

Оцінка незорової дії джерел світла для промислового освітлення

К.І. Суворова
Харківський національний
університет міського господарства
імені О.М. Бекетова
Україна
E-mail: kisuvorova17@gmail.com

К.О. Кулакова
Харківський національний
університет міського господарства
імені О.М. Бекетова
Україна
E-mail: alisher@gmail.com

О.М. Ляшенко
Харківський національний
університет міського господарства
імені О.М. Бекетова
Україна; E-mail:
OlenaLyashenko@kname.edu.ua

Анотація – Розглянуті питання незорового впливу світла на організм людини під час роботи, циркадної ефективності освітлювальних установок, проведено аналіз люмінесцентних ламп, що використовуються для освітлення промислових об'єктів за циркадними характеристиками, обґрунтовано необхідність їх врахування при створенні ефективної освітлювальної установки промислового призначення.

Ключові слова – циркадний ритм, фоточутливий рецептор, мелатонін, біологічна дія світла, циркадне активне випромінювання, циркадне корисне випромінювання, циркадна ефективність.

I. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проектування систем освітлення є однією з основних складових формування електроенергетичної системи будь-якого промислового об'єкта. При виборі обладнання для реалізації проекту необхідно керуватися не тільки електричними параметрами, але і світлотехнічними параметрами, так як крім силового навантаження освітлення являє собою засіб необхідний для успішного здійснення запланованого технологічного процесу. При цьому важливо відзначити, що неграмотне виконання освітлювальної мережі є шкідливим фактором і робить згубний вплив на роботу і здоров'я персоналу. Таким чином забезпечення світлового комфорту за умов дотримання нормованої освітленості для кожного приміщення є однією з ключових завдань, яке необхідно вирішувати при розрахунку і проектуванні системи освітлення. Правильно спроектована система освітлення безпосередньо впливає на продуктивність праці, стомлюваність, розрізнення предметів і поява зорового дискомфорту при виконанні робіт. При виборі джерел світла для забезпечення заданої нормованої освітленості використовуються різні відомі методики розрахунків, проте жодна з них не враховує фактори, що впливають на забезпечення зорового комфорту.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Відомо, що максимальна чутливість нового типу фоторецепторів в сітківці ока лежить на ділянці з короткими довжинами хвилі (синє світло). Отже більший невізуальний біологічний ефект робить холодно-білий світ, ніж світ з великим червоним компонентом (тепло-біле світло).

Таким чином, виникає питання про те, як застосування різних типів джерел світла для внутрішнього і зовнішнього освітлення вплине на природний баланс гормонів, природний ритм тіла і здоров'я.

При проектуванні системи освітлення рішення щодо використання тих чи інших ДС зазвичай ґрунтується на візуально значущих параметрах, а саме, світловому потоці, колірній температурі та індексі передачі кольору. Однак, сьогодні до якості освітлювальних установок висувають дещо інші вимоги, тому, для того, щоб спроектувати циркадно ефективну установку, необхідно оцінити ефективність кожної потенційної лампи.

Так як світлова віддача випромінювання у видимій області спектра у одноступінних за принципом роботи джерел приблизно однакова, то підвищити їх циркадну ефективність вдасться тільки шляхом збільшення частки випромінювання в областях спектра, що припадають на максимум спектральної кривої циркадної ефективності [1–9].

Корисне для здоров'я освітлення передбачає правильне поєднання рівня освітленості і колірної температури. При цьому важливу роль відіграє новий аспект, а саме подібне поєднання рівня освітленості і колірної температури повинно відбуватися у встановлений час і мати встановлену тривалість. Однак просторовий розподіл світла також має велике значення в створенні «здорових» освітлювальних установок.

У ранкові години варіант штучного освітлення передбачає стимулююче світло холодно-білого відтінку (6000 К) з відносно високим рівнем освітленості. Потім освітлення поступово змінює свій колір на більш теплий білий з більш низьким рівнем, щоб зберегти енергію в організмі людини. В обідній час забезпечується мінімальний рівень освітленості для виконання зорової роботи (500 лк) при тепло-білому світлі (3000 К) для створення емоційно-розслаблюючої обстановки. Після обіду необхідно різко збільшувати інтенсивність освітлення і колірну температуру (холодно-білий колір) для активізації організму. Ближче до вечора рівень освітленості і колірної температура знову повинні поступово знижуватися для збереження енергії людини. Перед кінцем робочого дня відбувається коротка зміна кольору на холодно-білий, а рівень освітленості при цьому не

змінюється для збереження енергії перед поїздкою додому.

Ідеальне освітлення для виробничих приміщень – динамічне, з повторенням природної світлової динаміки і по колірності, і за інтенсивністю. Для змінних робітників значима повнота світлового спектру, його наближеність до природного. У вечірній час небажані «холодне» світло і надлишковий рівень освітлення [10].

Згідно з останнім звітом Агентства охорони навколишнього середовища (ЕРА), люди в середньому проводять біля 87% свого життя в приміщенні. Сучасна світлова обстановка значно відрізняється кількістю часу проведеного при середній інтенсивності світла (30–300 лк). Вплив електричного світла після заходу сонця в цьому діапазоні надзвичайно розповсюджений в промислово розвинених країнах, та зростаюча кількість світловипромінюючих приладів може порушувати роботу циркадної системи [11].

III. ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ СТАТТІ

Метою публікації є визначення та аналіз циркадних характеристик джерел світла освітлювальної установки промислового призначення.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для досліджень було обрано 12 комерційних зразків трубчастих ЛЛП провідних світових виробників:

ТАБЛИЦЯ І. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ a_{cv} ОБРАНОГО ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

№	Тип ДС	P, Вт	Ткол, К	F, лм	Ra	a_{cv}
1	OSRAM L18w/31-830 T8	18	3000	1350	>80	0,366
2	OSRAM L18w/835 LUMILUX	18	3500	1350	>80	0,428
3	OSRAM L18w/640 BASIC T8	18	4000	1200	60	0,536
4	OSRAM L18w/765 BASIC T8	18	6500	1050	≥70	0,87
5	OSRAM L18w/965 BIOLUX G13	18	6500	1000	90	0,972
6	OSRAM 880 SKYWHITE 18w	18	8000	1300	>80	0,989
7	Philips MASTER TL-D Super 80 18w/830 1SL/25	18	3000	1350	>80	0,395
8	Philips MASTER TL-D Super 80 18w/840 1SL/25	18	4000	1350	>80	0,435
9	Philips TL-D Standard Colours 18w/33-640 1SL/25	18	4000	1200	63	0,71
10	Philips TL-D Standard Colours 18w/54-765 1SL/25	18	6500	1025	75	1,054
11	Philips Master TL-D 90 De Luxe 18w/965 SLV/10	18	6500	1150	93	0,774
12	Philips Master TL-D Super 80 18w/865 1SL/25	18	6500	1300	85	0,748

OSRAM та Philips. Всі обрані зразки потужністю 18 Вт з різною кольоровою температурою в діапазоні 3000 - 8000 К.

Одним зі шляхів визначення циркадної ефективності джерел світла різних типів є визначення коефіцієнта циркадної ефективності. Розрахунок a_{cv} джерела світла виконується за формулою:

$$a_{cv} = \frac{\int X_{e\lambda} c(\lambda) d\lambda}{\int X_{e\lambda} v(\lambda) d\lambda} \tag{1}$$

де $V(\lambda)$ – спектральна крива світлової ефективності;
 $c(\lambda)$ – спектральна крива циркадної ефективності;
 $X_{e\lambda}$ – спектральна щільність енергетичної величини.

У таблиці 1 наведено результати розрахунку коефіцієнта циркадної ефективності.

З іншого боку, біологічний ефект видимого світла визначається кількістю енергії, що падає на поверхню тіла, при її поглинанні тканинами організму та наявністю специфічного приймача – ока.

Ефект залежить від інтенсивності потоку енергії, що падає, подовженості опромінення, величини поверхні тіла, що опромінюється та спектрального складу потоку енергії, що визначається колірною температурою джерела. Також має значення глибина проникнення, що визначається енергією фотонів [12, 13]. Тобто, якщо припустити, що реакція нових чутливих клітин має місце при поглинанні фотонів, довжина хвиль яких знаходиться в діапазоні чутливості циркадних рецепторів, можливе визначення циркадного ефективного потоку, що визначається кількістю фотонів енергії випромінювання ламп в діапазоні довжин хвиль 380–580 нм.

Авторами [12, 13] для того щоб оцінити ДС щодо ефективного циркадного випромінювання, введено такі параметри як Circadian Active Radiation (CAR) – загальна кількість фотонів, що згенерована за секунду в певному інтервалі довжин хвиль. CAR враховує з рівною вагою все світло, що випромінює ДС, в діапазоні хвиль 380-580 нм. Інша величина, отримана шляхом “зважування” фотонного спектру зі спектральною кривою циркадної ефективності – Circadian Usable Radiation (CUR) визначає суму всіх фотонів, що створюють циркадний ефект випромінювання.

Цей метод дозволив виключити вплив середовища, де розповсюджується світло, а також залежність від детальної геометрії приміщення, що змінюється від установки до установки. Іншими словами, розрахунок виконано для ДС, а не для приймача випромінювання, що може бути використано для порівняння будь-яких ламп, а також стати вихідним параметром для

розрахунку біологічної дози, що створено конкретною установкою.

Показник CAR лампи в $\mu\text{E/s}$ визначиться як інтеграл по спектру випромінювання в діапазоні 380–580 нм:

$$CAR = \int_{380}^{580} X_e(\lambda) \mu\text{E} d\lambda \quad (2)$$

де $X_e(\lambda)\mu\text{E}$ – спектральна щільність випромінювання ДС, μE .

Помноження спектру в $\mu\text{E/s}\cdot\text{nm}$ на криву $c(\lambda)$ дає значення показника CUR:

$$CUR = \int_{380}^{580} X_e(\lambda) \mu\text{E} c(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Основні результати розрахунку наведено в таблиці 2.

Більш детальний аналіз циркадної ефективності було проведено для трубчастих ЛЛ різної колірної температури та індексу передачі кольору.

Результати розрахунку показників випромінювання для ЛЛ з індексом передачі кольору $R_a \geq 80$ наведено в таблиці 3.

Результати розрахунку показників випромінювання для ЛЛ з індексом передачі кольору $R_a \geq 90$ наведено в таблиці 4.

Таблиця II. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ CAR, CUR РІЗНИХ ТИПІВ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ЛАМП

№	Тип лампи	P_n, W	$F_n, \text{лм}$	$F_{max T}, \text{лм}$	η	CAR, $\mu\text{E/s}$	CAReff, $\mu\text{E/sW}$	CUR, $\mu\text{E/s}$
1	OSRAM L18w/31-830 T8	18	1350	6124,16	0,22	33,79	1,88	5,09
2	OSRAM L18w/835 LUMILUX	18	1350	6008,94	0,23	34,06	1,89	5,93
3	OSRAM L18w/640 BASIC T8	18	1200	6163,24	0,195	28,32	1,57	6,54
4	OSRAM L18w/765 BASIC T8	18	1050	5281,43	0,199	27,89	1,55	9,14
5	OSRAM L18w/965 BIOLUX G13	18	1000	4771,79	0,21	30,23	1,68	9,88
6	OSRAM 880 SKYWHITE 18w	18	1300	5171,52	0,25	35,5	1,97	13,04
7	Philips MASTER TL-D Super 80 18w/830 1SL/25	18	1350	5552,31	0,24	37,651	2,09	5,27
8	Philips MASTER TL-D Super 80 18w/840	18	1350	5917,87	0,23	34,53	1,92	5,79

	1SL/25							
9	Philips TL-D Standard Colours 18w/33-640 1S	18	1200	5024,39	0,24	35,69	1,98	8,46
10	Philips TL-D Standard Colours 18w/54-765 1SL/25	18	1025	4893,57	0,21	29,32	1,63	10,78
11	Philips Master TL-D 90 De Luxe 18w/965 SLV/10	18	1150	5680,32	0,202	29,29	1,63	9,17
12	Philips Master TL-D Super 80 18w/865 1SL/25	18	1300	5642,74	0,23	33,29	1,85	9,69

ТАБЛИЦЯ ІІІ. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ CAR, CUR ОБРАНИХ ДС З RA≥80

$R_a, \%$	$T_{кол}, K$	$P_{л}, W$	$F_{л}, лм$	$CAR, \mu E/s$	$CAR\ eff.$	CUR
80 Philips	3000	18	1350	37,65	2,09	5,27
	4000	18	1350	34,53	1,92	5,79
85 Philips	6500	18	1300	33,29	1,85	9,69

ТАБЛИЦЯ ІV. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ CAR, CUR ОБРАНИХ ДС З RA≥90

$R_a, \%$	$T_{кол}, K$	$P_{л}, W$	$F_{л}, лм$	$CAR, \mu E/s$	$CAR\ eff.$	CUR
90 OSRAM	3000	18	1350	37,793	1,88	5,1
	3500	18	1350	34,055	1,89	5,93
	6500	18	1000	30,23	1,68	9,88
	8000	18	1300	35,504	1,97	13,04
93 Philips	6500	18	1150	29,29	1,63	9,173

V. ВИСНОВКИ

За результатами розрахунку коефіцієнта циркадної ефективності зроблено висновок, що частка випромінювання, яка створює циркадний ефект від тепло-білих ЛЛ з $T_{кол} = 3000K - 4000K$ і гарною передачею кольору – та ж або менше ніж у ЛР. Лампи з $T_{кол} > 4000K$ надають більш високу біологічну дію.

Впорядкування ламп згідно їх коефіцієнту використання CUR грубо повторює тенденцію, що спостерігається з упорядкуванням по ефективності CAR: ті ж самі лампи з високою продуктивністю в термінах CAR/Watt займають високе місце в списку CUR/Watt. Іншими словами, ці два параметри добре корелюють. Основний ефект використання CUR в упорядкуванні ламп – очікувані кращі показники лампи, яка була спеціально розроблена з урахуванням кривої біологічної дії – SkyWhite Osram (8000 K).

Тобто з підвищенням колірної температури збільшується кількість фотонів активного та корисного циркадного випромінювання.

Ефективність ЛЛ з високим $R_a=90$ в одиницях CUR, приблизно на 10% менше ніж ЛЛ з меншим індексом передачі кольору. Але вони забезпечують і відносно високу продуктивність, і високий R_a .

Зрозуміло, первинним критерієм щодо циркадної ефективності повинен бути параметр CAREff. Тобто, для створення циркадно ефективною освітлювальною установки потрібно використовувати лампи з більш високим CAREff.

Визначення узагальнених показників для змішаних або багатолампових систем зводиться до складання показників окремих ламп з попереднім зваженням за

числом ламп кожного типу та масштабуванням внеску за фактичною потужністю лампи. Тому нескладно створити оптимальну освітлювальну установку, що задовольняє заданим конструктивним обмеженням.

Спектральний склад світла є важливим параметром штучних джерел світла, який впливає не тільки на зорову функцію, комфортність, але і на здоров'я людей. При розробленні нових норм освітлення, стандартів на джерела світла та оцінку їх якості, потрібно обов'язково враховувати параметри, які впливають на здоров'я та самопочуття людини.

VI. ЛІТЕРАТУРА

- [1] Иоффе К.И. Биологическое влияние видимого света на организм человека / К.И. Иоффе // Світлотехніка та електроенергетика. – 2008. – №3. – С. 21–29.
- [2] Berson D.M. Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock / D.M. Berson, F.A. Dunn, M. Takao // Science. – 2002. – Vol. 295. – P. 1070.
- [3] Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor / G. Brainard, J. Hanifin, J. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, M. Roilag // Journal of Neuroscience. – 2001. – Vol. 21. – №. 16. – P. 6405.
- [4] Thapan K. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans / K. Thapan et al // Journal of Physiology. – 2001. – 535. 1. – P. 261–267.
- [5] Rea M.S. A model of phototransduction by the human circadian system. / M.S. Rea et al. // Brain Research Reviews. – 2005. – Vol. 50. – P. 213–218.
- [6] Ван Боммель В. Зрительные, биологические и эмоциональные аспекты освещения / В. Ван Боммель // Светотехника. – 2005. – №4. – С. 4–6.
- [7] Ван Бельд Г. Освещение и самочувствие человека / Г. Ван Бельд // Светотехника. – 2004. – №6. – С. 11–14.
- [8] Figueiro M.G., Rea M.S. Short-Wavelength Light Enhances Cortisol Awakening Response in Sleep-Restricted Adolescents. Int. J. Endocrinol. 2012; 2012: 301935.
- [9] Figueiro M, Rea M. Office lighting and personal light exposures in two seasons: impact on sleep and mood. Lighting Research and Technology. First published online on 19 December 2014. DOI 1477153514564098.
- [10] High sensitivity and interindividual variability in the response of the human circadian system to evening light. Andrew J. K. Phillips, Parisa Vidafar, Angus C. Burns, Elise M. McGlashan, Clare Anderson, Shantha M. W. Rajaratnam, Steven W. Lockley, and Sean W. Cain. PNAS June 11, 2019 116 (24) 12019-12024.
- [11] U.S. EPA. Benchmark Dose Software (BMDS) Version 2.1 User's Manual Version 2.0, DRAFT. Doc No.: 53-BMDS-RPT-0028. — Washington, DC : Office of Environmental Information., 2009.
- [12] Иоффе К.И. Методи оцінки та засоби вимірювання характеристик джерел світла за циркадним ефектом. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.07 – світлотехніка та джерела світла. – Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. – Харків, 2013.
- [13] Иоффе К.И. Метод оцінки циркадної ефективності джерел світла різного типу / К.И. Иоффе, І.О. Ковальов // Комунальне господарство міст. Технічні науки та архітектура. – 2012. – №105. – С. 359–365.

The non-visual effects estimation of industrial lighting sources

K.I. Suvorova

O.M. Beketov National University of
Urban Economy in Kharkiv,
Ukraine

K.O. Kulakova

O.M. Beketov National University of
Urban Economy in Kharkiv,
Ukraine

O.M. Lyashenko

O.M. Beketov National University of
Urban Economy in Kharkiv,
Ukraine

The issues of the visible lights non-visual impact on the human body during work, the circadian efficiency of lighting installations are considered, the analysis of fluorescent lamps used to illuminate industrial facilities according to their circadian characteristics is carried out, the need to take them into account when creating an effective industrial lighting installation is substantiated.

Lighting systems design is one of the main components of the electric power systems formation for any industrial facility. When choosing equipment for the projects implementation, it is necessary to be guided not only by electrical parameters, but also by lighting technical parameters, since in addition to the power load, lighting is a means necessary for the successful implementation of the planned technological process. It is important to note that the illiterate implementation of the lighting network is a harmful factor and has a detrimental effect on the work and personnel health. Thus, ensuring light comfort, subject to the observance of the standardized illumination for each room, is one of the key tasks that must be solved when calculating and designing a lighting system. A properly designed lighting system has a direct impact on productivity, fatigue, visibility and visual discomfort during work. When choosing light sources to provide a given standardized illumination, various well-known calculation methods are used, but none of them takes into account the factors affecting the provision of visual comfort.

The spectral composition of light is an important parameter of artificial light sources, which affects not only visual function, comfort, but also human health. When developing new lighting standards, standards for light sources and assessment of their quality, it is necessary to take into account the parameters that affect human health and well-being.

Keywords – circadian rhythm, photosensitive receptor, melatonin, biological effect of light, circadian active radiation, circadian useful radiation, circadian efficiency.