

УДК 514.18:624.024:725.39

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНИХ РАДІАЦІЙНИХ ЗОН НА КРИВОЛІНІЙНИХ ПОКРИТТЯХ АЕРОВОКЗАЛІВ ПРИ ЇХ РЕКОНСТРУКЦІЇ

Г.М. Іванченко,
д-р техн. наук, професор

Г.В. Гетун,
канд. техн. наук, доцент

В.І. Запривода,
канд. техн. наук, доцент

І.С. Безклубенко,
канд. техн. наук, доцент

А.В. Запривода,
канд. техн. наук, доцент

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.220-228

У статті розглядається актуальна проблема енергоефективної модернізації великих транспортних вузлів через оптимізацію використання сонячної енергії. Об'єктом дослідження є процеси формування інсоляційних зон на складних криволінійних поверхнях покриттів сучасних аеровокзалів із використанням геліоприймальних пристроїв.

Ключові слова: реконструкція, криволінійні поверхні, оболонки, геліоприймачі, сонячна радіація, ефективні сонячні радіаційні зони.

Постановка проблеми і аналіз попередніх досліджень

Аеровокзали є одними з найбільших споживачів електроенергії через цілодобовий режим роботи, складні системи вентиляції, освітлення та обробки багажу. В умовах нестабільності енергоринків та курсу на «декарбонізацію», використання величезних площ покриттів для генерації власної енергії стає не просто екологічним трендом, а економічною необхідністю. Реконструкція сучасних аеровокзалів, особливо в умовах відновлення зруйнованої інфраструктури, вимагає вирішення складних технічних суперечностей.

З одного боку, функціональні вимоги передбачають використання великопрогонних криволінійних оболонок (до 300 м) для вільного планування пасажирських потоків [1, 2]. З іншого боку, необхідність мінімізації використання традиційних енергоносіїв змушує інтегрувати геліосистеми безпосередньо в огорожувальні конструкції [3, 4].

Головною проблемою є жорстка прив'язка будівлі до злітно-посадкової смуги (ЗПС), що обмежує можливість вільної орієнтації геліоприймачів на південь. Це обумовлює необхідність поглибленого дослідження геометричних факторів, які визначають понад 80% ефективності сонячного опромінення [5, 6].

Реконструкція зруйнованих аеровокзалів вимагає вирішення суперечливих завдань. З одного боку, необхідно забезпечити перекриття великих площ без проміжних опор для вільного функціонування пасажиропотоків. З іншого – сучасні вимоги до сталого розвитку диктують необхідність впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Використання сонячної енергії в умовах щільної існуючої забудови аеропорту є найбільш перспективним [7, 8, 9]. Проте ефективність геліосистем критично залежить від орієнтації поверхонь покриттів. При реконструкції архітектор обмежений існуючими інженерними спорудами та жорсткою прив'язкою будівлі до злітно-посадкової смуги (ЗПС). Таким чином, виникає науково-технічна проблема: як адаптувати геометрію великопрогонового покриття, щоб забезпечити максимальний ККД геліосистеми, не порушуючи функціонально-планувальні вимоги аеропорту.

Мета статті. Визначення геометричних та фізико-кліматичних факторів, що впливають на формування ефективних сонячних радіаційних зон (СРЗ) на криволінійних поверхнях аеропортів, та розробка методики їх розрахунку.

Основне дослідження. Процес проектування реконструкції сучасного аеропорту базується на синергії функціональних, конструктивних, естетичних та економічних вимог.

При виборі архітектурної форми основної будівлі аеропорту доцільно використовувати оболонки, що дозволяють перекривати прогони до 300 м. Функціональні вимоги до таких об'єктів можна моделювати геометрично через: задану конфігурацію плану, необхідну кубатуру та мінімальну висоту приміщення.

При розміщенні на поверхні оболонок геліоприймальних пристроїв крім вище перерахованих факторів необхідно враховувати і фактори, які впливають на інтенсивність надходження сонячної радіації на поверхню. Сюди відносяться: технологічні (функціональні) параметри геліосистеми, фізико – кліматичні фактори середовища, конструктивні рішення основної будівлі, фізичні та геометричні параметри будівлі, архітектурно-естетичні рішення, прив'язка головної будівлі до злітно-посадкової смуги, економічні фактори.

Очевидно, що всі ці фактори в різній мірі співвідносяться з процесом надходження сонячної радіації на поверхні покриттів будівель і споруд.

Геометричні фактори визначаються як сонячною геометрією, так і геометрією об'єкту, характеризують взаємне розташування сонячних променів та опроміненої поверхні. Положення сонячних променів залежить від широти місцевості, пори року, дня року і визначається азимутом та висотою сонця в заданий час або закономірністю зміни положення сонячних променів на протязі заданого проміжку часу.

Опромінена оболонка, в свою чергу, характеризується конфігурацією будівлі: розмірами, формою, видом поверхні, положенням.

Фактори цих груп повинні враховуватися при розробці геометричної моделі у вигляді параметрів або через введення поправочних коефіцієнтів.

Фактори впливу на ефективність геліосистем: для стаціонарно розміщених геліоприймачів, що повторюють форму оболонки, критичними є геометричні та фізико-кліматичні фактори. Геометричні параметри визначаються положенням Сонця (азимут, висота) та конфігурацією самої будівлі.

На інтенсивність надходження сонячної радіації впливають геометричні фактори, що характеризують взаємне положення сонячних променів та опроміненої поверхні. Як зазначається у дослідженнях [13, 14, 15], понад 80% впливу на ефективність геліосистеми мають саме геометричні та фізико-кліматичні параметри. Для помірних широт України рекомендовано орієнтацію з відхиленням від осі Пн.-Пд. не більше 30° , що мінімізує втрати енергії до 2%. Проте, при використанні оболонок, кут нахилу змінюється в кожній точці поверхні, що потребує детального розрахунку сонячних радіаційних зон (СРЗ).

Основними критеріями (параметрами), на які потрібно орієнтуватися при визначенні розмірів сонячних радіаційних зон (СРЗ), ефективних з точки зору максимального розміщення геліоприймальних пристроїв, є кількість сонячної радіації S , яка надходить на поверхню і геометричні розміри зони сонячної радіації, ефективної для розміщення геліоприймальних пристроїв і орієнтація за сторонами світу (рис. 1).

Цей рисунок демонструє вхідні параметри

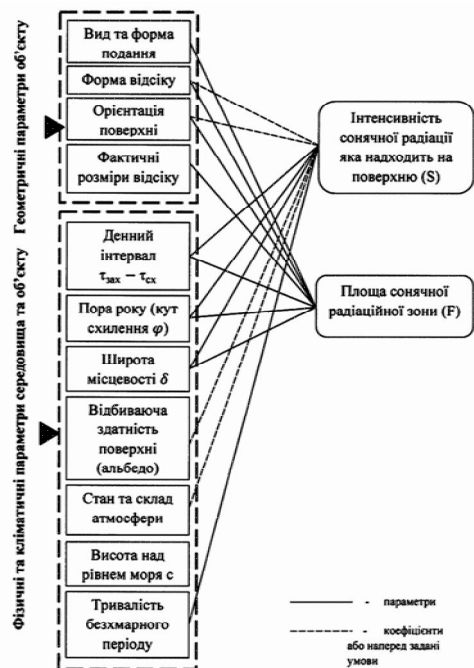


Рис. 1. Параметри необхідні для врахування розмірів сонячної радіаційної зони з максимально можливим розміщенням геліоприймачів

моделі: азимут і висоту сонця, орієнтацію осей будівлі відносно сторін світу та межі відсіків оболонки. Визначено, що відхилення від осі «Північ-Південь» до 30° призводить до втрати лише 2% теплонадходжень, що дає проєктанту певну свободу в адаптації будівлі до ЗПС [16, 17, 18].

При реконструкції терміналів важливо враховувати складну геометрію покриттів (оболонки, склепіння). При виборі архітектурного рішення аеровокзалу криволінійні оболонки є пріоритетними, оскільки дозволяють перекивати прогони до 300 м [19, 20].

Криволінійне покриття аеровокзалу зазвичай задається параметрично через векторну функцію поверхні $R(u,v)$. Для кожної точки поверхні розраховується одиничний вектор нормалі n [21]:

$$n = \frac{\frac{\partial R}{\partial u} \times \frac{\partial R}{\partial v}}{\left| \frac{\partial R}{\partial u} \times \frac{\partial R}{\partial v} \right|}$$

Кут падіння сонячних променів θ визначається через скалярний добуток нормалі n та вектору на Сонце s :

$$\cos\theta = n \cdot s.$$

Ця модель дозволяє ідентифікувати зони максимальної інсоляції («сонячні плями»), що критично для розміщення фотоелектричних елементів під час реконструкції [22].

Основна мета – визначення щільності потоку сонячної радіації I на довільно орієнтовану площину.

Загальна формула для розрахунку сумарної сонячної радіації I_{sum} :

$$I_{sum} = I_b \cdot \cos\theta + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + I_{sum} \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right),$$

де I_b, I_d – пряма та дифузна радіація; θ – кут падіння променів; β – кут нахилу поверхні до горизонту; ρ – альbedo підстильної поверхні.

Для визначення радіаційних зон доцільно використовувати наступний алгоритм [23, 24]:

1. Дискретизація поверхні: розбиття складної форми на скінченні елементи (триангуляція).
2. Розрахунок затінення: використання методів *Ray Casting* для врахування самозатінення частин конструкції аеровокзалу [25].
3. Інтегрування енергії: розрахунок добового або річного притоку енергії для кожного сегмента.

Таблиця 1

Ефективність реконструкції за типами кривини

Тип поверхні	Потенціал інсоляції	Складність моделювання	Рекомендоване джерело
Циліндричне склепіння	Середній	Низька	<i>Perez-Lombard</i> (2021) [26]
Гіперболічний параболоїд	Високий	Середня	<i>Zhangetal</i> (2023) [18]
Фрі-форм (<i>Free-form</i>)	Змінний	Висока	<i>Hachem-Vermette</i> (2022) [17]

Розглянемо визначення ефективних сонячних радіаційних зон на поверхні криволінійних оболонок. Для дослідження обрано дві базові моделі поверхонь другого порядку [27]:

1. Еліпсоїд обертання (замкнена об'їчна форма):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

2. Гіперболічний параболоїд з похилими краями (ефективна конструкційна форма):

$$z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}.$$

Розрахунок миттєвої інтенсивності сонячної радіації I у будь-якій точці поверхні виконується через косинус кута θ між нормаллю до поверхні n та вектором сонячного променя s :

$$I = I_1 \cdot \cos\theta,$$

де I_1 - кількість радіації на площадку, перпендикулярну до променів.

Використаємо геометричну модель надходження сонячної радіації на поверхні цих об'єктів, що являють собою відсіки поверхонь з нанесеними на них сімействами ліній рівного рівня сонячної радіації. Вони є основою для визначення сонячних радіаційних зон (СРЗ) на поверхні оболонки, які отримують найближчу до максимальної кількості сонячної радіації на протязі заданого проміжку часу з урахуванням факторів затінення. Моделлю поверхні буде упорядкований двомірний точковий каркас достатньої вільності над прямокутним планом, а моделлю множини сонячних променів – геометрична конструкція у вигляді конуса сонячних променів з вершиною в опромінюваній точці, параметри якого при заданій широті місцевості змінюються в залежності від широти року [27].

Виконаємо відповідні розрахунки. Результатом розрахунків по запропонованому алгоритму буде сімейство ліній однакового рівня сонячної радіації на конкретний момент часу доби. При цьому ми визначаємо ефективні сонячні радіаційні зони для оптимального розміщення геліоприймальних пристроїв та зони, що попадають у власну тінь (рис. 1, 2, 3).

Для візуалізації розподілу енергії використано метод нанесення сімейств ліній рівного рівня (ізоліній) сонячної радіації на регулярну сітку (10×10) вузлів. У кожному вузлі сітки встановимо нормаль. Визначимо кут між нормаллю до поверхні та вектором, оберненому напрямку сонячних променів за відомою формулою [28, 29]

$$\cos\gamma = \frac{a_x \bar{a}_x + a_y \bar{a}_y + a_z \bar{a}_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \cdot \sqrt{\bar{a}_x^2 + \bar{a}_y^2 + \bar{a}_z^2}}.$$

Підставивши значення $\cos\gamma$ у формулу інтенсивності сонячної радіації в довільно розміщену точку на поверхні, ми отримаємо значення миттєвої інтенсивності в кожному вузлі регулярної сітки (10×10) на поверхні (рис. 2).

$$s_\gamma = s_n \cos\gamma,$$

де s_n – кількість сонячної радіації, яка надходить на площадку перпендикулярну до напрямку сонячних променів і визначається за відомою формулою.

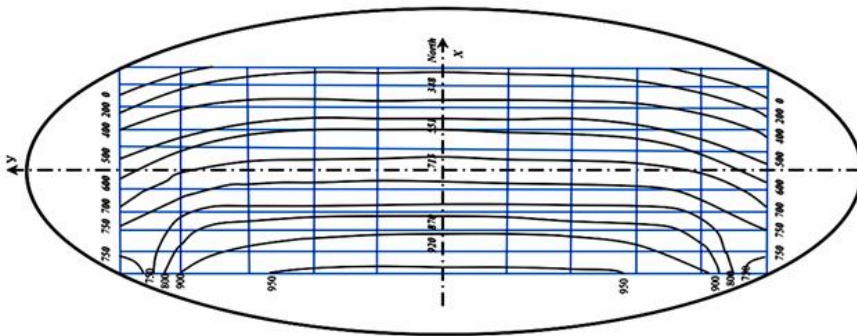


Рис. 2. Миттєва модель розподілу сонячної радіації по відсіку поверхні еліпсоїда

На моделі еліпсоїда чітко виділяється «енергетичне ядро» – зона максимальної інтенсивності, де нормалі до поверхні найближчі до напрямку сонячних променів. Для широт України (близько 50° пн. ш.) ця зона зміщена від zenіту в бік південного фасаду. Аналіз показує, що при використанні еліпсоїда як покриття аеропорту, геліоприймачі доцільно розміщувати у верхній центральній та південно-західній частинах оболонки.

На основі вище наведених формул побудовано моделі розподілу радіації (рис. 3). Розрахунки виконані для трьох різних варіантів при різній орієнтації головного корпусу відносно осі Пн.-Пд. (рис. 3).

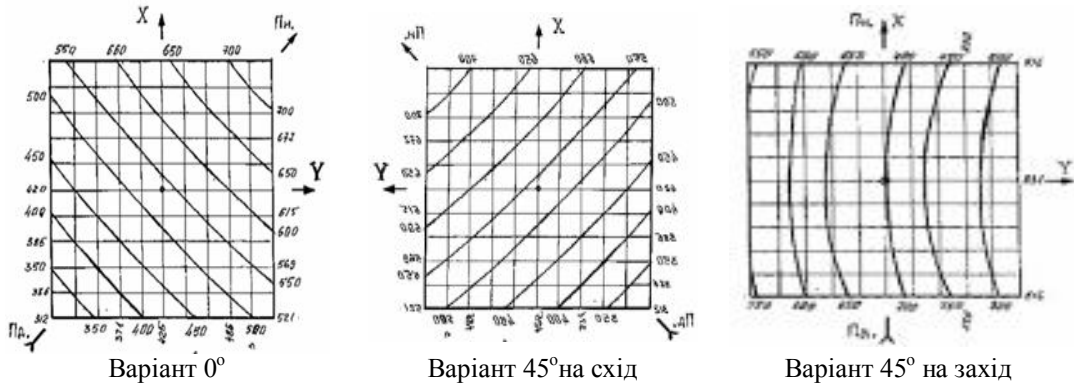


Рис. 3. Миттєва модель розподілу сонячної радіації по поверхні гіперболічного параболоїда з похилими краями

На рисунку 3 представлено три варіанти орієнтації гіпара відносно осі Пн-Пд (0° , 45° на схід, 45° на захід).

Варіант 0° : демонструє симетричний розподіл, проте виявляє значні зони «власної тіні» в увігнутих частинах поверхні.

Варіант 45° : показує складну трансформацію СРЗ. Зона максимального поглинання зміщується до одного з піднятих кутів оболонки. Це доводить, що для таких поверхонь необхідна кластерна схема підключення фотоелементів, оскільки різні частини даху працюють з різною ефективністю в різний час доби [30].

Висновки і перспективи подальших досліджень

Запропонована методика розрахунку миттєвої інтенсивності радіації у вузлах регулярної сітки (10×10) дозволяє точно визначити межі ефективних СРЗ. Моделювання на прикладі еліпсоїда та гіперболічного параболоїда продемонструвало, як зміна орієнтації на 45° впливає на перерозподіл зон власної тіні та сонячної активності.

Обґрунтовано, що в умовах реконструкції, коли потужність традиційних мереж обмежена, геліосистеми на оболонках можуть виступати як ефективне додаткове джерело енергії (для гарячого водопостачання або електрозабезпечення), що знімає необхідність дорогавартісної перекладки інженерних комунікацій.

Якщо при реконструкції аеропорту, якщо технічні умови (ЗПС, існуючі мережі) не дозволяють ідеально зорієнтувати будівлю, рекомендується:

1. Адаптувати геометрію покриття (зміна кривини оболонки) для збільшення площі СРЗ.

2. Використовувати стаціонарні геліоприймачі, що інтегровані в структуру покриття, що зменшує вартість експлуатації порівняно з трекерними системами.

Дослідження показало, що на стадії передпроектних рішень необхідно проводити ітераційний перебір варіантів геометрії оболонки. Використання запропонованого математичного апарату дозволяє визначити ефективні радіаційні зони з урахуванням специфічних обмежень реконструкції аероюзалів. Результатом є вибір такої форми будівлі, яка забезпечує баланс між максимальною площею покриття, архітектурною естетикою та достатнім рівнем енергозаміщення (опалення, вентиляція, електропостачання).

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці автоматизованого програмного модуля, який дозволить у реальному часі корегувати форму оболонки покриття аеропорту залежно від необхідного рівня енергозаміщення, враховуючи при цьому нормативні обмеження щодо висотності та безпеки польотів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kutterer, G. (2018). Geometric modeling of curved solar surfaces for airport infrastructure // *Journal of Infrastructure Systems*. – DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000412.
2. Mesa, F., et al. (2023). Geometric optimization of hyperbolic surfaces for solar collection // *Journal of Solar Energy Engineering*. – DOI: 10.1115/1.4055214.
3. Jelle, B. P. (2016). Building Integrated Photovoltaics: A review // *Energy and Buildings*. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.08.032.
4. Sorgato, S., et al. (2019). The energy savings potential of BIPV in different climates. *Energy*. – DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.088.
5. Запрудова В. І., Запрудова А. В. (2009). Співвідношення геометричних і фізико-кліматичних факторів з процесом надходження сонячної радіації на поверхні покриттів // *Сучасні проблеми будівництва*, №7 (12).
6. Skandalos, N., et al. (2022). Optical and thermal performance of BIPV systems: // *A review Solar Energy*. – DOI: 10.1016/j.solener.2022.01.053.
7. Національний стандарт України ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія.
8. Kurdgelashvili L., & Gladkykh G. (2021). Solar Energy Integration in Airport Infrastructure: Global Trends and Ukrainian Perspectives // *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. – № 6, p. 94-105. – DOI: 10.14254/jsdtl.2021.6-1.8.
9. Гетун Г. В., Безклубенко І. С., Соломін А. В., Баліна О. І. Особливості об'ємно-планувальних рішень захисних споруд цивільного захисту // *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. –2023. – № 66, с. 216-225. – DOI:https://doi.org/10/32347/2077-3455.2023.67.203-220.
10. Хірнеєс Е., Мехта М. (1984). SolarenergycontrolinbuildingРегулюваннясонячноїенергії в будівлях // *Architectural Science Review*, Volume 27, Issue 2 P. 29-37. – DOI:10.1080/00038628.1984.9696544.
11. Vrachytyskiy S., et al. (2024). Geometric Optimization of Shell Structures for Solar Energy // *Collection. International Journal of Civil Engineering and Architecture*. – DOI: 10.1117/1.JPE.14.018501.
12. Гетун Г. В., Колякова В. М., Соломін А. В., Безклубенко І. С. Особливості проєктування сталевих сейсмостійких конструкцій висотних будівель // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. – 2022.– № 11, р. 18-31. – DOI:10/32347/2522-4182/11/2022/18-31.
13. Markus, T. A., & Morris, E. N. (1980). Buildings, Climate and Energy. London: Pitman Publishing Limited. ISBN: 027300266X.
14. Bazylyuk, T. (2023). Energy-Efficient Reconstruction of Public Buildings: Use of Large-Span Curvilinear Shells // *Technical Sciences and Technologies*. –№3 (33). P. 172-181. – DOI: 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-172-181.
15. Getun G., Butsenko Y., Balina O., Bezklubenko I., Solomin A. Дифузійні процеси з накопичувальними характеристиками при експлуатації будівель // *Strength of materials and theory of structures*. – 2019. – № 102, p. 243-251. – DOI:10/32347/22410-2547, 2019.102.243-251.
16. Getun G., Butsenko Y., Labzhinsky Y., Balina O., Bezklubenko I., Solomin A. Situations forecasting and decision-making optimization based on markovs finite chains in areas with industrial pollutios // *Strength of materials and theory of structures*. – 2020. – № 104, p. 164-174. – DOI:10.32347/2410-2547.2020.104.164-174.
17. Hachem-Vermette, C., & Singh, K. (2022). Optimization of the solar potential of complex building envelopes. // *Energy and Buildings*. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112110.
18. Zhang, J., et al. (2023). Geometric optimization of free-form grid shells for enhanced solar collection. // *Automation in Construction*. – DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104782.
19. Гетун Г.В., Безклубенко І.С., Соломін А.В. Аналіз та класифікація сучасних конструкцій великопрогонових покриттів будівель / *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. – 2023. – № 65. С.216-225. – DOI:https://doi.org/10/32347/2077-3455.2023.65.216-225.
20. Lobaccaro, G., et al. (2021). Solar energy potential in the built environment: A review of modeling techniques. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – DOI: 10.1016/j.rser.2021.110714.
21. Al-Sallal, K. A., et al. (2022). Solar radiation mapping on complex surfaces using BIM and GIS integration. // *Applied Sciences*. – DOI: 10.3390/app12041923.
22. Sarihi, S., et al. (2021). Integrated solar geometric analysis for airport terminal roofs. // *Solar Energy*. – DOI: 10.1016/j.solener.2021.05.012.
23. Іванченко Г. М. Гетун Г. В., Безклубенко І. С., Соломін А. В. Особливості конструювання та розрахунків складних залізобетонних рам будівель // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – 2023. – № 110, с. 108-117. – DOI:10.32347/2410-2547.2023.110.108-117.
24. Bambrook, S. M., et al. (2023). Parametric design of responsive solar skins for large-scale transportation hubs. // *Journal of Building Engineering*. – DOI: 10.1016/j.job.2023.106201.
25. Wang, L., et al. (2024). Algorithmic approach to shading analysis on curved airport hangars. // *Energy Reports*. – DOI: 10.1016/j.egy.2024.01.045.
26. Perez-Lombard, L., et al. (2021). A review on solar geometric modeling for architectural reconstruction. // *Renewable Energy*. – DOI: 10.1016/j.renene.2021.02.091.
27. Gryhorii Ivanchenko, Galina Getun, Iryna Bezklubenko, Andrii Solomin, Serhii Getun. Mathematical model of the stress-strain state of multilayered structures with different elastic properties // *Strength of materials and Theory of Structures*. – 2024. – № 113, p. 131-138. – DOI:10.32347/2410-2547.2024.113.131-138.
28. Getun Galyna, Lesko Vitalii, Bezklubenko Iryna, Balina Olena, Butsenko Yurii. Stochastic models for ensuring parametric reliability of the construction machines / *Опір матеріалів і теорія споруд*, – 2021. – № 106, С. 262-273. – DOI:10/32347/22410-2547, 2021.106.262-273.

29. Li, H., et al. (2022). Evolutionary algorithms for solar-driven shape optimization of airport terminals. *Sustainability*. – DOI: 10.3390/su14116521.
30. Xu, S., et al. (2023). Real-time solar tracking models for large-span curved roofs. *Building Simulation*. DOI: 10.1007/s12273-023-1011-y.

REFERENCES

1. Kutterer, G. (2018). Geometric modeling of curved solar surfaces for airport infrastructure. // *Journal of Infrastructure Systems*. – DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000412.
2. Mesa, F., et al. (2023). Geometric optimization of hyperbolic surfaces for solar collection. // *Journal of Solar Energy Engineering*. – DOI: 10.1115/1.4055214.
3. Jelle, B. P. (2016). Building Integrated Photovoltaics: A review. // *Energy and Buildings*. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.08.032.
4. Sorgato, S., et al. (2019). The energy savings potential of BIPV in different climates. // *Energy*. – DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.088.
5. Zapryvoda V. I., Zapryvoda A. V. (2009). Spivvidnoshennya heometrychnykh i fizyko-klimatychnykh faktoriv z protsesom nadkhodzhennya sonyachnoyi radiatsiyi na poverkhni pokryttiv (The relationship between geometric and physical-climatic factors and the incidence of solar radiation on covering surfaces) // *Suchasni problemy budivnytstva*, №7 (12).
6. Skandalos, N., et al. (2022). Optical and thermal performance of BIPV systems: A review. *Solar Energy*. – DOI: 10.1016/j.solener.2022.01.053.
7. National Standard of Ukraine DSTU-N B V.1.1-27:2010. Protection against hazardous geological processes, harmful operational influences, and fire. Building climatology.
8. Kurdgelashvili, L., & Gladkykh, G. (2021). Solar Energy Integration in Airport Infrastructure: Global Trends and Ukrainian Perspectives. // *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. – № 6, p. 94-105. – DOI: 10.14254/jstdl.2021.6-1.8.
9. Getun G. V., Bezklubenko I. S., Solomin A. V., Balina O. I. Osoblyvosti ob'ємno-planuvaniy risheniy zakhysnykh sporud tsyvilnoho zakhystu (Features of space-planning solutions for civil protection shelters) // *Suchasni problem arkhitektury ta mistobuduvannya*. – 2023. – № 66, s. 216-225. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.67.203-220>.
10. Хіркнесс Е., Мехма М. (1984). Solar energy control in building Регулювання сонячної енергії в будівлях // *Architectural Science Review*, Volume 27, Issue 2 P 29-37. – DOI: 10.1080/00038628.1984.9696544.
11. Vrachytskyi, S., et al. (2024). Geometric Optimization of Shell Structures for Solar Energy // *Collection. International Journal of Civil Engineering and Architecture*. – DOI: 10.1117/1.JPE.14.018501.
12. Getun G. V., Kolyakova V. M., Solomin A. V., Bezklubenko I. S. Osoblyvosti proyektuvannya stalevykh seysmostiyykhykh konstruksiy vysotnykh budiveli (Features of space-planning solutions for civil protection shelters) // *Budiveli ni konstruksiyi. Teoriya i praktyka*. – 2022. – № 11, p. 18-31. – DOI: 10.32347/2522-4182/11/2022/18-31.
13. Markus, T. A., & Morris, E. N. (1980). Buildings, Climate and Energy. London: Pitman Publishing Limited. ISBN: 027300266X.
14. Bazylyuk, T. (2023). Energy-Efficient Reconstruction of Public Buildings: Use of Large-Span Curvilinear Shells // *Technical Sciences and Technologies*. – №3(33). P. 172-181. – DOI: 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-172-181.
15. Getun G., Butsenko Y., Balina O., Bezklubenko I., Solomin A. Dyfuziyni protsesy nakopychuvalnykh kharakterystykamy pryekspluatatsiyi budiveli (Diffusion processes with accumulative characteristics during building operation) // *Strength of materials and theory of structures*. – 2019. – № 102, p. 243-251. – DOI: 10.32347/22410-2547.2019.102.243-251.
16. Getun G., Butsenko Y., Labzhinsky V., Balina O., Bezklubenko I., Solomin A. Situations forecasting and decision-making optimization based on markovs finite chains in areas with industrial pollutions // *Strength of materials and theory of structures*. – 2020. – № 104, p. 164-174. – DOI: 10.32347/2410-2547.2020.104.164-174.
17. Hachem-Vermette, C., & Singh, K. (2022). Optimization of the solar potential of complex building envelopes. *Energy and Buildings*. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112110.
18. Zhang, J., et al. (2023). Geometric optimization of free-form grid shells for enhanced solar collection. *Automation in Construction*. – DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104782.
19. Getun G., Bezklubenko I., Solomin A. Analiz ta klasyfikatsiya suchasnykh konstruksiy velykopronovnykh pokryttiv budiveli (Analysis and classification of modern long-span roof structures of buildings) // *Suchasni problem arkhitektury ta mistobuduvannya*. – 2023. – № 62, p. 216-221. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.65.216-225>.
20. Lobaccaro, G., et al. (2021). Solar energy potential in the built environment: A review of modeling techniques. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – DOI: 10.1016/j.rser.2021.110714.
21. Al-Sallal, K. A., et al. (2022). Solar radiation mapping on complex surfaces using BIM and GIS integration. // *Applied Sciences*. – DOI: 10.3390/app12041923.
22. Sarihi, S., et al. (2021). Integrated solar geometric analysis for airport terminal roofs. // *Solar Energy*. – DOI: 10.1016/j.solener.2021.05.012.
23. Ivanchenko H. M., Hetun H. V., Bezklubenko I. S., Solomin A. V. Osoblyvosti konstruyuvannya ta rozrakhunkiv skladnykh zalizobetonnykh ram budiveli (Features of structural design and analysis of complex reinforced concrete frames of buildings) // *Opirmaterialiv i teoriya sporud*. – 2023. – № 110, s. 108-117. – DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.108-117.
24. Bambrook, S. M., et al. (2023). Parametric design of responsive solar skins for large-scale transportation hubs. // *Journal of Building Engineering*. – DOI: 10.1016/j.job.2023.106201.
25. Wang, L., et al. (2024). Algorithmic approach to shading analysis on curved airport hangars. // *Energy Reports*. – DOI: 10.1016/j.egy.2024.01.045.
26. Perez-Lombard, L., et al. (2021). A review on solar geometric modeling for architectural reconstruction. // *Renewable Energy*. – DOI: 10.1016/j.renene.2021.02.091.

27. Gryhorii Ivanchenko, Galina Getun, Iryna Bezklubenko, Andrii Solomin, Serhii Getun. Mathematical model of the stress-strain state of multilayered structures with different elastic properties // *Strength of materials and Theory of Structures*. – 2024. – № 113, p. 108-117. – DOI:10.32347/2410-2547.2024.113.131-138.
31. Getun Galyna, Lesko Vitalii, Bezklubenko Iryna, Balina Olena, Butsenko Yurii. Stochastic models for ensuring parametric reliability of the construction machines / *Опір матеріалів і теорія споруд*, – 2021. – № 106, с. 262-273. – DOI:10.32347/22410-2547, 2021.106.262-273.
28. Li, H., et al. (2022). Evolutionary algorithms for solar-driven shape optimization of airport terminals. *Sustainability*. – DOI: 10.3390/su14116521.
29. Xu, S., et al. (2023). Real-time solar tracking models for large-span curved roofs. *Building Simulation*. – DOI: 10.1007/s12273-023-10111-y.

Стаття надійшла 30.12.2025

Ivanchenko G.M., Getun G.V., Zapryvoda V.I., Bezklubenko I.S., Zapryvoda A.V.

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНИХ РАДІАЦІЙНИХ ЗОН НА КРИВОЛІНІЙНИХ ПОКРИТТЯХ АЕРОВОКЗАЛІВ ПРИ ЇХ РЕКОНСТРУКЦІЇ

У статті розглядається актуальна проблема енергоефективної модернізації великих транспортних вузлів через оптимізацію використання сонячної енергії. Об'єктом дослідження є процеси формування інсоляційних зон на складних криволінійних поверхнях покриттів сучасних аеровокзалів із використанням геліоприймальних пристроїв.

Автори аналізують специфіку реконструкції існуючих терміналів, де зміна конфігурації покрівлі може бути обмежена несучими конструкціями. Вибір геометрії здійснюється на стадії передпроектних рішень з врахуванням вимог до розміщення будівлі відносно злітно-посадкової смуги (ЗПС), умов пасажиропотоків, конструктивної безпеки та архітектурно-економічних чинників.

Запропоновано алгоритм геометричного моделювання, що базується на методах дискретної геометрії та комп'ютерного проєктування. Це дозволяє точно розрахувати інтенсивність сонячного випромінювання в кожній точці криволінійного покриття з урахуванням географічних координат та сезонних змін. Для аналізу обрано два типи поверхонь – еліпсоїд обертання та гіперболічний параболоїд. Розроблена модель дозволяє визначити найбільш ефективні зони для розміщення фотоелектричних панелей (BIPV-систем) та систем сонячного нагріву. Отримано графічні та аналітичні залежності розподілу радіаційних потоків, що дають змогу мінімізувати перегрів приміщень у літній період і максимізувати та покращити тепловий баланс взимку.

Запропонований підхід до визначення ефективних сонячних радіаційних зон дозволяє оптимізувати форму покриття аеровокзалу на стадії підготовчого етапу проєктування. Це забезпечує баланс між містобудівними обмеженнями (орієнтація відносно ЗПС) та вимогами енергонезалежності. Якщо обрана геометрія не забезпечує достатньої інсоляції, алгоритм передбачає ітераційний перебір варіантів форми або зміну функціонального призначення геліосистеми (наприклад, перехід від повного енергозабезпечення лише до гарячого водопостачання).

Ключові слова: реконструкція, криволінійні поверхні, оболонки, геліоприймачі, сонячна радіація, ефективні сонячні радіаційні зони.

Ivanchenko G.M., Getun G.V., Zapryvoda V.I., Bezklubenko I.S., Zapryvoda A.V.

GEOMETRIC MODELING OF SOLAR RADIATION ZONES ON CURVED AIRPORT TERMINALS COVERINGS DURING THEIR RECONSTRUCTION

The article considers the current problem of energy-efficient modernization of large transport hubs through optimization of the use of solar energy. The object of the study is the processes of formation of insolation zones on complex curved surfaces of coatings of modern airport terminals using solar-receiving devices.

The authors analyze the specifics of the reconstruction of existing terminals, where changing the roof configuration may be limited by load-bearing structures. The geometry is selected at the pre-design stage, taking into account the requirements for the location of the building relative to the runway (runway), passenger flow conditions, structural safety, and architectural and economic factors.

A geometric modeling algorithm based on discrete geometry and computer-aided design methods is proposed. This allows for accurate calculation of the solar radiation intensity at each point of a curved roof, taking into account geographical coordinates and seasonal changes. Two types of surfaces were selected for analysis - an ellipsoid of revolution and a hyperbolic paraboloid. The developed model allows you to determine the most effective areas for placing photovoltaic panels (BIPV systems) and solar heating systems. Graphical and analytical dependences of the distribution of radiation fluxes were obtained, which allow minimizing overheating of premises in the summer and maximizing heat gain in the winter.

The proposed approach to determining effective solar radiation zones allows optimizing the shape of the airport terminal's coverage at the pre-design stage. This ensures a balance between urban planning constraints (orientation relative to the runway) and energy independence requirements.

If the selected geometry does not provide sufficient insolation, the algorithm involves iteratively searching for shape options or changing the functional purpose of the solar system (for example, switching from full energy supply to hot water supply only).

Keywords: reconstruction, curved surfaces, shells, solar collectors, solar radiation, effective solar radiation zones.

УДК 514.18:624.024:725.39

Иванченко Г.М., Гетун Г.В., Заприво́да В.І., Безклубенко І.С., Заприво́да А.В. Геометричне моделювання сонячних радіаційних зон на криволінійних покриттях аероокзалів при їх реконструкції // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2026. – Вип. 116. – С. 220 - 228.

Табл. 1. Іл. 3. Бібліогр. 30 назв.

УДК 514.18:624.024:725.39

Ivanchenko G.M., Getun G.V., Zapryvoda V.I., Bezklubenko I.S., Zapryvoda A.V. Geometric modeling of solar radiation zones on curved airport terminals coverings during their reconstruction // // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – К.: KNUBA, 2026. – Issue 116. – P. 220 - 228.

Tabl. 1. Figs. 3. Ref. 30

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки КНУБА, ІВАНЧЕНКО Григорій Михайлович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, пр. Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, Іванченко Григорію Михайловичу

Тел.: +38(044)245-44-32

E-mail: ivgm61@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1172-2845>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, професор кафедри архітектурних конструкцій КНУБА, ГЕТУН Галина В'ячеславівна

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ГЕТУН Галині В'ячеславівні

Тел.: +38(044)245-44-32

E-mail: GalinaGetun@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3317-3456>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри архітектурних конструкцій КНУБА, ЗАПРИВОДА Віталій Іванович

Адреса: 03056 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ЗАПРИВОДА Віталію Івановичу

Тел.: +38(044)245-44-32

E-mail: zapryvoda.vi@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9790-8706>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри ІТППМ КНУБА, БЕЗКЛУБЕНКО Ірина Сергіївна

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, БЕЗКЛУБЕНКО Ірині Сергіївні

Тел.: +38(044)245-04-02

E-mail: i.bezklubenko@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9149-4178>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри АТП КНУБА, ЗАПРИВОДА Андрій Віталійович

Адреса робоча: 03056 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ЗАПРИВОДА Андрію Віталійовичу

Тел.: +38(044)244-96-52

E-mail: zapryvoda.av@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9171-9325>