

УДК 628.9.041

С.В. ПАВЛОВ, Є.О. ХОДЯКОВ, М.П. МАРЦЕВ

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ВІДСТАНЬ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМ КАБЕЛЯМ

*Вінницький національний технічний університет (ВНТУ)
21021, вул.Хмельницьке шосе, 95, м.Вінниця, Україна*

Анотація. У статті досліджуються функціональність і можливості застосування систем передачі сонячного випромінювання на відстань по волоконно-оптичним кабелям (ВОК).

Ключові слова. Сонячне випромінювання, концентратор сонячного випромінювання, волоконно-оптичний кабель, розсіювач світла.

Аннотация. В статье исследованы функциональность и возможности применения систем передачи солнечного излучения на расстояние по волоконно-оптическим кабелям (ВОК).

Ключевые слова. Солнечное излучение, концентратор солнечного излучения, волоконно-оптический кабель, рассеиватель света.

Abstract. This paper explores the functionality and application capabilities of the transmission systems of solar radiation on the distance through fiber optic cables.

Keywords. Solar radiation, solar radiation concentrator, fiber optic cable, light diffuser.

DOI: 10.31649/1681-7893-2018-35-1-73-80

ВСТУП

У сучасному світі люди все більше часу проводять в приміщеннях з штучним світлом, де частка природного сонячного світла явно недостатня для ефективної роботи. Це одна з причин високого споживання енергії для освітлення офісних і виробничих приміщень. Запропонована система передачі сонячного випромінювання по ВОК дозволяє вирішити проблему нестачі сонячного освітлення в приміщеннях без надходження природного сонячного світла скрізь вікна чи світлопрозорі отвори.

В умовах наростаючої екологічної кризи і підвищення вартості енергоресурсів в світі все більш широке застосування знаходять освітлювальні установки - системи передачі сонячного випромінювання на відстань по ВОК.

Технологія передачі сонячного випромінювання по ВОК - це сукупність світлотехнічних засобів, які концентрують денне світло, передають його на відстань і розсіюють у внутрішніх приміщеннях будівлі. Таким чином вирішується проблема доставки сонячного світла у внутрішні приміщення будівель і споруд, в яких відсутня можливість надходження сонячного світла скрізь вікна або скляні конструкції.

Існує безліч аргументів на користь вибору природного світла, так як людина найкраще пристосована до нього [1; 2]. Світло не тільки необхідне для виконання візуальних завдань, але також впливає на біологічні функції організму. Для людей в денний час для життя і трудової діяльності природне світло є більш сприятливим, ніж штучне. Природне освітлення також позитивно впливає на психофізіологічний стан людини.

Раціональне освітлення приміщень і робочих місць - одна з найбільш важливих вимог створення сприятливих і безпечних умов життя і праці людини.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Природне освітлення приміщень створюється прямим або відбитим денним світлом. Всі виробничі приміщення, а також приміщення з постійним перебуванням людей повинні мати природне освітлення, яке забезпечується бічним, верхнім або комбінованим світлом.

Енергія, яка використовується для освітлення досягає до 20% загальної енергії споживання.

Потреба в відновлюваних джерелах енергії сприяє розробкам різних методів, які зберігають або зменшують споживання невідновлюваних природних ресурсів. Альтернативні методи збереження енергії включають в себе такі технології, як використання систем природного освітлення, які можуть

освітлювати будівлі з використанням сонячного світла шляхом прийому, доставки та розподілу сонячного випромінювання в приміщення, де відсутнє надходження природного сонячного світла. Системи передачі сонячного випромінювання по ВОК знаходять все більш широке застосування за кордоном [3], [4], [5] в практиці проектування, будівництва та експлуатації освітлювальних установок сонячного освітлення.

Технологія сонячного освітлення з її ефективністю і відмінною якістю світла може повністю замінити електричні лампи під час сонячної погоди і, таким чином, збільшити енергозбереження будівельних додаткових штучних джерел світла.

Якість світла вимагає набагато більшої уваги, ніж приділяється в даний час. Наприклад, для офісу, щоб забезпечити добру якість робочого місця співробітника, ергономічним меблям, комп'ютеру, приділяється набагато більше коштів, ніж для освітлювального обладнання. Витрати на установку і, зокрема, на якість світла, складають дуже малу частину загальної вартості офісних приміщень. Крім того, можливі проблеми з якістю світла не розпізнаються або ігноруються більшістю людей. Для тих, хто працює в приміщеннях з низькою якістю світла, яке може викликати проблеми: наприклад, втому, депресію, низьку видимість деталей і проблеми розпізнавання кольору, характерна низька продуктивність праці.

Системи передачі сонячного випромінювання по ВОК складаються з наступних складових елементів:

1. Концентратор сонячного випромінювання;
2. Волоконно-оптичний кабель (ВОК);
3. Розсіювач світла.

Концентратор сонячного випромінювання являє собою модуль, який здійснює збір сонячного випромінювання і передачу його в ВОК. Він складається з блоку з набором лінз Френеля, який постійно орієнтований на сонце, і трекера, рівномірно слідкуючого протягом дня за сонцем. Таким чином сонячне світло може бути сфокусовано з відносно широкої області на блок оптоволоконного приймача, а потім передано в ВОК.

Волоконно-оптичний кабель (ВОК) складається з певної кількості оптичних волокон, рівних за кількістю лінз в концентраторі, які передають сонячне випромінювання на відстань.

Розсіювачі світла здійснюють прийом сонячного випромінювання від ВОК і розсіюють його в приміщенні. Вони можуть бути представлені двома типами пристроїв:

1. Пасивні розсіювачі світла передають в приміщення тільки сонячне випромінювання від ВОК;
2. Гібридні освітлювачі, які компенсують нестачу денного світла включенням до свого складу також світлодіодних джерел світла [6].

Основним елементом оптичного кабелю являється волоконний світловод, виготовлений у вигляді тонкого скляного волокна циліндричної форми, по якому здійснюється передача сонячних променів.

Волоконний світловод, як правило має двошарову конструкцію та складається зі серцевини та оболонки з різними показниками заломлення n_1 і n_2 .

Найбільш широке застосування здобули волоконні світловоди двох типів: східчасті та градієнтні. У східчастих світловодів показник заломлення в серцевині постійний та існує різкий перехід від n_1 серцевини до n_2 оболонки. Градієнтні світловоди мають безперервну плавну зміну показника заломлення в серцевині по радіусу світловоду від центру до периферії з максимумом на осі світловоду.

В свою чергу східчасті світловоди поділяють на одномодові та багатомодові. В одномодових світловодах діаметр серцевини сумірний з довжиною хвилі ($d \approx \lambda$), і по ньому передається лише один тип хвилі(мода). В багатомодових світловодах діаметр серцевини більший, ніж довжина хвилі($d > \lambda$), і по ньому поширюється більше число хвиль.

Практично серцевина світловода складає 4 – 8 мкм у одномодових і 50 мкм у багатомодових світловодів, діаметром оболонки 125 мкм. [7]

Серцевина служить для передачі сонячного випромінювання. Призначення оболонки – створення найкращих умов відбиття на межі, серцевина – оболонка та захист від випромінювання енергії в оточуюче середовище.

При $\lambda < d$ передача відбувається в результаті багатократного зигзагоподібного відбиття хвилі від межі поділу середовищ з різними показниками заломлення. Тому передача по світловодам можлива лише

в діапазоні дуже високих частот, коли, довжина хвилі менша ніж поперечні розміри (діаметр) направляючої системи (оптичної системи) та при передачі по волоконним світловодам повинен дотримуватись режим повного внутрішнього відбиття світлової хвилі на межі серцевини – оболочка світловода.

Розглянемо процес поширення електромагнітної хвилі по одношаровому волоконному світловоду методом геометричної оптики рис.1. [7]

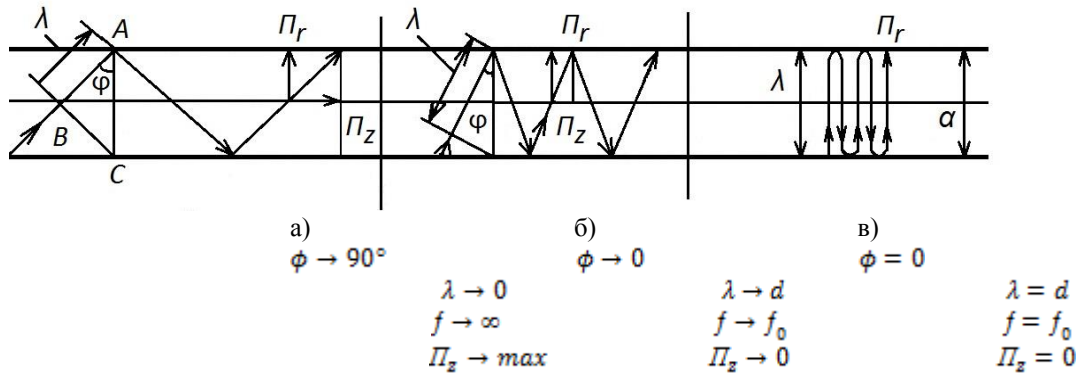


Рис.1. Зигзагообразне поширення електромагнітної хвилі при різних довжинах хвиль:

- а) – дуже коротких;
- б) – менш коротких;
- в) – критичних.

Тут світловий промінь утворює з поперечним перерізом світловода кут ϕ та багаторазово відбивається від межі серцевина-оболочка.

Між довжиною хвилі λ , діаметром світловоду d та кутом ϕ діє наступне співвідношення:

$$\cos \phi = \lambda/d.$$

На рис.1 наведені граничні випадки поширення малих довжин хвиль при $\lambda \rightarrow 0$ (рис.1, а) та хвиль сумірних з діаметром світловоду при $\lambda \rightarrow d$ (рис.1, б).

В першому випадку ($\lambda \rightarrow 0$, $f \rightarrow \infty$, кут $\phi \rightarrow 90^\circ$) відбиттів мало і хвиля прямує до прямолінійного руху вздовж світловоду. При цьому повздовжня складова вектора Пойтинга Π_z має максимальне значення і передача по світловоду проходить у вигідних умовах.

В другому випадку ($\lambda \rightarrow d$, $f \rightarrow c/d$, кут $\phi \rightarrow 0^\circ$) хвиля випробує велике число відбиттів і ходовий рух її надто малий. При цьому повздовжня складова Π_z прямує до нуля та вздовж світловода передається незначна доля енергії.

При певній довжині хвилі (рис.1,в) настає такий режим, коли $\phi=0$; хвиля падає на оболонку світловода і відбивається перпендикулярно. В світловоді установлюється режим стоячої хвилі і енергія вздовж світловода не переміщається. В даному випадку ми маємо справу з критичною довжиною хвилі $\lambda_0 = d$ та критичною частотою

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} = c/d.$$

Таким чином, в світловоді можуть поширюватись лише хвилі довжиною, меншої, ніж діаметр, серцевини світловода ($\lambda < d$). Однак в світловоді, з врахуванням того, що межею розподілу середовищ серцевина-оболонка, являються прозоре скло, можливо не тільки відбиття оптичного променя, але і проникнення його в оболонку. Для запобігання переходу енергії в оболонку і випромінювання її в навколишнє середовище необхідно дотримуватись умови повного внутрішнього відбиття. Реалізація цієї умови пристосованого до двошарового світловоду, зображено на рис.2. [1]

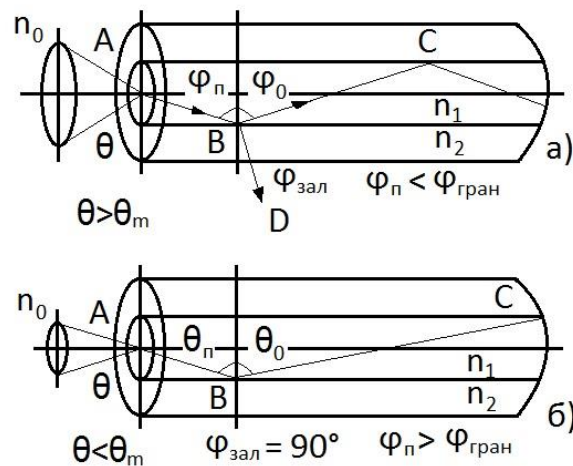


Рис.2. Поширення променя в волоконному світловоді:
 а – енергія випромінюється у зовнішнє середовище; б – повне внутрішнє відбиття

По законам геометричної оптики на межі серцевина-оболочка будуть падаюча хвиля (АВ) з кутом ϕ_n , відбита хвиля (BC) з кутом ϕ_0 та заломлена хвиля з кутом $\phi_{зал}$. Відомо, що при переході із середовища з більшою щільністю в середовище з меншою щільністю, тобто при $n_1 > n_2$, хвиля при певному куті падіння повністю відбивається та не переходить в інше середовище(рис.2,а). Кут падіння $\phi_n = \phi_{гран}$, починаючи з якого уся енергія відбивається від межі розділу середовищ, називається граничним кутом повного внутрішнього відбиття. Цей кут визначається із співвідношення [1]:

$$\sin \phi_{гран} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\mu_{r2} \epsilon_2 / \mu_{r1} \epsilon_1},$$

де μ_{r1} та ϵ_1 , μ_{r2} та ϵ_2 – відповідно магнітна та діелектрична проникність серцевини і оболонки. При $\phi_n > \phi_{гран}$ енергія, яка надійшла в серцевину, повністю відбивається і зигзагообразно поширюється по світловоду (рис.2, б). Чим більший кут падіння хвилі ϕ_n , тим кращі умови поширення і тим швидше хвиля надійде до приймального кінця. В цьому випадку вся енергія концентрується в серцевині світловода та практично не випромінюється в зовнішнє середовище.

При куті, меншим кута повного відображення, тобто $\phi_n < \phi_{гран}$, енергія проникає в оболонку, випромінюється в зовнішнє середовище, і передача по світловоду неефективна (рис.2, а).

Режим повного внутрішнього відбиття залежить від діаграми направленості джерела випромінювання.

Апертурний кут θ_m – це кут між оптичною віссю і однією із складових світлового конусу, який потрапляє в торець волоконного світловода, при якому $\phi_n = \phi_{гран}$.

Як видно з рис.2, світловод пропускає лише світло, яке замкнуте у межах тілесного кута Ω_A , обмежене конусом з кутом повного внутрішнього відбиття θ_m при вершині.

Зазвичай, користуються поняттям числової апертури [1]

$$NA = n_0 \sin \theta_m = n_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

де n_0, n_1, n_2 – показники заломлення зовнішнього середовища серцевини і оболонки.

Якщо торець світловода межує з повітрям [7], то $n_0 = 1$, а

$$NA = \sin \theta_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Як видно з рис.2, між граничним кутом повного внутрішнього відбиття $\phi_{гран}$ та апертурним кутом падіння променя θ_m існує взаємозв'язок. Чим більший кут $\phi_{гран}$, тим менший апертурний кут оптичного волокна θ_m .

Ввід променя в торець волоконного світловода слідує здійснювати під кутом, меншим апертурного кута волокна θ_m . До тих пір, поки кут падіння променя θ_n більше, ніж $\theta_{\text{гран}}$, промінь буде випробувати повне внутрішнє відбиття на межі серцевина-оболонка і передача буде проходити ефективно, в основному без випромінювання енергії в навколишнє середовище.

Особливістю світловода є наявність критичної частоти – частоти відсічки f_0 , нижче якої енергія не поширюється, а вище відбувається процес передачі. Раніше було відомо, що між довжиною хвилі λ та діаметром серцевини світловода d існує співвідношення:

$$\cos \theta = \lambda/d,$$

де θ – кут падіння хвилі на межу серцевина-оболонка.

Маючи на увазі, що $\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta}$, та використовуючи умову повного внутрішнього відбиття $\sin \theta = n_2/n_1$, отримуємо $\cos \theta = \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2}$. Прирівнюючи праві частини виразів косинусів, отримуємо $\lambda_0/d = \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2}$.

Відповідно критична довжина хвилі волоконного світловода визначається формулою [7]:

$$\lambda_0 = d \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = (d/n_1) \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Критична частота [7]:

$$f_0 = \frac{v_1}{\lambda_0} = \frac{v_1}{d_1} * \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}} = \frac{c}{d} * \frac{1}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}},$$

де v_1 – швидкість поширення енергії в серцевині світловода.

Аналізуючи одержані співвідношення, можливо відмітити, що чим більший діаметр серцевини волоконного світловода d і чим більше відрізняються показники заломлення серцевини n_1 , та оболонки n_2 , тим більша критична довжина хвилі і відповідно нижча критична частота.

Вище сказане дає підставу зробити висновок, що при частотах вище критичної f_0 енергія поля концентрується в середині серцевини світловода та ефективно поширюється вздовж нього.

Нижче критичної частоти енергія розсіюється в навколишнє середовище і не передається по світловоду.

Важливими параметрами волоконного світловода являються втрати та відповідно послаблення. Ці параметри визначають дальність поширення випромінюваних променів по оптичному кабелю та його ефективність.

Послаблення світловодних трактів волоконно-оптичних кабелів α обумовлено власними втратами у волоконних світловодах α_s та додатковими втратами, так названими кабельними α_k , зумовленими деформацією та згинами світловодів при накладанні покриттів та захисних оболонок у процесі виготовлення оптичних кабелів.

Власні втрати волоконних світловодів складаються в першу чергу із втрат поглинання α_n та втрат розсіювання α_p . Втрати на поглинання істотно залежать від чистоти матеріалу та при наявності сторонніх домішок α_d можуть бути значними. В результаті $\alpha_s = \alpha_n + \alpha_d + \alpha_p$. [7]

Послаблення в результаті поглинання α_n зв'язано з втратами на діелектричну поляризацію, лінійно зростає з частотою та значно залежить від властивості матеріалу світловода ($\tan \delta$).

Втрати обумовлені комплексним характером показника заломлення $n = n_0 + jn_u$, котрий зв'язаний з $\tan \delta$ виразом

$$\tan \delta = 2n_0 n_u / (n_0^2 - n_u^2). [7]$$

Послаблення у результаті поглинання визначається співвідношенням втрат в світловоді P_s до подвійного значенню повної потужності P , поширюваної по волоконному світловоду [7]:

$$\alpha_n = P_s/2P, \text{ де } P_s = GU^2; P = U^2/Z.$$

Тоді $\alpha_n = 1/2GZ$. В останніх формулах U – напруга; $G = \omega \epsilon \tan \delta$ – провідність матеріалу світловода; $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$ – хвильовий опір.

Використовуючи умову $v = c/n$ та $c = f\lambda$, отримуємо остаточно [7]: $\alpha_n = \pi n \tan \delta / \lambda$, де $n = \sqrt{\mu \epsilon}$ – показник заломлення; λ – довжина хвилі; $\tan \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат в світловоді.

Виражаючи $\tan \delta$ через комплексний показник заломлення, отримаємо: $\alpha_n = \left(\frac{\omega}{v}\right) n_i n_{ix} / (n_o^2 - n_{ix}^2)$.

Якщо коефіцієнт заломлення має дійсне значення $n = n_o$, то $\tan \delta = 0$ і втрати на поглинання відсутні.

Із формули видно, що частотна залежність послаблення в результаті поглинання має лінійний характер при постійних значеннях n .

Розсіювання обумовлене неоднорідністю матеріалу волоконного світловоду, розміри яких менші довжини хвилі, та теплової флуктуації показника заломлення.

Втрати на розсіювання, дБ, визначаються формулою [7]:

$$\alpha_p = (8\pi^3/3\lambda^4)(n^2 - 1)KT\kappa,$$

де K – постійна Больцмана; T – температура переходу; κ – стисканість; n – показник заломлення.

Таке розсіювання являється релєвським, воно зростає з частотою пропорційно f^4 . Втрати на релєвське розсіювання визначають нижню границю втрат, притаманним волоконним світловодам. Ця границя розрізняється для різних хвиль та з збільшенням довжини хвилі зменшується.

На рис.3 представлені частотні залежності коефіцієнта послаблення волоконного світловода. Із наведених даних видно, що втрати на поглинання зростають лінійно із збільшенням частоти, а втрати на розсіювання – зростають швидше – пропорційно f^4 .

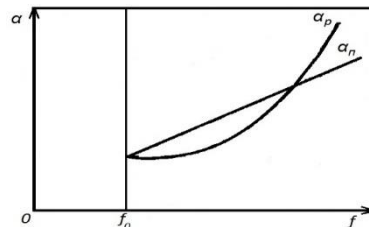


Рис.3. Частотна залежність послаблення поглинання α_n та послаблення розсіювання α_p

ВОК повинен передавати весь спектр видимого сонячного випромінювання, бути недорогим і зручним для монтажу систем. Для цих цілей найбільш підходить пластиковий ВОК на основі ПММА (поліметилметакрилат) [8].

На рис.4 представлені спектри денного сонячного випромінювання і спектри випромінювання різних джерел світла.

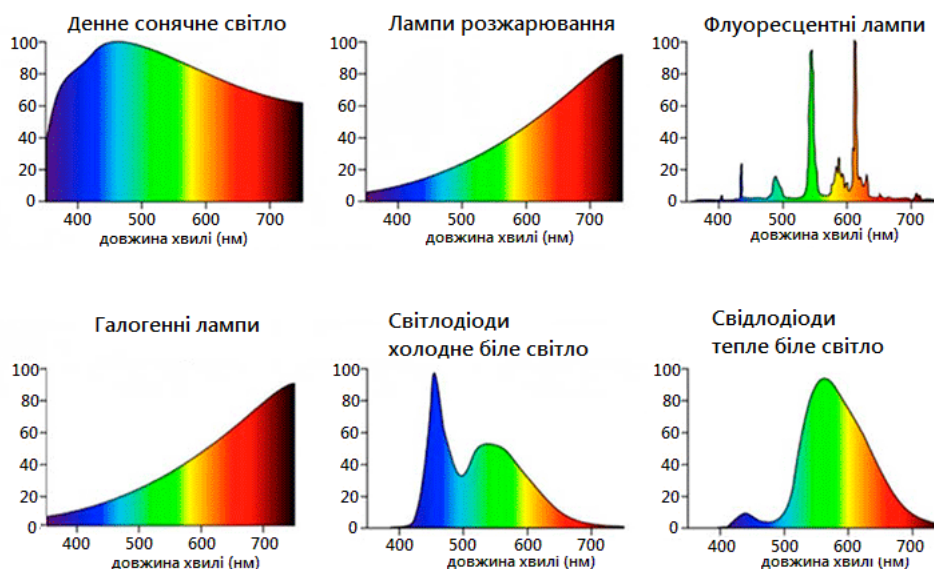


Рис.4. Спектри випромінювання різних джерел світла

Проаналізувавши ці спектри можна зробити висновок, що, з точки зору якості випромінювання для людини і енергоефективності світла, жодне із штучних джерел світла не відповідає спектру сонячного світла. Тому передача сонячного випромінювання по ВОК в приміщення, де відсутнє надходження сонячного світла через вікна, є найкращою [9].

Об'єктами впровадження таких систем освітлення є виробничі, адміністративні та громадські будівлі, що мають протяжні коридори без доступу природного світла. Також цими об'єктами можуть бути торгові центри з великою площею даху, внутрішні коридори і приміщення багатоквартирних і приватних будинків.

Вартість систем повинна бути такою, щоб термін окупності обладнання при освітленні великих об'єктів: супермаркетів, виробничих приміщень за показниками витрати електроенергії і підвищення продуктивності праці становив до 5 років.

Основними причинами, за якими запропоновані системи не знайшли широкого застосування є:

- відсутність дешевих розсіювачів і пристроїв концентрації світла;
- відсутність дешевого ВОК з малими втратами в області видимого спектру, що обмежує дальність передачі світла до десятків метрів;
- відсутність високої культури населення та професіоналів в галузі енергозбереження.

В даний час у зв'язку з бурхливим зростанням і здешевленням світлодіодного і оптоволоконного освітлення, назріла необхідність впровадження систем передачі сонячного випромінювання по ВОК і розробки дешевих розсіювачів і пристроїв концентрації світла.

Найбільш відомі комерційно успішні проекти - це системи HIMAWARI [3], PARANS [4].

Система HIMAWARI представляє собою прозорий купол, всередині якого розташовані від 12 до 36 лінз Френеля, розташованих на конструкції, яка стежить за сонцем.

Уся конструкція розташовується на найвищій точці даху будівлі і по ВОК сонячне випромінювання передається в будівлю.

Система PARANS являє собою прямокутну конструкцію, розташовану на металевому каркасі з трекером, що стежить за сонцем.

Нами були вивчені конструктивні особливості цих систем. Був проведений патентний аналіз, переглянуто велика кількість технічних рішень концентраторів світла, визначені основні технічні та конструктивні характеристики систем. З'ясовано, що основним критичним параметром, що обмежує застосування цих систем, є їх вартість.

В якості основних шляхів розвитку цих систем виділені наступні:

1. Найбільш простою і технологічно відтворюваною є конструкція концентратора світла у вигляді прямокутної конструкції з набором лінз Френеля, розташованих у три або чотири ряди по 6-8 лінз діаметром від 8 до 12см. Тоді розміри конструкції можуть перебувати в межах близько 1,5 м x 1 м x 0,3м.
2. ВОК повинен являти собою кабель в твердій оболонці, усередині якої розташовані світловоди, в якості яких найбільш раціональним з економічної точки зору є застосування пластикових світловодів на основі ПММА (поліметилметакрилат).
3. Діаметр світловодів повинен бути близько 3мм..
4. Довжина ВОК не повинна перевищувати 15м при використанні світловодів на основі ПММА..
5. Кількість розсіювачів світла може коливатися від 2 до 6 для одного приміщення площею 15-20кв.м.
6. Для ефективної роботи системи необхідно використання трекера, який стежить за сонцем.
7. Для виключення впливу погодних умов на рівень освітленості в приміщенні переважно застосування гібридного освітлення, яке включає в свій склад світильники, компенсуючі нестачу денного світла з концентратора використанням доповнюючого світлодіодного освітлення.
8. Живлення трекера і світлодіодних світильників може здійснюватися від сонячних панелей, встановлених на одній конструкції з концентраторами сонячного випромінювання. Електрична енергія від сонячних панелей надходить в акумулятор через спеціальний контролер, який керує роботою трекера і світлодіодних світильників.
9. Для того, щоб система була економічно вигідною та окупною в 5 річний термін, її ціна не повинна перевищувати приблизно 1-2 тис. євро.

ВИСНОВКИ

Масове впровадження в практику сучасного будівництва систем передачі сонячного випромінювання по ВОК в приміщення в перспективі призводить до таких позитивних результатів:

- поліпшується освітленість внутрішніх приміщень будівель природним світлом в денний час при найменших енерговитратах;
- світлові прорізи в конструкціях перестають відігравати домінуючу роль у висвітленні

внутрішніх просторів будівель, що дозволяє якісно змінювати архітектурні форми будівель;

- така автономна система освітлення відповідає екологічним стандартам якості;
- видимий спектр сонячного випромінювання надає позитивний вплив на здоров'я людей.
- системи передачі сонячного світла по ВОК мають властивості оптичних фільтрів, передаючи в приміщення тільки видиму складову частину спектру сонячного випромінювання (без УФ та ІЧ складових), зменшуючи передачу теплової енергії в приміщення, що дозволяє зменшити витрати енергії на кондиціювання.

Перераховані вище переваги застосування систем передачі сонячного випромінювання по ВОК дозволяють віднести їх до енергозберігаючих і екологічно чистих технологій. Ці системи відповідають вимогам часу в питанні енергоефективного «зеленого» будівництва. Також матимуть місце позитивні соціальні результати: зниження стомлюваності працівників на робочих місцях, підвищення ефективності роботи торгових підприємств, зниження денної навантаження на електричні мережі за рахунок зменшення часу використання штучних джерел світла.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hathaway, W. E., Hargreaves, J.A., Thompson, G.W. & Novitsky, D. (1992), A study into the effects of light on children of elementary school age – A case of daylight robbery, Alberta. Dept. of Education, Edmonton. Planning and Information Services.
2. Franta, G. & Anstead, K. (1994). Daylighting offers great opportunities, Window & Door Specifier-Design Lab, pp. 40-43.
3. HIMAWARI Solar Lighting System. Available online: http://www.himawari-net.co.jp/e_page-index01.html (accessed on 14 December 2015).
4. PARANS Product Information. Available online: <http://www.parans.com/eng/sp3/> (accessed on 14 December 2015).
5. <http://www.echy.fr/>
6. Yuexia Lv, Longyu Xia, Jinyue Yan, Jinpeng Bi. Design of a hybrid fiber optic daylighting and PV solar lighting system. REM 2017, 18–20 October 2017.
7. И.И. Гроднев, Ю.Т. Ларин, И.И. Теумин (1985). Оптические кабели. Конструкции, характеристики, производство и применение. М.: Энергоатомиздат.
8. Christopher G. Werring, (2009) “Design And Application Of Fiber Optic Daylighting Systems,” Dept. of Architectural Engineering & Construction Science, College of Engineering, Kansas State University.
9. В.П.Кожем'яко, Є.О.Ходяков, О.О.Кузін. (2016) Сучасні енергозберігаючі освітлювальні пристрої, побудовані на основі оптичної системи передачі сонячного випромінювання на відстань по волоконно-оптичних кабелях (ВОК). Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 1 (31), 74-81.

Надійшла в редакцію 15.04.2018

ПАВЛОВ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ — д-р техн. наук, професор, проректор по науковій роботі, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

ХОДЯКОВ ЄВГЕНІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ — провідний інженер кафедри лазерної та оптоелектронної технології, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

МАРЦЕВ МИКОЛА ПАВЛОВИЧ — науковий співробітник, Вінниця, Україна