

УДК 628.94.001.24

Л. Костик, канд. техн. наук; С. Поталіцин

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## СВІЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ ІЗ ДЖЕРЕЛАМИ СВІТЛА ЗАДАНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ

**Резюме.** Проведено дослідження доцільності прямої заміни традиційних джерел світла на сучасні енергоощадні джерела світла із заданими розмірами світлого тіла на основі аналізу світлового розподілу та ККД світлового приладу для зовнішнього освітлення типу РКУ-ЖКУ-Helios 21. Встановлено, що основною причиною зниження ККД при використанні КЛЛ у вуличних світильниках є поглинання частини світлового потоку внаслідок багатократних відбивань світлових променів між верхньою частиною відбивача та поверхнею світлого тіла джерела. Для покращення енергоефективності світлового приладу з КЛЛ розроблено математичну модель, яка дозволяє проводити модернізацію оптичної системи світлового приладу і з світним тілом заданих розмірів за рахунок забезпечення оптимального перерозподілу світлового потоку в зовнішню область. Дана модель оперує вихідними даними розрахунку відбиваючої поверхні, тому може бути застосована разом із будь-якими методами світлотехнічного розрахунку.

**Ключові слова:** світловий прилад, енергетична ефективність, коефіцієнт корисної дії, фотометричне тіло, світлотехнічний розрахунок, світне тіло.

L. Kostyk, S. Potalityn

## LIGHTING ENGINEERING CALCULATION OF LIGHTING DEVICES WITH GIVEN GEOMETRIC DIMENSION LIGHT SOURCES

**Summary.** Power efficiency of lighting sets (LS) is determined by lighting engineering parameters of light sources and optical system of light devices that provide their basic characteristics – light distribution and efficiency. Nowadays there are lots of light devices for street illumination that are designed for high pressure bid sources of HPS type. Promising sources for outdoor lighting from the point of view of power efficiency and improvement of lighting engineering parameters are power-saving compact luminescent lamps (CLL) of high capacity (45-240W) with high enough efficiency (50-80 lm/W), possibility of “warm start” and range of operating temperatures from – 30 to +45 °C. Besides, there is no need to use additional elements for lamp operation (ballast and pulsed light devices are needed for HPS) it reduces its weight, decreases expenses for installing and maintenance of luminaires. The use of traditional base E27 or E40 in such lamps makes possible to use them for direct replacement in extant light devices, improvement of luminaire circuit being held, optical system stays unchangeable. Nevertheless, shape, dimensions and arrangement of luminescent source body relatively the optical system, determine light distribution of luminaire, protective angle and accordingly influence on parameters of light field, indexes of discomfort. That is why the development of LS with light sources of given dimensions is actual from the point of view of improvement of light engineering sets power efficiency. Reasonability of direct replacement of traditional light sources by modern energy efficient light sources with desired size of the luminous body by analyzing light distribution and efficiency lights for outdoor luminaire of РКУ-ЖКУ-Helios 21 type is researched. It is established, that the main reason of efficiency decrease, when compact fluorescent lamp (CFL) are used in outdoor luminaires is absorption of luminous flux due to multiple reflections of light rays between the top of the reflector and the luminous body source surface. To improve the efficiency of light device (LD) with CFL the mathematical model that allows to modernize the optical system of LD with given sizes luminous body by providing optimal redistribution of luminous flux in the outer region has been developed. This model operates on output data calculation of reflecting surface, that is why it can be used with any means of lighting engineering calculation.

**Key words:** light device, energy efficiency, efficiency, photometric body, lighting engineering calculation, luminous body.

**Постановка проблеми.** Енергоефективність освітлювальних установок (ОУ) визначається світлотехнічними параметрами джерел світла та оптичної системи світлових приладів, які забезпечують їх основні характеристики – світловий розподіл та коефіцієнт корисної дії (ККД). На даний час існує велика кількість різного типу світлових приладів для вуличного освітлення, спроектованих для розрядних джерел високого тиску типу ДНаТ чи ДРИ. Перспективними джерелами для зовнішнього освітлення з точки зору енергоефективності та покращення світлотехнічних параметрів є сучасні енергоощадні компактні люмінесцентні лампи (КЛЛ) великої потужності (45-240 Вт) з досить високими значеннями світловіддачі (50-80 лм/Вт), можливістю «теплого запуску» та діапазоном робочих температур від  $-30$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ . Використання в таких лампах традиційних цоколів E27 або E40 дозволяє використовувати їх для прямої заміни в існуючих світлових приладах. При цьому, як правило, проводиться тільки модернізація електричної схеми світильника, а оптична система залишається незмінною. Проте форма, розміри і розміщення світлого тіла джерела відносно оптичної системи визначають світловий розподіл світильника, захисний кут і, відповідно, впливають на параметри світлового поля, показники засліпленості та дискомфорту. Тому розроблення СП із джерелами світла заданих розмірів є актуальним з точки зору збільшення енергоефективності світлотехнічних установок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найважливішим етапом проектування світлового приладу є етап світлотехнічного розрахунку, оскільки його результати значною мірою визначають форму і розміри оптичної системи світлового приладу, а також його світлотехнічні параметри [1]. Мета світлотехнічного розрахунку полягає у встановленні параметрів оптичної системи СП залежно від геометричних розмірів та світлотехнічних параметрів джерела світла, що буде забезпечувати необхідні фотометричні характеристики СП. На даний час використовують два підходи до світлотехнічного розрахунку СП: прямий, що полягає у розрахунку форми кривої сили світла готового приладу, та зворотнім, завданням якого є розрахунок геометричних параметрів поверхні відбивача СП за заданими фотометричними характеристиками.

Існує багато методів вирішення як прямої, так і зворотної задачі проектування світлових приладів. До першого типу відносять методи балансу світлових потоків, елементарних відображень, прямого і зворотного ходу променя. До другого типу – метод Simultaneous multiple surfaces (SMS) [2], метод підгонки поверхонь [3]. Ці методи передбачають певні спрощення щодо форми світних тіл джерел світла та характеру їх свічення і не можуть забезпечити необхідну точність розрахунків.

**Мета роботи.** Розроблення методики світлотехнічного розрахунку СП із заданими розмірами світлого тіла для отримання заданого світлового розподілу.

**Постановка задачі.** Для підвищення енергетичної ефективності світлотехнічних установок за рахунок оптимізації форми оптичної системи СП необхідно розробити математичну модель, яка буде пов'язувати необхідні світлотехнічні параметри та розміри світлого тіла джерела з формою відбиваючої поверхні з урахуванням направленої типу відбивання відбивача.

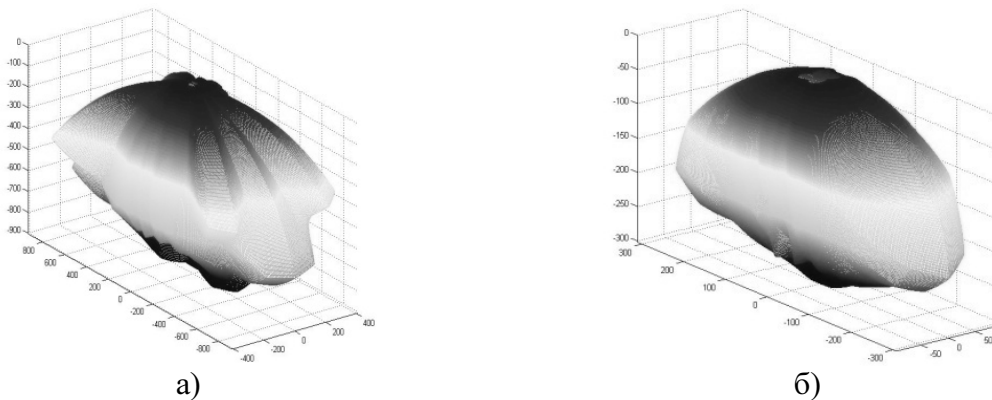
**Результати дослідження.** У роботі проведено дослідження світлового розподілу та ККД світлового приладу для зовнішнього освітлення типу РКУ-ЖКУ-Helios 21 при прямій заміні лампи ДНаТ на КЛЛ.

Вимірювання світлового розподілу проводили за допомогою модернізованого розподільного фотометра, що дозволяв обертати світловий прилад у двох площинах одночасно. Значення ККД визначали за формулою

$$\eta = \frac{\Phi_{cs}}{\sum_{i=1}^n \Phi_{li}} = \frac{4 \sum_{\alpha=0}^{\alpha_{\max}} \sum_{\beta=0}^{\beta_{\max}} I_{\alpha\beta} \Omega_{\alpha\beta}}{\sum_{i=1}^n \Phi_{li}},$$

де  $\Phi_{cs}$  – світловий потік світильника;  $\Phi_{li}$  – світловий потік ламп із світильника;  $I_{\alpha\beta}$  – сила світла світильника в напрямку  $(\alpha; \beta)$ ;  $\Omega_{\alpha\beta}$  – тілесний кут, в межах якого розподіляється випромінювання;  $\alpha_{\max}, \beta_{\max}$  – максимальне значення кутів поздовжньої та поперечної площин, при яких світловий прилад випромінює.

На рис.1 наведено отримані фотометричні тіла світильника РКУ-ЖКУ-Helios 21 для вуличного освітлення з лампами ДНаТ та КЛЛ.

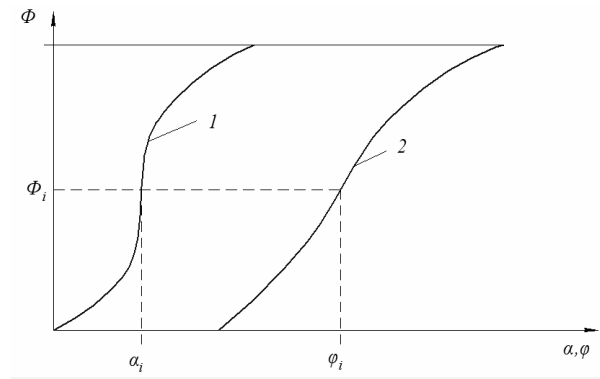


**Рисунок 1.** Фотометричні тіла вуличного світильника РКУ-ЖКУ-Helios 21:  
а) з лампою ДНаТ-100; б) з лампою КЛЛ-45

**Figure 1.** Photometric body of РКУ-ЖКУ-Helios 21 type luminaire  
a) with lamp HPS-100; b) with lamp CFL-45

За результати обчислень ККД світильника з лампою ДНаТ становив 70,8%, з КЛЛ – 51,5%. ККД світильника з лампою КЛЛ значно зменшується внаслідок об'ємнішої форми світлого тіла, екранування частини світлового потоку верхньою частиною відбивача та між розрядними каналами лампи. Це призводить до зниження показників рівномірності розподілу освітленості на дорожньому покритті [4] та зниження енергетичної ефективності СП. Як бачимо, пряма заміна лампи ДНаТ на КЛЛ в існуючому світловому приладі не є раціональною з точки зору енергоефективності. Тому при виборі сучасних джерел світла для заміни в світильниках зовнішнього освітлення необхідно комплексно враховувати світловий розподіл самої лампи та необхідні параметри світлового поля, створюваного світловим приладом, на основі чого слід проводити розрахунки геометричних параметрів світлорозподільних пристроїв.

Проведено світлотехнічний розрахунок СП із заданими розмірами світлого тіла джерела. Попередні розрахунки проводилися із припущенням, що джерело світла є точковим. Для розрахунків використали метод балансу світлових потоків, який полягає у розрахунку світлового потоку, випромінюваного світловим приладом у різні зони простору [1]. При цьому початковий світлорозподіл СП задають функцією  $I(\alpha)$ , де  $\alpha$  – кут між оптичною віссю світильника та напрямком сили світла  $I$ . Потім розраховують функцію необхідного ходу променів  $\alpha(\varphi)$  (рис. 2).



**Рисунок 2.** Функції необхідного ходу променів: 1 – залежність відбитого світлового потоку від величини кута  $\alpha$  ; 2 – залежність падаючого від джерела світлового потоку у напрямку  $\varphi$

**Figure 2.** Functions of required rays: 1 - dependence of reflected light beam from the angle  $\alpha$  ; 2 - dependence on the source of the incident light flux toward  $\varphi$

Координати профільної кривої відбивача визначаємо із диференціального рівняння, яке має виглядати

$$\frac{dr}{r} = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha - \varphi}{2}\right) d\varphi$$

де  $r$  – радіус - вектор поверхні відбивача;  
 $\varphi$  – кут відбивання світла від поверхні відбивача.

Безпосередня заміна точкового джерела світла на джерело світла із заданими геометричними розмірами світлого тіла призведе до поглинання світним тілом частини відбитого світлового потоку, що, в свою чергу, знижує ККД світлового приладу. Тому, щоб розрахувати правильну форму відбивача, яка б направляла світло повз поверхню світлого тіла у заданому напрямку, необхідно спочатку визначити «критичну ділянку», яка спрямовує світловий потік на світне тіло.

Для цього задамо поверхню світлого тіла  $A_2$ , яка описується функцією  $f_2(x, y, z)$  і має яскравість, що описується скалярним полем  $L = L(x, y, z)$ . Розглянемо елементарну ділянку  $dA_1$  відбиваючої поверхні  $A_1$  (рис.3). Світловий потік, що падає на цю елементарну ділянку, від поверхні  $A_2$  буде дорівнювати

$$d\Phi_1 = \vec{\varepsilon} d\vec{A}_1,$$

де  $\vec{\varepsilon}$  – світловий вектор, що створюється випромінюючою поверхнею  $A_2$  на елементарній ділянці  $dA_1$  ;

$d\vec{A}_1$  – вектор, направлений уздовж одиночного вектора нормалі  $\vec{n}$  до  $dA_1$  і має абсолютне значення  $|d\vec{A}_1| = dA_1$ .

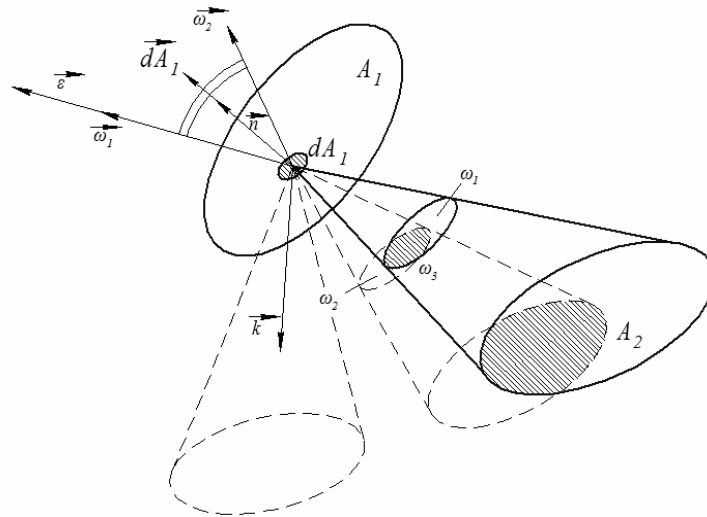


Рисунок 3. – Геометрична модель системи «світне тіло – відбивач»

Figure 3. – Geometric model of "luminous body – reflector" system

При цьому

$$\vec{\varepsilon} = \int_{\omega_1} L d\vec{\omega}_1,$$

де  $d\vec{\omega}_1$  – вектор елементарного тілесного кута  $d\omega_1$ , у межах якого зосереджена елементарна випромінююча поверхня  $dA_2$ . Модуль вектора елементарного тілесного кута  $d\vec{\omega}_1$  чисельно дорівнює тілесному куту  $d\omega_1$ , а напрямок вектора співпадає із віссю елементарного тілесного кута.

Очевидно, що світловий потік, який поглинається поверхнею випромінювача, зосереджений у тілесному куті  $\omega_3$ , що утворений перетином тілесних кутів  $\omega_1$  та  $\omega_2$  і визначається за формулою

$$d\Phi_3 = L\vec{\omega}_3 d\vec{A}_1.$$

Якщо тілесний кут  $\omega_3 > 0$  для  $i$ -тої елементарної ділянки  $dA_1$ , то світловий потік  $d\Phi_3 > 0$ . Дана умова дозволяє визначити множину всіх елементарних ділянок, що утворюють «критичну ділянку».

Проведемо зміну форми «критичної ділянки». Для того, щоб визначити рівняння нового відбивача, скористаємося формулою [5]

$$f(x, y, z) = \int_{x_1}^{x_k} W(x, y, z) dx + \int_{y_1}^{y_k} M(x_0, y, z) dy + \int_{z_1}^{z_k} R(x_0, y_0, z) dz + C,$$

$$\text{де } C = f(x_0, y_0, z_0), W = \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{K_{x_i} + P_{x_i}}{\sqrt{2 - 2 \cos \psi}}, M = \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{K_{y_i} + P_{y_i}}{\sqrt{2 - 2 \cos \psi}}, R = \frac{\partial f}{\partial z} = \frac{K_{z_i} + P_{z_i}}{\sqrt{2 - 2 \cos \psi}};$$

$(P_{x_i}, P_{y_i}, P_{z_i})$  – координати вектора тілесного кута  $\omega_1$  (тілесний кут, в якому зосереджений падаючий світловий потік  $d\Phi_1$  в околі точки  $x_i, y_i, z_i$ );

$(K_x, K_y, K_z)$  – вектор  $\vec{k}$ , що задає напрямок, в якому буде перенаправлятися світловий потік;

$\psi$  – кут між цими векторами.

На основі запропонованої моделі проведено розрахунок відбивача СП для вуличного освітлення.

Алгоритм розрахунку такий:

- задаємо вхідні дані для розрахунку (геометричні розміри світного тіла, фотометричне тіло СП);

- розраховуємо множину профільних кривих відбивача з точковим ДС у різних перетинах фотометричного тіла за методом балансу світлових потоків;

- формуємо поверхню відбивача і з сферичних сегментів;

- уточнюємо форму відбивача залежно від геометричних розмірів ДС.

Джерело світла представляємо у вигляді циліндра, що описується параметричними рівняннями

$$x = h,$$

$$y = R \sin(u),$$

$$z = R \cos(u),$$

$R$  – радіус основи циліндра;

$h$  – висота циліндра.

Керуючись вимогами [4], що ставляться до рівномірності освітлення дорожнього покриття, вибираємо таку форму фотометричного тіла СП, що забезпечує широкий світлорозподіл у поздовжній площині та глибокий – в поперечній (рис. 4).

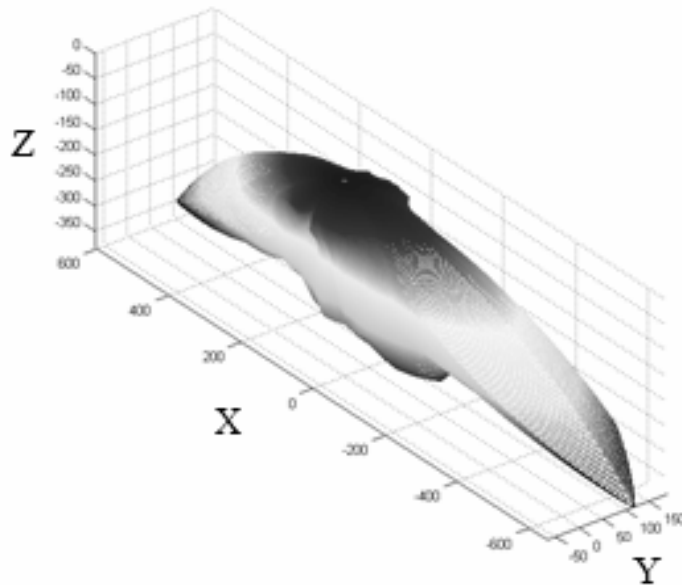
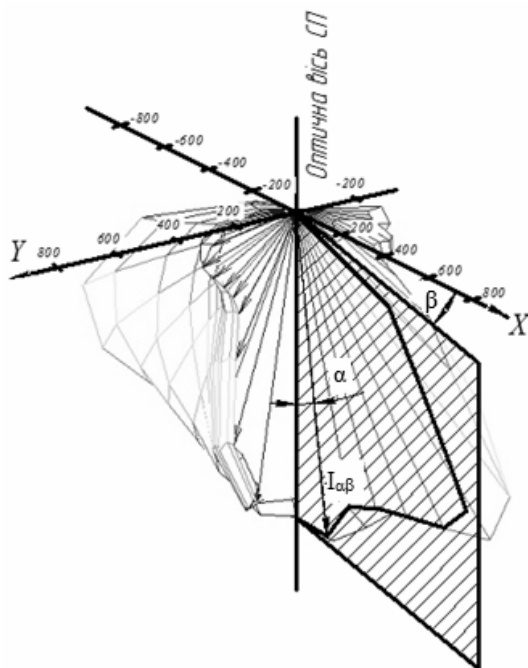


Рисунок 4. Фотометричне тіло СП, для якого проводиться розрахунок

Figure 4. Photometric body of luminaire for which calculations are performed

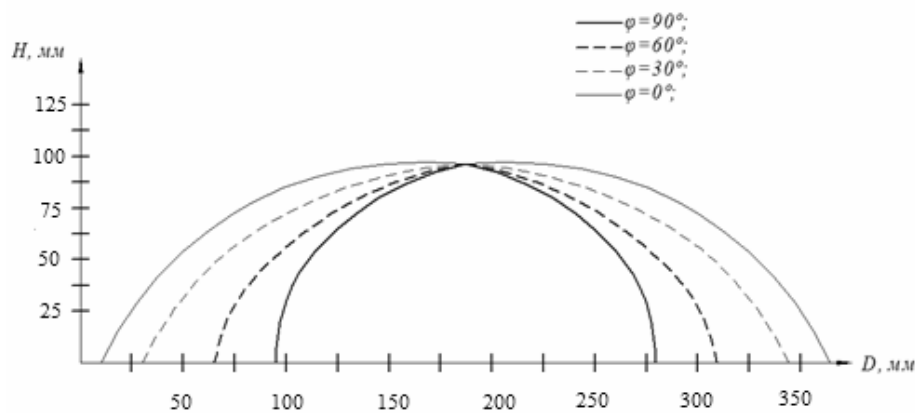
На рис. 5 представлено перетин фотометричного тіла СП профільними площинами. Розрахунок множини профільних кривих відбивача проводили в різних перетинах фотометричного тіла при зміні кута  $\beta$  на  $30^\circ$  за методом балансу світлових потоків.



**Рисунок 5.** Перетин фотометричного тіла СП профільною площиною

**Figure 5.** Luminaire photometric body cross-section by profile plane

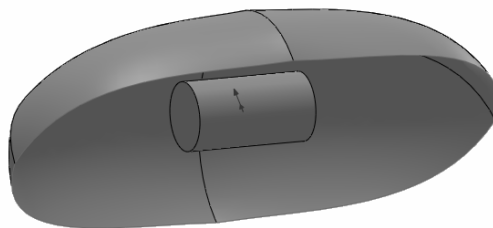
На рис.6 представлено профільні криві відбивача для різних перетинів фотометричного тіла.



**Рисунок 6.** Профільні криві відбивача СП для різних перетинів фотометричного тіла

**Figure 6.** Profile curves of reflector for different photometric body cross-section

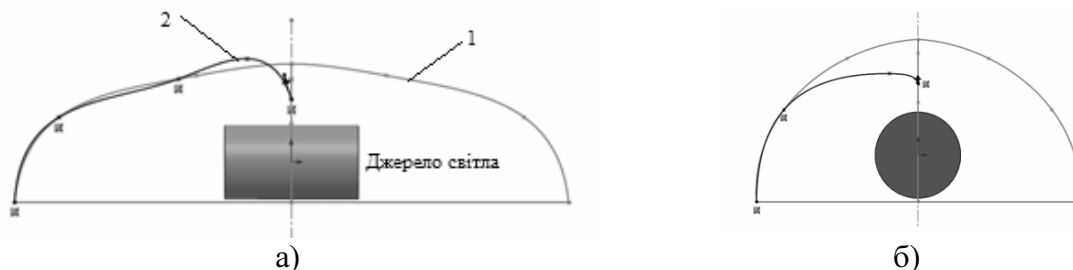
За отриманими профільними кривими побудована загальна поверхня відбивача СП з лампою КЛЛ-45 у середовищі програми SolidWorks (рис.7). Розрахункове світне тіло задане у вигляді геометричного заміника реального тіла при умові рівності їх максимальних геометричних розмірів та світлових потоків.



**Рисунок 7.** Поверхня відбивача СП із розрахунковим світним тілом

**Figure 7.** Reflector surface with calculation luminous body

Для того, щоб підвищити ККД світлового приладу, проведено зміну оптичної системи світлового приладу згідно з представленою математичною моделлю. Отриманні результати наведено на рис. 8.



**Рисунок 8.** Профільні криві відбивачів СП, розрахованого за методом балансу потоків (1) та із модернізованою відбиваючою поверхнею (2): а) в поздовжній площині; б) в поперечній площині

**Figure 8.** Profile curves of the light device reflectors calculated by the method of balance of streams (1) and with the modernized reflecting surface (2): a) in longitudinal plane; b) in transversal plane

Дослідження даної моделі проведено в середовищі програми TracePro. При розрахунках коефіцієнт відбивання дорівнював 0,85, аналогічно як для реального відбивача. Для відбивача, який був розрахований на основі методики балансу потоків ККД дорівнював 53,2%. При цьому основна частка світлового потоку втрачається внаслідок попадання на поверхню світного тіла ДС.

Для СП із модернізованою відбиваючою поверхнею, при розрахунку якої було використано додатково розроблену модель, ККД СП з лампою КЛЛ-45 дорівнював 75,1%, що на 23,6% більше, ніж для оригінального відбивача і на 4,3% більше, ніж для існуючого СП з лампою ДНаТ. Отже, даний відбивач забезпечує перерозподіл світлового потоку повз поверхню світного тіла ДС, що в свою чергу підвищує енергетичну ефективність спроектованого приладу.

**Висновки.** Проведено дослідження доцільності прямої заміни ламп ДНаТ на КЛЛ для вуличного освітлення на основі аналізу світлового розподілу та ККД світлового приладу типу РКУ-ЖКУ-Helios 21. Встановлено, що використання КЛЛ у вуличних світильниках робить світловий розподіл рівномірнішим, проте ККД світильника зменшується на 19,3% внаслідок об'ємнішої форми світного тіла, екранування частини світлового потоку верхньою частиною відбивача та між розрядними каналами лампи, що призводить до зменшення енергетичної ефективності СП. Розроблено математичну модель, яка дозволяє проводити модернізацію оптичної



системи світлового приладу і з світним тілом заданих розмірів для підвищення ККД СП за рахунок забезпечення оптимального перерозподілу світлового потоку у зовнішню область. Дана модель оперує вихідними даними розрахунку відбиваючої поверхні, тому може бути застосована разом із будь-яким методами світлотехнічного розрахунку.

**Conclusion.** Reasonability of direct replacement of traditional light sources by modern energy efficient light sources with desired size of the luminous body basing on the analysis of light distribution and efficiency lights for outdoor luminaire of РКУ-ЖКУ-Helios 21 type is researched. It is established, that the main reason of efficiency decrease, when compact fluorescent lamp (CFL) are used in outdoor luminaires is absorption of luminous flux due to multiple reflections of light rays between the top of the reflector and the luminous body source surface. To improve the efficiency of light device (LD) with CFL the mathematical model that allows to modernize the optical system of LD with given sizes luminous body by providing optimal redistribution of luminous flux in the outer region has been developed. This model operates on output data calculation of reflecting surface, that is why it can be used with any means of lighting engineering calculation.

#### Список використаної літератури

1. Трембач, В.В. Световые приборы. 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В.В. Трембач // М.: Высшая школа. – 1990. – С. 463.
2. Miñano, J.C. An application of the SMS method for imaging designs / J.C. Miñano, Pablo Benítez, Wang Lin, José Infante, Fernando Muñoz, Asunción Santamaría // Opt. Express 17, 24036-24044 – 2009. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-17-26-24036>.
3. Ries H.R. Tailored edge-ray reflectors for illumination / H.R. Ries, R. Winston // J. Opt. Soc. Am. A Vol. 11, No. 4. 1994. [Електронний ресурс]. Режим оступу: [http://fp.optics.arizona.edu/koshel/Papers/JOSAA11.4\\_1260.pdf](http://fp.optics.arizona.edu/koshel/Papers/JOSAA11.4_1260.pdf).
4. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. Чинний з 2006-10-01. – К. Мінбуд України, 2006. – 96 с.
5. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том III. [Текст] / Г.М. Фихтенгольц // М.: Физматлит. – 2001. – С. 662

*Отримано 20.08.2015*