

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРЯМОЛІНІЙНИХ ПОРОЖНИСТИХ ТРУБЧАСТИХ СВІТЛОВОДІВ

Радомцев Д.О.

Київський національний університет будівництва і архітектури
м. Київ, Україна

АНОТАЦІЯ: В статті описано процес дослідження новітніх систем інтегрального освітлення зумовив появу низки методів розрахунку ефективності світловодів та освітленості архітектурного простору від них. В статті аналізуються базові математичні моделі, які дозволяють в спрощеній формі визначити значення характеристик світлового поля від прямолінійних трубчастих світловодів.

АННОТАЦИЯ: В статье описан процесс исследования современных систем интегрального освещения обусловил появление цепи методов расчёта эффективности световодов и освещённости архитектурного пространства от них. В статье анализируются базовые математические модели, которые позволяют в упрощённой форме определить значения характеристик светового поля от прямолинейных трубчатых световодов.

ABSTRACT: The process of research actual integrated light systems set conditions for appearance of diversity methods for calculation lightguide efficiency and illumination of architectural space is described in the article. Basic mathematical models which allow in simplified form to specify means of light field parameters from rectilinear light tubes are analyzed in article.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Енергозбереження, природне освітлення, інтегральна система освітлення, світловод, метод розрахунку.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Одним із основних чинників підвищення енергоефективності будівель і споруд є застосування оптимального природного освітлення внутрішнього простору. Внаслідок досліджень був запропонований новий тип архітектурних конструкцій – системи інтегрального освітлення на основі світловодів. Вони дозволяють транспортувати як природний світловий потік у денні години, так і штучний у нічні, що дозволяє раціонально суміщати та використовувати випромінювання.

Наявність багатьох груп науковців, паралельні теоретичні та експериментальні дослідження призвели до наявності багатьох методів розрахунку ефективності світловодів та освітлення від них.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Вивчення, математичне моделювання та впровадження систем суміщеного освітлення набули активної фази наприкінці ХХ сторіччя у багатьох країнах - США, Австралії, Росії, Англії, Італії, Швейцарії, Германії [1]. В цей час були розроблені базові методи розрахунку ефективності світловодів, на основі яких в подальшому були розроблені поліномні моделі та методи із застосуванням аналітичної геометрії та теорії світлового поля.

Мета роботи – проаналізувати базові методи розрахунку ефективності систем інтегрального освітлення з прямолінійною головною віссю.

МОДЕЛІ ОБЧИСЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРЯМОЛІНІЙНИХ СИСТЕМ ТА ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОВОГО ПОЛЯ

Рівняння Застроу-Вітвера (Zastrow and Wittwer method)

Перше наближення до аналітичного розрахунку ефективності було запропоновано у 1986 році [2]. Відносна ефективність ξ транспортування прямої складової світлового потоку крізь прямолінійний порожнистий трубчастий світловод із постійним круговим перетином та дзеркальним світловідбиттям матеріалу внутрішньої поверхні визначається за формулою:

$$\xi = p^{\frac{l \times \tan \theta}{d}}, \quad (1)$$

де p – середній коефіцієнт відбиття від внутрішньої поверхні світловоду, що не залежить від спектрального складу світлового потоку;

l – довжина світловоду, що дорівнює геометричній довжині центральної вісі, м;

θ – кут нахилу сонячних променів відносно вертикальної центральної вісі вхідного отвору світловоду, °;

d – оптичний діаметр світловоду, м;

Пізніше це рівняння було використано Д. Могельніковою для моделювання світлового поля від інтегральної системи освітлення із ідентичними параметрами на основі функції світлового потоку від кута нахилу променів світла θ [3].

$$\Phi(\theta) = \Phi_0 \theta \times p^{\frac{l \times \tan \theta}{d}}, \quad (2)$$

де $\Phi(\theta)$ – значення світлового потоку із суцільним спектром після проходження крізь світловод, Лм;

$\Phi_0 \theta$ – значення падаючого світлового потоку, Лм;

Рівняння Свіфта-Сміта (Swift and Smith method)

Вперше формула була запропонована авторами у 1995 році [2]. Відповідно до неї проводиться розрахунок відносної ефективності при ідентичних до зазначених у попередньому рівнянні геометричних параметрах та умов світлового потоку. Наведена формула є розвитком метода Застроу-Вітвера, що базується на представленні геометричної характеристики світловоду як відношення його довжини до діаметру та підрахунку цілої кількості відбиттів від внутрішньої поверхні:

$$\xi = \frac{4}{\pi} \int_{d=0}^1 \frac{d^2}{1-d^2} p^{\int_0^{\frac{b \times \tan \theta}{d}} 1 - 1 - p \times \frac{b \times \tan \theta}{d} - \int_0^{\frac{b \times \tan \theta}{d}} dd}, \quad (3)$$

де b – відношення довжини світловоду l до оптичного діаметра d ;

$\int []$ – ціле значення відбиттів світлових променів від внутрішньої поверхні.

Рівняння Едмонда (Endmond method)

Ця формула є логічним розвитком наведених вище формул. Геометричні характеристики інтегральної системи залишаються як і у попередніх методах, проте уточнюється визначення потужності падаючого прямого випромінювання за рахунок врахування коефіцієнту проходження променів крізь атмосферу. Ключовим співвідношенням у рівнянні стає $r^2 - x^2 \frac{1}{2}/r$ – вираз, що відображає рівномірне розповсюдження світлового потоку по всьому вхідному отвору світловоду[2].

$$\xi = \int_{x=0}^r \frac{r^2 - x^2 \frac{1}{2}}{r} \times p^{\frac{l}{2r \cos i \tan \theta}} dx, \quad (4)$$

де r – оптичний радіус світловоду, м;

i – кут повного відбиття світлового потоку від внутрішньої поверхні, °;

Із урахуванням світлового потоку, що надходить до інтегральної системи, формула приймає наступний вигляд[2, стр.58]:

$$\Phi = 4\Phi_{0atm} T_{atm} \sin \theta \int_{x=0}^r \frac{r^2 - x^2 \frac{1}{2}}{r} \times p^{\frac{l}{2r \cos i \tan \theta}} dx, \quad (5)$$

де Φ_{0atm} – світловий потік, що надходить із космічного простору, Лм;

T_{atm} – фактор прозорості атмосфери.

Система рівнянь Тіклеану (Ticleany method)

Модель розрахунку освітленості була запропонована у 2006 році та базується на рекурентних залежностях проходження світлового потоку крізь світловод, що були виведені за допомогою алгоритму Левенберга-Марквардта для нелінійної регресії [6]. Отримані на різних поперечних перетинах експериментальні дані освітленості від повнорозмірної моделі прямолінійного світловоду із відгалуженням були проаналізовані та оброблені у програмі CurveExpert 1.3 за допомогою вищезгаданого алгоритму.

$$E_{гор} = E_{eg} \times \vartheta l, \quad (6)$$

де ϑl – рекурентне рівняння залежності горизонтальної освітленості вихідного отвору від оптичної довжини прямолінійного світловоду, що приймає вигляд

$$\vartheta l = a l - k^c, \quad (7)$$

де a, k, c – коефіцієнти рівняння, виведені в автоматичному режимі у програмі CurveExpert 1.3, які дорівнюють:

$$a = 39,358572; k = -10,332781; c = 1,2648536.$$

$$E_{\text{верт}} = E_{eg} \times \psi l, \quad (8)$$

де ψl – рівняння залежності вертикальної освітленості внутрішньої поверхні прямолінійного світловоду від оптичної довжини, що приймає вигляд

$$\psi l = a + kl^{\frac{-1}{c}}, \quad (9)$$

де $a = 0,80990555$; $k = -5,413364$; $c = 0,021229594$.

$$E_{\text{верт}} = E_{\text{вдг}} \times \beta l_{\text{вдг}}, \quad (10)$$

де $\beta l_{\text{вдг}}$ – рекурентне рівняння залежності вертикальної освітленості дифузору світловоду від довжини відгалуження.

$$\beta l_{\text{вдг}} = ak + cl_{\text{вдг}}^j \quad k + l_{\text{вдг}}^j, \quad (11)$$

де $a = 8489,2571$; $k = 17470121$; $c = 9048,3439$; $j = 5,4168508$.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Наведені моделі є основними методами розрахунку задач будівельної світлотехніки щодо визначення ефективності прямолінійних порожнистих трубчастих світловодів та характеристик світлового поля, що створюється при їх використанні.

Перші три рівняння – Застроу-Віттвера, Свіфта-Сміта та Едмонда є загальними виразами для моделювання ефективності прямолінійних трубчастих систем освітлення, згідно яких характер процесу переносу світла залежить від кута нахилу падаючого випромінювання, відношення довжини до діаметру та коефіцієнті світловідбиття від внутрішніх поверхонь світловоду. При цьому умови світлового клімату та положення Сонця при відповідному географічному місцезнаходженні або взагалі не описуються, або приймаються із великим спрощенням. В цілому, вони є першими та базовими рівняннями, що характеризують головні залежності світлового поля від параметрів системи та надають загальний напрямок розвитку наступних підходів.

Рівняння Тіклеану є таким, що базуються на коефіцієнтному відображенні всієї низки фізичних, кліматичних, геометричних факторів, що впливають на характеристики світлового поля. Оптимальні рівняння виведені внаслідок комп'ютерного моделювання на основі великої кількості експериментальних даних, що отримані в різний час та за різних умов.

Чисельні підходи не в повній мірі відображають геометричну будову складових конструкцій світловодів, внаслідок чого теоретичні розрахунки мають суттєві похибки відносно розрахунків ідентичних експериментальних моделей. Математичні моделі, що базуються на коефіцієнтному відображенні існуючих впливів на перенос світлового потоку, дають вірні результати лише за конкретних умов світлового клімату та географічного положення. Найбільш точними та наближеними до дійсних значень світлового поля у приміщенні є методи із використанням аналітичної геометрії, що враховує параметри небосхилу, вхідного світлового потоку, геометричну будову системи, процес багаторазового повного внутрішнього відбиття. Вони є найбільш перспективним напрямком подальшого дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Знак, 2006. — С. 856.
2. Zhang X. Daylighting performance of tubular Solar Light Pipes: Measurement, Modeling and Validation. A thesis submitted to Napier University for the degree of Doctor of Philosophy. — Napier University, Edinburgh, Scotland, 2002.
3. Mohelnikova J. Daylighting and energy savings with tubular light guide / Mohelnikova J. // WSEAS transactions on Environment and Development, USA, 2008. — Vol. 4. - №. 3. — P. 200-209.
4. Mankova J. Simplified determination of indoor daylight illumination by light pipes / J. Mankova, J. Hraska, M. Janak // Slovak Journal of Civil Engineering, 2009. - Vol. 4 — P. 22-30.
5. Shin J. Y. Evaluation of daylighting effectiveness and energy saving potentials of light-pipe systems in buildings / J. Y. Shin, G. Y. Yun, J.T. Kim // Indoor and built environment. — 2012. - Vol.21. - №.1 — P. 129-136.
6. Ticleanu C. Approach on numerical modeling of branched daylight guidance systems / C. Ticleanu // Ingineria iluminatului. — 2006. - Vol.8. - №.18. — P. 37-45.

REFERENCES

1. Aizenberg U.B. Lighting engineering reference book / Edited by U.B. Aizenberg. 3-rd edition. — M.: Znak, 2006. — P. 856.
2. Zhang X. Daylighting performance of tubular Solar Light Pipes: Measurement, Modeling and Validation. A thesis submitted to Napier University for the degree of Doctor of Philosophy. — Napier University, Edinburgh, Scotland, 2002.
3. Mohelnikova J. Daylighting and energy savings with tubular light guide / Mohelnikova J. // WSEAS transactions on Environment and Development, USA, 2008. — Vol. 4. - № 3. — P. 200 - 209.
4. Mankova J. Simplified determination of indoor daylight illumination by light pipes / J. Mankova, J. Hraska, M. Janak // Slovak Journal of Civil Engineering. — 2009. - Vol. 4 — P. 22-30.
5. Shin J. Y. Evaluation of daylighting effectiveness and energy saving potentials of light-pipe systems in buildings / J. Y. Shin, G. Y. Yun, J.T. Kim // Indoor and built environment. — 2012. - Vol. 21. -№.1. — P. 129 - 136.
6. Ticleanu C. Approach on numerical modeling of branched daylight guidance systems / C. Ticleanu // Ingineria iluminatului. — 2006. - Vol.8. - №.18. — P. 37-45.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2014 р.