photopic and scotopic functions, spectral characteristics, photometry, lighting standards.

1. CIE (1926) Commission Internationale de L'Eclairage Proceedings. 1924. Cambridge: Cambridge University Press.
2. CIE (2005) Photometry. The CIE system of physical photometry. International Standart CIE S010/E: 2004; ISO 23539: 2005. Vienna, CIE. 2005.
3. CIE 191:2010 Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance. Vienna: CIE. 2010.
4. Л.А. Назаренко, Т.В. Можаровська, Д.О. Усіченко. Спектральний розподіл потужності світла та присмеркова фотометрія. *Український метрологічний журнал*. 2017. №1. С. 43-52.
5. M. Eloholma [et all]. The effects of lighting spectral on visual performance at mesopic light levels.II Proceedings of the CIE Symposium "75 Years of CIE Photometry": Report theses. Budapest, Hungary; Vienna, Austria. 1999. P. 5.1-5.4.
6. J. Schanda [et all]. Does lighting need more photopic luminous efficiency functions? *Lighting Research and Technology*.2002.**34**, №1.P. 69-76.
7. Y He [et all]. Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times. *Journal of Illuminating Engineering Society*.1997.**26**, №1. P.125-138.
8. Fotios S.A., C. Cheal. Lighting for subsidiary streets: investigation of lamps of different SPD. Part 2. *Brightness Lighting Research and Technology*.2007. **39**, №3. P. 233-249.
9. Mesopic street lighting demonstration and evaluation. Final report. (Electronic resource) https: //www.lrc.rpi.edu/researchAreas/pdf/CrotonFinalReport.pdf.
10. 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.
11. S.M. Berman. Energy efficiency consequences of scotopic sensitivity. *Journal of the Illuminating Engineering Society.* 1992.**21,** №1. P.3-14.
12. Value Metrics for Better Lighting. By Mark S. Rea, Bellingham. WA: SDIE Press. 2013. ISBN 978-0819493224. 114 p.
13. Rea MS: The Lumen Seen in a New Light: Making Distinctions between Light, Lighting and Neuroscience (Lighting Research and Technology). 2015. **47**. P. 259-280.
14. J. Habel J., D. Zak, A.J. Zalesak. Determination of luminous flux in conditions of mesopic vision. *Przeglad Electrotechniczny*. 2013. **89,** №6. P. 333-336.
15. T. Goodman, A. Forbes, H. Walkey, M. Eloholma, L. Halonen, J. Alferdinek, A. Freiding, J.P. Bodrog, G. Varady, A. Szalmas. Mesopic visual efficiency IV: A model with relevance to night-time driving and other applications. *Lighting Research and Technology*. 2007. **39**. P. 365-392.

[1]Харківський національний університет
міського господарства ім. О.М. Бекетова
13, вул. Маршала Бажанова
61002 Харків, Україна
leonnaz@ukr.net
kisuvorova17@gmail.com

Отримано 15.08.2022.

[2]ННЦ «Інститут метрології»
40, вул. Мироносицька,
61002 Харків, Україна