

Ефективне Використання Природного Світла в Офісних Приміщеннях

Vitalii Burmaka^{*a}, Mykola Tarasenko^a, Kateryna Kozak^a, Lukman Ahmed Omeiza^b, Nataliia Sabat^c

^a Department of Electrical Engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 56, Ruska Street, 46001 Ternopil, Ukraine

^b Department Of Electrical/Electronic Engineering, Federal Polytechnic Bida, 5, Doko Road, 912101 Bida, Niger State, Nigeria

^c Department of Computer Systems and Networks, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska Street, 76019 Ivano-Frankivsk, Ukraine

* Corresponding author – e-mail: vitaliy.burmaka@gmail.com

Раціональне використання природного освітлення дозволяє суттєво зменшити витрати електроенергії на штучне освітлення. Тому метою даного дослідження стало визначення параметрів світлопрозорих зовнішніх огорожувальних конструкцій та величини коефіцієнта природного освітлення при яких забезпечується максимальна ефективність використання природного світла в офісних приміщеннях різних розмірів. В статті проведено аналіз залежності тривалості забезпечення нормованої освітленості денним світлом приміщень від величини коефіцієнта природного освітлення для чотирьох міст різних країн Європи. Визначено питому автономність природного освітлення для забезпечення нормованої освітленості офісних приміщень (год/(рік×м²)). Доведено, що незалежно від розмірів приміщень, максимальна питома автономність природного освітлення (для нормованої освітленості 300 лк), при боковому природному освітленні досягається при коефіцієнті природного освітлення в межах від 1,7% до 1,9%, максимум при 1,8%. При нормованій освітленості 500 лк максимальна питома автономність природного освітлення має місце при величині від 2,6% до 3,0%, максимум – при 2,8%.

Ключові слова: коефіцієнт природного освітлення; автономність природного освітлення; природне освітлення; ЗІЗП; освітлення офісних приміщень.

Умовні позначення	$I_{ЗС.П}$	зведений індекс засклення приміщення, %;
$АПО$ автономність природного освітлення, год/рік	l	ширина непрозорої частини СЗОК, м;
$АПО_{300}$ річна автономність природного освітлення з нормованою освітленістю 300 лк, год/рік;	$l_{ЗП}$ $l_{ЗС}$	ширина завішення СЗОК, м; ширина засклення СЗОК, м;
$АПО_{con}$ відношення між освітленістю забезпеченою тільки денним світлом в РТ і мінімальною освітленістю яку необхідно забезпечити на РП відповідно до нормативних документів, вілн. од.;	$l_{ПРОФ}$ $l_{СЗОК}$ $S_{ЗС}$ $S_{СЗОК}$ $S_{РП}$ $СК$ WWR	ширина профілю СЗОК, м; ширина СЗОК, м; площа засклення СЗОК, м ² ; площа СЗОК, м ² ; площа робочої поверхні, м ² ; світловий коефіцієнт, %; window to wall ratio, %;
$АПО_{max}$ річна частка часу, протягом якої забезпечується максимальний рівень природної освітленості, при перевищенні якого може виникати візуальний дискомфорт, %;	λ ЗІЗП	коефіцієнт відносного проникнення сонячної радіації, %; зведений індекс засклення приміщення;
$КПО$ коефіцієнт природного освітлення, %;	EDR ЗОК	energy daylight rate; зовнішня огорожувальна конструкція;
$d_{РТ}, l_{РТ}$ координати розміщення РТ в приміщенні, м;	РТ	розрахункова точка;

E	середньомісячне значення горизонтальної освітленості, клк;	КВПСР	коефіцієнт проникнення радіації;	відносного сонячної
$e_{\text{СЗОК}}$	питома ефективність використання площі СЗОК, год/(рік·м ²);	СЗОК	світлопрозора огорожувальна конструкція;	зовнішня
$h_{\text{СЗОК}}$	висота засклення, м;			
$i_{\text{к.СЗОК}}$	висота СЗОК, м;	РП	робоча поверхня.	
	індекс координації СЗОК, відн. од;			

Вступ

В теперішній час при вирішенні питання освітлення приміщень основна увага зосереджена на використанні штучних джерел світла. Вони, згідно даних Міжнародного енергетичного агентства, споживають близько 2650 ТВт·год електроенергії в рік ($\approx 19\%$ від глобального виробництва), перевищуючи сумарне її виробництво всіма атомними електростанціями світу [1]. В Україні на освітлення, припадає близько 16% від всієї виробленої електроенергії. Це вказує на те, що штучне освітлення є вагомим споживачем електроенергії, особливо в адміністративних будівлях (до 80%).

Використання природного світла для освітлення приміщень – один з очевидних шляхів економії електроенергії. Повна відсутність природного світла, у відповідності з нормативами з охорони праці, віднесена до шкідливих факторів. Людина біологічно пристосована до природного світла. Рациональне його використання дозволяє суттєво зменшити витрати електроенергії на штучне освітлення. Для цього необхідно аргументовано підійти до визначення розмірів та теплотехнічних характеристик світлопрозорих огорожувальних конструкцій (СЗОК). До недавнього часу саме СЗОК були найслабшою ланкою зовнішніх огорожувальних конструкцій (ЗОК) будівель за цим параметром.

В період всевітньої економії невідновлюваних джерел енергії і капітальних витрат на індустріальне будівництво, нераціональні проектні рішення освітлення будівель, які спричиняють різкий дискомфорт і колосальні втрати тепла, нині неприпустимі. Потрібно прагнути до максимального використання природного світла.

Економічні переваги природного освітлення часто розглядаються з точки зору енергозбереження, без врахування зростання продуктивності праці, яка може бути вагомішою за економію енергії. За даними Управління США з загальних послуг, агентства федерального уряду США, яке управляє всіма федеральними будівлями США, за 40-річну економічну діяльність офісної будівлі, витрати на заробітну плату становили близько 92% від сумарних витрат, в той час як витрати на будівництво і технічне обслуговування становили тільки 2% і 6%, відповідно [2]. Інвестиції, спрямовані на модернізацію систем освітлення, опалення та охолодження, можуть бути легко компенсовані підвищенням продуктивності праці.

Подібного роду дослідженнями займалися Самойлов С.І., Соловйов А.К [2], Бартенбах В. [3], Косо Й. [4], Бобекрі М. [5], Табунщиков Ю. А. [6], Нойферт Е. [7] Коркіна А [8], Коржнева Т.Г. [9] та інші.

Щодо останніх досліджень в даній сфері, то Коркіна А. в [8] оцінила вплив конструкції та розмірів СЗОК на її коефіцієнт відносного проникнення сонячної радіації (КВПСР). Оцінкою енергоефективності суміщеного освітлення з врахуванням енергетичного балансу приміщень займалася Коржнева Т.Г [9]. Вивченням впливу типу, розмірів і розташування СЗОК на освітлення приміщень житлових будівель проводилося в [10]. Результати досліджень показали, що важливі не тільки розміри і тип СЗОК, але й їх місце розташування в ЗОК.

Динамічне моделювання денного світла є дуже корисним інструментом при проектуванні природного освітлення приміщень. Воно дозволяє ґрунтовно проаналізувати рівень проникнення денного світла в приміщення і визначити, чи є він адекватними для виконання конкретних візуальних завдань. Отримані результати можуть бути використані для проектування сонцезахисних пристроїв або систем керування освітленням на основі порівняння різних технічних рішень. Використання моделювання такого типу, ймовірно, набуде поширення в звичайній практиці проектування, оскільки деякі правила і системи оцінки екологічності будівель припускають їх використання. В статті [11] представлені результати динамічного моделювання денного світла для офісу з відкритим плануванням. Підкреслена його функціональність і запропонована методологія для широкого застосування. В дослідженні [12] зазначено, що оцінка витрат енергії за допомогою різного програмного забезпечення дозволяє отримувати результати з похибкою до 15%. Похибка зумовлена різними методиками визначення наявності денного світла в приміщенні, а також способом моделювання систем керування, які нехтують такими факторами, як специфічні характеристики фотодатчиків, світильників або драйверів [13-16]. Незважаючи на те, що ці методи розрахунку дуже корисні для проектування, необхідно і надалі їх вдосконалювати для того, щоб зменшити розбіжності з експериментальними даними.

В дослідженні [17] показано, що реалізація нових вимог стандарту EN-17037 є важливою, тому що в ньому розглядаються питання природного освітлення. Авторами акцентовано увагу на необхідності використання програмного моделювання, яке дозволяє розрахувати критерії з даного стандарту. Також в статті співставлено вимоги цього стандарту з практичними завданнями, що виникають в процесі будівництва. На практиці є побоювання, що тільки приміщення, розташовані в дуже відкритому середовищі (верхні поверхи), можуть бути добре оцінені. Крім того, автори стурбовані тим, що цей стандарт може бути кращим для будівель з повністю заксленими фасадами, що є контрпродуктивним, якщо ми прагнемо до досягнення загальної продуктивності, особливо по відношенню до потреб в охолодженні.

У зв'язку з тим, що теоретичне поєднання характеристик природного і штучного освітлення є проблематичним (для виконання докладних розрахунків необхідні різні пакети програмного забезпечення) в [18, 19] автори запропонували ввести новий параметр EDR (Energy Daylight Rate). З його допомогою можна оптимізувати дизайн ЗОК на ранній стадії проектування приміщення.

В дослідженнях [20-22] розглянуто способи збільшення енергоефективності систем штучного освітлення адміністративних приміщень. В дослідженні [20] показано на необхідність оптимізації систем штучного освітлення адміністративних будівель у зв'язку зі значним їх споживанням на штучне освітлення. В [21] розглянуто доцільність впровадження системи керування штучним освітленням. Також наведено аргументи щодо доцільності використання систем суміщеного освітлення в [22]. Загалом, дані дослідження вказують на необхідність впровадження систем природного освітлення в адміністративних приміщеннях для забезпечення максимальної енергоефективності систем штучного освітлення будівлі.

Враховуючи те, що інтенсивність надходження сонячної радіації залежить від кліматичних умов в [23] була розроблена методика орієнтована на використання при розрахунках тих кліматичних даних, які сформульовані в ДСТУ з будівельної кліматології. Методика дозволяє визначати вплив надходження сонячної радіації через СЗОК при використанні регульованих сонцезахисних пристроїв.

У дослідженні [24] розглянуто комплексний метод розрахунку споживання електроенергії освітленням нежитлових будівель, представлений у Європейському

стандарті EN 15193: 2007 з метою можливості його використання у Китаї. У ньому коефіцієнт забезпечення приміщень денним світлом (вплив денного освітлення на використання штучного), є єдиним фактором, пов'язаним з місцем розташування і розрахованим відповідно до широти. Однак стандарт (EN15193: 2007) обмежує діапазон широт від 38° до 60° північної широти в Європі, для якої співвідношення між коефіцієнтом забезпечення денним світлом і широтою є майже лінійним.

В роботах [25, 26] пропонується методика нової структури аналізу природного освітлення житлових будинків. Вона складається з двох параметрів, які відображають денну та сезонну доступність природного світла, а також середню тривалість доступу до прямої сонячної радіації. Показано, що завдяки використанню запропонованої методики можна виявити значні і дієві якісні відмінності між квартирами, які в процесі проектування не були враховані. Вона має декілька рівнів деталізації – від простого розрахунку до побудови просторових графіків, що дозволяє розробникам моделей зрозуміти й оптимізувати характеристики природного освітлення кімнат, житлових будинків або районів.

Річне енергоспоживання офісною будівлею для різних типів СЗОК в кліматичній зоні з спекотним літом і холодною зимою представлено в [27]. Авторами розроблено розрахункову модель офісу та проведено серію моделювань енергоспоживання будівлею при зміні параметрів СЗОК. Встановлено, що, при використанні, як одинарного застібання, так і двошарового склопакету зі звичайного скла (в тому числі і пофарбованого в зелений колір), найбільша енергоефективність приміщень має місце при величині window-to-wall ratio (WWR) близькій до 20%.

В дослідженні [28] проведено вивчення взаємозв'язку між атрибутами конструкції будівлі і існуючими параметрами вимірювання природного освітлення на основі нової методології. Ця методологія включає в себе статистичне вивчення. Це нова методологія, яка допомагає аналізувати велику кількість вихідних даних і вплив великої кількості проектних змін. Зокрема, цю статистичну методологію можна використати, щоб проаналізувати, які параметри важливі, а які ні, а також тип їх залежностей один від одного. Використовуючи ці методи, статистичні моделі можуть бути створені для прогнозування значень метрики природного освітлення для різних типів будівель і проектних рішень. У цій статті описано принцип роботи цієї методології і проаналізовано конструктивні особливості будівлі, які мають найбільший вплив на ефективність природного освітлення.

В огляді літератури [29] показано, що теоретичні розрахунки, вимірювання в повномасштабних приміщеннях і моделювання освітлення за затвердженими програмами вказують на те, що питоме споживання електроенергії $10 \text{ кВт} \times \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{рік})$ є реалістичним для електричного освітлення офісних приміщень. Це вказує на можливість зниження енергоємності не менше ніж на 50% у порівнянні з фактичним середнім споживанням електроенергії на освітлення ($21 \text{ кВт} \times \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{рік})$ в Швеції). Представлені та обговорені стратегії щодо скорочення використання енергії для штучного освітлення за рахунок: підвищення енергоефективності джерел світла, струмообмежувальних баластів і світлових приладів, використання природного світла, поліпшення коефіцієнта технічного обслуговування та розумного використання пристроїв для ручного димерування і відключення. Обговорені і такі питання як: вплив характеристик СЗОК, властивостей сонцезахисних пристроїв, відбивної здатності внутрішніх поверхонь приміщень. Підкреслена необхідність оптимізації параметрів штучного освітлення для зменшення навантаження на енергетичну систему, яке постійно зростає у зв'язку з електрифікацією усіх процесів та пристроїв, які використовуються, як на підприємствах так і у повсякденному житті. Яскравим

прикладом цього є електромобілі, які все більше завойовують автомобільний ринок, збільшуючи навантаження на електроенергетичну систему усіх країн.

В роботі [30] представлений огляд літератури щодо енергоефективної модернізації систем штучного та природного освітлення будівель. В огляді, що охоплює близько 160 наукових статей, розглянуті наступні теми: а) модернізація штучного освітлення в будівлях; б) використання електроенергії і потенціалу з енергозбереження; в) стратегія модернізації освітлення, заміна джерел світла, баласту або світильника; використання заданого дизайну освітлення навколишнього середовища; поліпшення обслуговування; зниження підтримуваних рівнів освітленості; поліпшення кольоропередачі джерел світла; поліпшення самопочуття мешканців; використання систем управління штучним і природним світлом. Підкреслено, що існуючі загальні знання про модернізацію освітлення в даний час дуже обмежені і є брак інформації щодо фактичних енергетичних характеристик систем освітлення, встановлених в існуючому будівельному фонді.

Незважаючи на значну кількість досліджень в області природного освітлення, питання проектування СЗОК, визначення величини коефіцієнта природного освітлення (КПО), при якому забезпечується максимальне використання сонячної радіації не є достатньо розкритим. Це свідчить про актуальність проведення досліджень спрямованих на розроблення рекомендацій щодо підвищення енергоефективності будівель не тільки за рахунок збільшення теплового опору ЗОК, але й більш повного використання природного світла. Саме тому, метою даного дослідження і стало визначення параметрів СЗОК та встановлення величини КПО при якому забезпечується максимальна ефективність використання природного світла в офісних приміщеннях різних розмірів

2. Матеріали та методи дослідження

У звичайних умовах штучне освітлення приміщень суттєво нижче природного навіть при самій похмурій погоді. Так при штучному освітленні приміщень рівні горизонтальної освітленості знаходяться в межах 100-500 лк. У той час як природна освітленість навіть у похмурий день становить від 1000 до 2000 лк. У ясний сонячний день під відкритим небом ця цифра зростає до 100000 лк.



Рис. 1. Схема приміщення з розмірами 4×4 м та СЗОК площею 6 м² [31]

Ефективність використання природного світла визначається раціональними конструктивними рішеннями введення світла в будівлю, інтенсивністю і спектральним складом сонячного випромінювання. Першим етапом на шляху вирішення цього питання є встановлення взаємозв'язку між автономністю природного освітлення (АПО) в приміщенні та величиною КПО в розрахунковій точці (РТ) на робочій поверхні (РП) для офісних приміщень (рис. 1).

Розрахунки проводились для приміщень, параметри яких відповідають вимогам чинних нормативних документів [32-37]. Відповідно до них вибрані значення висоти приміщення, товщини його стін та коефіцієнти відбиття внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій (табл. 1).

Таблиця 1

Розрахункові параметри приміщень			
Величина	Висота, м	Товщина стін, м	Коефіцієнти відбиття стелі/стін/підлоги, відн. од.
Значення	3	0,38	0,7/0,5/0,2

2.1. Автономність природного освітлення

Концепція АПО (Daylight Autonomy) була вперше представлена у Технічному звіті CIE Daylight [38]. Повторно вона була запропонована у 2001 році Рейнхартом і Уокенхорстом [39], як річний відсоток робочого часу, протягом якого природна освітленість приміщення відповідає нормованому значенню. У 2006 році Роджерс [40] розширив АПО до $АПО_{con}$. Він запропонував розраховувати її як співвідношення між освітленістю, яка забезпечується тільки денним світлом в РТ, і мінімальною освітленістю РП, відповідно до нормативних документів. Наприклад, якщо зареєстровано значення освітленості 400 лк, а мінімальна освітленість на РП дорівнює 500 лк, то $АПО_{con}$ буде дорівнювати 0,8 (400/500).

У 2006 р $АПО_{max}$ була представлена тим же Роджерсом [40], щоб врахувати ризики дискомфорту від надмірного рівня освітленості. Він запропонував розраховувати $АПО_{max}$ як річний відсоток часу, протягом якого максимальний рівень освітленості перевищує нормоване значення настільки, що може викликати візуальний дискомфорт. Ця межа – це десятикратне перевищення мінімальної освітленості робочої поверхні від визначеної у нормативних документах. Наприклад, якщо норми встановлюють 150 лк на робочій поверхні, ця межа буде дорівнювати 1500 лк.

Визначимо залежність АПО в приміщенні від величини КПО в РТ на РП для м. Тернопіль. Поставлена задача була вирішена за допомогою програми Relux [41], оскільки в ній доступна функція визначення АПО для різних регіонів, при заданих значеннях КПО, нормованої освітленості та режиму роботи в приміщенні. Достовірність результатів цього програмного пакета перевірена в [42-44].

Оскільки при розрахунку АПО в програмі Relux використовуються стандартні параметри хмарності неба (СІЕ), а розрахунок проводиться лише для розсіяного світла, то приймаємо, що СЗОК в даному дослідженні орієнтовані на північ. Тобто в дослідженні використано мінімальні значення автономності природного освітлення.

Таблиця 2

Помісячна тривалість роботи, год/міс												
Величина	Місяць											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
t_p	207	180	198	189	207	189	198	207	180	207	198	189

Для розрахунків, тривалість робочого дня була прийнятою 9 год (з 9:00 до 18:00).

Відповідно до українського нормативного документу [32, 45], нормована освітленість офісних приміщень дорівнює 300 лк ($АПО_{300}$). Встановивши помісячну тривалість роботи в офісних приміщеннях можна визначити залежність $АПО_{300}$ від величини КПО. Вихідні дані, щодо помісячної тривалості робочого часу, які використовувались при розрахунках в програмі Relux, наведено в **табл. 2**.

2.2. Визначення площі та розмірів СЗОК необхідних для забезпечення відповідної величини КПО в РТ

У зв'язку з тим, що ні за величиною КПО ні за розміри приміщення визначити площу СЗОК не можливо, ми скористалися поняттям зведений індекс засклення приміщення (ЗІЗП) [31]

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

де 1,1 – коефіцієнт запасу [31].

Проте при визначенні ЗІЗП в [31] не враховано вплив КВПСР ($\epsilon_{зс}$) на величину КПО. В дослідженні [31] його величина прийнята рівною $\epsilon_{зс} = 0,8$. Відповідно до [32] величина КПО прямо пропорційна коефіцієнту пропускання світла. Тому, для його врахування, вираз (1) необхідно помножити на $0,8/\epsilon_{зс}$. Тоді вираз (1) прийме наступний вигляд (2)

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

Виходячи з цих даних, а також з залежності ЗІЗП від КПО (2), за [41] можна визначити необхідну площу засклення СЗОК за формулою (3) [31]

$$I_{зс.п} = S_{зс} / S_{рп} \cdot \sqrt[4]{2 \cdot l_{рп} / d_{рп}} \cdot 100, \% \quad (3)$$

де $S_{зс}$ – площа засклення СЗОК, m^2 [46];

$S_{рп}$ – площа робочої поверхні ($S_{рп} = 2 \cdot l_{рп} \times d_{рп}$), m^2 ;

$d_{рп}, l_{рп}$ – координати розташування РТ в приміщенні (**рис. 1, т. В**), м.

Відповідно до нормативного документу [32], який гармонізований з європейським стандартам [45], бокове природне освітлення нормується за мінімальним значенням КПО. Тому, РТ для його визначення, була вибрана у найвіддаленішому місці РП на відстані 1 м від стіни, протилежної до СЗОК.

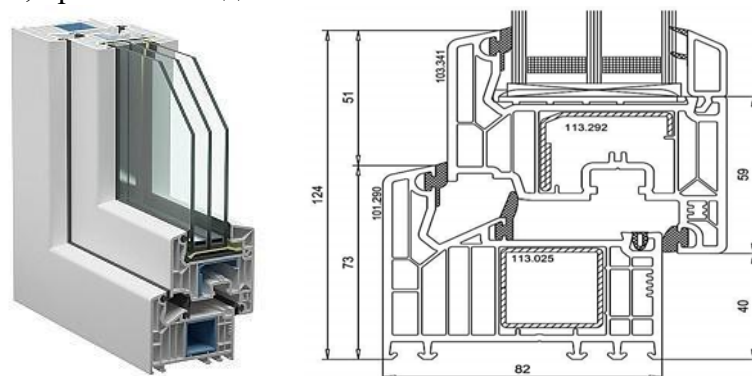


Рис. 2. Зовнішній вигляд та розміри профілю Veka Softline 82 з склопакетом 4Solar-16Ar-4-12Ar-4i [47]

У якості СЗОК використано металопластикове вікно з профілем Veka Softline 82 та склопакетом 4Solar-16Ar-4-12Ar-4i, з термічним опором $1 \text{ (м}^2 \times \text{°C)/Вт}$ та КВПСР 0,68 відн. од. (рис. 3)

Виходячи з отриманого значення ЗІЗП, з [41] можна визначити мінімальну площу застосування СЗОК, при якій забезпечується нормована освітленість в розрахунковій точці робочої поверхні за виразом (4) [31].

$$S_{\text{ЗС}} = I_{\text{ЗС.П}} \cdot S_{\text{РП}} \cdot \sqrt[4]{d_{\text{РТ}} / (2 \cdot l_{\text{РТ}})} / 100, \text{ м}^2. \quad (4)$$

Наступним, відповідно до алгоритму з [31] необхідно задати індекс координації приміщення ($i_{\text{К.СЗОК}}$), оскільки, відповідно до [48] пропорції СЗОК впливають на значення КПО в РТ. Розміри застосування СЗОК визначено за допомогою виразів (5) і (6)

$$h_{\text{ЗС}} = \sqrt{S_{\text{ЗС}} / i_{\text{К.СЗОК}}}, \text{ м}, \quad (5)$$

де $i_{\text{К.СЗОК}}$ – індекс координації СЗОК;

$$l_{\text{ЗС}} = \sqrt{S_{\text{ЗС}} \cdot i_{\text{К.СЗОК}}}, \text{ м}. \quad (6)$$

Для визначення площі СЗОК необхідні дані щодо ширини профілю і заповнення СЗОК. Для цього необхідно визначити висоту і ширину СЗОК. Виходячи з розмірів застосування та товщини профілю їх можна визначити за виразами (7) і (8)

$$h_{\text{СЗОК}} = h_{\text{ЗС}} + 2 \cdot l_{\text{ПРОФ}}, \text{ м}, \quad (7)$$

де $l_{\text{ПРОФ}}$ – товщина профілю, м [47];

$$l_{\text{СЗОК}} = l_{\text{ЗС}} + 2 \cdot l_{\text{ПРОФ}}, \text{ м} \quad (8)$$

Товщину заповнення визначено з [46], за виразами (9)

$$\begin{cases} \text{якщо } l_{\text{СЗОК}} > h_{\text{СЗОК}}, \text{ то } l_{\text{ЗП}} = (125 \cdot l_{\text{СЗОК}}^2 - 123 \cdot l_{\text{СЗОК}} + 1050) \cdot 10^{-5} \text{ м}, \\ \text{якщо } l_{\text{СЗОК}} < h_{\text{СЗОК}}, \text{ то } l_{\text{ЗП}} = (125 \cdot h_{\text{СЗОК}}^2 - 123 \cdot h_{\text{СЗОК}} + 1050) \cdot 10^{-5} \text{ м}, \\ \text{якщо } l_{\text{СЗОК}} \text{ або } h_{\text{СЗОК}} \geq 4,5 \text{ м, то приймаємо } l_{\text{ЗП}} = 0,03 \text{ м.} \end{cases} \quad (9)$$

Відповідно до [31] площа СЗОК визначається за формулою (10)

$$S_{\text{СЗОК}} = S_{\text{ЗС}} + 2 \cdot l \cdot (l_{\text{СЗОК}} + h_{\text{СЗОК}} + 2 \cdot l), \text{ м}^2 \quad (10)$$

де l – ширина непрозорої частини СЗОК [46], м.

Ширина непрозорої частини СЗОК, відповідно до [46] визначена за виразом (11)

$$l = l_{\text{ПРОФ}} + l_{\text{ЗП}}, \text{ м}. \quad (11)$$

Розрахунки проведено за алгоритмом, який наведено на блок-схемі на рис.3.

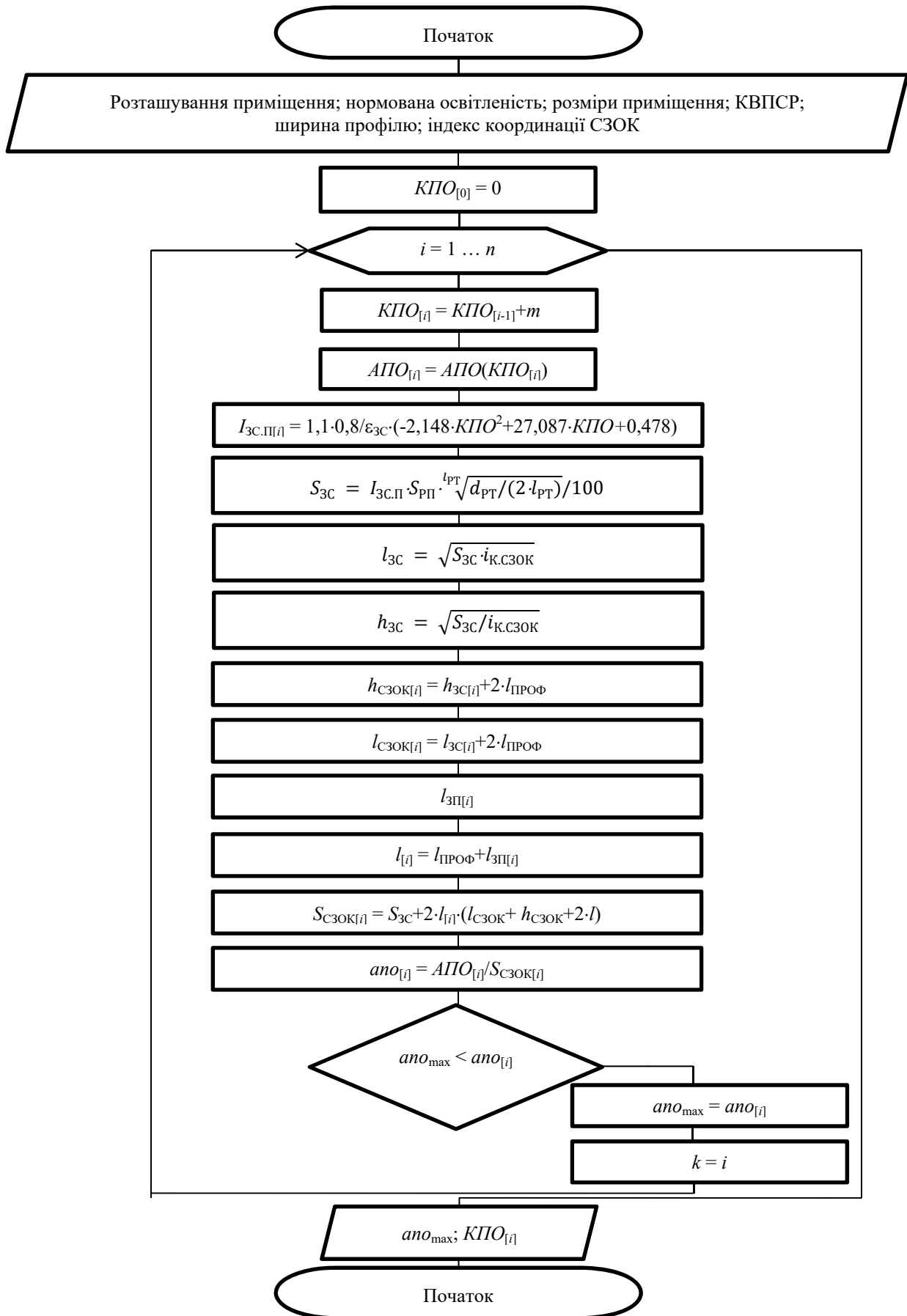


Рис. 3. Блок-схема розрахунку значення КПО, при якому досягається максимальне значення питомої автономності природного освітлення

3. Результати досліджень

3.1. Перевірка доцільності використання СК, WWR та ЗІЗП для оцінки природного освітлення

У східноєвропейських країнах, таких, як Україна, Білорусь, Росія та ін. для порівняння енергоефективності СЗОК використовується світловий коефіцієнт (СК), який визначається як відношення площі СЗОК до площі підлоги приміщення (S_{Π}). В англійській літературі СК згадується як window to floor ratio (WFR). Для даних значень КПО відношення СК наведено в [табл. 3](#).

Таблиця 3

Значення СК, при яких забезпечується необхідна величину КПО для приміщень різних в плані розмірів, %

КПО, %	Розміри приміщення, м								
	4×2	4×3	4×4	4×5	5×3	5×4	5×5	6×3	6×4
1,9	14.5	26.7	37.4	47.0	25.9	34.2	41.2	26.0	33.2
2,0	15.0	27.7	38.8	48.9	26.9	35.6	42.9	27.0	34.6

Як видно з [табл. 3](#), значення СК, при якому забезпечується величина КПО в 1.9% і 2%, для приміщень, які розглянуто, змінюються від 14.5% до 47.0% в першому випадку і від 15% до 48.9% – в другому. Тобто, в залежності від розмірів приміщення, значення СК можуть відрізнятися в 3.24-3.26 раз. З чого можна зробити висновок про недопустимість використання СК для оцінки природної освітленості приміщень.

У дослідженнях [[3](#), [16](#), [27](#), [49-57](#)], для узагальнення отриманих результатів було використано WWR, тобто відношення площі СЗОК ($S_{СЗОК}$) до внутрішньої площі огорожувальної конструкції $S_{ЗОК}$, в якій він встановлений. Висота досліджуваного приміщення 3 м.

Таблиця 4

Значення WWR, при яких забезпечується необхідна величина КПО для приміщень різного розміру, %

КПО, %	Розміри приміщення, м								
	4×2	4×3	4×4	4×5	5×3	5×4	5×5	6×3	6×4
1,9	9,6	26,7	49,8	78,3	25,9	45,6	68,7	26,0	44,3
2,0	10,0	27,7	51,8	81,5	26,9	47,4	71,5	27,0	46,1

Як видно з [табл. 4](#), в залежності від розмірів приміщення значення WWR, при якому забезпечується величина КПО в 1.9% і 2.0% змінюється від 9.6% до 78.3% в першому випадку і від 10.0 до 81.5% – в другому. Тобто для приміщення з розмірами (ширина×глибина×висота) 4×2×3 м значення WWR буде в 8,15 раз меншим, а ніж для приміщення з розмірами 4×5×3 м. Це свідчить про недопустимість використання цього показника при дослідженні енергоефективності використання природного освітлення.

Як бачимо використання як СК так і WWR для оцінки ефективності використання природного освітлення є недопустимим.

Для того, щоб визначити похибку, яка спостерігається при використанні ЗІЗП визначимо величину КПО в РТ, яка буде забезпечена в розглянутих приміщеннях з площею СЗОК, яка вказана в [табл. 2](#).

Розрахунки проведено в програмі Relux за алгоритмом глобальної освітленості (Radiosity). Похибка не перевищила 7% [[58](#)]. Згідно з [[59](#)] похибка розрахунків в програмі Relux не перевищує $\pm 10\%$. Цього цілком достатньо для проведення різного роду світлотехнічних розрахунків.

Методику розрахунку КПО в РТ наведено в [31]. Коефіцієнти забруднення та поглинання прийняті рівними 0,9. Результати розрахунку величини КПО в РТ в приміщеннях з СЗОК площею, вказаною в табл. 2, наведено в табл. 5. Аналіз даних табл. 5 показав, що для значень КПО 1,9% і 2,0%, в приміщеннях з розмірами 4×5; 5×5; і 6×5 площа СЗОК повинна становити 9,78 м², 10,72 м² і 12,19 м² відповідно. Оскільки висота приміщень прийнято на рівні 3 м, а відповідно до виразу (5), для даних випадків вона становитиме 3,13 м, 3,27 м і 3,49 м, то їх висота перевищує висоту приміщення. Тому розрахунок відхилення КПО від заданого значення визначимо для значення КПО в 0,8% ($I_{зс.п} = 20,66$) та 1% ($I_{зс.п} = 26,89$).

Таблиця 5

Результати розрахунку КПО для досліджуваних приміщень різного розміру, в залежності від ЗІЗП, %

ЗІЗП (КПО),%	Розміри приміщення, м									
	4×2	4×3	4×4	4×5	5×3	5×4	5×5	6×3	6×4	6×5
20,66 (0,8)	0,256	0,931	1,009	0,922	0,922	0,918	0,914	0,527	0,957	0,803
26,89 (1,0)	0,467	1,113	1,173	1,084	1,052	1,139	1,100	0,906	1,158	1,067

Як видно з табл. 5, для приміщень різного розміру, при однаковому значенні ЗІЗП відносна похибка КПО не перевищує 26,1% $((0,8-1,009)/0,8 \cdot 100)$, окрім випадків, коли ширина приміщення вдвічі перевищує глибину ($l_{п} \geq 2 \cdot d_{п}$). Така велика похибка пояснюється тим, що в [31] для компенсації несинхронності зміни КПО від пропорцій СЗОК для приміщень довільних розмірів використовується коефіцієнт запасу, який призводить до завищення значень КПО над нормованим.

В той час, як СК та WWR в залежності від розмірів приміщення можуть відрізнитись в декілька разів, використання ЗІЗП дозволяє розробити єдині критерії оцінки ефективності природного освітлення. Тому для вирішення даної проблеми ми пропонуємо використовувати ЗІЗП, оскільки він враховує розміри приміщення.

Для встановлення оптимальних параметрів СЗОК в подальших дослідженнях необхідно розглянути вплив СЗОК на енергетичний баланс приміщення. Для цього потрібно врахувати не тільки економію електроенергії за рахунок використання природного світла, але й зростання втрат тепла в наслідок теплопередачі та теплонадходжень від сонячного випромінювання в опалювальний період, а також теплонадходжень в охолоджувальний період, що частково розглянуто нами в [60].

3.2. Автономність природного освітлення офісних приміщень

Оскільки нормована освітленість офісних приміщень повинна становити 300 лк, то знаючи помісячну тривалість роботи, можна визначити залежність тривалості забезпечення нормованої освітленості від величини КПО. На рис. 4 представлено графік залежності $АПО_{300}$ від величини КПО протягом року для міст Тернопіль (49°34' пн. ш. 25°36' сх. д.), Київ (50°27' пн. ш. 30°31' сх. д.), Париж (48°51' пн. ш. 2°21' сх. д.) та Берлін (52° 31' пн. ш., 13° 24' сх. д.).

Як видно з рис. 4, для м. Тернопіль, при зміні значення КПО від 0,4% (рис. 4, т. А) до 0,6% (рис. 4, т. В) і від 1,2% (рис. 4, т. D) до 1,4% (рис. 4, т. Е) спостерігається стрибкоподібна зміна $АПО_{300}$. Тобто на даних ділянках збільшення величини КПО на 0,2% призводить до суттєвого зростання економії електроенергії на штучне освітлення. В загальному, при збільшенні величини КПО на 1%, отримаємо наступну різницю в $АПО_{300}$: при зміні від 0% до 1% (рис. 4, т. С) – 599,00 год; від 1% (рис. 4, т. С) до 2% (рис. 4, т. F) – 986,58 год; від 2% (рис. 4, т. F) до 3% (рис. 4, т. G) – 187,92 год; від 3% (рис. 4, т. G) до 4% (рис. 4, т. H) – 77,52 год; від 4% (рис. 4, т. H) до 5% (рис. 4, т. I) –

46,98 год. В той час, як різниця між 0,4-0,6% становить 211,41 год і між 1,2-1,4% – 239,60 год. Виходячи з отриманих результатів, можна стверджувати, що при зміні певних значень КПО (рис. 4, т. А, рис. 4, т. D) на 0,2% (рис. 4, т. В, рис. 4, т. E) можна досягти такого ж зростання $АПО_{300}$, як і при зміні інших (рис. 4, т. F, рис. 4, т. G) на 1% (рис. 4, т. F, рис. 4, т. H).

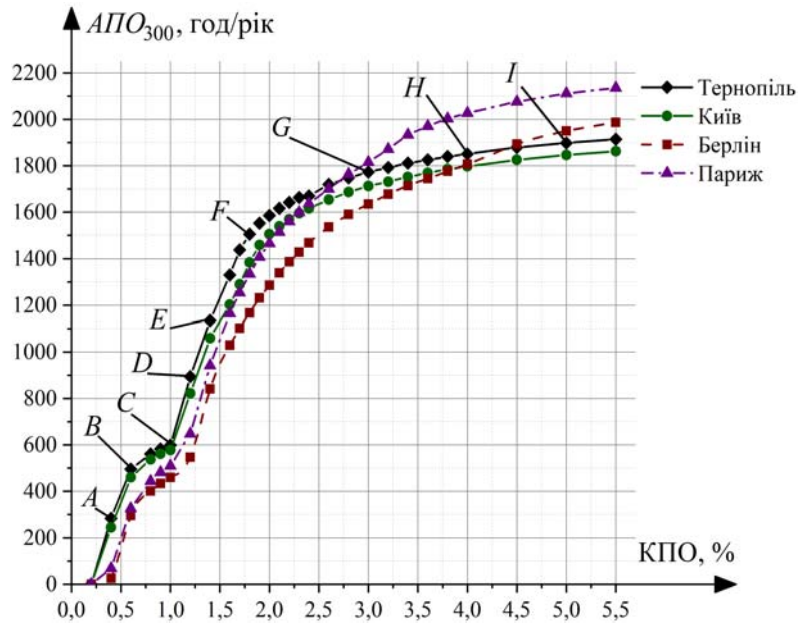


Рис. 4. Залежність автономності природного освітлення від величини КПО, при нормованій величині освітленості 300 лк для чотирьох міст

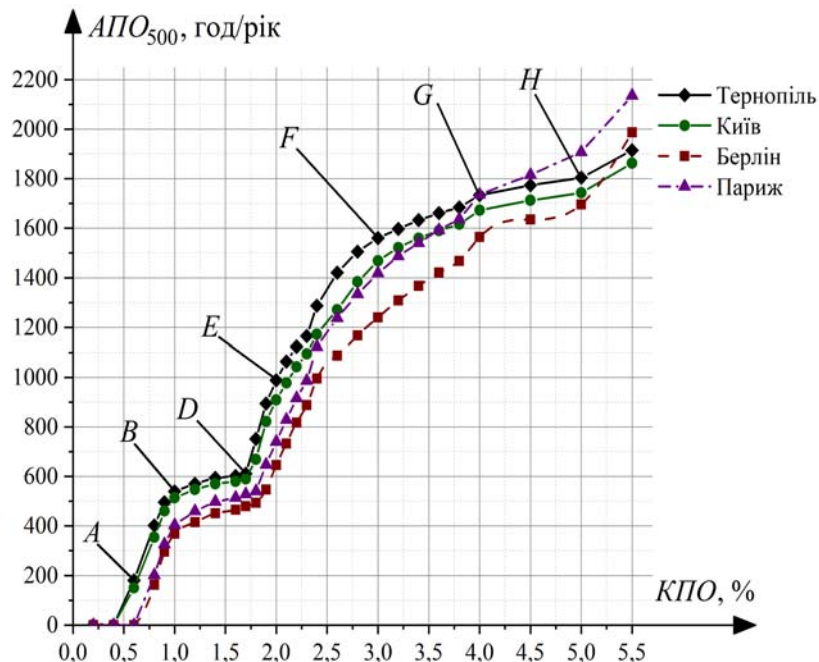
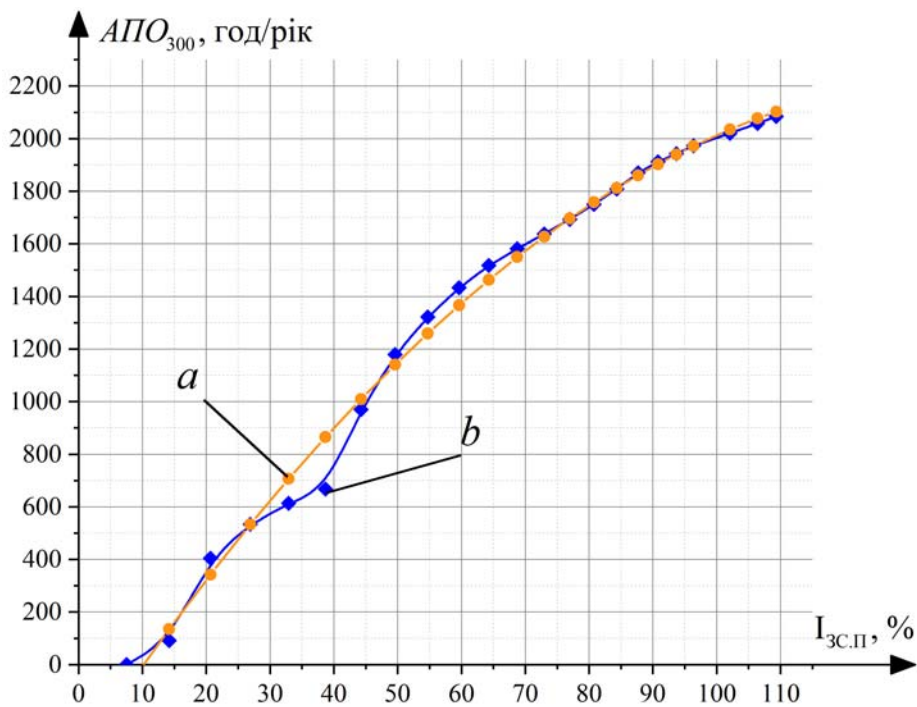


Рис. 5. Залежність автономності природного освітлення від величини КПО, при нормованій величині освітленості 500 лк для чотирьох міст

Якщо ж порівнювати графіки залежності $АПО_{300}$ і $АПО_{500}$ від величини КПО (рис. 4 і рис. 5), то бачимо різну за значенням, але схожі за формою залежності. Також слід зауважити, що попри те, що по величині нормованої освітленості для $АПО_{500}$, вона має

бути в 1,67 раз більшою, а ніж для $АПО_{300}$, значення цих величин відрізняються на: при величині КПО в 1% (рис. 4, т. С і рис. 5, т. В) – 17,25%, 2% (рис. 4, т. F і рис. 5, т. E) – 43,56%, 3% (рис. 4, т. G і рис. 5, т. F) – 15,10%, 4% (рис. 4, т. H і рис. 5, т. G) – 9,01%, 5% (рис. 4, т. I і рис. 5, т. H) – 6,56%.

Для встановлення аналітичної залежності $АПО_{300}$ від розмірів приміщення та площі СЗОК побудуємо графічні залежності $АПО_{300}$ від ЗІЗП (рис. 6), для цього використаємо дані, отримані при визначенні залежності $АПО_{300}$ від величини КПО в РТ (рис. 4). Дані наведені для м. Тернопіль, Україна.



a – апроксимовані значення $АПО_{300}$, розраховані в Relux
b – значення $АПО_{300}$ розраховані в програмі Relux (рис. 4).

Рис.6. Залежність $АПО_{300}$ від величини ЗІЗП для м. Тернопіль

В результаті апроксимації отриманих точкових даних (рис. 6, крива *a*) методом найменших квадратів отримано вираз (12), який дозволяє визначити величину $АПО_{300}$ для довільних значень ЗІЗП для м. Тернопіль, а відповідно і розмірів приміщення та площі СЗОК з стандартним відхиленням 82,6 і коефіцієнтом детермінації 0,979 (рис. 6, крива *b*). Апроксимація проводилась за допомогою програми Advanced Grapher.

$$АПО_{300} = -0,227 \cdot I_{ЗС.П}^2 + 45,854 \cdot I_{ЗС.П} - 420,953, \text{ год/рік} \quad (12)$$

Для м. Київ $АПО_{300}$ з стандартним відхиленням 71,22 і коефіцієнтом детермінації 0,983 визначається за формулою (13)

$$АПО_{300} = -0,203 \cdot I_{ЗС.П}^2 + 42,680 \cdot I_{ЗС.П} - 401,236, \text{ год/рік} \quad (13)$$

Для м. Берлін $АПО_{300}$ з стандартним відхиленням 67,66 і коефіцієнтом детермінації 0,987 визначається за формулою (14)

$$АПО_{300} = -0,115 \cdot I_{зс.п}^2 + 34,564 \cdot I_{зс.п} - 414,578, \text{ год/рік} \quad (14)$$

Для м. Париж $АПО_{300}$ з стандартним відхиленням 76,73 і коефіцієнтом детермінації 0,987 визначається за формулою (15)

$$АПО_{300} = -0,146 \cdot I_{зс.п}^2 + 40,248 \cdot I_{зс.п} - 481,275, \text{ год/рік.} \quad (15)$$

3.3. Питома ефективність використання природного освітлення

Розглянемо приклад визначення мінімальних параметрів СЗОК, при яких виникає економія електроенергії на штучне освітлення. Дослідження проводилось для приміщення з розмірами (ширина×глибина×висота) 6×4×3 м.

З (2) визначено значення ЗІЗП, яке відповідає необхідній величині КПО. Обраний склопакет (рис. 3), відповідно до даних виробника, має КВПСР 0,68 відн. од. і товщину профілю 0,073 м, для глухої СЗОК. Для значення КПО 0,6%, при КВПСР 0,68 ЗІЗП становить

$$I_{зс.п} = 1,1 \cdot 0,8 / 0,68 \cdot (-2,148 \cdot 0,6^2 + 27,087 \cdot 0,6 + 0,487) = 20,66.$$

Виходячи з отриманого значення КПО в РТ мінімальне значення площі застосування, визначене за (4), становить

$$S_{зс} = 20,66 \cdot 15 \cdot \sqrt[2,5]{3 / (2 \cdot 2,5)} / 100 = 2,53, \text{ м}^2.$$

Оскільки, відповідно до [31] та [48], при зміні розмірів приміщень залежність КПО від пропорцій СЗОК не є синхронною, для кожного конкретного випадку необхідно вибирати оптимальний варіант пропорцій СЗОК. Тому, для спрощення розрахунків, індекс координації СЗОК приймаємо рівним 1 ($i_{к.сзок} = 1$).

Для отримання КПО 0,6% при КВПСР 0,68 з $i_{к.сзок} = 1$, відповідно до (5) та (6), застосування СЗОК повинно мати наступні розміри: $h_{зс} = 1,59$ м, $l_{зс} = 1,59$ м.

Для визначення площі СЗОК необхідно визначити ширину профілю і заповнення СЗОК. Відповідно до [47] товщина профілю для глухої СЗОК (рис. 3) становить 0,073 м.

Виходячи з розмірів застосування та товщини профілю за (7) і (8) висота і ширина СЗОК будуть мати наступні розміри: $h_{сзок} = 1,736$ м, $l_{сзок} = 1,736$ м.

При ширині СЗОК 1,736 м, за формулою (9), ширина заповнення становить

$$l_{зп} = (125 \cdot 1,736^2 - 123 \cdot 1,736 + 1050) \cdot 10^{-5} = 0,012 \text{ м.}$$

Ширина непрозорої частини СЗОК, відповідно до (11) становить

$$l = 0,073 + 0,012 = 0,085, \text{ м.}$$

Для забезпечення значення КПО в 0,6%, відповідно до (10) площа СЗОК повинна становити

$$S_{сзок} = 2,53 + 2 \cdot 0,085 \cdot (1,59 + 1,59 + 2 \cdot 0,085) = 3,097 \text{ м}^2.$$

Для визначення площі СЗОК при якій забезпечується максимальна ефективність СЗОК, необхідно розрахувати їх значення для приміщень різних розмірів. Для цього проведемо вищевказані розрахунки для приміщень з розмірами (ш×г): 4×2 м, 4×3 м, 4×4 м, 4×5 м, 5×3 м, 5×4 м, 5×5 м, 6×3 м, 6×4 м і 6×5 м. Результати розрахунків наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Площа СЗОК, при якій забезпечується необхідне значення КПО, для приміщень з різними розмірами, для м. Тернопіль, м²

КПО, %	Розміри приміщення, м									
	4×2	4×3	4×4	4×5	5×3	5×4	5×5	6×3	6×4	6×5
0,6	0,51	1,30	2,35	3,63	1,56	2,67	3,96	1,86	3,10	4,48
0,8	0,62	1,63	2,98	4,62	1,97	3,40	5,05	2,35	3,94	5,73
1,0	0,73	1,95	3,58	5,58	2,35	4,09	6,10	2,82	4,75	6,92
1,2	0,84	2,25	4,15	6,49	2,72	4,75	7,11	3,27	5,52	8,07
1,6	1,03	2,81	5,23	8,21	3,41	5,98	8,99	4,11	6,97	10,22
1,7	1,07	2,94	5,48	8,62	3,57	6,28	9,44	4,30	7,31	10,73
1,8	1,11	3,07	5,73	9,01	3,73	6,56	9,88	4,50	7,65	11,22
1,9	1,16	3,20	5,98	9,40	3,88	6,84	10,30	4,68	7,98	11,71
2,0	1,20	3,32	6,21	9,78	4,03	7,11	10,72	4,87	8,30	12,19
2,2	1,28	3,56	6,67	10,51	4,33	7,64	11,52	5,22	8,91	13,10
3,0	1,56	4,39	8,27	13,08	5,35	9,49	14,35	6,47	11,08	16,33
4,0	1,81	5,17	9,79	15,51	6,31	11,23	17,02	7,64	13,13	19,38

Питому автономність природного освітлення визначено за виразом (12)

$$ano = APO / S_{\text{СЗОК}}, \text{ год}/(\text{рік} \cdot \text{м}^2). \tag{12}$$

В результаті розрахунків отримано дані, щодо ефективності використання площі СЗОК для м. Тернопіль, які представлено на рис. 7.

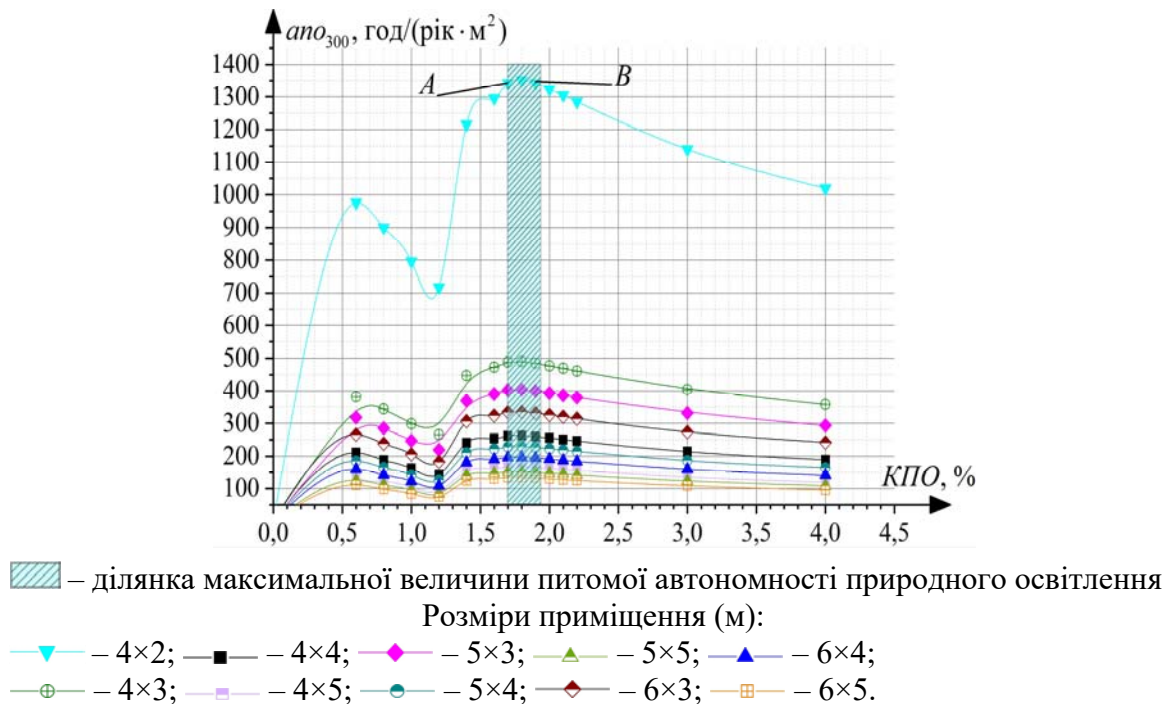


Рис. 7. Залежність питомої автономності природного освітлення від величини КПО, для приміщень різного розміру, при нормованій величині освітленості 300 лк розташованих в м. Тернопіль

Як видно з **рис. 7**, максимальна ефективність використання СЗОК для забезпечення природного освітлення, при нормованій освітленості в 300 лк (від 1342,82 год/(рік·м²) до 1351,52 год/(рік·м²)) спостерігається при величині КПО від 1,7% (**рис. 7, т. А**) до 1,9% (**рис. 7, т. В**). Екстремум – при 1,8%.

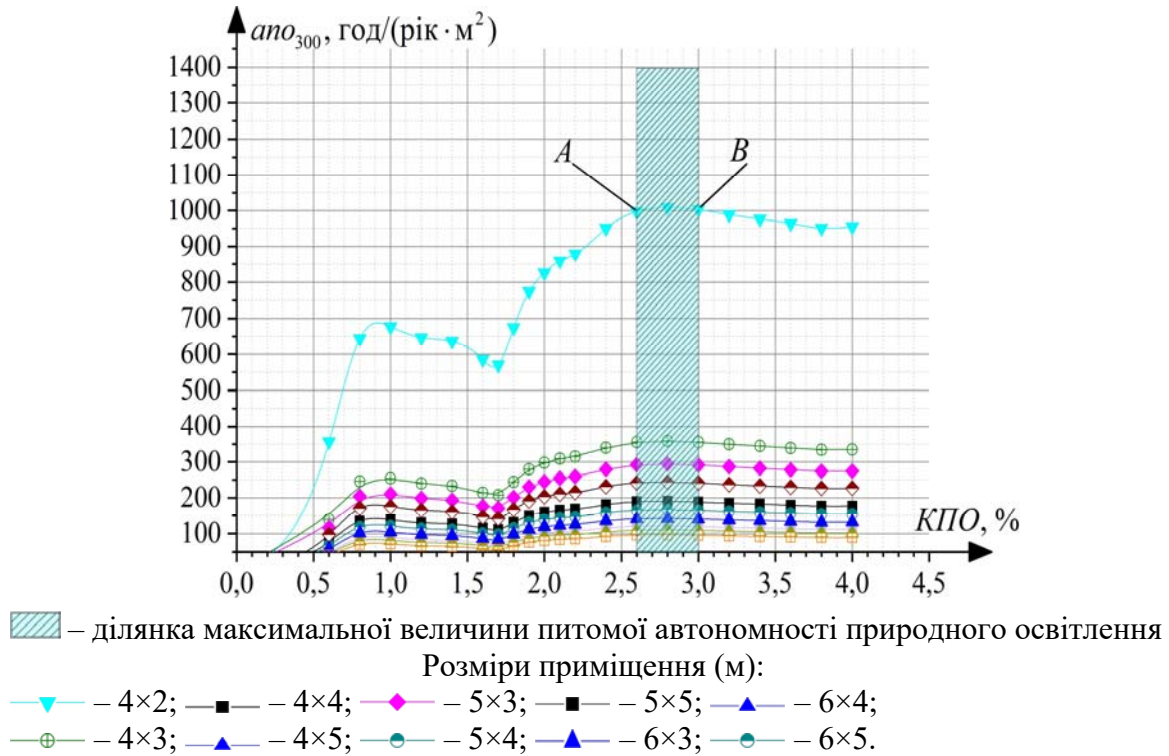


Рис. 8. Залежність питомої автономності природного освітлення від величини КПО, для приміщень різного розміру, при нормованій величині освітленості 500 лк, розташованих в м. Тернопіль

Відповідно до **рис. 8**, при нормованій освітленості в 500 лк максимальна ефективність використання СЗОК для забезпечення природного освітлення (від 997,71 год/(рік·м²) до 1009,35 год/(рік·м²)) спостерігається при величині КПО від 2,6% (**рис. 8, т. А**) до 3,0% (**рис. 8, т. В**), з екстремумом – при 2,8%.

4. Обговорення

Ця робота присвячена визначенню аналітичних залежностей автономності природного освітлення від величини КПО та площі СЗОК для приміщень різних розмірів. Доцільність проведеного дослідження зумовлена необхідністю економії енергетичних ресурсів в будівлях за рахунок підвищення енергетичної ефективності СЗОК шляхом збільшення тривалості надходжень денного світла в приміщення протягом року.

В дослідженнях [3, 12, 16, 18, 19, 29, 30, 39, 40, 49-56] представлені результати енергоефективності СЗОК, використовуючи WWR та WFR для визначення параметрів її максимальної енергоефективності. В статтях [18, 19] наведено результати моделювання витрат енергії для 108 випадків і запропоновано показник енергоефективності EDR. Проте ці результати отримані за допомогою комп'ютерного моделювання для конкретних випадків, що унеможливує їх широке використання. Для того, щоб можна було представити результати типових досліджень у вигляді

аналітичних виразів, виникла необхідність в дослідженні залежності енергетичної ефективності природного освітлення (яка виражається в її автономності). Тому в рамках даного дослідження було проведено дослідження залежності $АПО_{300}$ ш $АПО_{500}$ від КПО для декількох міст.

Доведено, що ефективність використання площі СЗОК для забезпечення природної освітленості 300 лк в офісному приміщенні максимальна при величині КПО 1,8%. Для 500 лк – при КПО 2,8%. Встановлено, що для оцінки ефективності СЗОК для освітлення приміщення доцільно використовувати зведений індекс засклення приміщення (ЗІЗП). При використанні світлового коефіцієнта (СК) або window to wall ratio (WWR) зміна розміру приміщень призводить до суттєвого зростання похибки розрахунків – в 3,24 раз для СК і в 8,15 раз для WWR. В той час як при використанні ЗІЗП похибка не перевищує 26,1%.

Також слід зауважити, що в залежності від розміщення досліджуваного об'єкту значення питомої автономності природного освітлення можуть відрізнятися від представлених в даному дослідженні. Це пояснюється тим, що протягом року окрім зміни траєкторії падіння сонячних променів досить динамічно змінюється і хмарність. Тому подібного роду розрахунки потрібно проводити для кожного конкретного випадку окремо.

Щодо використання зведеного індексу засклення приміщень, то йому також притаманні певні обмеження. Якщо ширина приміщення буде вдвічі перевищувати глибину ($l_{\Pi} \geq 2 \cdot d_{\Pi}$), – похибка може зрости до 68%.

Оскільки автономність природного освітлення враховує рівні освітленості вище нормованого значення, для сумарної оцінки потенціалу використання природного освітлення необхідно врахувати і граничні значення освітленості на робочій поверхні (3000 лк) [61]. Це необхідно для того, щоб врахувати відблиски та необхідність використання сонцезахисних пристроїв. Для цього в подальших дослідженнях потрібно об'єднати автономність природного освітлення з показником UDI (корисна природна освітленість) [62].

4. Висновки

Стаття присвячена визначенню величини КПО, при якій досягається максимальна ефективність використання природного світла для освітлення приміщень. В результаті досліджень встановлено, що найбільша ефективність використання природного світла для освітлення приміщень, при нормованій освітленості 300 лк характерна для значень КПО в межах від 1,7% до 1,9%. Для значення 1,8% – вона максимальна при нормованій освітленості в 500 лк максимальна ефективність використання СЗОК спостерігається при величині КПО від 2,6% до 3,0% з екстремумом при 2,8%.

В межах значень КПО від 0,8% до 1,2% для $АПО_{300}$ і від 1,2% до 1,7% для $АПО_{500}$ спостерігається різкий спад ефективності використання природного світла для забезпечення нормованої освітленості. В результаті апроксимації точкових значень, отримано вирази для визначення автономності природної освітленості, для нормованої величини освітленості в 300 лк, для приміщень різних розмірів з різною площею СЗОК.

Визначені параметри світлопрозорих зовнішніх огорожувальних конструкцій та коефіцієнта природного освітлення при яких забезпечується максимальна ефективність використання природного світла в офісних приміщеннях різних розмірів. Доведено, що оцінку ефективності використання природного світла для приміщень різних розмірів не доцільно виконувати спираючись на поняття світлового коефіцієнта та коефіцієнта WWR. Встановлено, що перехід від коефіцієнта природного освітлення до зведеного індексу засклення приміщення дає можливість адекватно оцінювати

енергоефективність використання природного світла в приміщеннях різних розмірів, окрім випадків, коли ширина приміщення буде вдвічі перевищувати $l_{\Pi} \geq 2 \cdot d_{\Pi}$.

На практиці, результати даного дослідження можуть бути використані при проектуванні приміщень шляхом забезпечення максимальної ефективності використання природного світла і, відповідно, економії електроенергії за рахунок зменшення тривалості роботи системи штучного освітлення. Ще один напрямок де можна застосувати наведені результати це розробка нормативних документів для кожного регіону, шляхом визначення максимальної питомої автономності природного освітлення для конкретного регіону. Це дозволить зменшити сумарне споживання електроенергії та підвищити сумарну енергетичну ефективність офісних приміщень.

Список літератури

- [1] С.М. Гвоздев, Д.И. Панфилов, Т.К. Романова, Л.П. Варфоломеев, Энергоэффективное электрическое освещение: учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, (2013) 288 с. Режим доступа: https://issuu.com/undprussia/docs/ee_lighting_textbook.
- [2] M. Boubekri, Daylighting design. Planning strategies and best practice solutions, Birkhäuser, Basel, (2014). Режим доступа: https://issuu.com/birkhauser.ch/docs/daylighting_design._planning_strate
- [3] С.И. Самойлов, А.К. Соловьёв, Проектирование светопроемов в офисах и экономия энергии, Светотехника 1 (2000) 23-25.
- [4] К. Бартенбах, В. Бартенбах, Как правильно осветить рабочее место в офисе?, Современная светотехника, 1 (2010) 70-72. Режим доступа: https://www.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf_file=%252Fimages%252Fnotes%252FFS2010_1_5.pdf
- [5] Y. Koso, Solar House. Daylighting in planning and building, Kontent, 2008.
- [6] Ю.А. Табунщиков, Окна: неизученные возможности. Окно как элемент архитектуры, системы тепло- и солнцезащиты, отопления и вентиляции, а также биоархитектуры, Стройпрофиль 8 (30). Режим доступа: <http://stroyprofile.com/archive/1037>
- [7] E. Neufert Bauentwurfslehre. 42th ed., Buch inkl, Online-Nutzung, 2018, 605.
- [8] Е.В. Коркина, Комплексное сравнение оконных блоков по светотехническим и теплотехническим параметрам, Жилищное строительство, 6 (2015) 60-62. Режим доступа: http://rifsm.ru/u/f/js_06_fin.pdf
- [9] Т.Г. Коржнева, В.Я. Ушаков, А.Т. Овчаров, Анализ теплотерь помещений через системы естественного освещения. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 322 (4) (2013) 56-60. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/analiz-teploter-pomescheniy-cherez-sistemy-estestvennogo-osvesheniya>
- [10] Altan H., Mohelnikova J. Windows influence on room daylighting in residential buildings. Journal of Civil Engineering and Architecture, 9 (2015) 291-299. <http://dx.doi.org/10.17265/1934-7359/2015.03.007>
- [11] L. Bellia, F. Fragliasso, A. Pedace, Evaluation of Daylight Availability for Energy Savings, Journal of Daylighting 2 (2015) 12-20. <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2015.2>
- [12] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, and F. V. Topalis, A critical review of simulation techniques for daylight responsive systems, in: Proceedings of the European Conference on Dynamic Analysis, Simulation and Testing applied to the Energy and Environmental performance of buildings, 2005, Athens, Greece

- [13] A. Choi, K. Song and Y. Kim, The characteristics of photosensors and electronic dimming ballasts in daylight responsive dimming systems, *Building and Environment* 40 (2005) 39-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.07.014>
- [14] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, and F.V. Topalis, The role of spectral response of photosensors in daylight responsive systems, *Energy and Buildings* 40 (2008) 588-599. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.010>
- [15] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, and F. Topalis, Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts, *Energy and Buildings* 40 (2008) 36-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.019>
- [16] C. Ehrlich and K. Papamichael, Judy Lai, Kenneth Revzan, A method for simulating the performance of photosensor-based lighting controls, *Energy and Buildings* 34 (2002) 883-889. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00064-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00064-6)
- [17] B. Paule, J. Boutillier, S. Pantet, Y. Sutter, A lighting simulation tool for the new European daylighting standard, *Proceedings of BSO 2018: 4th Building Simulation and Optimization Conference*, Cambridge, UK: 11-12 September 2018, (2018) 32-37.
- [18] P. Xue, J. Xie, J. Liu, C. Mak, How to choose a better envelope design? A balance between energy and daylighting performance, 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19-22 October 2017, Jinan, China. *Procedia Engineering* 205 (2017) 1027-1033. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.166>
- [19] J. C. Xie, P. Xue, C. M. Mak, J. P. Liu, Balancing energy and daylighting performances for envelope design: A new index and proposition of a case study in Hong Kong, *Applied Energy* 205 (2017) 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.115>
- [20] В.П. Коваль, А. Федусь, Автоматизація вимірювань рівня освітленості від світильників місцевого освітлення, *Збірник тез доповідей XIV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя "Матеріалознавство та машинобудування"*, 27-28 жовтня 2010 року, 2 (2010) 62. Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/12102>
- [21] О. Герега, В.П. Коваль, Енергофактивність освітлення адміністративних приміщень, *Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“*, 8-9 червня 2017 року, (2017) 201. Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/24238>
- [22] В.П. Коваль, Енергофактивність суміщеного освітлення, *Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“*, 8-9 червня 2017 року, (2017) 211-212. Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/24244>
- [23] O. V. Serheichuk, Features of accounting for adjustable sun protection in the calculation of solar heat. *Budivelni konstruktsii*. 80 (2014) 17-21. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2014_80_6
- [24] Meng Tian and Yuehong Su, An Improvement to Calculation of Lighting Energy Requirement in the European Standard EN 15193:2007, *Journal of Daylighting* 1 (2014) 16-28. <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2014.3>
- [25] T. Dogan, Y. C. Park, A new framework for residential daylight performance evaluation. In: *Proceedings of the International IBPSA Building Simulation Conference*, San Francisco, USA (2017) 170-178. Режим доступу: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2017/BS2017_103.pdf
- [26] T. Dogan, Y. C. Park, A critical review of daylighting metrics for residential architecture and a new metric for cold and temperate climates, *Lighting Research & Technology* 51 (2018) 206-230. <https://doi.org/10.1177/1477153518755561>

- [27] А.К. Соловьёв, И. Сунь (2012). Влияния характеристик светопроема на энергопотребление офисного здания в климатической зоне с жарким летом и холодной зимой в Китае. Вестник МГСУ, (9), 31-38. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/vliyaniya-harakteristik-svetoproema-na-energopotreblenie-ofisnogo-zdaniya-v-klimaticheskoy-zone-s-zharkim-letom-i-holodnoy-zimoy-v-kitae-1>
- [28] J. Lee, M. Boubekri, F. Liang, Impact of building design parameters on daylighting metrics using an analysis, prediction, and optimization approach based on statistical learning technique, Sustainability, 11(5) (2019) 1474. <https://doi.org/10.3390/su11051474>
- [29] M-C. Dubois, A. Blomsterberg, Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review, Energy and Buildings 10(43) (2011) 2572-2582. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.001>
- [30] M-C. Dubois, F. Bisegna, N. Gentile, M. Knoop, B. Matusiak, W. Osterhaus and E. Tetri, Retrofitting the Electric Lighting and Daylighting Systems to Reduce Energy Use in Buildings: A Literature Review, Energy Research Journal 1(6) (2015) 25-41. <https://doi.org/10.3844/erj.2015.25.41>
- [31] V. Burmaka, M. Tarasenko, K. Kozak, V. Khomyshyn, Визначення зведеного індексу заклення приміщення, Східно-Європейський журнал передових технологій 4(10 (94)) (2018) 22-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141018>
- [32] Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення: ДБН В.2.5-28-2018. – [Чин. від 28.02.2019]. – К.: Мінбуд України (2019) 133 с. Режим доступу: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_5_28/1-1-0-1188
- [33] Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places: DIN EN 12464-1:2011-08. – [Чин. від 01.08.2011]. – German Institute for Standardisation, 2011. <https://dx.doi.org/10.31030/1737408>
- [34] Конструкції будинків і споруд. Блоки віконні та дверні. Загальні технічні умови: ДСТУ Б В.2.6-23:2009. – [Чин. від 01.08.2009]. – К.: Мінрегіонбуд України (2009) 32 с. Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/5-1-0-1077>
- [35] Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services: ISO 21930. – [Чин. від 01.07.2017]. – ISO (2017) 80 с. Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/61694.html>
- [36] Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2016. – [Чин. від 01.05.2017]. – К.: Мінрегіон України (2017) 31 с. Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-13>
- [37] Thermal insulation of buildings. Including energy efficiency of buildings: ISO 91.120.10. – ISO. Режим доступу: <https://www.iso.org/ru/ics/91.120.10/x/>
- [38] CIE Technical Report Daylight, CIE, Vienna, 1970
- [39] C. F. Reinhart and O. Walkenhorst, Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds, Energy and Buildings 33 (2001) 683-697. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00058-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00058-5)
- [40] Z. Rogers, Daylighting Metric Development Using Daylight Autonomy Calculations In the Sensor Placement Optimization Tool, 2006, Режим доступу: <http://www.archenergy.com/SPOT/download.html>
- [41] ReluxDesktop – the new approach to planning –RELUX, (n.d.). Режим доступу: <https://relux.com/en/relux-desktop.html>
- [42]. P. Byrne, Comparison Study of Four Popular Lighting Simulation Software Programs. Brunel University; 2014 Режим доступу: https://issuu.com/peter.byrne1000/docs/dissertation_-_peter_byrne_-_publis/

- [43]. L. Gabrova, M. Hlaskova, F. Vajkay, Comparative Evaluation of Daylighting Simulation Programs, *Applied Mechanics and Materials* 824 (2016) 732–739. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.824.732>
- [44] I. Anne, R. Nicolas, H. Mette, J. Michael, C. Jens, O. Werner, J. Kjeld, *Daylight Calculations in Practice: An Investigation of the Ability of Nine Daylight Simulation Programs to Calculate the Daylight Factor in Five Typical Rooms*; Danish Building Research Institute, Aalborg University: Aalborg, Denmark (2013) 26.
- [45] DIN EN 17037 – Daylight in buildings. Режим доступу: <https://www.en-standard.eu/din-en-17037-daylight-in-buildings/>
- [46] М.Г. Тарасенко, В.О. Бурмака, К.М. Козак, Залежності відносної та абсолютної площі застакнення від конфігурації та загальної площі віконного прорізу, *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 89(1) (2018) 122-131. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2018.01.122
- [47] Profile Softline 82 – veka.ua, (n.d.). Режим доступу: http://veka.ua/ua/products/win/SOFTLINE_82.html
- [48] Бурмака В. О., Тарасенко М. Г. Дослідження впливу геометричних параметрів віконних прорізів на коефіцієнт природної освітленості // *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»*, 22–24 травня 2018 року. (2018) 196-198. Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/25411>
- [49] A. Nedhal, F. S. F. Syed, A. Adel, Relationship between window-to-floor area ratio and single-point daylight factor in varied residential rooms in Malaysia, *Indian journal of science and technology* 9(33) (2016) 1-8. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i33/86216>
- [50] M. F. M. A. Sadin, N. L. N. Ibrahim, K. Sopian, E. Salleh, Daylighting rules of thumb and a comparison of different floor depth under overcast and intermediate sky without sun, *Proceedings of the 2014 International Conference on Power Systems, Energy, Environment* (2014) 173-177. Режим доступу: <https://pdfs.semanticscholar.org/6900/fad9b4b2f856151fa1af17790aa4d4ae8c0d.pdf>
- [51] M. S. Firas, Daylighting: an alternative approach to lighting buildings, *Journal of American Science* 10 (4) (2014) 1-5. Режим доступу: <http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/am1004/>
- [52] Z. Nouredine, Z. Djamel, 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 115 (2017) 162-172. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.016>
- [53] Ī. Tuğba, An investigation on daylighting performance in educational institutions, *Structural Survey* 31(2) (2013) 121-138. <https://doi.org/10.1108/02630801311317536>
- [54] P. Rathi, Optimization of energy efficient windows in office buildings for different climate zones of the United States, Kent State University (2012) Режим доступу: https://etd.ohiolink.edu/pg_10
- [55] R. M. J. Bokel, The effect of window position and window size on the energy demand for heating, cooling and electric lighting, *Proceedings: Building Simulation* (2007) 117-121
- [56] H. Shen, A. Tzempelikos, A parametric analysis for the impact of facade design options on the daylighting performance of office spaces, 1st International High Performance Buildings conference, Paper 36, (2010)
- [57] P. Zazzini, A. Romano, A. Di Lorenzo, V. Portaluri, A. Di Crescenzo, Experimental Analysis of the Performance of Light Shelves in Different Geometrical Configurations

- Through the Scale Model Approach, *Journal of Daylighting* 7 (2020) 37-56. <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2020.4>
- [58] D. N. Makarov, Computer simulation methods for lighting installations, Doctoral dissertation, Moscow Power Engineering Institute 2007. Режим доступу: http://lightonline.ru/documents/Other/Dissertation_MakarovDN.html
- [59] Xu Yu, Yuehong Su, Xin Chen, Application of RELUX simulation to investigate energy saving potential from daylighting in a new educational building in UK, *Energy and Buildings* 74 (2014) 191-202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.024>
- [60] В. Бурмака, М. Тарасенко, К. Козак, В. Хомишин, Вплив орієнтації світлопрозорої зовнішньої огорожувальної конструкції на енергетичний баланс приміщення. *Вісник ТНТУ*. – Т.: ТНТУ 94(2) (2019) 111-122. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2019.02.111
- [61] Mardaljevic J, Andersen M, Roy N, Christoffersen J, editors. Daylighting metrics: is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability. *Proceedings of the building simulation and optimization conference (BSO12)*, Loughborough, UK; 2012.
- [62] Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 41-57. <https://doi.org/10.1191/1365782805li128oa>
- [63] В. Бурмака, М. Тарасенко, Ефективність використання природного світла в офісних приміщеннях, *Матеріали XXI наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя*, 16-17 травня 2019 року. (2019) 115-116. Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28176>