

УДК 628.98

Л. А. НазаренкоХарківський національний
університет міського
господарства ім. О.М.

Бекетова

К. І. Іоффе

ПАТ

«Важпромелектропроект»

м. Харків

ЦИРКАДНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗА СВІЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ

Вступ, обґрунтування актуальності проблеми

Протягом сторіччя штучне освітлення проектувалося та оптимізоване для виконання зорової задачі. Однак останні дослідження показали, що світло також впливає на регуляцію добового циркадного ритму людини, якість сну та бадьорість [1-4]. Подальша практична та дослідницька робота повинна ґрунтуватися на новому розумінні ролі світла в житті людини. Поява нових джерел світла (ДС) та систем освітлення потребує детального всебічного вивчення в частині співставлення фізичних та психологічних особливостей, що є у центрі уваги ергономічного проектування освітлення з використанням нової техніки.

В рамках реалізації програм енергозбереження в усіх ведучих державах ЄС, США, КНР та ін. значна увага приділяється світлодіодним системам освітлення [5].

Область використання вискоелективних світлодіодів (СД) на цей час дещо обмежена: світлосигналізація; аварійне освітлення; рекламне та декоративно-художнє освітлення; інформаційні табло.

Головними критеріями, що визначають переважне використання СД та світлодіодних систем освітлення зазвичай називають: низьке енергоспоживання; строк служби до 30 тис. год та більше, високу світлову віддачу – до 200 лм/Вт; спроможність роботи при низьких температурах навколишнього середовища; стійкість до механічних впливів; незначні витрати на експлуатацію та обслуговування. При цьому визначають високий рівень безпеки, маючи на увазі відсутність випромінювання у УФ та ІК діапазонах, відсутність вмісту ртуті та вибухо-, пожежобезпеку.

Крім того, освітлювальні світлодіодні системи надають можливість простого, динамічного управління фото- та колориметричними характеристиками випромінювання [6]. Сьогодні це зветь «розумним світлом» (smart light), іншими словами, «регульоване», «персоніфіковане» світло. Саме це розширює функціональні можливості освітлювальних приладів, а головне – надає можливість створення ергономічного світлового середовища, на відміну від існуючого – некерованого та статичного.

Постановка наукової проблеми.

Безумовно, характеристики та переваги СД приведуть к проектуванню ергономічного освітлення. Але, крім ефективності, існують обов'язкові вимоги, які повинні бути виконані для створення дійсно ергономічної освітлювальної установки.

Світлодіодне освітлення має переваги в різних аспектах: енергетичном, безпеки навколишнього середовища, дизайну та ін. та по ряду показників повинне стати сприятливим для життєдіяльності та здоров'я людини, але в деяких проявленнях може виявитися й шкідливим [6].

Сучасні білі СД мають суттєво визначену полосу випромінення в синє-блакитній частині спектру 440–460 нм, що приходиться на спектр дії фотохімічного ушкодження сітківки ока та її пігментного епітелію. Існує думка, таке випромінення має особливу небезпеку для очей дітей та підлітків, тому що їх хрусталики вдвічі прозорі в блакитній частині спектру, ніж очі дорослих. Фотохімічне ушкодження розвивається згодом та викликає поступові незворотні порушення зору. Тому використання СД в дитячих закладах може мати непередбачені наслідки та потребує професійного офтальмологічного обґрунтування [7].

Велика яскравість СД суттєво ускладнює їх використання в світлотехніці із-за надмірної блискотливості виробів зі СД. Одним з засобів вирішення цієї проблеми є використання спеціальних відбиваючих оптичних систем [6, 8].

В біологічному аспекті світлодіодне біологічно ефективне освітлення основане на відкритті нової рецепторної системи в оці людини та відповідного нервового зв'язку з мозком людини, що синхронізує функціонування організму людини зі станом світлового середовища.

Тема незорового впливу світла на організм та його наслідків приваблює світлотехнічне та медичне співтовариство з другої половини 2000-х років [1-4]. Велике значення мають дослідження, у яких розглянутий ефект «циркадних фоторецепторів». Чутливість нового фоторецептора неоднакова до світла різних довжин хвиль. Оптичне випромінювання в діапазоні $\lambda = 430-470$ нм впливає на утворення в організмі людини гормону втоми - «мелатоніна». Оскільки організм людини сформувався під дією 24-годинного (циркадного) біоритму, виробка гормону теж носить циклічний характер, а світлові сигнали регулюють внутрішній годинник незалежно від відомих рецепторів. Тобто, під впливом видимого світла певного спектрального діапазону спостерігається ефект зменшення секреції гормону мелатоніна, іншими словами циркадний ефект.

Отримання нових знань в області фізіології ока людини потребувало вирішення комплексу задач, серед яких оцінка циркадних характеристик ДС різних типів, можливість визначення параметрів випромінення за допомогою певних вимірювальних засобів та насамперед розробки чітких норм та правил щодо створення корисного та якісного освітлення з урахуванням біологічної дії світла.

Дана робота присвячена актуальній науково-прикладній задачі створення методів оцінки та засобів вимірювання характеристик джерел світла за циркадним ефектом на підставі розробки науково-технічних основ вимірювання незорової дії випромінення. Авторами запропоновано концептуально новий підхід щодо контролю якості характеристик випромінення джерел світла, в тому числі й СД, за циркадним ефектом.

Виклад основного матеріалу дослідження. Рішення проблеми урахування біологічної дії видимого світла включає в себе такі основні напрямки:

1. створення системи ефективних одиниць та розробку стандарту, що містить основні величини, символи та спектр дії біологічного впливу видимого світла;
2. розробку засобів вимірювання нових характеристик джерел світла та метрологічного забезпечення цих засобів;

3. створення концепції формування якісного світлового середовища з новим набором критеріїв якості освітлення.

Створення системи ефективних циркадних одиниць. Як один із методів оцінки циркадної ефективності ДС різного типу запропоновано створення системи ефективних циркадних одиниць. Це стало можливим завдяки визначеному спектру дії циркадного ефекту – спектральній кривій циркадної ефективності $c(\lambda)$ з максимумом 460-480 нм, яка описує ефект зменшення виробки мелатонину під дією світла [9, 10].

Створення тієї чи іншої системи одиниць в загальному вигляді ґрунтується на визначенні ефективного потоку – потоку, що оцінюється за реакцією приймача та розраховується за спектром дії. Тобто, за аналогією зі світловими величинами, що визначаються за допомогою кривої відносної спектральної світлової ефективності $V(\lambda)$, виходячи з визначення ефективного потоку випромінювання, у загальному вигляді можна виразити циркадну ефективну характеристику в такий спосіб:

$$X_{ec} = k \int X_{e\lambda} c(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Коефіцієнт перед інтегралом є нормувальним множником для переходу від одиниць променистого потоку до одиниць ефективного потоку. Значення і розмірність цього коефіцієнта визначається вибраними одиницями. Якщо покласти його рівним одиниці і безрозмірним, то ефективний потік буде вимірюватися у ватах.

Таким чином, знаючи циркадний ефективний потік отримано інші циркадні величини, що містять в своєму визначенні циркадний ефективний потік та відрізняються лише геометричними умовами.

Тобто,

- циркадна освітленість $E_c = \frac{d\varphi_c}{dA}$ [лм_c/м²];

- циркадна сила світла $I_c = \frac{d\varphi_c}{d\omega}$ [лм_c/ср];

- циркадна яскравість $L_c = \frac{d^2\varphi_c}{d\omega dA \cos \Theta}$ [кд_c/м²],

де - $\varphi_c = k_m \int \varphi_e(\lambda) c(\lambda) d\lambda$ - циркадний потік [лм_c].

Вимірювання та розрахунок коефіцієнта циркадної ефективності.

Відношення інтегралів циркадних і фотометричних функцій називається коефіцієнтом циркадної ефективності a_{cv} :

$$a_{cv} = \frac{\int X_{e\lambda} c(\lambda) d\lambda}{\int X_{e\lambda} v(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

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

Коефіцієнт циркадної ефективності, який є біологічним фактором дії для нічного придушення мелатонину, дозволяє не тільки проводити спектральну оцінку

випромінювання, а також робити певні розрахунки при проведенні інтегральних вимірювань рівнів освітленості, розподілу випромінювання та обчисленні часу дії.

Отже для визначення циркадної ефективності необхідно виміряти світловий потік та енергетичний потік, скоригований за спектральною кривою біологічного впливу світла, що обумовлені відповідно спектральними чутливостями приймачів.

Відомо, що циркадна ефективність ДС залежить від його спектру, тому для джерела з відомим спектром можна обчислити циркадну ефективність. Використання спектра випромінювання стандартизованого джерела типу А дозволило змодельовати процес вимірювання світлових та циркадних характеристик з подальшим розрахунком коефіцієнта циркадної ефективності. В таблиці 1 наведені результати розрахунку коефіцієнта циркадної ефективності ДС різних типів.

Таблиця 1

Результати розрахунку коефіцієнта циркадної ефективності

Тип ДС	a_{cv}	a_{cv} по Gall	a_{cv} по Rea
ЛР	0,4	0,4	0,38
ДНаТ	0,28	0,2	0,2
Галогенна лампа	0,404	-	-
МГЛ типу PAR	0,34	0,48	0,44
СД білий 2700К	0,51	0,6	0,55
СД білий 4000К	0,541	0,56	0,59
СД синій 468 нм	15,268	9,8	10,5
КЛЛ 2700К	0,33	0,4	0,44
КЛЛ 4000К	0,421	0,45	-
КЛЛ 6500К	0,782	0,86	-
КЛЛ 8000К SkyWhite	0,95	0,94	0,99
КЛЛ 17000К ActiViva	0,984	1,6	1,35

Метод оцінки циркадної ефективності джерел світла за кількістю фотонів в певному спектральному діапазоні. Складність задачі визначення циркадної ефективності тих чи інших типів ДС полягає у тому, що на сьогодні не існує чіткої термінології відносно циркадних ефектів. Тому на першому етапі величини і параметри обрано у відповідності з аналогічними для інших спектрів дії.

Таким чином, 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 за кількістю фотонів енергії випромінювання в діапазоні довжин хвиль 380-580 нм.

Цей метод є аналогом визначення ефективності ДС щодо створення процесу фотосинтезу рослин, шляхом визначення Photosynthesis Active Radiation (PAR) та Photosynthesis Usable Radiation (PUR) в залежності від потужності випромінювання.

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 та визначається за формулою (3). 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 згідно (4).

$$CAR = \int_{380}^{580} X_e(\lambda) \mu E d\lambda, \quad (3)$$

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

$$CUR = \int_{380}^{580} X_e(\lambda) \mu E c(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

В процесі досліджень джерел світла різних типів встановлено пряму пропорційну залежність показників циркадної ефективності від колірної температури та потужності лампи. Тобто з підвищенням колірної температури та потужності збільшується кількість фотонів активного та корисного циркадного випромінювання.

Використання цього методу дає можливість створити оптимальну освітлювальну установку без урахування впливу середовища, де розповсюджується світло, що змінюється від установки до установки. Крім того, результат розрахунку за цим методом може стати вихідним параметром для визначення біологічної дози випромінювання.

Результати розрахунків даним методом показані у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку CAR, CUR різних типів ДС

Тип лампи	P, W	$F_t, \text{Лм}$	$F_{max}, \text{Лм}$	η	CAR, $\mu E/s$	CAR _{eff} , $\mu E/sW$	CUR, $\mu E/s$
Лампа розжарювання	60	720	9242	0,08	4,62	0,077	1,52
ДНАТ	70	6600	28553	0,231	42,24	0,603	9,09
Галогенна лампа	20	235	2909	0,081	1,59	0,079	0,55
МГЛ типу PAR	35	1700	7690	0,221	19,17	0,547	8,05
Світлодіод білий 4500K	2	93	565	0,164	0,727	0,363	0,287
Світлодіод білий 6500K	0,7	40	192	0,208	0,49	0,7	0,289
Світлодіод синій 19000K нм	0,7	35	29,36	1,192	3,17	4,52	2,96
КЛЛ 2500K	14	770	4806	0,16	4,62	0,33	1,42
КЛЛ 4000K	16	1150	5272	0,218	8,91	0,55	3,44
КЛЛ 8000K	16	840	4596	0,183	9,05	0,565	4,71
КЛЛ 6500K	16	980	4629	0,212	9,98	0,62	4,79
MASTER TL5 ActiViva	49	4150	13106	0,317	52,73	1,08	27,04

Розробка засобів вимірювання циркадних характеристик джерел випромінювання. Загальна концепція створення системи вимірювань циркадних характеристик оптичного випромінювання та ідеологія побудови приладу для циркадних вимірювань базується на використанні фотоприймачів, спектральні характеристики яких, за аналогією із люксометром, відповідають відносній спектральній кривій циркадної ефективності $c(\lambda)$.

При розробці засобів вимірювання циркадних характеристик виникла задача передачі одиниці циркадної освітленості робочим вимірювальним приладам. У випадку циркадних вимірювань вирішення задачі передавання одиниці від еталонного приймача до вимірювального приладу циркадних характеристик зводиться до порівняння реакції еталонного приймача та вимірюваного приймача на кожній довжині хвиль необхідного діапазону і визначення спектральної характеристики відношення фотострум / енергетична потужність випромінювання вимірюваного приймача, тобто його спектральної характеристики ампер-ватної чутливості.

В якості еталонного приймача використовували трап-детектор - приймач, що за своїми характеристиками є найбільш придатним для виконання світлових і циркадних вимірювань у випромінюванні від джерела типу А.

Коригування відносної спектральної чутливості приймача до функції циркадної ефективності виконано шляхом підбору світлофільтрів за допомогою розробленої програми автоматичного підбору фільтрів, яка дозволила за найкоротший час перебрати велику кількість світлофільтрів, як по номенклатурі, так й за товщиною із заданою точністю. На рис. 1, 2 наведена спектральна крива пропускання обраного світлофільтру для каналу циркадних вимірювань.

Оцінка похибки коригування спектральної чутливості кремнієвих фотодіодів ФД288 за кривою циркадної ефективності показала, що похибка коригування складає 8,15%, що достатньо для використання певної пари фотодіод-світлофільтр в приладах циркадних вимірювань.

В результаті проведених досліджень розроблено засоби вимірювання циркадних параметрів світлового середовища, які за своїми метрологічними характеристиками відповідають сучасним вимогам. На рис. 3 представлено загальний вигляд двоканального приладу вимірювання ЦЕР-2 та радіометру ЦЕР-1.

Прилад ЦЕР-2, укомплектований програмним забезпеченням для проведення калібрування і вимірювання, дозволяє визначати як циркадні, так і світлові характеристики з подальшим розрахунком коефіцієнту циркадної ефективності, що виконує ПК при зчитуванні значення сигналу, що вимірюється.

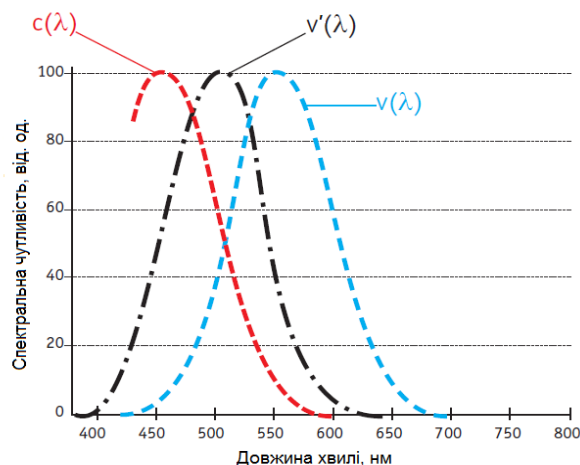


Рис. 1 - Спектральні криві циркадної ефективності $c(\lambda)$; світлової ефективності денного $V(\lambda)$ та нічного $V'(\lambda)$ зору

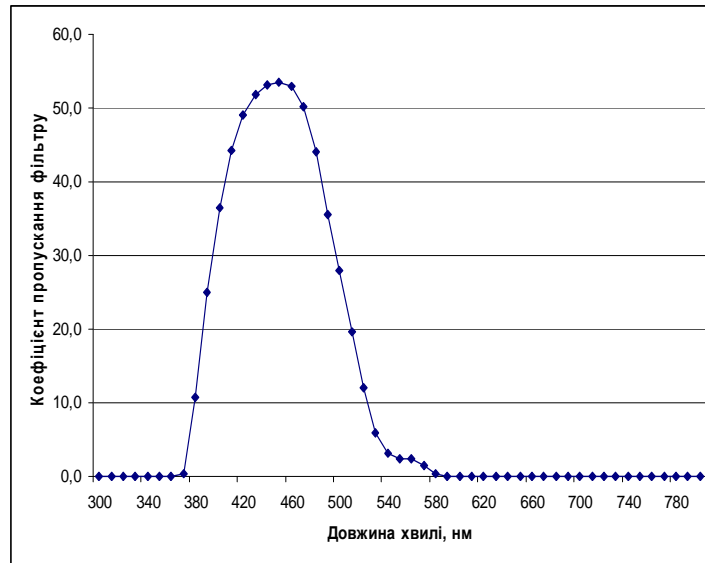


Рис. 2 - Спектральні криві пропускання світлофільтру

Радіометр ЦЕР-1 розроблений для контролю параметрів оптичного випромінювання і кількісної оцінки біологічного впливу видимого випромінювання на організм людини. Даний прилад дозволяє вимірювати щільність потужності в діапазоні від 1 мВт/см^2 до 1000 мВт/см^2 . Робочий спектральний діапазон складає 380 - 580 нм.



Рис. 3 - Загальний вигляд ЦЕР-2 та ЦЕР-1

Радіометр ЦЕР-1 розроблений для контролю параметрів оптичного випромінювання і кількісної оцінки біологічного впливу видимого випромінювання на організм людини. Даний прилад дозволяє вимірювати щільність потужності в діапазоні від 1 мВт/см^2 до 1000 мВт/см^2 . Робочий спектральний діапазон складає 380 - 580 нм.

Для атестації та періодичної повірки засобів вимірювальної техніки для контролю циркадних параметрів світлового середовища запропоновано використання метрологічної установки для повірки фотометрів та яскравомірів. У відповідності до діючих нормативних вимог, така установка укомплектована еталонним вимірювальним блоком з основною відносною похибкою вимірювань $\pm 1,5\%$. Рівень фонового

засвічення установки складає не більше $\pm 1,0\%$, нестабільність потоку випромінювання не перевищує $\pm 1,0\%$, діапазон вимірювання освітленості $1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^3$ лк, основна відносна похибка вимірювань освітленості $\pm 3,0\%$.

Концепція формування якісного світлового середовища.

Світло за впливом як на зорову, так й циркадну систему, описується такими первинними даними: рівень освітленості, спектр, розподіл, синхронізація та тривалість дії [2,10]. Але, при цьому світло для зорової системи, глибоко відрізняється від світла для циркадної системи. Саме розуміння формування циркадних реакцій, їх особливостей та відмінностей від зорового процесу та їх великої значності для здорового існування людини потребує створення нової концепції так званого циркадного освітлення, що забезпечить комфортні умови для виконання зорових завдань, але й при цьому не порушить природного циклу розвитку та існування людства. Загалом, мета якісного освітлення для циркадної системи - це створення постійної 24-годинної організованої моделі поведінки людини, що і є основним критерієм циркадної ефективності.

Таким чином, метою циркадного освітлення повинно стати створення якісних умов світлового середовища за допомогою засобів, що засновані на фундаментальній оцінці освітленості, спектру, розподілу, тривалості дії та синхронізації світла для забезпечення гармонізації біологічних годинників з життєдіяльністю людини. Тобто п'ять основних характеристик світла є основними параметрами, що визначають ефективність для циркадної системи, вони й легли в основу концепції створення якісного освітлення.

Подальша інтеграція потреб зорової та циркадної систем людини потребує розробки рекомендацій щодо створення принципів нормування біологічно активного освітлення. Тому сформульовані вимоги до систем освітлення, що враховують особливості циркадної дії випромінювання повинні враховуватися при створенні норм та правил проектування ергономічних освітлювальних установок різного призначення нової якості.

Висновки та подальший розвиток питання.

- На основі існуючих уявлень щодо якості освітлення запропоновано новий комплексний підхід щодо вирішення проблеми врахування циркадного ефекту світла.
- Загальна схема побудови системи фотометричних величин та наявність спектру біологічної дії дозволили дати визначення нової редукованої величини - циркадного ефективного потоку, що є в основі нової системи ефективних циркадних величин.
- Отримано методи розрахунку циркадних характеристик випромінювання, а також розроблено фотоелектронні прилади ЦЕР-1, ЦЕР-2 для вимірювання циркадних характеристик джерел світла.
- Концепція формування якісного світлового середовища, що враховує основні характеристики світла, фундаментальна оцінка яких забезпечить необхідний набір засобів і методів проектування циркадно ефективного ергономічного освітлення сприяє створенню стандартів щодо біологічного впливу світла.

Результати роботи доцільно використати при створенні основ циркадної фотометрії, розробці нових технічних засобів вимірювання характеристик джерел світла за циркадним ефектом та відповідної метрологічної бази, розробці нових норм та правил проектування освітлювальних систем різного призначення.

Література

1. Шаракшанэ А. Влияние освещения на циркадный ритм человека «опасность синего света» / А. Шаракшанэ // Полупроводниковая светотехника. - 2012. - №4. - С. 52 - 56.

2. Ри М. Циркадные ритмы: новые горизонты практической и теоретической светотехники / М. С. Ри, М. Фигуэро, Дж. Баллоу // Полупроводниковая светотехника. - 2012. - №4. - С. 12 - 17.
3. Ри М. Анализ влияния наружного освещения на систему суточного ритма человека / М. Ри, М. Фигуэро, Э. Бьерман // Современная светотехника. - 2010. - №3. - С. 54 – 58.
4. Иоффе К. И. Методы оцінки та засоби вимірювання характеристик джерел світла за циркадним ефектом : дис. ... канд. техн. наук / К. И. Иоффе. - Харків. 2013. - 135 с.
5. Абрашкина М. Л. Стандартизация – один из путей прогресса в области светодиодных источников света / Абрашкина М. Л., Рожкова Т. А., Терешкин А. И. // Светотехника. - 2012. - №4. - С. 19 – 22.
6. Закгейм А. Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор) // Светотехника. - 2012. - №6. - С. 12 – 21.
7. Зак П. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков / П. Зак, М.А. Островский // Светотехника. - 2012. - №3. - С. 4 - 6.
8. Дус Д. Освещение светодиодами: благоприятные возможности или опасность для здоровья? / Д. Дус // Светотехника. - 2012. - №4. - С. 23 – 25.
9. Бижак Г. Спектры излучения светодиодов и спектр действия для подавления секреции мелатонина / Г. Бижак, М. Б. Кобав // Светотехника. - 2012. - №3. - С. 11 - 16.
10. Аладов А. В. О биологическом эквиваленте излучения светодиодных и традиционных источников света с цветовой температурой 1800-10000 К / А. В. Аладов, А. Л. Закгейм, М. Н. Мизеров, А. Е. Черняков // Светотехника. - 2012. - №3. - С. 7 – 10.

ЦИРКАДНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ СВЕТОДИОДНОМ ОСВЕЩЕНИИ

Л. А. Назаренко, К.И. Иоффе

Изложены результаты разработки методов и средств измерения характеристик источников света по циркадному эффекту. Рассмотрен вопрос создания осветительных систем нового качества. В ходе исследований получило дальнейшее развитие построение новой системы эффективных циркадных величин. Предложены методы оценки излучения источников света разных типов по циркадному эффекту. Описан ряд разработанных средств измерения циркадных характеристик. Даны рекомендации по формированию качественной световой среды и созданию соответствующих стандартов.

CIRCADIAN EFFICIENT FOR LED LIGHTING

L. A. Nazarenko, K.I. Ioffe

The results of methods and means of light sources measuring under circadian effect development have been proposed. The question of a new quality of lighting systems creation is considered. The methods of radiation assessment the circadian efficiency of light sources of different types have been assessed. A number of ordinary instruments for measuring the circadian characteristics have been developed. Certain recommendations are given to develop a qualitative illumination environment and to create corresponding standards.