

СПЕКТРАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ПОТУЖНОСТІ СВІТЛА ТА ПРИСМЕРКОВА ФОТОМЕТРІЯ

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

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

Д.О. Усиченко, інженер з метрології 2 категорії ДП "Харківстандартметрологія"



Л.А. Назаренко



Т.В. Можаровська



Д.О. Усиченко

Розглянуто вплив спектрального світлорозподілу джерел світла на видимість в умовах присмеркової фотометрії. Проаналізовано дослідження цієї теми. Подано розрахунки S/P відношення зразків світильників провідних українських фірм та рекомендації щодо поліпшення ефективності освітлення для умов водіння у присмерковий час.

The influence of spectral light distribution of light sources for visibility in twilight conditions photometry is considered. Study of this subject is analyzed. The calculations of S/P ratio of samples of the lights of the leading Ukrainian companies and recommendations as for improvement of the efficiency of lighting conditions for driving conditions in twilight time are submitted.

Вступ

Ідея присмеркової фотометрії базується на загальному знанні про роботу ока. Світло фокусується лінзою на сітківку, на якій існує два типи фоторецепторів, що сприяють баченню, – палички і колбочки. Палички чутливі на дуже низьких рівнях освітленості, а також роблять свій внесок у периферійний зір. Колбочки виявляють колір і бувають трьох типів, кожний з яких сприймає різний діапазон довжин хвиль, і грубо можна розглядати їх як червоний, зелений і синій детектори. Колбочки зосереджено в центрі сітківки і відповідають за деталізований зір.

Око має великий динамічний діапазон, може працювати при яскравому світлі і ефективно стає лічильником фотонів у дуже темному світлі.

При яскравому світлі (> 3 кд/м²) око працює у фотопічній області і має спектральну характеристику, показану на рис. 1. У цій області працюють колбочки, і спектральний відгук очей не змінюється, якщо світло стає яскравішим. Майже всі фотометричні стандарти та передовий досвід ґрунтуються на фотопічній функції світлової ефективності $V(\lambda)$ (рис. 1), визначено Міжнародною комісією з освітлення (МКО) [1, 2]. Ця функція значною мірою базується на результатах досліджень, які проводилися при відносно високих рівнях освітлення (10 кд/м²), із використанням психофізичної техніки під назвою "фліккер-фотометрія" із вторинною основою на яскравісне узгодження даних для джерел світла точно такого ж кольору світла [2, 3].

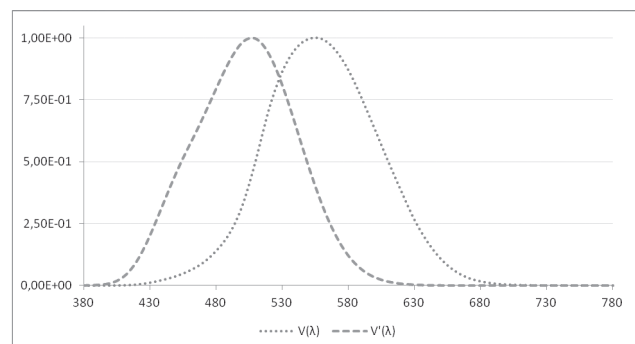


Рис. 1. Фотопічна $V(\lambda)$ та скотопічна $V'(\lambda)$ функції світлової ефективності за МКО

Функція в основному охоплює спектральну чутливість фовеа (1...2^o ретини) – колбочкових

фоторецепторів. Пік спектральної чутливості знаходиться на довжині хвилі 555 нм, де за рекомендацією МКО [2] 1 Вт потужності випромінювання на 555 нм визначається як еквівалент для 683 лм [4]. Рис. 2 показує функцію фотопічної світлової ефективності, яка визначає світлову ефективність світла (лм/Вт) для різних видимих довжин хвиль.

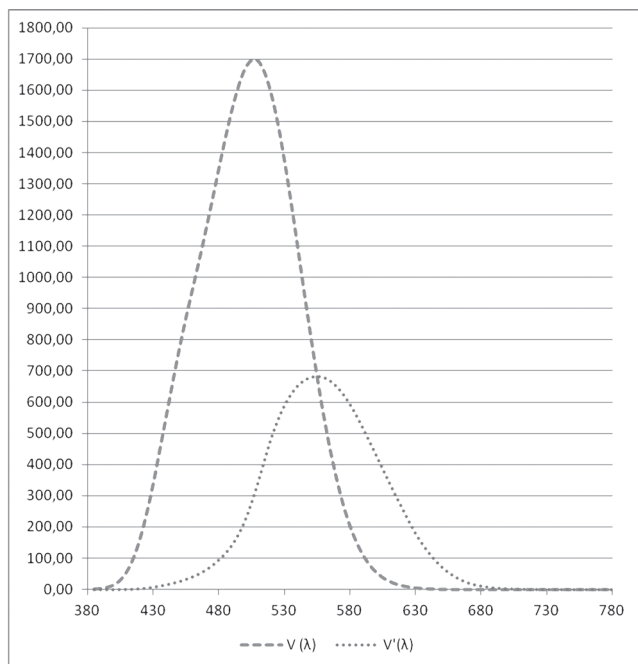


Рис. 2. Фотопічна $V(\lambda)$ та скотопічна $V'(\lambda)$ функції світлової ефективності, нормалізовані при 555 нм

Фотопічну функцію світлової ефективності $V(\lambda)$ було визначено відносно малим, фовеальним стимулом, і вона не характеризує спектральну чутливість на периферійній ретині. $V(\lambda)$ недооцінює короткохвильову чутливість на периферійній ретині через те, що жовті екрануючі пігменти охоплюють центральну ямку, і через те, що на периферії пропорція короткохвильових чутливих колбочок нижча, ніж на фовеальній ретині. Для вирішення цього питання в 2005 р. МКО опублікувала збільшену фотопічну функцію $V_{10}(\lambda)$, яка базується на 10° функції відповідності кольорів. Цю функцію було збільшено відносно короткохвильової чутливості щодо $V(\lambda)$, і хоча це не показувало спектральної чутливості ретини за межами 10° поля зору, її було рекомендовано МКО як корисну для поля зору аж від 20 до 30° [5]. Для дуже великих полів, типових для тих, які зустрічаються у світловій практиці, участь паличок виникає, коли фотопічні світлові рівні і $V(\lambda)$ можуть не бути практично корисними. Для більшості ширококутових джерел світла відмінність в яскравості, розрахованій за допомогою $V(\lambda)$ і $V_{10}(\lambda)$, менше 5 % [6].

Інший кінець візуального діапазону ($<0,001$ кд/м²) називається скотопічним. Спектральна реакція очей не змінюється, якщо світло стає темнішим. Скотопічна функція світлової ефективності $V'(\lambda)$ описує спектральну чутливість фоторецепторів ретини, що називаються паличками.

При дуже низьких світлових рівнях, нижче колбочкового порога (нижче ніж $0,001$ кд/м²), скотопічна функція чутливості — це єдина спектральна чутливість ока. Система паличок (паличковий апарат) має максимальну чутливість світла на довжині хвилі 507 нм. Однак за [2] скотопічна функція світлової ефективності має більше пікове значення, ніж фотопічна функція, досягаючи максимуму при 1700 лм/Вт швидше ніж 683 лм/Вт (рис. 2). $V'(\lambda)$ описує спектральну чутливість візуальної системи при скотопічних рівнях світла для всіх візуальних задач і відгуків. Через те що фовія містить тільки колбочки, спектральна чутливість цієї частини сітківки зазвичай характеризується функцією $V(\lambda)$ на всіх світових рівнях, поки досягається ліміт чутливості колбочкового апарату, проте в інших точках фовія ефективно сліпа.

Діапазон яскравостей, в якому око адаптується до яскравостей між фотопічним та скотопічним діапазонами, називається мезопічним. На цих рівнях і колбочки, і палички роблять свій внесок у бачення, тому ні $V(\lambda)$, ні $V'(\lambda)$ не описують спектральної чутливості цієї візуальної системи. Зі зменшенням світлових рівнів пік чутливості зсувається ближче до короткохвильового діапазону (ефект Пуркінє). Цей ефект поступовий, як перехід спектральної чутливості від $V(\lambda)$ до $V'(\lambda)$, і обмежений для великих візуальних полів (більше 1°) і периферійної ретини (через відсутність паличок у фовії).

Точні межі фотопічного, мезопічного і скотопічного діапазонів визначені і геометрично залежні; наприклад, межа між мезопічним і фотопічним діапазонами знаходиться між 1 кд/м² [7] та 10 кд/м² [8] (рис. 3).



Рис. 3. Межі фотопічного, мезопічного та скотопічного діапазонів

Як відзначалося раніше, основну систему фотометрії побудовано на базі значень відносної спектральної ефективності для стандартного фотометричного спостерігача МКО $V(\lambda)$. Існує можливість того, що ця міра не повно характеризує всі візуальні відгуки в умовах низьких рівнів освітлення, особливо для об'єктів, що знаходяться на периферії. Публікація МКО системи для приримеркової (мезопічної) фотометрії "Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance" [9] може стати розширеною характеристикою для пояснення візуальних ефектів освітлення.

Відкриття нової системи присмеркової фотометрії визвало велику кількість робіт, присвячених дослідженню впливу спектрального розподілу потужності випромінювання на зір при мезопічних рівнях світла, тому що існує гіпотеза, що рівні світла з більшою потужністю в короткохвильовому діапазоні можуть результувати в сторону поліпшення візуального виконання, у порівнянні зі світловими джерелами з відносно малою потужністю в цьому спектральному діапазоні.

Основна частина

Проектувальник освітлення має можливість маніпулювати чотирма змінними освітлення: просторовим розподілом сили світла, часовим розподілом світла, кількістю світла і спектральним розподілом потужності (СРП) світла. Наразі існує широка різноманітність СРП-світильників, що поряд із відмінностями у вартості та світловіддачі дають зміни в кольорі світла та кольорі освітлюваних поверхонь.

Важливим індексом для ранжування джерел світла за кількістю короткохвильової енергії є коефіцієнт S/P (скотопік/фотопік) [10]. S/P-відношення визначається діленням скотопічнозваженого вихідного сигналу джерела (наприклад, світлового потоку, яскравості) на відповідно фотопічно зважений вихід [4]. Формула для розрахунку S/P може мати вигляд

$$\frac{S}{P} = \frac{K'_m \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}.$$

У табл. 1 наведено огляд результатів експериментальних досліджень візуальної ефективності за мезопічних рівнів світла для джерел світла з різним СРП. Розглянуті дослідження включають до себе як абстрактні лабораторні дослідження, так і дослідження у реальних візуальних умовах, таких як керування автомобілем у нічний час.

Таблиця 1

Огляд результатів експериментальних досліджень візуальної ефективності за мезопічних рівнів світла для джерел світла з різним СРП

Автори	Візуальні задачі та умови	Результати
Акаші та Нічес (2003) [11]	Лабораторні дослідження: Виявлення позаосьових цілей (1...18°) при 0,1 кд/м ² (~0,6 або 1,5 S/P коефіцієнт) за різних рівнях світла для когнітивного навантаження (відстеження та усний рахунок)	Короткий час реакції при вищому S/P Дуже невелике збільшення різниці між S/P при більш складому когнітивному навантаженні
Акаші та Ріа (2002) [12]	Поле дослідження: Виявлення позаосьових цілей (15...23°) при водінні (5,5 лк на дорозі, ~ 0,6 або 1,5 S/P коефіцієнт) з і без зустрічного світла фар	Час реакції коротше і досягається найменша кількість пропущених цілей при збільшенні S/P коефіцієнта з і без зустрічного світла фар
Бірман та ін. (1998) [13]	Лабораторні вивчення: Час реакції (бінокулярний зір) для 2° цілі зору при 12° від осі (0,001...10 кд/м ² , ~0,6 або 1,6 S/P коефіцієнт)	При збільшенні S/P на низьких рівнях яскравості час реакції коротший
Бодрогі та ін. (2003) [14]	Лабораторні вивчення: Контрастний поріг (осьові та 10° позаосьові цілі) (0,1 кд/м ² , ~0,2...30 S/P коефіцієнт)	Не виявлено ефектів S/P на осьовому порозі контрастності, проте при позаосьовому зорі виявлено нижчий поріг контрастності для вищих S/P коефіцієнтів
Буллоф та Ріа (2000) [15]	Лабораторні вивчення: Симуляція швидкості руху і швидкості зіткнень (0,1...3 кд/м ² , ~0,6...38 S/P коефіцієнт) Розрізнення маленьких (від 2 до 3°) позаосьових (18°) цілей (0,1...3 кд/м ² , ~0,6...38 S/P коефіцієнт)	Впливу S/P на змодельовану швидкість руху або швидкість зіткнення при будь-якій яскравості не виявлено Найменша кількість пропущених цілей для високих S/P коефіцієнтів при низькій яскравості
Елохолма та ін. (1999) [16]	Лабораторні вивчення: Гострота зору (осьового) (0,2...5 кд/м ² , червоний, зелений, синій та білий фони) Розмір поля зору (0,1...5 кд/м ² , червоний, зелений, синій та білий фони)	Відсутні ефекти S/P коефіцієнта на гостроту зору при різних яскравостях Найменше візуальне поле з червоним фоном при нижчих яскравостях

Автори	Вїзуальнї задачі та умови	Результати
Хї та їн. (1997) [1]	Лабораторнї вивчення: Час реакції (монокулярний зїр) для 2° цїлі осьового зору (0,003...10 кд/м ² , ~0,6 або 1,6 S/P коефіцієнт) Час реакції (монокулярний зїр) для 2° цїлі 15° позаосьового зору (0,003...10 кд/м ² , ~0,6 або 1,6 S/P коефіцієнт)	Вплив S/P коефіцієнта на осьовий час реакції не виявлено При вищому S/P на низьких рївнях освїтлення час реакції зменшувався
Хї та їн. (1998) [17]	Лабораторнї вивчення: Час реакції для бїнокулярного зору для 2° цїлі спостереження 12° поза осьового зору (~0,03...40 S/P коефіцієнт)	При вищому S/P на низьких рївнях освїтленостї час реакції зменшувався
Яноф та Хавард (1997, 1997) [18, 19]	Поле дослїдження: Розрїзнення маленьких цїлей (18 см ²) і розпїзнання вїдстанї, суб'єктивнї оцїнки вїдимостї під час водїння або перегляду під HPS (~ 0,9 кд/м ²) і МН (~ 0,8 кд/м ²) при дорожнїх рївнях освїтлення	Вїдимість полїпшувалася під лампою з бїльш високим S/P коефіцієнтом Не виявлено ефектїв, що впливають на виявлення або розпїзнання вїдстанї в залежностї вїд спектрального складу випромїнювання
Кетомакї та їн. (2003) [20]	Лабораторнї вивчення: Контрастний порїг (осьовї та 10° позаосьовї цїлі) (0,1...2 кд/м ² , при синьому, червоному та жовтому фонах)	Бїльший контрастний порїг для осьових і позаосьових умов при синьому фонї при нижчїй яскравостї
Левїс (1998) [21]	Лабораторнї вивчення: Час реакції/розпїзнання симуляційних цїлей для пїшоходїв (0,1...4 кд/м ² , ~0,2...2 S/P коефіцієнт)	При вищому S/P коефіцієнтї на нижчих рївнях яскравостї час реакції зменшувався
Левїс (1999) [22]	Лабораторнї вивчення: Контрастний порїг для ґраток вїд 10 до 13° ґраток (0,1...10 кд/м ² , ~0,2...2 S/P коефіцієнт) Час реакції/розпїзнання ґраток (0,1...10 кд/м ² , ~0,2...2 S/P коефіцієнт) Час реакції/розпїзнання симуляційних цїлей для пїшоходїв (0,1...10 кд/м ² , ~0,2...2 S/P коефіцієнт)	Маленький ефект вїд S/P коефіцієнта показує менший контрастний порїг для вищих S/P коефіцієнтїв при низьких яскравостях Короткий час реакції /розпїзнання ґраток при вищому S/P при нижчих яскравостях Короткий час реакції /розпїзнання цїлей при вищому S/P коефіцієнтї при нижчих яскравостях
Лїн та їн. (2004) [23]	Лабораторнї вивчення: Вїзуальне поле зору (~0,01...2 кд/м ² , бїлий, червоний, зелений і синїй фонї)	Бїльшї розмїри полїв вїзуальних задач при нижчих яскравостях
Лїн та їн. (2006) [24]	Лабораторнї вивчення: Розпїзнання фовїальних та позаосьових (10°) цїлей (при 2 та 10° розмїрї, ~0,04...14 S/P коефіцієнт) при рїзних яскравостях фонїв (0,01...1 кд/м ²)	Вища можливїсть розпїзнання при вищих S/P коефіцієнтах для позаосьових цїлей Цей ефект збїльшувався при низькїй яскравостї фону
Лїнґард та Рїа (2002) [25]	Лабораторнї вивчення: Розпїзнання позаосьових цїлей (12...29°) при виконаннї симуляції задач водїння (0,1...3 кд/м ² , ~0,5...1,8 S/P коефіцієнт)	При вищому S/P коефіцієнтї на нижчих рївнях свїтла час реакції нижче при меншїй кїлькостї пропущених цїлей
Малдер та Бойсї (2005) [26]	Поле дослїдження: Швїдкїсть ходьби і частота зїткнень (ї оцїнка продуктивностї на основї обох) для рїзних умов (0,01...12 лк на пїдлозі чорної кїмнати, ~0,05...15 S/P коефіцієнт)	Швїдкїсть, кїлькїсть зїткнень і оцїнка продуктивностї показують добре узгодження з розрахунковими скотопїчними і мезопїчними (розрахованими за моделлю Хї та їн., 1998) яскравостями Освїтленїсть вище або близько до скотопїчного рївня
Рїа та їн. (1997) [27]	Поле дослїдження: Осьова гострота зору на великїй вїдстанї (кїльце Ландольґа) (0,02...0,2 кд/м ² , ~0,6...1,6 S/P коефіцієнт) Розрїзнення (визначення) периферичної цїлі (30-метрова дистанція 14...22 см, 15° позаосьова цїль) (0,02 або 0,2 кд/м ² , ~ 0,6...1,6 S/P коефіцієнт)	Вїдсутнїй вплив S/P коефіцієнта при рїзних яскравостях свїтла Зменшення часу реакції і найменша кїлькїсть пропущених цїлей при вищому S/P коефіцієнтї при нижчих рївнях освїтлення

Автори	Візуальні задачі та умови	Результати
Ван Дер-ловські та Буллоф (2003) [28]	Розпізнавання позаосьової (2,5...17,5°) маленької (20 см ²) цілі на відстані 60 м при світлі різними фарами (вироблена ближнім світлом еквівалентна освітленість, ~ 1,0...2,0 S/P коефіцієнт)	Менший час реакції і найменша кількість пропущених цілей для вищого S/P коефіцієнта на великих позаосьових кутах
Ван Дер-ловске та ін. (2003) [29]	Поле дослідження: Визначення позаосьової (21...51°) маленької (10 см ²) цілі на відстані 10 м при світлі різними фарами (вироблена ближнім світлом еквівалентна освітленість, ~1,6 и 1,7 S/P коефіцієнт)	Менший час реакції і найменша кількість пропущених цілей для вищого S/P коефіцієнта на великих позаосьових кутах

Слід виділити декілька аспектів спектральних ефектів, що були відкриті за різних експериментальних умов.

Час реакції. Поллак [30] і Лін та ін. [31] показують, що час реакції для практично монохроматичних світлових стимулів при мезопічних яскравостях варіюється з піком довжин хвиль стимулів у такий шлях, що спектральна чутливість відображає фотопічну функцію світлової ефективності при високих рівнях освітлення і скотопічну функцію світлової ефективності при нижчих рівнях. У цих дослідженнях використовувалися цілі, розташовані в центрі поля зору, які включали не лише фовеа, але й частину ретини.

Хі та ін. у дослідженнях з використанням високорозрядних та металогалогенних ламп [7] вивчали час реакції для 2^о осьового стимулу і 15^о позаосьового. Для осьових цілей час реакції не залежав від спектральної потужності випромінювання на будь-яких світлових рівнях, але для позаосьових цілей час реакції зменшувався зі збільшенням спектрального впливу джерел світла (S/P відношення). Ці дані було підтверджено у дослідженні [17], а також в інших вивченнях на цю тему [11, 12, 21, 22, 25, 27–29].

Ймовірність виявлення. Пов'язана з часом реакції ймовірність виявлення цілі – це ймовірність того, що ціль буде виявлено при заданому наборі світлових умов у межах певного періоду часу. Ймовірність виявлення є важливим візуальним завданням, пов'язаним із виявленням руху та пересування в периферичному полі зору. Виявлення руху за віссю і поза віссю бачення може бути важливим для безлічі практичних вуличних завдань, і нецентральної компонента може мати спектральну залежність в основному при мезопічних рівнях, розглянутих у роботах на час реакції, зазначених вище. Однак ці візуальні завдання не були вивчені в літературі про зір і бачення або світлотехнічній літературі з урахуванням потенційних залежностей СРП джерел світла при позаосьовому виявленні руху на мезопічних рівнях світла. Дані вивчення, що включають спрямованість руху, повинні бути зроблені з метою надання більш комплексного розуміння спектральних ефектів на візуальних завданнях у мезопічному діапазоні.

У дослідженнях [12, 15, 24, 25, 27–29] було відзначено залежність між завданнями виявлення цілей при мезопічних рівнях світла і S/P відношеннями.

Пороговий контраст. Левіс [22] проводив вимірювання контрастного порогу для великих (10...13°) гратчастих стимулів, освітлених різними джерелами світла, що мали широкий діапазон S/P відношень у світловому діапазоні фотопічної і мезопічної яскравостей. При вищій яскравості контрастний поріг визначався відносно фотопічної яскравості. При нижчій яскравості поріг яскравостей ґраток, освітлених джерелами з вищим значенням коефіцієнта S/P, був меншим і припускав зсув спектральної чутливості від фотопічної до скотопічної світлової ефективності. Бодрогі та ін. [14] вимірювали контрастний поріг ґраток, представлений осьовим і позаосьовим стимулами в умовах мезопічного діапазону, і не відзначили спектральних ефектів для фовеально поданих стимулів, але знайшли, що пороговий контраст позаосьових ґраток нижчий при вищому S/P відношенні. Кетомакі та ін. [20] відкрили поліпшення контрастного порога виявлення для великих 10° ґраток зі збільшенням S/P коефіцієнта для позаосьових і осьових цілей.

Гострота зору. Дослідження [16, 27] не виявили впливу S/P коефіцієнта на гостроту зору в мезопічному діапазоні. Це пояснюється роздільною здатністю гостроти зору, залежної від колбочок, і відсутністю паличок у ретині.

Розмір поля зору. Ефективний розмір поля зору було вивчено, використовуючи параметри, такі як вимірювання візуальної ефективності при мезопічних рівнях освітлення. У роботі [16] було порівняно ефективні розміри поля зору (визначені як максимальний кут, при якому ціль може бути помічено на периферії) при кольоровому фоні в мезопічному діапазоні яскравостей і визначено, що при низьких рівнях (0,1 кд/м²) червоний фон (найнижчий показник S/P з усіх вивчених кольорів) призводить до найменшого ефективного розміру поля зору. У дослідженні [23] у схожий спосіб було виявлено, що синій та зелений фон результували у збільшення розміру поля зору при мезопічних рівнях освітлення, на відміну від білого та червоного фонів.



Рис. 4. Вимірювальний комплекс SPL 2000

Відстань видимості. Янофф і Хавард у роботі [18] досліджували визначення дистанції маленьких (18 см^2) цілей уздовж дороги, освітленої високо-розрядними або металогалогенними лампами, поки об'єкт рухається вздовж дороги. Не було виявлено ефектів від СРП лампи на визначення і розпізнавання дистанції, незважаючи на суб'єктивну оцінку видимості, яка віддає перевагу металогалогенним джерелам світла [19]. Найімовірніше, результат виявився таким через використання фовеальної цілі, яка, до того ж, визначалася маленьким візуальним кутом.

Симуляція виконання водіння. Буллоф і Рїа [15] вимірювали симуляцію швидкості водіння і частоту аварій при переміщенні об'єкта за курсом, що проектувався на екран. Фільтри перетворювали яскравість в яскравість мезопічного і нижчого фотопічного діапазонів із розрахунком коефіцієнтів S/P. Було відзначено залежність від S/P.

З табл. 1 видно, що деякі візуальні завдання (час реакції для позаосьових цілей) показують значні спектральні ефекти в мезопічних рівнях освітлення, з магнітудою збільшення ефектів при зменшенні рівня світла.

Одним із факторів, який, імовірно, відіграє роль у цій подвійності, є сутність візуального завдання; наприклад, є завдання, в першу чергу, для осьового (фовеального) зору, а є ті, що базуються на позаосьовому виявленні. При завданнях водіння, зазвичай, велика частина інформації приходить із зовні маленького центрального поля зору [32]. Наприклад, пішохід, що йде по узбіччю, може бути спочатку виявлений у периферійному полі зору, з подальшим направленням погляду водія на більш явне розрізнування небезпеки. Тобто перший знак, що небезпека відбудеться, може бути отриманий за допомогою позаосьового зору. Так само документовано, що водії оглядають дорожню сцену під час водіння і не фокусуються на одній точці в полі зору [33]. Однак більш невизначеним є відношення важливості осьового зору в порівнянні з позаосьовим для водіння і для інших візуальних завдань. Крім того, дуже мало відомо про вплив різних рівнів світла в межах поля зору візуальної адаптації; ці

цілі будуть неодмінно взаємодіяти із впливом СРП джерел світла на візуальну продуктивність при мезопічних рівнях світла.

СРП джерел світла може мати інший вплив на сприйняття яскравості середовища, таке як світність [4, 34–42], дискомфортні відблиски [43–46] та циркадні ритми [47–50]. Такі ефекти можуть відбуватися як на фотопічних, так і на мезопічних рівнях, тому світлотехніки повинні брати їх до уваги при проектуванні світлових установок.

Зокрема, яскравісне сприйняття є важливим у більшості сцен вуличного освітлення. Складність світлоти полягає в тому, що вона не поділяє фотометричних величин, таких як яскравість, включаючи взаємодію з кольорним баченням, оточуючими умовами та іншими контекстними чинниками.

Деякі вивчення збільшеного поля позаосьової світлоти виявляють, що спектральний відгук на світлоту при мезопічних рівнях може бути змодельований в основному за допомогою комбінацій фотопічної і скотопічної ефективностей [51–53].

У роботі [54] виявлено, що при однаковій освітленості окремих сцен джерелами світла з різним СРП візуальне сприйняття відрізняється, тобто одна сцена здається яскравішою за іншу. Постає питання, чи дійсно міра “кількості світла”, що базується лише на $V(\lambda)$, підходить для характеристики яскравості простору при освітленні різними джерелами світла і чи задовольняються візуальні потреби людини на мезопічних рівнях світла, коли $V(\lambda)$ не працює в повною мірою.

То ж багато питань щодо впливу СРП випромінювання на візуальне сприйняття залишаються відкритими і потребують додаткових досліджень. Проте ясно, що введення S/P відношення як нормативної характеристики джерел світла може допомогти у визначенні візуальної ефективності джерела світла.

У табл. 2 подано колірні властивості деяких вуличних світильників провідних світлотехнічних компаній України. Слід зазначити, що вимірювані зразки — це світлодіодні світильники для освітлення доріг та парковок, що обиралися лише за кольоровою температурою, потужність не мала значення.

Огляд результатів вимірювань СРП світильників за допомогою вимірювального комплексу SPL 2000

Номер світильника	Потужність, Вт	Світловий потік, лм	Колірна температура, К	Координати колірності		R_a	S/P
				x	y		
1	110	8565	4036	0,3835	0,393	71	1,508
2	73	6687	4168	0,3719	0,366	86	1,762
3	64	7002	4196	0,3754	0,3814	82	1,703
4	86	7583	4280	0,3675	0,3627	86	1,791
5	23	2457	4326	0,3674	0,3691	75	1,635
6	76	7005	4657	0,3585	0,3819	66	1,623
7	61	6561	5119	0,3426	0,3594	81	1,916
8	96	6071	5242	0,3392	0,3637	67	1,724
9	53	7616	5258	0,3387	0,3592	81	1,853
10	87	6255	5410	0,3347	0,3515	73	1,849
11	42	4158	5739	0,3274	0,3378	88	2,194
12	37	2445	5890	0,3239	0,3368	85	2,134
13	116	8565	5956	0,3224	0,3386	73	1,959
14	41	3301	6606	0,3086	0,3397	81	2,272
15	84	6433	7483	0,3027	0,3024	87	2,344

Вимірювання СРП світильників проводилися за допомогою вимірювального комплексу SPL 2000 (Атестат акредитації № 2Н545 від 11.11.2015 р.) Державного підприємства “Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації” (рис. 4).

Табл. 2 також містить S/P коефіцієнти світильників, обчислені у програмі MathCad за формулою (1).

У ході аналізу було виявлено зростання S/P відношення зі збільшенням колірної температури, а також відзначено деяку залежність збільшення S/P відношення зі зменшенням координат колірності. Проте в роботі [55] авторами виявлено збільшення S/P зі зменшенням координати x і збільшенням координати y. Тобто це питання потребує подальшого розгляду з дослідженням більшої кількості зразків.

На рис. 5 наведено криві СРП для деяких досліджуваних світильників з різною колірною температурою та значенням S/P. Видно, що розподіл енергій для різних колірних температур різних. Проте всі світлодіоди мають два максимуми приблизно в тих же діапазонах, що і криві світлочутливості ока для нічного і денного зору, що дозволяє охарактеризувати світлодіодні джерела світла як найбільш підходящі джерела для застосування в установках освітлення вулиць в умовах приємкової фотометрії.

То ж, якщо врахувати цей факт, то нормовані рівні яскравості можна зменшити за рахунок більшої ефективності освітлювальних установок зовнішнього освітлення вулиць на базі світлодіодів із високим S/P відношенням.

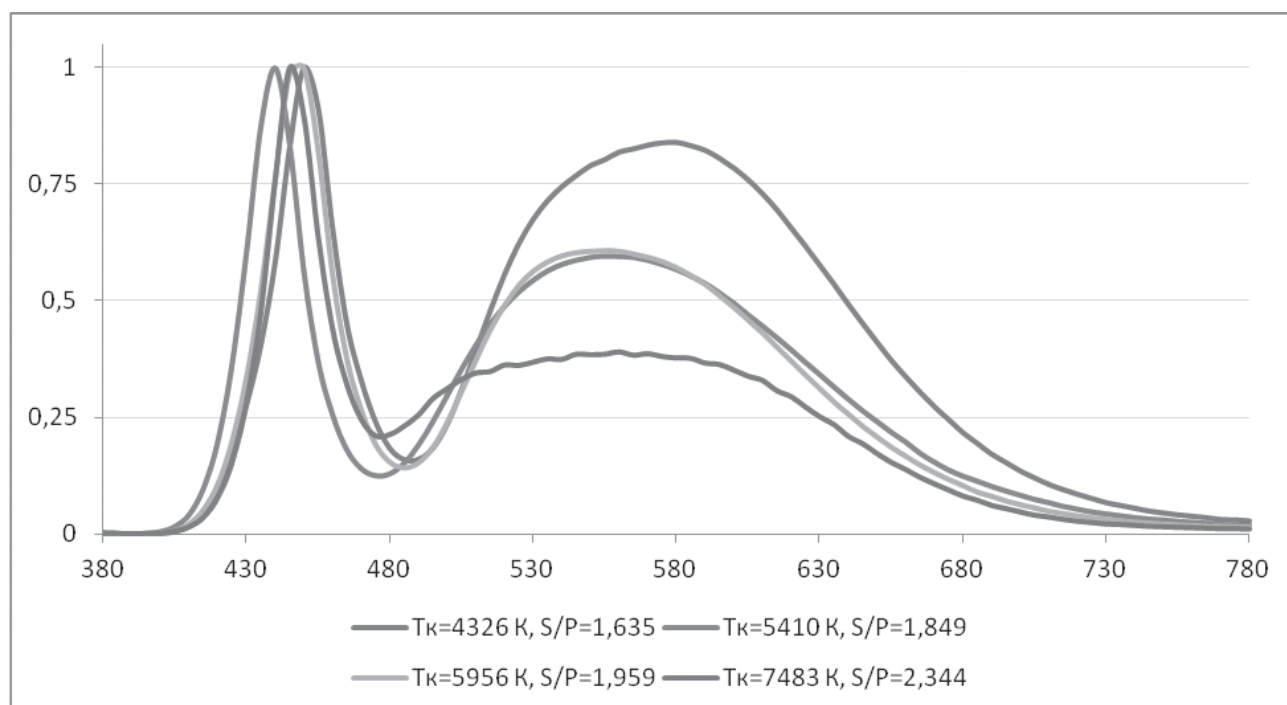


Рис. 5. Криві спектрального світлорозподілу для джерел світла з різною колірною температурою

У березні 2005 р. Комітет із вивчення ефектів спектральної ефективності джерел світла (Committee on Effects of Lamp Spectral Distribution) поставив питання щодо можливості зниження рівня світла для вирішення питання світлового забруднення або можливості розробки рекомендацій для рівнів світла при освітленні конкретними джерелами з обов'язковим урахуванням СРП. Було відзначено важливість урахування спектральних ефектів освітлення при мезопічних умовах.

У роботі [56] було запропоновано користуватися значенням об'єднаної яскравості для джерел світла з різними S/P, яка дозволить поєднати джерела світла з різним СРП, а також зменшити нормовані рівні світла для кожного значення S/P з метою енергозбереження. Запропонована система досить проста у виконанні. Це, по суті, система для вибору серед усіх доступних джерел світла оптимального для досягнення необхідного рівня освітленості не лише у фотопічному, а й у мезопічному діапазонах. Різні комбінації джерел світла та рівні освітленості можуть виробляти таку ж єдину яскравість, яка означає фотометричну еквівалентність. Докладний приклад розрахунку єдиної яскравості можна знайти в роботі [4].

Все ж важливо розуміти, що візуальне виявлення не може бути передбачене лише за допомогою фотометричних характеристик, таких як рівні світла, навіть коли рівень світла відрегульований відповідно до практичної моделі мезопічного зору. Інші характеристики візуальних завдань, такі як контраст, розташування, складність та інші додаткові завдання, що виконуються одночасно, можуть мати глибокий вплив на вимірювання візуальних ефектів у мезопічних умовах освітлення.

Також важливо брати до уваги, що для будь-яких світлових установок спектральна ефективність — це не тільки функція використаних джерел світла, але так само поверхні, яка освітлюється. Сучасне дорожнє покриття не нормується за світлотехнічними характеристиками. Відповідно до досліджень у роботах [57–59], асфальтні та бетонні матеріали мають вищий коефіцієнт відбиття на більш довгих хвилях. Тобто, 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 [4]. Це питання залишається відкритим для подальших досліджень.

Висновки

Дослідження, розглянуті в роботі, показують, що для рівних яскравостей в мезопічному діапазоні джерела світла з вищим S/P відношенням будуть приводити до покращеної позаосьової продуктивності. Зрозуміло також, що для маленьких завдань центрального спостереження, таких як ідентифіка-

ція деталей, різниця між джерелами світла з різними S/P відносно мала, якщо взагалі є.

У положенні Свілотехнічного Товариства Північної Америки (IESNA) зазначено, що розумний вибір спектральних характеристик джерел світла може привести до поліпшення візуальної продуктивності в деяких ситуаціях при мезопічних рівнях освітленості [4]. Комітетом IESNA і Комітетом із вивчення ефектів спектральної ефективності джерел світла пропонується розглянути спектральний розподіл потужності при розробці рекомендацій на основі консенсусу для освітлення при мезопічних рівнях освітленості, що відноситься до конкретних візуальних завдань, коротко описаних у цій роботі.

Існує потенційна можливість енергозбереження при зменшенні нормованих рівнів освітлення з урахуванням значень S/P відношення. Введення цієї характеристики як нормативної для кожного джерела світла може допомогти у ранжуванні джерел світла з точки зору візуальної ефективності.

У ході аналізу світлодіодних джерел світла, поданого в основній частині, зроблено висновок про підвищення ефективності вуличних освітлювальних установок за рахунок використання світлодіодних світильників із високим S/P відношенням.

Звичайно, вибір джерел світла в освітлювальній практиці також сильно залежить від інших факторів, таких, як час життя світильника, вартість, однорідність, передача кольору, відблиски, світлове забруднення та інших, у залежності від застосування. Наприклад, при порівнянні установок з високорозрядними і світлодіодними джерелами світла, з однаковим S/P аспект щодо різної характеристики кольору також є важливим у дизайні зовнішніх систем освітлення.

Важливим фактором у всій системі освітлення є дорожнє полотно. Дослідження на тему нормування асфальтних покриттів зі світлотехнічної точки зору також є актуальними.

Список літератури

1. Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) 1926. — UK.: Cambridge University Press, 1924. — P. 67–89.
2. Roufs J.A. J. Light as a true visual quantity: principles of measurement. — 1978.
3. Lennie P., Pokorny J., Smith V.C. Luminance //JOSA A. — 1993. — Т. 10, № 6. — P. 1283–1293.
4. Назаренко Л.А. Мезопічна фотометрія і вуличне освітлення / Л.А. Назаренко, Т.В. Можаровська, В.С. Чернець // Український метрологічний журнал. — 2016. — № 2. — С. 9–14.
5. CIE165 C. I. E. CIE10 Degree Photopic Photometric Observer //Vienna: CIE. — 2005.
6. Does lighting need more photopic luminous efficiency functions? / J. Schanda [et al.]

- // Lighting Research and Technology. — 2002. — Т. 34, № 1. — P. 69–76.
7. Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times / Y. He [et al.] // Journal of the Illuminating Engineering Society. — 1997. — Т. 26, № 1. — P. 125–138.
 8. Johnson L.B. Upper limit of mesopic vision / L.B. Johnson // Trans Illum Eng Soc. — 1937. — Т. 32. — P. 646–50.
 9. CIE191 C. I. E. Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance // Vienna: CIE. — 2010.
 10. Berman S.M. Energy efficiency consequences of scotopic sensitivity / S.M. Berman // Journal of the Illuminating Engineering Society. — 1992. — Т. 21, № 1. — P. 3–14.
 11. Akashi Y. The effect of foveal task load on peripheral target detection / Y. Akashi, J. Neches // Proceedings of CIE25th Session in San Diego. — 2003. — D4. — P. 44–47.
 12. Akashi Y. Peripheral detection while driving under a mesopic light level / Y. Akashi, M. Rea // Journal of the Illuminating Engineering Society. — 2002. — Т. 31, № 1. — P. 85–94.
 13. Bierman A. Visual reaction times: Method for measuring small differences / A. Bierman, Y. He, M.S. Rea // Lighting Research and Technology. — 1998. — Т. 30, № 4. — P. 169–174.
 14. A mesopic contrast threshold experiment / P. Bodrogi [et al.] // Proc. 5th Internat. Symp. on Progress in Automobile Lighting, Herbert Utz Verl. München. — 2003. — P. 135–139.
 15. Bullough J.D. Simulated driving performance and peripheral detection at mesopic and low photopic light levels / J.D. Bullough, M.S. Rea // Lighting Research and Technology. — 2000. — Т. 32, № 4. — P. 194–198.
 16. The effects of lighting spectral on visual performance at mesopic light levels / M. Eloholma [et al.] // Proceedings of the CIE Symposium “75 Years of CIE Photometry”: Report theses. — Budapest, Hungary; Vienna, Austria, 1999. — P. 5.1–5.4.
 17. He Y. A system of mesopic photometry / Y. He, A. Bierman, M.S. Rea // Lighting Research and Technology. — 1998. — Т. 30, № 4. — P. 175–181.
 18. Janoff M.S. The effect of lamp color on the detection and recognition of small targets / M.S. Janoff, J.A. Havard // Proceedings of the Illuminating Engineering Society of North America Annual Meeting, Seattle. — 1997.
 19. Janoff M.S. The effect of lamp color on the visibility of small targets / M.S. Janoff, J.A. Havard // Journal of the Illuminating Engineering Society. — 1997. — Т. 26, № 1. — P. 173–181.
 20. Visibility of coloured targets at low light levels / J. Ketomaki [et al.] // Proceedings of the Automobile Lighting 5th International Symposium. — 2003. — Т. 10. — P. 507–515.
 21. Lewis A.L. Equating light sources for visual performance at low luminances / A.L. Lewis // Journal of the Illuminating Engineering Society. — 1998. — Т. 27, № 1. — P. 80–84.
 22. Lewis A.L. (1999). Visual performance as a function of spectral power distribution of light sources at luminances used for general outdoor lighting/ A.L. Lewis // Journal of the illuminating Engineering Society. — 1999. — 28(1). — P. 37–42.
 23. The effect of spectrum on visual field in road lighting / Y. Lin [et al.] // Building and environment. — 2004. — Т. 39, № 4. — P. 433–439.
 24. Lin Y. The significance of mesopic visual performance and its use in developing a mesopic photometry system / Y. Lin, D. Chen, W. Chen // Building and environment. — 2006. — Т. 41, № 2. — P. 117–125.
 25. Lingard R. Off-axis detection at mesopic light levels in a driving context / R. Lingard, M. Rea // Journal of the Illuminating Engineering Society. — 2002. — Т. 31, № 1. — P. 33–39.
 26. Mulder M. Spectral effects in escape route lighting / M. Mulder, P.R. Boyce // Lighting Research and Technology. — 2005. — Т. 37, № 3. — P. 199–216.
 27. A field test comparing the effectiveness of metal halide and high pressure sodium illuminants under mesopic conditions / M.S. Rea [et al.] // Proceedings of the NPL–CIE–UK Conference, Visual Scales: Photometric and Colorimetric Scales. — Teddington, UK. — 1997.
 28. Van Derlofske J. Spectral effects of high-intensity discharge automotive forward lighting on visual performance: SAE Technical Paper / J. Van Derlofske, J.D. Bullough. — 2003. — №. 2003–01–0559.
 29. Van Derlofske J. Visual benefits of blue coated lamps for automotive forward lighting: SAE Technical Paper / J. Van Derlofske, D. Dyer, J.D. Bullough. — 2003. — № 2003–01–0930.
 30. Pollack J.D. Reaction time to different wavelengths at various luminances / J.D. Pollack // Perception & Psychophysics. — 1968. — Т. 3, № 1. — P. 17–24.
 31. Lit A. Simple time reaction as a function of luminance for various wavelengths / A. Lit, R.H. Young, M. Shaffer // Perception & Psychophysics. — 1971. — Т. 10, № 6. — P. 397–399.
 32. Olson P.L. Forensic aspects of driver perception and response / P.L. Olson, R. Dewar, E. Farber. — 2010.
 33. Zwahlen H.T. Eye scanning rules for drivers-how do they compare with actual observed eye scanning behavior? / H.T. Zwahlen. — 1991. — № VTI Rapport 372A, Part 2.
 34. Dresler A. The non-additivity of heterochromatic brightnesses / A. Dresler // Lighting Research and

- Technology. — 1953. — Т. 18, № 6 IEStrans. — P. 141–165.
35. *Alman D.H.* Errors of the standard photometric system when measuring the brightness of general illumination light sources / D.H. Alman // *Journal of the Illuminating Engineering Society.* — 1977. — Т. 7, № 1. — P. 55–62.
 36. *Ikeda M.* Mesopic luminous-efficiency functions / M. Ikeda, H. Shimozono // *JOSA.* — 1981. — Т. 71, № 3. — P. 280–284.
 37. *Sagawa K.* Spectral luminous efficiency functions in the mesopic range / K. Sagawa, K. Takeichi // *JOSA A.* — 1986. — Т. 3, № 1. — P. 71–75.
 38. *Sagawa K.* System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships / K. Sagawa, K. Takeichi // *JOSA A.* — 1992. — Т. 9, № 8. — P. 1240–1246.
 39. *Nickerson D.* Light sources and color rendering / D. Nickerson // *JOSA.* — 1960. — Т. 50, № 1. — P. 57–68.
 40. *Houser K.W.* Composite CRI / K.W. Houser, R.B. Gibbons // *Journal of the Illuminating Engineering Society.* — 2000. — Т. 29, № 2. — P. 119–134.
 41. Pupillary size differences under incandescent and high pressure sodium lamps / S.M. Berman [et al.] // *Journal of the Illuminating Engineering Society.* — 1987. — Т. 16, № 1. — P. 3–20.
 42. Despite different wall colors, vertical scotopic illuminance predicts pupil size / S.M. Berman [et al.] // *Journal of the Illuminating Engineering Society.* — 1997. — Т. 26, № 2. — P. 59–68.
 43. *Ferguson H.M.* A note on the relative discomfort glare from mercury, sodium and tungsten light sources / H.M. Ferguson, J. Reeves, W.R. Stevens // *GEC J.* — 1953.
 44. *Bullough J.D.* Discomfort and disability glare from halogen and HID headlamp systems: SAE Technical Paper / J.D. Bullough, Z. Fu, J. Van Derlofske. — 2002. — № 2002-01-0010.
 45. Short-wavelength content of LED headlamps and discomfort glare / M. Sivak [et al.] // *Leukos.* — 2005. — Т. 2, № 2. — P. 145–154.
 46. *Назаренко Л.А.* Проблеми світлового забруднення / Л.А. Назаренко, В.С. Чернець // *Світлотехніка та електроенергетика: Міжнар. наук.-техн. журнал.* — 2014. — № 2. — P. 6–17.
 47. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor / G.C. Brainard [et al.] // *The Journal of Neuroscience.* — 2001. — Т. 21, № 16. — P. 6405–6412.
 48. *Thapan K.* An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans / K. Thapan, J. Arendt, D.J. Skene // *The Journal of physiology.* — 2001. — Т. 535, № 1. — P. 261–267.
 49. A model of phototransduction by the human circadian system / M.S. Rea [et al.] // *Brain Research Reviews.* — 2005. — Т. 50, № 2. — P. 213–228.
 50. *Назаренко Л.А.* Циркадна ефективність за світлодіодного освітлення / Л.А. Назаренко, К.І. Юффе // *Світлотехніка та електроенергетика: Міжнар. наук.-техн. журнал.* — 2013. — № 3–4. — P. 33–41.
 51. *Walters H.V.* The spectral sensitivity of the fovea and extrafovea in the Purkinje range / H.V. Walters, W.D. Wright // *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences.* — 1943. — Т. 131, № 865. — P. 340–361.
 52. *Kinney J.A.S.* Comparison of scotopic, mesopic, and photopic spectral sensitivity curves / J.A.S. Kinney // *JOSA.* — 1958. — Т. 48, № 3. — P. 185–190.
 53. *Kokoschka S.* Influence of field size on the spectral sensitivity of the eye in the photopic and mesopic range / S. Kokoschka, W.K. Adrian // *Optometry & Vision Science.* — 1985. — Т. 62, № 2. — P. 119–126.
 54. *Fotios S.A.* Lighting for subsidiary streets: investigation of lamps of different SPD. Part 2—Brightness / S.A. Fotios, C. Cheal // *Lighting Research and Technology.* — 2007. — Т. 39, № 3. — P. 233–249.
 55. *Ильина Е.* Наружное светодиодное освещение автомагистралей и улиц городов. Применимость светодиодов в наружном освещении с точки зрения визуального восприятия / Е. Ильина // *Полупроводниковая светотехника.* — 2010. — № 4. — С. 50–55.
 56. *Rea M.S.* Outdoor lighting: Visual efficacy (ASSIST recommends, Volume 6, Issue 2) / M.S. Rea, J.P. Freyssinier // *New York: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.* — 2009. — P. 14.
 57. *Suits G.H.* Natural sources / G.H. Suits // *The Infrared Handbook.* — 1978. — Т. 3. — P. 3–110.
 58. *Adrian W.* The spectral Reflectance of Road Surfaces and Resulting Luminance in MH and HPS Light / W. Adrian // *Proceedings of the CIE Symposium, Division.* — Т. 4. — P. 47–53.
 59. *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.