

УДК.621.327;534

В.А.Андрійчук, докт. техн. наук,
Л.М.Костик
 Тернопільський державний
 технічний університет імені
 Івана Пулюя

РОЗРАХУНОК ІНТЕГРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОВОГО ПОЛЯ, СТВОРЕНОГО ОПРОМІНЮВАЧЕМ З НЕСИМЕТРИЧНИМ СВІТЛОВИМ РОЗПОДІЛОМ

Вступ. Поняття світлового поля як частини простору, в якому відбувається перенесення світлової енергії від джерела випромінювання, вперше було введено А.Гершуном [1]. Перенесення енергії в світловому полі характеризується усередненими по часу характеристиками, які не враховують дискретності і часового розподілу імпульсів кожного елементарного акту випромінювання. Таким усередненим значенням вектора Умова-Пойтінга у світловому полі є вектор переносу густини світлової енергії, який за пропозицією А.Гершуна та М.Гуревича прийнято називати світловим вектором [2,3]. Крім світлового вектора, поле оптичного випромінювання характеризується інтегральними характеристиками: освітленістю площини, просторовою освітленістю, сферичною, півсферичною та циліндричною освітленостями [3,4]. Їх розрахунок для круглосиметричних точкових джерел випромінювання наведено в [4–6]. Розрахунок характеристик поля джерела з несиметричним світловим розподілом пов'язаний з труднощами при визначенні сили випромінювання в заданому напрямку [7–9]. Такий розрахунок є важливим при моделюванні умов опромінення рослин з довільним розташуванням їх листків.

У даній статті розглядається методика розрахунку на ЕОМ інтегральних характеристик світлового поля несиметричного точкового опромінювача, світловий розподіл якого заданий фотометричним тілом, отриманим експериментально.

Теоретична частина. Для характеристики поля оптичного випромінювання джерела можна використати любий фотометричний параметр, наприклад, яскравість пучка променів, які попадають у вибрану точку. Цей параметр, як і інші параметри поля, є функцією координат точки і напрямку до неї, що вимагає для опису світлового поля в цій точці не одне, а багато значень. Такий підхід є непридатним для практичного користування. Авторами [2–5] було запропоновано використати усереднені по напрямках, або, так звані, інтегральні характеристики.

Загальний вигляд інтегральної характеристики поля згідно [2,3]:

$$C = \int_{\Omega} L(\varphi, \alpha) \cdot f(\varphi, \alpha) \cdot d\Omega = \int_{\Omega} f(\varphi, \alpha) \cdot dE_n, \quad dE_n = L(\varphi, \alpha) \cdot d\Omega, \quad (1)$$

де C – інтегральна характеристика точки поля; $L(\varphi, \alpha)$ – яскравість випромінювання в напрямку досліджуваної точки поля; φ – кут в екваторіальній площині; α – кут в меридіональній площині; $f(\varphi, \alpha)$ – функція, яка визначає цінність випромінювання в напрямку (φ, α) і залежить від форми і розташування приймача; Ω – тілесний кут, який оточує досліджувану точку поля; dE_n – освітленість площадки від елемента джерела, розташованої перпендикулярно напрямку на цей елемент, у вибраній точці поля.

Для точкового випромінювача

$$dE_n = \frac{I(\varphi, \alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot d\varphi \cdot d\alpha}{l^2}, \quad (2)$$

де $I(\varphi, \alpha)$ – сила світла або сила випромінювання в напрямку до досліджуваної точки поля; l – відстань від джерела до даної точки.

Виходячи із (1) та (2) запишемо вирази для основних інтегральних характеристик світлового поля.

1. Освітленість площини:

$$E = \int_{2\pi} L(\varphi, \alpha) \cdot \cos \alpha \cdot d\Omega = \int_{2\pi} \cos \alpha \cdot dE_n. \quad (3)$$

2. Просторова освітленість E_0 в даній точці СП по визначенню [3, 4]:

$$E_0 = \int_{2\pi} L(\varphi, \alpha) d\Omega = \int_{2\pi} dE_n. \quad (4)$$

3. Середня сферична освітленість $E_{4\pi}$:

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} \int_{4\pi} L(\varphi, \alpha) \cdot d\Omega = \frac{1}{4} \int_{4\pi} dE_n = \frac{1}{4} E_0. \quad (5)$$

4. Середня півсферична освітленість $E_{2\pi}$:

$$E_{2\pi} = \frac{1}{4} \int_{4\pi} L(\varphi, \alpha) \cdot (1 + \cos \alpha) d\Omega = \frac{1}{4} \int_{2\pi} dE_n + \frac{1}{4} \int_{4\pi} \cos \alpha dE_n. \quad (6)$$

5. Середня циліндрична освітленість:

$$E_{\pi} = \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} L(\varphi, \alpha) \cdot \sin \alpha d\Omega = \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} \sin \alpha dE_n, \quad (7)$$

де α – кут між віссю циліндра і напрямком випромінювання у вибрану точку світлового поля.

6. *Світловий вектор* $\vec{\epsilon}$. Модуль світлового вектора визначається максимальною різницею значень освітленості двох сторін площадки ds у вибраній точці поля [2-4]:

$$|\vec{\epsilon}| = \Delta E_{\max} = E - E_{\pi}. \quad (8)$$

Для точкового джерела:

$$d\vec{\epsilon} = \vec{l}(\varphi, \alpha) dE_n \quad (9)$$

де $\vec{l}(\varphi, \alpha)$ – одиничний вектор напрямку випромінювання; dE_n – освітленість елементарної площадки, перпендикулярної осі тілесного кута.

З (3–9) випливає, що всі інтегральні характеристики вибраної точки СП можна виразити через просторову освітленість E_0 (4), яка, у випадку точкового джерела, дорівнює освітленості елемента площини dE_n перпендикулярної до потоку випромінювання. Розрахунок dE_n є частковим випадком більш загальної задачі – розрахунку опромінення площини довільної орієнтації. Зупинимось на більш загальному випадку.

На рис.1 приведена геометрична схема для розрахунку опромінення площини довільної орієнтації від несиметричного опромінювача з параболоциліндричним відбивачем.

Задамо декартову систему координат $OXYZ$, в якій будемо розглядати світлотехнічну установку в цілому. Площину, опромінення якої необхідно визначити, проведемо через вибрану точку P і зв'яжемо з нею прямокутну систему координат $PX_1Y_1Z_1$, яку назвемо системою приймача. Причому координатна площина PX_1Y_1 збігається з вибраною площиною, а вісь PZ_1 – з вектором нормалі до неї. Вектор \vec{N} утворює з віссю OZ – кут ψ_z . Вісь PX_1 проведемо паралельно до площини OXY . Кут між осями OX і PX_1 – ψ_x . Координати одиничних векторів даної системи в системі $OXYZ$ визначатимуться за формулами:

$$\begin{aligned}\vec{g}_{x_1} &= \vec{g}_x \cos \psi_x + \vec{g}_y \sin \psi_x ; \\ \vec{g}_{y_1} &= -\vec{g}_x \cos \psi_z \cdot \sin \psi_x + \vec{g}_y \cos \psi_z \cdot \cos \psi_x + \vec{g}_z \sin \psi_z ; \\ \vec{g}_{z_1} &= \vec{g}_x \sin \psi_z \cdot \sin \psi_x - \vec{g}_y \sin \psi_z \cdot \cos \psi_x + \vec{g}_z \cos \psi_z ,\end{aligned}\quad (10)$$

де \vec{g}_x , \vec{g}_y , \vec{g}_z – одиничні вектори у системі $OXYZ$.

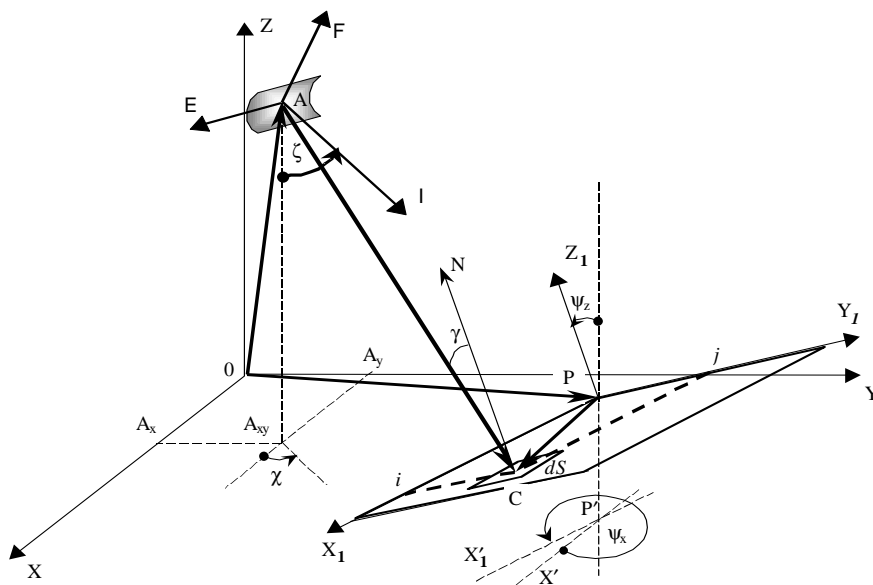


Рис. 1 – Геометрична схема для розрахунку опромінення довільної площини від опромінювача з несиметричним світловим розподілом: $OXYZ$ – система координат опромінювальної установки; $AFEI$ – система координат випромінювача; $PX_1Y_1Z_1$ – система координат приймача; AI – оптична вісь ОП; χ – кут між віссю OX і проекцією оптичної осі ОП на площину XOY ; \vec{N} – одиничний вектор нормалі до ділянки dS ; ψ_z – кут між осями PZ_1 і OZ ; ψ_x – кут між осями OX і PX_1 .

Опромінювач у даній світлотехнічній установці розташуємо у точці A . Його оптичну вісь спрямуємо під кутом ζ до осі OZ (до вертикалі). З опромінювачем пов'яжемо ще одну декартову систему координат $AFEI$, що повністю збігається з системою координат, де виконувалися експериментальні вимірювання його світлових характеристик, і назвемо її системою джерела. Орієнтацію системи джерела відносно $OXYZ$ задамо так. Вісь AI спрямуємо вздовж оптичної осі опромінювача. Її напрям задаватиме одиничний вектор \vec{i} , координати якого в системі $OXYZ$ визначаються за рівнянням

$$\vec{i} = \vec{g}_x \sin \zeta \cos \chi + \vec{g}_y \sin \zeta \sin \chi - \vec{g}_z \cos \zeta . \quad (11)$$

Вісь AE проведемо перпендикулярно до осі AI і спрямуємо паралельно до площини XOY . Координати одиничного вектора даної осі в системі $OXYZ$ дорівнюватимуть

$$\vec{e} = \vec{g}_x \sin \chi - \vec{g}_y \cos \chi . \quad (12)$$

При такому виборі двох ортогональних осей AI і AE одиничний вектор третьої ортогональної осі AF можна визначити з векторного добутку двох попередніх одиничних векторів

$$\vec{f} = \vec{e} \times \vec{i} = \vec{g}_x \cos \zeta \cos \chi + \vec{g}_y \cos \zeta \sin \chi + \vec{g}_z \sin \zeta. \quad (13)$$

Кутовий розподіл сили випромінювання несиметричного опромінювача $I(\varphi, \alpha)$ отримувався експериментально на гоніофотометричній установці. При цьому будь-який напрям сили випромінювання задавався двома кутами: α – кутом повороту опромінювача відносно осі E; φ – кутом повороту відносно осі I. Обидва кути змінювалися в межах $+90^\circ \dots -90^\circ$. Знак «+» застосовувався тоді, коли опромінювач повертався за годинниковою стрілкою, якщо дивитися у бік випромінювання ОП, а «-» – при обертанні проти годинникової стрілки.

Такі вимірювання проведені для ряду світильників та ширококутових прожекторів з кроком зміни кутів $\Delta\varphi = 10^\circ$ і $\Delta\alpha = 5^\circ$ у лабораторіях Українського світлотехнічного інституту (м. Тернопіль). Результати експериментальних вимірювань подавалися у вигляді таблиць, де відповідно до значень кутів φ і α записувалися значення сили світла у заданому напрямі.

При складанні таблиць дотримувалися таких правил:

1) значення сили світла $I(\varphi, \alpha)$ у табличних точках визначалися з однаковою похибкою, яка для даної гоніофотометричної установки дорівнювала 5%;

2) у таблиці подавалися лише ті значення сили світла, похибка кожного з яких не перевищувала 0,5 одиниці молодшого розряду експериментально отриманих величин.

Табличні дані служили основою для подальших світлотехнічних розрахунків.

Математичний вираз для розрахунку опромінення ділянки dS , яка лежить на вибраній площині PX_1Y_1 і охоплює довільну точку світлового поля С, записували через скалярний добуток векторів

$$E_C = \frac{I(t, \varphi, \alpha) \cdot (\overrightarrow{AC} \cdot (-\vec{N}))}{|\overrightarrow{AC}|^3}, \quad (14)$$

де $I(t, \varphi, \alpha)$ – функція сили випромінювання, яка, в загальному випадку, залежить від часу та вибраного напрямку АС.

Якщо потік випромінювання опромінювача не змінюється протягом всього періоду опромінення, то модуль вектора сили випромінювання буде залежати лише від вибраного напрямку АС і у формулу (14) необхідно підставити $I(\varphi, \alpha)$ та координати векторів \overrightarrow{AC} і \vec{N} . Вектор \overrightarrow{AC} запишемо як суму векторів

$$\overrightarrow{AC} = \overrightarrow{OP} + \overrightarrow{PC} - \overrightarrow{OA}. \quad (15)$$

Значення сили випромінювання $I(\varphi, \alpha)$ в напрямку \overrightarrow{AC} визначається методом інтерполяції експериментально отриманих табличних даних $I(\varphi, \alpha_j)$ для вибраного опромінювача.

Розрахунок $I(\varphi, \alpha)$ проводився на ЕОМ по розробленій програмі згідно алгоритму:

- за заданими координатами точки С визначаються кути φ і α ;
- знаходиться ділянка, $[\varphi_p, \alpha_q; \varphi_{p+1}, \alpha_{q+1}]$ матриці I_{ij} , в яку потрапляє дана точка;
- проводиться лінійна інтерполяція [10];
- оцінюється похибка лінійного інтерполювання;
- проводиться порівняння абсолютної похибки розрахованої величини з абсолютною похибкою вимірюваних $I(\varphi_p, \alpha_q)$. Якщо похибка розрахованої величини $R_1(\varphi, \alpha)$ менша або дорівнює 0,5 одиниці молодшого розряду експериментальних величин, то отримане

значення $I(\varphi, \alpha)$ використовується в подальших розрахунках. Якщо ж переважає вказану величину, то відбувається перехід до квадратичної інтерполяції;

- проводиться інтерполювання за допомогою многочлена другого степеня [10];
- оцінюється похибка квадратичного інтерполювання $R_2(\varphi, \alpha)$;
- проводиться порівняння з похибкою експериментально отриманих величин і, якщо вона не перевищує її, то отримане $I(\varphi, \alpha)$ береться для подальших розрахунків, якщо ж перевищує – то програма інформує про це оператора.

Для розрахунку опромінення вибраної площини була розроблена програма, алгоритм якої полягає в наступному:

- задаються координати ОП в системі OXYZ та кут нахилу ζ його оптичної осі до вертикалі;
- в системі OXYZ задається опромінювальна площина і зв'язується з нею система координат приймача $PX_1Y_1Z_1$;
- на координатній площині OXY вибирається площадка $R_x \times R_y$, в яку попадає проекція точки, або сама точка P;
- на опромінювальній площині вибирається ще одна площадка, у вигляді прямокутника, з сторонами $R_{x1} \times R_{y1}$, які співпадають з осями PX_1 та PY_1 ;
- задається напрям одиничного вектора нормалі $\vec{N}(N_x, N_y, N_z)$ до вибраної площадки, який співпадає з віссю PZ_1 ;
- площадка розбивається на елементарні квадратні ділянки з стороною Δ ;
- кожному елементу розбиття присвоюється пара цілих чисел (i, j) , які відповідають його координатам по осях PX_1 і PY_1 , якщо за одиничний відрізок прийняти Δ ;
- за формулою (15) визначається середнє опромінення E_{ij} кожної елементарної ділянки Δ_{ij} ;
- опромінення всієї площадки задається матрицею $\{E\}$ розміром $R_{x1}/\Delta \times R_{y1}/\Delta$, елементами якої E_{ij} є середні значення опромінення кожної елементарної ділянки Δ_{ij} .

Результати розрахунку та їх обговорення.

Розроблена методика дозволяє проводити розрахунок інтегральних характеристик світлового поля в точках, розташованих на будь-якій вибраній поверхні. Розглянемо випадок, який найбільш часто зустрічається в практиці розрахунку опромінювальних установок, коли опромінювальною поверхнею є площина.

Виберемо опромінювач з параболоциліндричним відбивним елементом ЖСП-ВОТ-02 та джерелом випромінювання ДНаТ-400. Нехай опромінювач розташований на висоті $h = 3$ м і нахилений під кутом $\zeta = 40^\circ$ до вертикалі. Проведемо розрахунок параметрів поля оптичного випромінювання даного джерела в точках, розташованих на горизонтальній площині. На цій площині виберемо ділянку розміром $R_{x1} = 7$ м, $R_{y1} = 6$ м і розіб'ємо її на елементарні квадрати з стороною $\Delta = 0,1$ м. Для кожного елемента розбиття визначимо середні значення інтегральних характеристик світлового поля випромінювача.

Розрахунки проводились на ЕОМ за розробленою програмою, згідно якої в першу чергу визначалось просторове опромінення E_0 кожного елемента розбиття за наведеними вище алгоритмами. Розрахунок кожної інтегральної характеристики світлового поля проводився згідно своєї підпрограми, яка включала програму розрахунку E_0 і враховувала множник, який входить до формул (3–9). Результати розрахунку приводилися у вигляді графіків однакових значень відповідного параметра поля для множини точок, розташованих на заданій поверхні.

На рис.2,а-г наведені криві однакових значень основних інтегральних характеристик поля випромінювання ФАР в точках, розташованих на горизонтальній площині. По осях графіків відкладено порядкові номери елементів розбиття вибраної площадки.

Графіки розподілу точок з однаковим сферичним опроміненням ФАР будуть мати такий же характер як і точок з однаковим просторовим опроміненням (рис.2,б), лише числові значення опромінення будуть зменшені в 4 рази. Криві однакових значень модуля світлового вектора збігаються з кривими однакових значень просторового опромінення (рис.2, б).

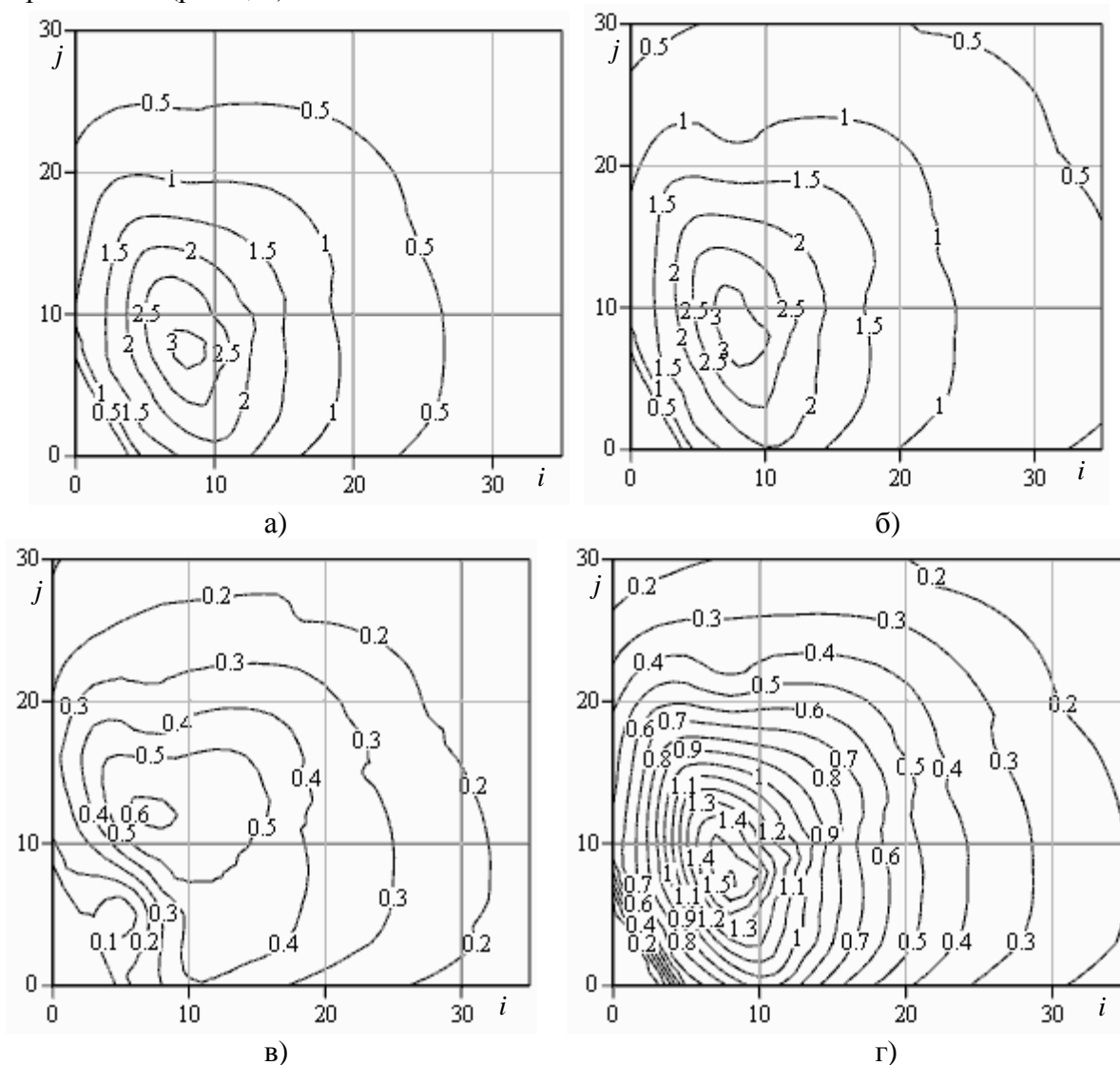


Рис. 2 – Інтегральні характеристики поля випромінювання фотосинтезноактивної радіації (Вт/м^2) в точках, розміщених на горизонтальній площині ($PZ_1=0$) опромінювача ЖСП-ВОТ-02 з лампою ДНаТ-400, розташованого під кутом $\zeta=40^\circ$ до вертикалі на $h=3$ м і $\psi_\chi=30^\circ$: а) криві однакового опромінення горизонтальної площини; б) криві однакового просторового опромінення; в) криві однакового циліндричного опромінення в точках горизонтальної площини на висоті $PZ_1=0,5$ м; г) криві однакового півсферичного опромінення.

Висновки

1. Запропоновано аналітичний метод розрахунку опромінення площини довільної орієнтації від опромінювача з несиметричним світловим розподілом.
2. Розглянуто методику визначення сили випромінювання в довільному напрямку несиметричного опромінювача шляхом інтерполяції многочленом Лагранжа першого і другого степеня з врахуванням абсолютної похибки інтерполювання.

3. Запропоновано методику та приведено алгоритми розрахунку на ЕОМ інтегральних характеристик поля оптичного випромінювання несиметричного точково-го опромінювача.

4. Приведено результати розрахунку інтегральних характеристик поля випромінювання ФАР для параболоциліндричного опромінювача ЖСП-ВОТ-02 з лампою ДНаТ-400.

Література

1. Гершун А.А. Световое поле от поверхности излучателей равномерной и неравномерной яркостей / Труды ГОИ, 1928. – Т. 4. – Вып. 38. – С.10–19.
2. Гершун А.А., Гуревич М.М.. Световое поле / Журнал Русского физико-математического общества. 1928 – Т. 60. – Вып. 4. – С.355–360.
3. Гершун М.М. Световое поле. Избранные труды по фотометрии и светотехнике. – М.: Физматгиз, 1958. – С.223–397.
4. Мешков В.В. Основы светотехники. – М.: Энергия. 1979. – 368 с.
5. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б.Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 972 с.
6. Андрійчук В.А., Герій Я.М., Чубатий Ю.О. Світлотехнічний розрахунок опромінювальної установки з прецесуючим рухом опромінювачів // Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулля, 2000 р., – Т. 5. – №1. – С. 85–91.
7. Сарычев Г.С. Облучательные светотехнические установки. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
8. Кноринг Г.М. Осветительные установки. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 288 с.
9. Андрійчук В.А., Герій Я.М. Розрахунок опроміненості площини довільної орієнтації від опромінювача з некруглосиметричним світловим розподілом // Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулля, 2001. – Т.6. – №1. – С.78–88.
10. Самарский А.А., Тулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.

РАСЧЁТ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОВОГО ПОЛЯ, СОЗДАННОГО ОБЛУЧАТЕЛЕМ С НЕСИММЕТРИЧЕСКИМ СВЕТОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

В.А. Андрійчук, Л.Н. Костик

Представлена методика расчёта на ЭВМ облучения плоскости произвольного размещения от облучателя с несимметрическим световым распределением. Приведены алгоритмы расчёта сил света в произвольном направлении для несимметрического облучателя, распределения облучения плоскости произвольного расположения, разработано их программное обеспечение. Рассмотрены примеры расчёта для облучателя РСП-ВОТ-02 с лампой ДНаТ-400.

CALCULATION OF LIGHT FIELD INTEGRAL DESCRIPTIONS, CREATED IRRADIATOR WITH UNSYMMETRIC LIGHT DISTRIBUTING

V.A. Andriychuk, L.N. Kostyk

The method of calculation of irradiation of plane of the arbitrary placing from an irradiator with the unsymmetric light distributing on computer is presented. The algorithms of calculation of candle-powers are resulted in arbitrary direction for an unsymmetric irradiator, distributing of irradiation of plane of arbitrary location, their software is developed. The examples of calculation are considered for the irradiator of РСП-ВОТ-02 with the lamp ДНаТ-400.