

Умови забезпечення енергоощадного використання світлопрозорих зовнішніх огорожувальних конструкцій

Віталій Бурмака^{a,*}, Микола Тарасенко^a, Катерина Козак^a, Наталія Сабат^b, Віктор Хомишин^a, Володимир Юськів^a

^aТернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 46001, Україна

^bІвано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 76019, Україна

Отримано: 28 серпня, 2020. Рецензовано: 12 жовтня, 2020. Прийнято: 19 листопада, 2020.

© 2020 Автори. Опубліковано Національним університетом «Львівська політехніка».

Анотація

Стаття присвячена визначенню впливу властивостей світлопрозорих зовнішніх огорожувальних конструкцій (СЗОК) на сумарний енергетичний баланс приміщення. Розглянуто вплив термічного опору та коефіцієнту відносного проникнення сонячної радіації (КВПРС) застосування СЗОК на величину витрати електроенергії в опалювальний та охолоджувальний періоди для компенсації втрат та надходжень теплової енергії відповідно. Визначено залежність витрат електроенергії на штучне освітлення від величини коефіцієнта природного освітлення в розрахунковій точці на робочій поверхні, КВПРС та від площі СЗОК для м. Тернопіль. Встановлено залежність між витратами електроенергії на опалення та охолодження приміщення каналними кондиціонерами від розмірів та властивостей СЗОК. Це дає можливість визначати ті значення термічного опору та КВПРС, при яких використання СЗОК дозволить зменшити сумарне споживання електроенергії офісним приміщенням. Отримано нерівності, які дозволяють визначати термічний опір, КВПРС та площу СЗОК при яких буде виникати економія електроенергії при дотриманні нормованих показників клімату приміщення. Незважаючи на те, що результати розрахунків представлені тільки для м. Тернопіль, розроблена методика дійсна для будь-якого регіону.

Ключові слова: СЗОК; коефіцієнт природного освітлення; зведений індекс застосування приміщення; енергоефективність природного освітлення.

1. Вступ

Використання сонячного світла для освітлення приміщень – один з очевидних шляхів економії електроенергії. Людина біологічно пристосована до природного світла. Оптимальне його використання здатне суттєво зменшити витрати електроенергії на штучне освітлення. Для цього необхідно правильно підібрати розміри та теплотехнічні характеристики світлопрозорих зовнішніх огорожувальних конструкцій (СЗОК).

У теперішній час основна увага при вирішенні питання освітлення приміщень зосереджена на використанні штучних джерел світла, які згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства, споживають близько 19% загальних світових витрат електроенергії [1]. Електричне освітлення приміщень все ще домінує в області створення світлового простору. Дієві норми природного освітлення приміщень є лише у європейських країнах.

Саме тому провідні спеціалісти розвинутих країн світу вважають особливо актуальним питання правильної організації природного освітлення різного роду приміщень. Застосування тільки одного виду освітлення у більшості випадків є не тільки нераціональним, але й не відповідає потребам людини у збереженні її здоров'я. Так, повна відсутність природного світла, відповідно до нормативів з охорони праці, вважається шкідливим фактором.

* Автор-кореспондент. Електронна адреса: vitaliy.burmaka@gmail.com

Дослідження енергоефективності використання бокового природного освітлення проводились як в Україні, так і за кордоном. В Україні це питання досліджували: О.Л. Підгорний та О. В. Сергійчук [2], В.Л. Мартинов [3], О.І. Філоненко [4, 5] та ін. За кордоном – С.І. Самойлов і О. К. Соловйов [6], D.K. Arasteh [7-9], R. Hart [8], H. Goudey [8, 9], A. S. Muhaisen [10], К.Н. Клевец [11], І.А. Колесник [12], D. Zekraoui [13], Н. Bülow-Hübe [14], J. M. A. Melendo [15], S. Dipa [16] та ін.

2. Мета роботи

Визначення тих параметрів СЗОК, при яких виникатиме зменшення сумарного споживання електроенергії в офісному приміщенні. З практичної точки зору, отриманий результат дозволить визначати необхідні площу СЗОК, КВПСР і термічний опір, при яких економія від зменшення тривалості використання штучного освітлення буде більшою, а ніж витрати електроенергії на компенсацію теплових втрат та надходжень через СЗОК за рік.

3. Аналіз досліджень та публікацій

Питання раціональної орієнтації СЗОК енергоефективних будівель розглядалось в [3, 10, 17]. Проте авторами не було враховано надходження тепла від сонячної радіації під час опалювального та охолоджувального періодів. До уваги була взята тільки величина термічного опору, що не дозволяє стверджувати про однозначність отриманих результатів для інших значень. Відповідно не встановлений і вплив сонячної радіації, яка проникає в приміщення, на енергоефективність будівель. У [11] розглянуто питання щодо надходження тепла від сонячної радіації через СЗОК південного фасаду в зимовий і літній періоди року, при наявності і відсутності сонцезахисних пристроїв. Проте, в статті не розглянуті питання щодо впливу орієнтації та коефіцієнту відносного проникнення сонячної радіації (КВПСР) через СЗОК на величину теплонадходжень в будівлю. В [12] проведено аналіз впливу теплотехнічних характеристик СЗОК на стан мікроклімату приміщень в опалювальний період. Автори визначили вплив інтегрального теплового опору СЗОК на величину втрат тепла в опалювальний період, але не акцентували увагу на пори року та орієнтацію СЗОК. У [13] розглянуті питання щодо впливу орієнтації і площі заклення СЗОК на тепловтрати і теплонадходження в офісні приміщення з певними значеннями теплового опору зовнішніх огорожувальних конструкцій (ЗОК). Але знехтувано надходженнями тепла від сонячної радіації в опалювальний період. В [14-16] досліджено вплив орієнтації та розміру СЗОК на споживання електроенергії для опалення та охолодження приміщень. Вплив теплового опору та КВПСР в приміщення не було взято до уваги.

В [18] Встановлена залежність економічно доцільного опору теплопередачі зовнішніх стін цивільних будівель для різних регіонів України від кількості градусо-днів опалювального періоду та наведено аналітичний опис результатів розрахунку. Отримані результати дозволяють удосконалити підходи до нормування необхідного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій на основі урахування вартості теплової енергії та кліматичних характеристик району розміщення будівельного об'єкта.

Відповідно до [19], використання денного світла дозволяє зекономити до 2/3 електричної енергії на штучне освітлення приміщень. Дані отримані на макеті приміщення, зменшеному в 50 раз з конкретними розмірами. Для приміщень інших розмірів отримані результати не можуть бути застосовані.

У [20] проводились дослідження втрат тепла через СЗОК та витрат електроенергії на видалення тепла, яке через нього надходить. Проте визначення оптимальної площі СЗОК, з точки зору ефективного використання природного освітлення, для офісних приміщень, залишилось поза увагою. В [21] досліджувалось оптимальне значення світлового коефіцієнта (СК) для декількох приміщень різної форми і площі. Недоліком отриманих результатів є те, що отримані результати справедливі тільки для тих приміщень, які розглядалися в дослідженні.

Дослідження, щодо приросту надходження сонячної енергії і аналіз енергоспоживання для опалення приміщень житлових будинків із монолітними стінами, оснащених експериментально досяжним значенням термічного опору нового потрійного вакуумного склопакету, було проведено в [22]. Річна вартість обігріву приміщень з однокамерними склопакетами була зменшена на 15,31% (\approx USD 90,7) завдяки використанні трикамерних склопакетів. Вплив загальних втрат тепла через монолітну огорожувальну конструкцію житлового будинку було проаналізовано за допомогою стаціонарних розрахунків, які показують падіння на 10,23% при використанні трикамерних склопакетів в порівнянні з однокамерними.

В роботах [23-27] проведено дослідження удосконалення методики проектування природного освітлення приміщень будівель. В [23] розглянуто розподілу природного освітлення у приміщеннях лекційних аудиторій. В [25] і [26] проаналізовано та удосконалено існуючі методики розрахунку природного освітлення. Та в результаті отримано комплексний метод розрахунку освітлення будівель при ясному та хмарному небі [27]. Проте дані дослідження були спрямовані лише на підвищення ефективності природного освітлення без врахування тепловтрат та теплонадходжень через СЗОК. В [24] проведено експериментальні дослідження теплотехнічних властивостей світлопрозорих огорожувальних конструкцій, але не враховано економію від використання природного освітлення.

Аналіз тенденції оцінок енергоефективності освітлення офісних приміщень показує, що в розвинених країнах витрати електроенергії на освітлення знаходяться в межах від 5 до 15%. В той час як у країнах, що розвиваються вони можуть сягати до 86% [28, 29]. В Європі на освітлення приміщень витрачається понад 40% від споживаної енергії [30]. Витрати на штучне і природне освітлення залежать від того, які ОУ використовуються. В [26] встановлено, що найбільш енергоефективними є люмінесцентне та світлодіодне освітлення, а світлові колодази або світловоди – це, на даний час, економічно недоцільний варіант.

Авторами статті [31] розрахована питома вартість одиниці світлової енергії виробленої джерелом світла за середню тривалість світіння (грн·Вт/(Млн·год)) при генеруванні її лампами розжарення, компактними люмінесцентними лампами та світлодіодними джерелами світла (ДС). У [32] більш детально розглянуто всю гаму існуючих ДС. Для кожного типу ДС вибиралися лампи з мінімальними і максимальними номінальними світловими віддачами. Енергетичні параметри, пов'язані з перегрівом приміщень в літній період часу переохолодженням зимою не розглядалися.

Це вказує на те, що дослідження щодо визначення впливу термічного опору, КВПСР та засклення СЗОК на витрати електроенергії для компенсації втрат тепла в опалювальний період та його видалення в період охолодження є актуальними.

4. Результати досліджень

Визначення залежності втрат тепла від величини термічного опору СЗОК проводились за методикою представленою в [33]. Були проаналізовані приміщення, параметри яких відповідають вимогам чинних нормативних документів України (ДБН В.2.5-28-2006, ДСТУ Б В.2.6-23:2009 та ДБН В.2.6-31:2016).

Для опалення та охолодження приміщень була вибрана спліт-система з штучною вентиляцією. Робоча температура системи опалення, відповідно до [42] становить 20°C. Робоча температура системи охолодження – 26°C. Всі розрахунки проведено для м. Тернопіль (49°34' пн. ш. 25°36' сх. д.).

На даний час розроблено велика кількість безкоштовних, високоточних програм для розрахунку природного освітлення, достовірність яких перевірена реальними вимірюваннями в [36, 37]. Тому розрахунки автономності природного освітлення (АПО) проведено в програмі Relux. Розрахунки проводилися виходячи з даних розміщення приміщення і величини КПО в розрахунковій точці (РТ) на робочій поверхні (РП).

Визначення втрат тепла через СЗОК з різним тепловим опором проводилися згідно з методиками наведеними в СНиП II-4-79 і ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. При розрахунках розглядалися будівлі, параметри яких відповідають вимогам чинних нормативних документів України (ДСТУ-Н Б В.2.6-83:2009, ДБН В.2.5-28:2018, ДСТУ Б В.2.6-23:2009, ДБН В.2.6-31:2016, ДСТУ Б EN 15251, СНиП II-33-75, ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 і ДСТУ-Н Б В.1.1-27 2010). Відповідно до них були вибрані значення розрахункових величин огорожувальних конструкцій та навколишнього середовища. Всі розрахунки були проведено для м. Тернополя.

Кількість витраченої або зекономленої електроенергії за рахунок зміни властивостей СЗОК визначалась за формулою (1)

$$W_{\text{СЗОК}} = W_{\text{Ш.О}} - \omega, \text{ (кВт}\times\text{год)/рік}, \quad (1)$$

де $W_{\text{Ш.О}}$ – електроенергія зекономлена за рахунок використання природного освітлення, (кВт×год)/м²; ω – електроенергія, яку споживає кондиціонер для компенсації тепловтрат та теплонадходжень через СЗОК, (кВт×год)/рік.

Електроенергія зекономлена за рахунок використання природного освітлення визначалась за формулою (2)

$$W_{\text{ш.о}} = (S_{\text{п}} \cdot p_{\text{ш.о}} \cdot \text{АПО}_{300}), (\text{кВт} \times \text{год}) / \text{рік}, \quad (2)$$

де $S_{\text{п}}$ – площа підлоги приміщення, м^2 ; $p_{\text{ш.о}}$ – питома потужність штучного освітлення, $\text{кВт} \times \text{год} / \text{м}^2$; АПО_{300} – автономність природного освітлення (при нормованому значенні освітленості 300 лк), $\text{год} / \text{рік}$;

АПО_{300} можна визначити в спеціалізованому програмному забезпеченні Relux, для будь якої локації. Відповідно до [36], для довільних розмірів приміщень та площі СЗОК, в м. Тернопіль, АПО_{300} визначалась за формулою (3) з стандартним відхиленням 82,6 і коефіцієнтом детермінації 0,979.

$$\text{АПО}_{300} = -0,227 \cdot I_{\text{зс.п}}^2 + 45,854 \cdot I_{\text{зс.п}} - 420,953, \text{ год} / \text{рік}, \quad (3)$$

де $I_{\text{зс.п}}$ – зведений індекс засклення приміщення [37], %.

Відповідно до [36, 37] ЗІЗП визначалась за формулою (4)

$$I_{\text{зс.п}} = 1,1 \cdot 0,8 / \varepsilon_{\text{зс}} \cdot (-2,148 \cdot \text{КПО}^2 + 27,087 \cdot \text{КПО} + 0,487), \%, \quad (4)$$

де 1,1 – коефіцієнт запасу [37]; $\varepsilon_{\text{зс}}$ – КВПСР через засклення СЗОК, відн. од.

Відповідно до [33] витрати електроенергії на роботу кондиціонера для компенсації тепловтрат та теплонадходжень через СЗОК визначаються за виразом (5).

$$\omega = (\omega_{\text{оп}} - Q_{\text{оп}}) / \text{COP} + Q_{\text{ох}}^{\text{макс}} / \text{ERR}, (\text{кВт} \times \text{год}) / \text{рік}, \text{ EER} \quad (5)$$

де $\omega_{\text{оп}}$ – втрати теплової енергії через СЗОК, $(\text{кВт} \times \text{год}) / \text{рік}$; $Q_{\text{оп}}$ – надходження сонячної радіації через СЗОК за опалювальний період, $\text{кВт} \times \text{год}$; COP – коефіцієнт перетворення, означає заявлену потужність для нагрівання повітря $[\text{кВт}]$, поділену на вхідну номінальну потужності для опалення $[\text{кВт}]$ приміщення, яка забезпечує обігрів за стандартних умов випробувань $\text{кВт} / \text{кВт}$; $Q_{\text{ох}}^{\text{макс}}$ – Найбільше значення радіаційних надходжень тепла в робочу зону впродовж охолоджувального періоду, $\text{кВт} \times \text{год} / \text{рік}$; EER – номінальний коефіцієнт енергоефективності, означає заявлену потужність для охолодження повітря $[\text{кВт}]$, поділену на вхідну номінальну потужність для охолодження $[\text{кВт}]$ приміщення за стандартних умов випробувань, $\text{кВт} / \text{кВт}$.

Втрати теплової енергії визначались як різниця між втратами через СЗОК і втратами через ту ж площу ЗОК. Втрати теплової енергії через СЗОК, $(\text{кВт} \times \text{год}) / \text{рік}$ з наявністю опції чергового опалення в неробочий час, згідно з СНиП II-4-79, визначалися за формулою (6)

$$\omega_{\text{оп}} = \left(10^{-3} \cdot 1,1 \cdot (1,3 + \eta) \cdot (1 / R_{\text{СЗОК}} - 1 / R_{\text{ЕК}}) \cdot z_{\text{оп}} \cdot S_{\text{СЗОК}} \times \right. \\ \left. \times [(t - t_{\text{з.ср}}) \cdot T + (t_{\text{ч}} - t_{\text{з.ср}}) \cdot (8760 - T)] \right) / 365, (\text{кВт} \times \text{год}) / \text{рік}, \quad (6)$$

де 1,1 – коефіцієнт, який враховує втрати тепла в системах опалення [38], відн. од.; 1,3 – коефіцієнт, який враховує втрати тепла на нагрівання зовнішнього повітря, яке надходить через СЗОК [38], відн. од.; η – коефіцієнт, який враховує додаткові втрати тепла через ЗОК, вибирається з [40, дод. 5, табл. 2] (табл. 1), відн. од.; $R_{\text{СЗОК}}$ – термічний опір СЗОК, $(\text{м}^2 \times \text{°C}) / \text{Вт}$; $R_{\text{ЕК}}$ – економічно доцільний термічний опір ЗОК [39], $(\text{м}^2 \times \text{°C}) / \text{Вт}$; $t_{\text{з.ср}}$ – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період [42], °C ; t – розрахункова зимова температура повітря всередині приміщення в робочий час [42], °C ; T – річна тривалість робочого часу, приймається 2150 год – при роботі в одну зміну; 4300 год – при роботі в дві зміни; 6500 год – при роботі в три зміни, $\text{год} / \text{рік}$; $S_{\text{СЗОК}}$ – площа СЗОК в покритті чи стіні, м^2 ; $z_{\text{оп}}$ – тривалість опалювального періоду для житлових приміщень [43], діб; $t_{\text{ч}}$ – температуру повітря при черговому опаленні [46], °C .

З [44, 45] відомо, що відносна площа засклення залежить від пропорцій СЗОК, а термічний опір від величини площі його профілю, засклення і заінення. Тому для кращої репрезентативності результатів аналізу було прийнято СЗОК гомогенною (з однаковим тепловим опором по всій площі), з відносною площею засклення рівною 1.

Таблиця 1 Додаткові втрати тепла для зовнішніх вертикальних поверхонь

Орієнтація вікна	Пд	Пн, Сх	Зх
η , %	0	10	5

В неробочий час при черговому опаленні температуру повітря всередині приміщення ($t_{\text{ч}}$) прийнято рівною 5°C для виробничих і 10-12°C для всього об'єму офісних приміщень [46].

Відповідно до [33] вираз для визначення втрат теплової енергії в опалювальний період $\omega_{\text{оп}}$, (кВт×год)/рік через СЗОК для м. Тернопіль при наявності опції чергового опалення в неробочий час має вигляд (7)

$$\omega_{\text{оп}} = 89,44 \cdot S_{\text{СЗОК}} \cdot (1,3 + \eta) \cdot (1/R_{\text{СЗОК}} - 1/R_{\text{ЕК}}), \text{ (кВт×год)/рік.} \quad (7)$$

У зв'язку з тим, що втрати тепла через СЗОК прямо пропорційні її площі вираз (8) можна використовувати для розрахунків СЗОК будь-яких розмірів. Оскільки залежність втрат тепла через СЗОК від орієнтації характеризується лише коефіцієнтом додаткових втрат теплової енергії, то і сумарні втрати будуть відрізняються від них на теж саме значення [33].

Надходження сонячної радіації через СЗОК за опалювальний період ($Q_{\text{оп}}$), для фасадів будинку, орієнтованих за чотирма напрямками – південь (Пд), північ (Пн), захід (Зх) і схід (Сх), визначалися, згідно [39], за виразом (8)

$$Q_{\text{оп}} = \zeta_{\text{СЗОК}} \cdot \varepsilon_{\text{ЗС}} \cdot (S_{\text{Пд}} \cdot I_{\text{Пд}} + S_{\text{Пн}} \cdot I_{\text{Пн}} + S_{\text{Зх}} \cdot I_{\text{Зх}} + S_{\text{Сх}} \cdot I_{\text{Сх}}), \text{ (кВт×год)/рік,} \quad (8)$$

де $\zeta_{\text{СЗОК}}$ – коефіцієнт, що враховує затінення СЗОК непрозорими елементами [47, табл. 1], відн. од.; $S_{\text{ЗС.Пд}}$, $S_{\text{ЗС.Пн}}$, $S_{\text{ЗС.Зх}}$, $S_{\text{ЗС.Сх}}$ – площа СЗОК у фасаді будинку, орієнтованих на Пд, Пн, Зх і Сх, відповідно, м²; $I_{\text{Пд}}$, $I_{\text{Пн}}$, $I_{\text{Зх}}$, $I_{\text{Сх}}$ – середня величина сонячної радіації за опалювальний період, спрямована на вертикальну поверхню за умов хмарності, відповідно орієнтовану на Пд, Пн, Зх і Сх [39, табл. 2], (кВт×год)/м².

Вихідні дані для визначення надходження сонячної радіації через СЗОК за опалювальний період для м. Тернопіль наведено в табл. 2.

Таблиця 2 Вихідні дані для розрахунку надходження сонячної радіації через СЗОК за опалювальний період

Величина	$I_{\text{Пд}}$, (кВт×год)/м ²	$I_{\text{Пн}}$, (кВт×год)/м ²	$I_{\text{Зх}}$, (кВт×год)/м ²	$I_{\text{Сх}}$, (кВт×год)/м ²
Значення	249,2	86,1	145,6	142,2

В (9) для врахування непрозорих елементів СЗОК використовується коефіцієнт $\zeta_{\text{СЗОК}}$, який, відповідно до кількості камер та компонування склопакетів вказує, на частку площі СЗОК, через яку сонячна радіація проникатиме в приміщення. Тобто він вказує відносну площу засклення СЗОК ($\zeta_{\text{СЗОК}} = S_{\text{ЗС.СЗОК}}$). Його недоліком є те, що він не враховує площі СЗОК, а відповідно до [44], відносна площа засклення СЗОК має різні значення для різної площі та пропорцій СЗОК. Тому для удосконалення даного розрахунку пропонується замінити добуток цього коефіцієнта та площі СЗОК на площу засклення відповідної СЗОК (9).

$$S_{\text{ЗС}} = \bar{S}_{\text{ЗС}} \cdot S_{\text{СЗОК}}, \text{ м}^2, \quad (9)$$

де $\bar{S}_{\text{ЗС}}$ – відносна площа засклення СЗОК, відн. од.

$$Q_{\text{оп}} = \varepsilon_{\text{ЗС}} \cdot (S_{\text{ЗС.Пд}} \cdot I_{\text{Пд}} + S_{\text{ЗС.Пн}} \cdot I_{\text{Пн}} + S_{\text{ЗС.Зх}} \cdot I_{\text{Зх}} + S_{\text{ЗС.Сх}} \cdot I_{\text{Сх}}), \text{ (кВт×год)/рік,} \quad (10)$$

де $S_{\text{ЗС.Пд}}$, $S_{\text{ЗС.Пн}}$, $S_{\text{ЗС.Зх}}$, $S_{\text{ЗС.Сх}}$ – площа засклення у фасаді будинку, орієнтованого на Пд, Пн, Зх і Сх, відповідно, м².

Найбільше значення радіаційних надходжень тепла в робочу зону ($Q_{\text{ОХ}}^{\text{МАКС}}$) в охолоджувальний період, визначається за максимальним значенням сумарної сонячної радіації, яка надходить на поверхню СЗОК протягом доби і розраховується, згідно з [38], за формулою (11)

$$Q_{\text{ОХ}}^{\text{МАКС}} = (Q_{\text{В.ПР.VII}}^{\text{МАКС}} + Q_{\text{В.РОЗ.VII}}^{\text{МАКС}}) \cdot \varepsilon_{\text{ЗС}} \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \cdot \bar{s}_{\text{ЗС}} \cdot S_{\text{СЗОК}} \cdot T_{\text{ОХ}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} \times \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{рік}), \quad (11)$$

де $Q_{\text{В.ПР.VII}}^{\text{МАКС}}$ – найбільше значення прямої сонячної радіації в липні при безхмарному небі на вертикальну поверхню певної орієнтації [43], Вт/м²; $Q_{\text{В.РОЗ.VII}}^{\text{МАКС}}$ – найбільше значення розсіяної сонячної радіації в липні при безхмарному небі на вертикальну поверхню певної орієнтації [43], Вт/м²; τ_2 – коефіцієнт, який враховує втрати світла в переплетах СЗОК [48], відн. од.; τ_3 – коефіцієнт, який враховує зниження теплонадходжень за рахунок забруднення скла [40, табл. 5, дод. 12], відн. од.; τ_4 – коефіцієнт теплопропускання сонцезахисних пристроїв, відн. од., приймається з [48]; $T_{\text{ОХ}}$ – тривалість охолоджувального періоду, год/рік, визначається з [49].

Найбільше значення радіаційних надходжень тепла в робочу зону ($Q_{\text{ОХ}}^{\text{МАКС}}$), через СЗОК відповідно до [33], та з врахуванням вищезгаданих зауважень, для м. Тернопіль, в залежності від орієнтації визначалось за виразами (12), (13) та (14).

– на південь:

$$Q_{\text{ОХ}}^{\text{МАКС}} = 145,62 \cdot \bar{s}_{\text{ЗС}} \cdot S_{\text{СЗОК.Пд}} \cdot \varepsilon_{\text{ЗС}}, \text{ (кВт} \times \text{год) / рік}, \quad (12)$$

– на північ:

$$Q_{\text{ОХ}}^{\text{МАКС}} = 35,69 \cdot \bar{s}_{\text{ЗС}} \cdot S_{\text{СЗОК.Пн}} \cdot \varepsilon_{\text{ЗС}}, \text{ (кВт} \times \text{год) / рік}, \quad (13)$$

– на захід і схід:

$$Q_{\text{ОХ}}^{\text{МАКС}} = 187,88 \cdot \bar{s}_{\text{ЗС}} \cdot S_{\text{СЗОК.(Зх/Сх)}} \cdot \varepsilon_{\text{ЗС}}, \text{ (кВт} \times \text{год) / рік}. \quad (14)$$

Відповідно до [33] середнє значення COP для сучасних каналних кондиціонерів становить 3,41, а EER – 2,73. Термічний опір для першої температурної зони України $R_{\text{ЕК}}=3,3 \text{ м}^2 \times \text{°C/Вт}$. Вирази для визначення економії електроенергії за рахунок використання СЗОК, для м. Тернопіль, набувають наступного вигляду.

– для південної орієнтації:

$$W_{\text{СЗОК}} = S_{\text{П}} \cdot p_{\text{Ш.О}} \cdot APO_{300} - S_{\text{СЗОК.Пд}} \cdot ((34,097 / R_{\text{СЗОК}} - 10,333) - 19,74 \cdot \bar{s}_{\text{ЗС}} \cdot \varepsilon_{\text{ЗС}}), \text{ (кВт} \times \text{год) / рік} \quad (15)$$

– для північної орієнтації:

$$W_{\text{СЗОК}} = S_{\text{П}} \cdot p_{\text{Ш.О}} \cdot APO_{300} - S_{\text{СЗОК.Пн}} \cdot ((36,720 / R_{\text{СЗОК}} - 11,127) - 12,18 \cdot \bar{s}_{\text{ЗС}} \cdot \varepsilon_{\text{ЗС}}), \text{ (кВт} \times \text{год) / рік}; \quad (16)$$

– для західної орієнтації:

$$W_{\text{СЗОК}} = S_{\text{П}} \cdot p_{\text{Ш.О}} \cdot APO_{300} - S_{\text{СЗОК.Зх}} \cdot ((35,409 / R_{\text{СЗОК}} - 10,730) + 26,12 \cdot \bar{s}_{\text{ЗС}} \cdot \varepsilon_{\text{ЗС}}), \text{ (кВт} \times \text{год) / рік}; \quad (17)$$

– для східної орієнтації:

$$W_{\text{СЗОК}} = S_{\text{П}} \cdot p_{\text{Ш.О}} \cdot APO_{300} - S_{\text{СЗОК.Сх}} \cdot ((36,720 / R_{\text{СЗОК}} - 11,127) + 27,12 \cdot \bar{s}_{\text{ЗС}} \cdot \varepsilon_{\text{ЗС}}), \text{ (кВт} \times \text{год) / рік}. \quad (18)$$

В результаті аналізу виразів (15), (16), (17) та (18) видно, що для південної (15) та північної (16) орієнтацій збільшення КВПСР призводить до збільшення економії електроенергії (від'ємний коефіцієнт), тоді як для західної (17) та східної (18) – до зменшення. Проте не варто забувати, що збільшення КВПСР призводить до зростання кількості природного світла, яке надходить в приміщення, зменшуючи споживання електроенергії системою штучного освітлення.

Виходячи з виразів (15), (16), (17) та (18) отримуємо нерівності (19), (20), (21) та (22) для визначення тих параметрів, при яких СЗОК матиме позитивний вплив на сумарний енергетичний баланс приміщення для м. Тернопіль:

– для південної орієнтації:

$$S_{\Pi} \cdot p_{\Pi.O} \cdot APO_{300} > S_{\text{СЗОК.Пд}} \cdot ((34,097 / R_{\text{СЗОК}} - 10,333) - 19,74 \cdot \bar{s}_{3C} \cdot \varepsilon_{3C}), \text{ (кВт}\times\text{год)/рік; } \quad (19)$$

– для північної орієнтації:

$$S_{\Pi} \cdot p_{\Pi.O} \cdot APO_{300} > S_{\text{СЗОК.Пн}} \cdot ((36,720 / R_{\text{СЗОК}} - 11,127) - 12,18 \cdot \bar{s}_{3C} \cdot \varepsilon_{3C}), \text{ (кВт}\times\text{год)/рік; } \quad (20)$$

– для західної орієнтації:

$$S_{\Pi} \cdot p_{\Pi.O} \cdot APO_{300} > S_{\text{СЗОК.Зх}} \cdot ((35,409 / R_{\text{СЗОК}} - 10,730) + 26,12 \cdot \bar{s}_{3C} \cdot \varepsilon_{3C}), \text{ (кВт}\times\text{год)/рік; } \quad (21)$$

– для східної орієнтації:

$$S_{\Pi} \cdot p_{\Pi.O} \cdot APO_{300} > S_{\text{СЗОК.Сх}} \cdot ((36,720 / R_{\text{СЗОК}} - 11,127) + 27,12 \cdot \bar{s}_{3C} \cdot \varepsilon_{3C}), \text{ (кВт}\times\text{год)/рік. } \quad (22)$$

Для прикладу, розрахуємо при якій площі, СЗОК з профілем Veka Softline 82 з термічним опором 1 (м²×°C)/Вт та склопакетом 4Solar-16Ar-4-12Ar-4i, з термічним опором 1,14 (м²×°C)/Вт та КВПСР 0,68, яка встановлено в ЗОК приміщення з розмірами (ш×г×в) 6×4×3 м буде досягнуто максимальну енергоефективність. Для цього за виразом (4) визначимо значення ЗІЗП для значень КПО, відповідно до [37] від 0,6 до 2,2, за (3) визначимо $AP0_{300}$ для отриманих значень ЗІЗП, та за алгоритмом з [36] отримаємо площу СЗОК.

Виходячи з отриманого значення ЗІЗП, з [37] можна визначити мінімальну площу застосування СЗОК, при якій забезпечується нормована освітленість в розрахунковій точці робочої поверхні.

Інженерний розрахунок фактичного приведенного термічного опору СЗОК може бути з достатньою коректністю виконаний на підставі європейських нормативних документів DIN EN ISO 10077 «Теплові характеристики вікон, дверей і жалюзі. Розрахунок тепловтрат» і DIN V 4108-4 «Термічний захист будівель».

Для більшості випадків, для визначення інтегрального термічного опору прямокутних СЗОК, вмонтованих в проріз основної несучої непрозорої ЗОК, відповідно до [41], на стадії інженерного проектування може бути використана спрощена формула (23).

$$R_{\text{СЗОК}} = \left(S_{3C} + \sum_{i=1}^n S_i \right) / \left(S_{3C} / R_{\Sigma 3C} + \sum_{i=1}^n S_i / R_{\Sigma i} + \sum_{j=1}^m k_j \cdot L_j \right), \text{ (м}^2\text{}\times\text{°C)/Вт, } \quad (23)$$

де S_{3C} – площа світлопрозорої частини (застосування) СЗОК, м²; $R_{\Sigma i}$, S_i – термічний опір теплопередачі та площа i -го непрозорого елемента СЗОК; n – кількість непрозорих елементів СЗОК з певними значеннями $R_{\Sigma i}$ і S_i , шт; k_j – лінійний коефіцієнт теплопередачі, j -го теплопровідного включення, Вт/(м²×°C); L_j – лінійний розмір j -го конструктивного непрозорого елемента СЗОК, м; m – кількість непрозорих елементів конструкції, для яких необхідно визначати k_j .

В результаті розрахунків, для заданих параметрів отримано значення площі СЗОК, ЗІЗП, $AP0_{300}$ та $R_{\text{СЗОК}}$, які наведено в табл. 3.

Таблиця 3 Значення площі елементів СЗОК, ЗІЗП, $АПО_{300}$ та $R_{СЗОК}$ для СЗОК з заданими параметрами

КПО, %	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,2
$I_{ЗСП}$, %	20,66	26,89	32,90	38,69	44,26	49,60	52,19	54,72	57,20	59,62	64,29
$АПО_{300}$, год/рік	429,5638	648,0649	842,0675	1013,392	1163,791	1294,951	1353,824	1408,489	1459,137	1505,957	1588,838
$S_{ЗС}$, м ²	2,53	3,29	4,02	4,73	5,41	6,07	6,69	6,99	7,29	7,86	9,88
$S_{ПРОФ}$, м ²	0,49	0,55	0,61	0,66	0,70	0,74	0,78	0,79	0,81	0,84	0,94
$S_{ЗП}$, м ²	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,26
$S_{СЗОК}$, м ²	3,10	3,94	4,75	5,52	6,26	6,97	7,65	7,98	8,30	8,91	11,08
$\bar{S}_{ЗС}$, відн. од.	0,82	0,83	0,85	0,86	0,86	0,87	0,87	0,88	0,88	0,88	0,89
$R_{СЗОК}$	1,13	1,13	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14

Розглянемо вплив СЗОК на енергетичний баланс приміщення для південної орієнтації СЗОК (табл. 4).

Таблиця 4 Економії електроенергії при встановленні СЗОК ($W_{СЗОК}$) для різних значень питомого споживання електроенергії штучним освітленням та КПО в РТ для приміщення з розмірами 6×4×3 м, кВт×год/рік

$p_{ш.о.}$, кВт/м ²	КПО, %										
	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2
0,005	24,018	43,714	60,836	75,551	88,040	98,486	100,510	104,641	108,350	109,408	103,393
0,01	75,565	121,482	161,884	197,158	227,695	253,880	262,969	273,660	283,447	290,123	294,053
0,015	127,113	199,250	262,932	318,765	367,350	409,274	425,428	442,678	458,543	470,838	484,714
0,02	178,661	277,017	363,980	440,372	507,005	564,668	587,887	611,697	633,640	651,552	675,374

Як видно з табл. 4 економія електроенергії для приміщень з СЗОК для м. Тернопіль виникає навіть при питомій потужності системи штучного освітлення 0,005 кВт/м² та величині КПО від 0,6%. З чого можна зробити висновок, що встановлення сучасних СЗОК призводить до зменшення сумарного споживання електроенергії для забезпечення нормованих кліматичних умов в офісному приміщенні.

5. Висновки

Стаття присвячена визначенню тих властивостей СЗОК, при яких виникає позитивний вплив на сумарний енергетичний баланс приміщення. З практичної точки зору, отриманий результат дозволяє визначати значення площі СЗОК, КВПСР і термічного опору, при яких виникає економія електроенергії, за рахунок зменшення тривалості використання штучного освітлення та надходжень тепла в опалювальний період через СЗОК.

В результаті отримано аналітичні залежності для визначення економії електроенергії на штучне освітлення від величини КПО та питомого її споживання системою штучного освітлення. Отримані вирази дозволяють визначити ті властивості СЗОК, при яких економія електроенергії на штучне освітлення та надходження тепла в опалювальний період будуть більшими, а ніж витрати електроенергії на компенсацію втрат тепла та видалення надлишкових теплонадходжень.

Встановлено, використання сучасних СЗОК в офісних приміщеннях в м. Тернопіль дозволяє зменшити сумарне споживання електроенергії навіть при питомій потужності системи штучного освітлення 0,005 кВт/м² і величині КПО від 0,6%. При збільшенні величини КПО сумарна економія також зростає.

Посилання

- [1] Тарасенко М.Г., Козак К.М., Бурмака В.О. (2015). Динаміка параметрів розрядних ламп високого тиску при розгоранні та димеруванні. *Світлотехніка та електроенергетика*, **3-4**, 15-21.
- [2] Підгорний О.Л., Плоский В.О., Сергійчук О.В. (2010). Актуальні проблеми геометричного моделювання в задачах енергозбереження у будівництві. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, **14**, 25-31.
- [3] Мартинов В.Л. (2013). Визначення оптимальної орієнтації енергоефективних будівель з дотриманням норм освітленості та інсоляції. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, **5**, 173-176.
- [4] Філоненко О.І. (2013). Вплив повітропроникності конструкції на її теплозахисні властивості. *Збірник наукових праць (галузевого машинобудування, будівництва). НТУ*, **39(4(1))**, 261-265.
- [5] Філоненко О.І., Вельбой М.А. (2013). Аналіз енергоефективності стінових конструкцій залежно від їх архітектурно-конструктивних особливостей. *Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво*, **4(2)**, 233-239.

- [6] Самойлов С.И., Соловьёв А.К. (2000). Проектирование светопроёмов в офисах и экономия энергии. *Светотехника*, **1**, 23-25.
- [7] Arasteh D.K., Kohler C., Griffith B. (2009). Modeling windows in energy plus with simple performance indices. Department of Energy R&D, USA, 30.
- [8] Hart R., Goudey H., Arasteh D.K., Curcija D.C. (2012). Thermal performance impacts of center-of-glass deflections in installed insulating glazing units. *Energy and Buildings*, **54**, 453-460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.026>
- [9] Gustavsen A., Grynning S., Arasteh D.K., Jelle B.P., Goudey H. (2011). Window sizes required for the energy efficiency of a building against window sizes required for view. *Energy and Buildings*, **43**(10), 2583–294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.010>
- [10] Muhaisen A.S. Dabboor H.R. (2015). Studying the impact of orientation, size, and glass material of windows on heating and cooling energy demand of the gaza strip buildings. *Journal of Architecture and Planning*, **27**, 1-15.
- [11] Клевещ К. (2013). Вплив теплових надходжень через вікна південного фасаду на створення комфортних умов у приміщенні. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, **91**, 196-200.
- [12] Колесник И.А., Петренко В.О., Ветвицкий И.Л., Ветвицкая Д.А. (2016). Анализ влияния теплотехнических характеристик оконных блоков на состояние микроклимата помещений в отопительный период. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве*, **92**, 67-72.
- [13] Zekraoui D., Zemmouri N. (2017). The impact of window configuration on the overall building energy consumption under specific climate conditions. *Energy Procedia*, **115**, 162-172. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.016>
- [14] Bülow-Hübe H. The effect of glazing type and size on annual heating and cooling demand for Swedish offices. Proc. of Renewable Energy Technologies in Cold Climates '98. Montréal, Québec, Canada, 1998, 188-193.
- [15] Melendo J.M.A., la Roche P. Effects of window size in daylighting and energy performance in buildings. American Solar Energy Society - SOLAR2008, Including Proc of 37th ASES Annual Conf, 33rd National Passive Solar Conf, 3rd Renewable Energy Policy and Marketing Conf: Catch the Clean Energy Wave2008, 2008, 4345-4351.
- [16] Dipa S., Szadik A., Shahriar A.T.M., Mithu N.H. (2017). North-south vs east-west: the impact of orientation in daylighting design for educational buildings in Bangladesh. *Architecture Research*, **7**(4), 184-189. <http://dx.doi.org/10.5923/j.arch.20170704.06>
- [17] Eljojo A. (2017). Effect of windows size, position and orientation on the amount of energy needed for winter heating and summer cooling. *Journal of Engineering Research and Technology*, **1**(1), 1-8. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32424.47361>
- [18] Карюк, А.М., Кошлатий, О.Б. (2015). Економічно доцільний опір теплопередачі зовнішніх стін цивільних будівель для різних регіонів України. *Нові технології в будівництві*, **29**, 35-39.
- [19] Firas M.S. (2014). Daylighting: an alternative approach to lighting buildings. *Journal of American Science*, **10**(4), 1-5.
- [20] Noureddine Z., Djamel Z. The impact of window configuration on the overall building energy consumption under specific climate conditions. International conference – alternative and renewable energy quest, areq 2017, 1-3 February, 2017, **115**, 162-172. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.016>
- [21] Nedhal A., Syed F.S.F., Adel A. (2016). Relationship between window-to-floor area ratio and single-point daylight factor in varied residential rooms in Malaysia. *Indian Journal of Science and Technology*, **33**(9), 1-8. <http://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i33/86216>
- [22] Memon, S., Eames, P.C. (2017). Solar Energy Gain and Space-Heating Energy Supply Analyses for Solid-Wall Dwelling Retrofitted with the Experimentally Achievable U-value of Novel Triple Vacuum Glazing. *Journal of Daylighting*, **4**, 15-25. <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2017.2>
- [23] Галінська, Т.А., Крепка, Т.С. (2011). Експериментальні дослідження розподілу природного освітлення у приміщеннях лекційних аудиторій корпусу «п» ПолтНТУ, яке здійснюється через бокові світлопрорізи в огороженні будівлі. *Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво*, **2**, 241-251.
- [24] Галінська Т.А., Носач Б.Л., Лещенко М.В., Ліхтей В.В. (2013). Експериментальні дослідження теплотехнічних властивостей світлопрозорих огорожувальних конструкцій. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*, **68**, 104-108.
- [25] Галінська Т.А. (2013). Удосконалення методики проектування природного освітлення приміщень будівель. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, **25**, 528-541.
- [26] Галінська Т.А. (2006). Розрахунок природного освітлення приміщень будівель, які освітлюються через зенітні прямокутні у плані ліхтарі при ясному і хмарному небі. *Научно-технический сборник. Коммунальное хозяйство городов*, **76**, 151-158.
- [27] Галінська Т.А. Комплексний метод вирішення освітлення будівель при ясному та хмарному небі: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. Полтава, 2011, 24.
- [28] Черненко П.О., Мартинюк О.В. (2012). Підвищення ефективності короткострокового прогнозування електричного навантаження енергооб'єднання. *Технічна електродинаміка*, **1**, 63-70.
- [29] eia. U. S. Energy Information Administration [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.eia.gov>. – How much electricity is used for lighting in the United States?
- [30] Айзенберг Ю.Б., Варфоломеев Л.П. (2011). Как повысить энергоэффективность освещения. *Спец. выпуск АВОК*, **3**, 52-56.
- [31] Кожушко Г.М., Басова Ю.О., Губа Л.М. (2016). Порівняння динаміки світлових та кольорних характеристик компактних люмінесцентних та світлодіодних ламп в процесі строку служби. *Technology audit and production reserves*, **30**(4), 63-69. <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.74678>

- [32] Тарасенко М.Г., Козак К.М. (2013). Комплексний підхід щодо визначення енергоефективності джерел світла. *Світлотехніка та електроенергетика*, **33**(1), 27-33.
- [33] Бурмака В., Тарасенко М., Козак К., Хомишин В. (2019). Вплив орієнтації світлопрозорої зовнішньої огорожувальної конструкції на енергетичний баланс приміщення. *Вісник ТНТУ*. – Т.: ТНТУ, **94**(2), 111-122. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2019.02.111
- [34] Byrne P. Comparison Study of Four Popular Lighting Simulation Software Programs. Brunel University, 2014, 81.
- [35] Gábrová L., Hlášková M., Vajkay F. (2016). Comparative evaluation of daylighting simulation programs. *Applied Mechanics and Materials*, **824**, 732-739. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.824.732>
- [36] Burmaka V., Tarasenko M., Kozak K., Omeiza L.A., Sabat N. (2020). Effective use of daylight in office rooms. *Journal of Daylighting*, **7**(2), 154-166. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2020.15>
- [37] Burmaka V., Tarasenko M., Kozak K., Khomyshyn V. (2018). Definition of a composite index of glazing rooms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **4**(10 (94)), 22-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141018>
- [38] Пособие по расчету и проектированию естественного, искусственного и совмещенного освещения (к СНиП II-4-79). – М.: Стройиздат, 1980, 156.
- [39] Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції: ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. – [Чин. від 01.07.2008]. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2008.
- [40] Строительные нормы и правила. Часть II «Нормы проектирования. Глава 33 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»: СНиП II-33-75. – [Чин. від 01.07.1976]. – М.: Стройиздат, 1976, 109.
- [41] Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2016. – [Чин. від 01.05.2017]. – К.: Мінрегіон України, 2017, 31.
- [42] Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики (EN 15251:2007, IDT): ДСТУ Б EN 15251. – [Чин. від 01.07.2008]. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2008, 33.
- [43] Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1-27 2010. – [Чин. від 01.11.2011]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011, 123.
- [44] Tarasenko M., Burmaka V., Kozak K. (2018). Залежності відносної та абсолютної площі засклення від конфігурації та загальної площі віконного прорізу. *Вісник ТНТУ*. – Т.: ТНТУ, **89**(1), 122-131. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2018.01.122
- [45] Тарасенко М. Г. Бурмака В., Козак К. Залежності відносної площі засклення від загальної площі віконного прорізу. Materials 6th International Scientific Conference «Lighting and power engineering: history, problems and perspectives», 30 січня - 02 лютого 2018 року. – Т.: ФОП Паляниця В.А., 2018, 99-100.
- [46] Инженерная энциклопедия. Дежурное отопление. URL: <http://engineeringsystems.ru/d/dejurnoe-otoplenie.php>.
- [47] Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції: ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. – [Чин. від 01.07.2008]. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2008.
- [48] Природне і штучне освітлення: ДБН В.2.5-28:2018. – [Чин. від 01.03.2019]. – К.: Мінрегіон України, 2018, 113.
- [49] Любарець О.П. (2018). Розрахункові параметри охолоджувального періоду в Україні. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, **24**, 11-16.