

УДК 662.997

д.т.н., проф. **Олександр Приймак**,

02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3081-6057,

аспірант **Іван Кріпак**,

kripakivan1995@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4702-700X,

Київський національний університет будівництва і архітектури

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.19-29>

## **АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОГЕНЕРУВАЛЬНОГО ВІКНА**

***Анотація.** Зростання технологічного прогресу призводить до безперервного вдосконалення не лише огорожувальних конструкцій, але і інженерних систем життєзабезпечення. Глобальне зростання вартості енергоносіїв і необхідність зменшення викидів парникових газів стимулюють розробку систем, які поєднують функціональність і екологічність. «Теплогенерувальне вікно» пропонує перспективний підхід до забезпечення енергоефективності будівель, що відповідає потребам сучасного суспільства. Дана конструкція поєднує в собі основні функції світлопрозорої огорожувальної конструкції (як найбільш вразливого, щодо теплових втрат, елементу огороження) з елементами систем опалення та кондиціонування повітря. Вона може суттєво підвищити енергоефективність вікон, але, водночас, вимагає нового підходу до визначення рівня енергоефективності такої системи. Метою даної роботи є отримання і аналіз ключових показників енергоефективності теплогенерувального вікна на основі традиційних теплофізичних параметрів.*

***Ключові слова:** теплогенерувальне вікно, енергоефективність, тепловий насос, вікно, світлопрозора огорожувальна конструкція, відновлювана енергія, фотоелектрична поверхня.*

**Постановка проблеми:** будь-яка опалювана будівля в холодний період року постійно втрачає внутрішню теплову енергію від системи опалення за рахунок перенесення теплоти з теплішого внутрішнього середовища приміщень до холоднішого зовнішнього повітря. Теплові втрати через огорожувальні конструкції і негативний внесок кожного її елементу є специфічним для кожної будівлі. Проте, в переважній частині випадків, найбільші втрати теплової енергії припадають на світлопрозорі огорожувальні конструкції (вікна) [1, 2]. Такі елементи є об'єктами наукових досліджень у більшій кількості.

Посилення вимог щодо скорочення викидів парникових газів [3, 4] та зростання тарифів [5] на енергоносії актуалізують потребу в інтегрованих

інженерних рішеннях. Концепція «теплогенерувального вікна» є інноваційною відповіддю на виклики енергоефективності в будівництві, поєднуючи функції світлопрозорої огорожувальної конструкції з елементами кліматичного контролю. Така система, яка інтегрує властивості прозорих огорожувальних конструкцій із функціями опалення та кондиціонування, потребує переосмислення критеріїв оцінки її енергетичної ефективності.

**Актуальність дослідження** ключових показників енергоефективності конструкції вікна, котре здатне виконувати функцію опалювально-охолоджувального приладу, визначається сучасними тенденціями до підвищення енергоефективності будівель і використання інноваційних технологій у сферах опалення і кондиціонування.

Впровадження конструкції такого типу може сприяти оптимізації розподілу теплових потоків і зниженню загальних втрат теплоти зовнішніми огороженнями будівель. Аналіз і глибоке розуміння теплових балансів у такій системі є основою для її ефективного впровадження та розширення сфери застосування.

**Останні дослідження та публікації.** На сьогодні існує досить обмежена кількість інформації щодо способів поєднання світлопрозорої огорожувальної конструкції з системами опалення та кондиціонування повітря. Всі наявні світлопрозорі конструкції, котрі виконують роль додаткових джерел теплоти [6], мають спільний недолік: вони потребують обов'язкового приєднання до зовнішнього джерела електричної енергії [7]. Також жодне з наявних, або запатентованих вікон [8] не претендує на звання першого світлопрозорого елемента, здатного до охолодження приміщення в теплий період року. Єдина конструкція, здатна вирішити вищевказані недоліки, є «теплогенерувальне вікно», наприклад, конструкція на рис. 1.

У наявних дослідженнях даної конструкції [9] не було проаналізовано показники енергоефективності, котрі можна назвати «ключовими» для подібного інженерного приладу.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є визначення і аналіз основних показників енергоефективності «теплогенерувального вікна». У даній роботі запропоновано додаткові показники, які впливатимуть на клас енергоефективності зазначеної конструкції.

**Основна частина.** Зазвичай енергоефективність вікон визначається кількома ключовими показниками:

- коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) – чим нижче значення, тим краще вікно утримує теплоту;
- коефіцієнт опору теплопередачі  $R$ , м<sup>2</sup>·К/Вт – показує здатність матеріалу протистояти тепловтратам, а вищі значення означають кращу ізоляцію;

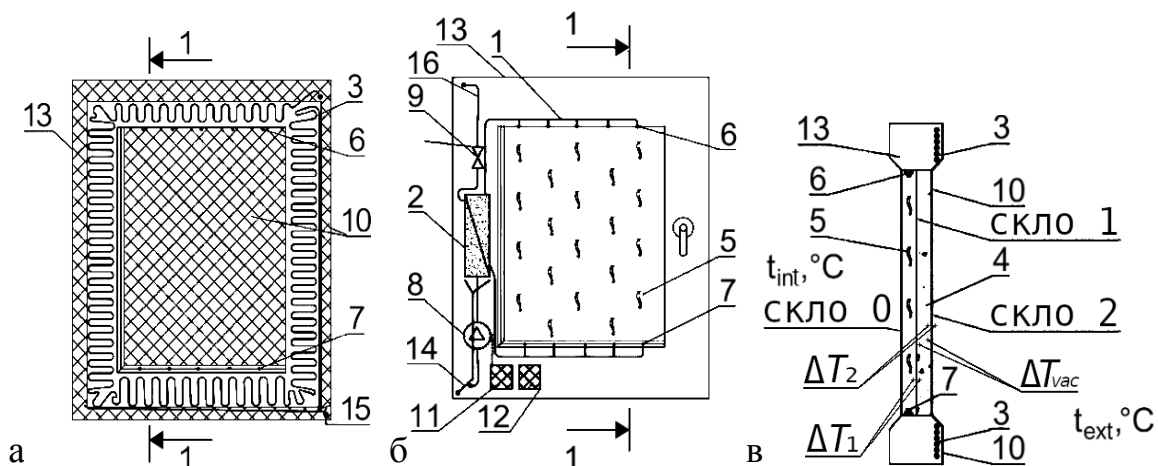


Рис. 1. Приклад теплогенерувального вікна:

а – внутрішній бік теплогенерувального вікна; б – зовнішній бік теплогенерувального вікна; в – поперечний розріз теплогенерувального вікна (1-1): 1 – повітря, як робоче тіло внутрішнього контуру теплового насосу; 2 – внутрішній теплообмінник; 3 – зовнішній мідний теплообмінник-змійовик; 4 – зовнішній вакуумний склопакет; 5 – внутрішній склопакет; 6 – верхні перепускні отвори; 7 – нижні перепускні отвори; 8 – мікрокомпресор; 9 – дросель-клаван; 10 – світлопрозора (до 60 %) плівкова фотоелектрична поверхня (ФЕП); 11 – акумуляторний блок; 12 – інвертор; 13 – рама вікна; 14 – самоплинна дренажна система від внутрішнього теплообмінника; 15 – самоплинна дренажна система від зовнішнього теплообмінника

- коефіцієнт сонячного випромінювання  $G$  (безрозмірна величина, від нуля до одиниці) – визначає, скільки сонячної енергії проходить через скло;
- опір повітропроникності (англ. air leakage),  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$  – вказує на властивість світлопрозорої огорожувальної конструкції запобігати інфільтрації повітря: чим герметичніше вікно, тим нижчий цей показник;
- наявність заповнення склопакета інертним газом (аргон або криптон) – задля покращення теплоізоляційних властивостей;
- кількість камер у склопакеті – збільшення кількості камер у склопакеті забезпечує кращу теплоізоляцію [10].

Оновленими критеріями ключових показників енергоефективності для світлопрозорих конструкцій на кшталт «теплогенерувального вікна» стануть:

- рівень світлопропускнуї здатності віконної конструкції (враховуючи покриття скла плівковою фотоелектричною поверхнею (ФЕП) типу «Solar Window» [11] на зовнішній частині склопакету);
- оцінка ефективності розподілу теплових потоків системи;
- коефіцієнт корисної дії світлопрозорої фотоелектричної поверхні;

- коефіцієнт перетворення електричної енергії в згенеровану теплову потужність (COP).

Вищезазначені критерії добре відомі в світі інженерії, проте в даній роботі їх вперше пропонується застосовувати до світлопрозорої огорожувальної конструкції.

Враховуючи наявність фотоелектричної поверхні, розташованої на зовнішній частині склопакету – першочерговою задачею є визначення рівня світлопропускної здатності такої світлопрозорої огорожувальної конструкції.

Формула світлопропускної здатності конструкції скла з ФЕП описується, як функція відношення інтенсивності видимого спектру сонячного випромінювання, котре пройшло через скло з ФЕП, до інтенсивності світла, що падають. У диференціальній формі можна розглядати диференціальне зменшення інтенсивності світла крізь шар матеріалу.

Нехай  $I(x)$  – інтенсивність видимого спектру сонячного випромінювання на відстані  $x$ , м, у матеріалі. Тоді зміна інтенсивності вздовж відстані  $x$  описується законом поглинання світла,

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha \cdot I(x), \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання матеріалу, який залежить від властивостей скла та довжини хвилі видимого спектру сонячного випромінювання,  $\text{м}^{-1}$ ;  $I(x)$  – інтенсивність видимого спектру сонячного випромінювання на відстані  $x$  у матеріалі,  $\text{Вт/м}^2$ .

Розв'язуючи це диференціальне рівняння, можна отримати експоненціальне зменшення інтенсивності видимого спектру сонячного випромінювання,

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

де  $I_0$  – початкова інтенсивність видимого спектру сонячного випромінювання на вході в матеріал (при  $x = 0$ ),  $\text{Вт/м}^2$ .

Світлопропускна здатність скла з ФЕП на товщині  $x$ , м, у цьому випадку може бути визначена як відношення

$$\Theta = \frac{I(x)}{I_0} = e^{-\alpha \cdot x}. \quad (3)$$

Не менш важливою задачею є аналіз теплових балансів системи – процес дослідження й оцінювання потоків теплової енергії. Основна мета аналізу – визначити, як відбувається розподіл теплоти з урахуванням його надходження, втрати та накопичення.

Аналіз теплових балансів системи передбачає:

- визначення джерел теплових втрат або надходжень;
- встановлення алгоритмів розрахунку кількості небажано втраченої/отриманої теплової енергії;
- розроблення способів підвищення енергоефективності системи.

Наступною задачею при оцінюванні енергоефективності «теплогенерувального вікна» може стати визначення теплонадходжень внаслідок сонячного випромінювання крізь вікно у теплий період року. Таку змінну можна описати як різницю між сонячною енергією, що надходить, та тією її частиною, яка відбивається або поглинається.

Позначимо

$Q_{in}$  – потужність теплонадходжень через склопакет, Вт/м<sup>2</sup>;

$Q_{solar}$  – потужність сонячного випромінювання, що надходить на поверхню скла Вт/м<sup>2</sup>;

$\phi$  – коефіцієнт відбиття конструкції скла з ФЕП (частка відбитої енергії);

$\alpha$  – коефіцієнт поглинання скла з ФЕП (внаслідок опору теплопередачі);

$\tau$  – коефіцієнт пропускання теплової енергії випромінюванням крізь склопакет;

$x$  – глибина вікна або товщина шару скла з конструкцією плівкової ФЕП, через які проходить світло.

У таких позначеннях коефіцієнт пропускання, поглинання і відбиття задовольняють умову нормування:

$$\tau + \phi + \alpha = 1. \quad (4)$$

Теплонадходження  $Q_{in}$  через скло можна виразити у диференціальній формі через зміну сонячної енергії після часткового відбиття та поглинання:

$$\frac{dQ_{in}}{dx} = \tau(1 - \phi) \frac{dQ_{solar}}{dx} + Q_{solar} \frac{d(\tau(1 - \phi))}{dx}, \text{ Вт/м}^3. \quad (5)$$

Таким чином, якщо врахувати, що відбивається частка енергії  $\phi \cdot Q_{solar}$ , Вт і

поглинається частка  $\alpha \cdot Q_{solar}$ , внутрішнє теплонадходження  $Q_{in}$  визначається як

$$Q_{in} = \tau \cdot (1 - \phi) \cdot Q_{solar}, \text{ Вт/м}^2. \quad (6)$$

де коефіцієнт  $\tau \cdot (1 - \phi)$  враховує відбиття сонячних променів від поверхонь скла разом з ФЕП і забезпечує правильне значення теплонадходження всередину приміщення. Подібні процеси змодельовано і проаналізовано авторами в роботі [12].

У холодний період року тепловий потік направлений з опалювального приміщення назовні. У випадку з конструкцією «теплогенерувального вікна» даною втратою теплоти можна знехтувати при розрахунку тепловтрат будівлі, адже сама світлопрозора огорожувальна конструкція виступає опалювальним приладом і змінює напрям теплового потоку. Єдині втрати теплоти, котрі будуть відбуватися крізь зовнішній, вакуумний склопакет, є власними тепловими втратами «теплогенерувального вікна». Цю кількість теплоти можна розрахувати таким чином,

$$Q = \frac{\Delta T_1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}} + \frac{\Delta T_2}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}} + \frac{\Delta T_{vac}}{\frac{1}{h_{vac}}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (7)$$

$\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $\Delta T_{vac}$  – різниця температури, К, між зовнішньою і внутрішньою поверхнями скла 1, скла 2 і між поверхнями обох скляних елементів по обидва боки від вакуумного прошарку, °С (рис. 1 в),  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – товщини першого та другого шару скла, (м),  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – коефіцієнти теплопровідності відповідного скла, Вт/(м·°С);  $h_{vac}$  – еквівалентний коефіцієнт теплопередачі через вакуумний прошарок, Вт/(м²·К), який враховує в основному випромінювання, оскільки теплопровідність і конвекція у вакуумі мінімальні:

$$h_{vac} = \sigma \cdot \epsilon_{eff} \cdot (T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2), \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (8)$$

де  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – стала Стефана-Больцмана;  $\epsilon_{eff}$  – ефективна приведена випромінювальна здатність обох поверхонь скла;  $T_1$ ,  $T_2$  – абсолютні температури (у кельвінах) обох скляних поверхонь, між якими знаходиться вакуум.

Ще одним з запропонованих критеріїв для присвоєння ступеню енергоефективності для майбутніх інноваційних теплогенерувальних

світлопрозорих конструкцій може стати визначення коефіцієнту корисної дії (ККД) використаної світлопрозорої ФЕП.

ККД ФЕП описує відношення корисної електричної потужності, що генерується, до загальної потужності світла, що падає [13, 14]. У диференціальній формі зміну потужності можна описати залежно від різних чинників, що впливають на процес перетворення світла в електричну енергію.

Нехай  $P_{in}$  – інтенсивність світла, що падає (вхідна потужність на одиницю площі), а  $P_{out}$  – генерована електрична потужність. Тоді ККД фотоелектричної поверхні  $\eta$  задається як

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (9)$$

У диференціальній формі це можна розглянути як зміну корисної потужності за глибиною проникнення світла.

Якщо  $P_{out}$  залежить від координати  $x$ , можна записати

$$\frac{dP_{out}}{dx} = -\beta P_{in}(x), \text{ Вт/м}^2, \quad (10)$$

де  $\beta$  – ефективний коефіцієнт перетворення, який враховує квантову ефективність, внутрішнє поглинання, відбиття поверхнею, втрати та інші фактори;  $P_{in}(x)$  – інтенсивність світла на відстані  $x$ , м, від поверхні фотоелемента.

Оцінити загальне значення  $P_{out}$  і, відповідно, ККД, можна інтегруванням рівняння (10) для конкретних умов та залежностей. Останнім з критеріїв визначення ступеню енергоефективності «теплогенерувального вікна» може стати коефіцієнт продуктивності – COP (Coefficient of Performance) [14] вбудованого в запропоновану конструкцію міні-теплового насоса.

Спосіб розрахунку для визначення COP є класичним [15],

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}}, \quad (11)$$

де  $Q_{out}$  – кількість теплової енергії, що генерується (Вт),  $W_{in}$  – затрачена електрична потужність (Вт).

**Висновки.** З удосконаленням світлопрозорих огорожувальних конструкцій та їх поєднанням з новітніми інженерними технологіями в системах опалення та охолодження виникає потреба у введенні нових, відповідних критеріїв для класифікації рівня енергоефективності таких виробів. Запропоновано як критерії використовувати рівень світлопропускну здатності віконної конструкції з урахуванням покриття скла плівковою фотоелектричною поверхнею (ФЕП); оцінка ефективності розподілу теплових потоків системи; коефіцієнт корисної дії світлопрозорої фотоелектричної поверхні; коефіцієнт перетворення електричної енергії в згенеровану теплову потужність (COP).

**Перспективи подальших досліджень:** детальне вивчення кожного з запропонованих критеріїв енергоефективності «теплогенерувального вікна»; збирання дослідного зразка для практичного перевіряння ефективності даної конструкції; розроблення методики інтеграції теплогенерувальних вікон у наявні будівельні стандарти, з урахуванням кліматичних зон та типів забудови; оцінювання довгострокової експлуатаційної надійності таких конструкцій, а також їх впливу на загальну енергетичну модель будівлі для формування більш комплексного підходу до сертифікації енергоефективності.

### References

1. Teplova izolyatsiya ta energoefektyvnist budivel. DBN V 2.6-31:2021 Ukrarkhbudininform, 2013, p. 7. (in Ukrainian)
2. Gomeliuk M., Kaspruk V., “Vyznachennia teploizoliuiuchykh vlastuvociei budivli” Aktualni zadachi suchacynykh tekhnologii. Materiali XII Mizhnarodnoi naukovykh praktychnoi konferentsii molodykh vchenykh i studentiv, 6-7 May, 2023., Ternopil, Ukraine, Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, 2023, pp. 109-110. (in Ukrainian)
3. “Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999” (‘European Climate Law’), Official Journal of the European Union, June 2021. (in English)
4. Ignatenko O. “Novyi paket propozyitsii YeS dlia dosiahnennia 55% skorochnia vykydiv parnykovykh haziv do 2030 roku” Informatsiinyi tsentr "Zelene dosie". <https://www.dossier.org.ua/news/fit-to-55/> . Accessed 31 August 2025. (in Ukrainian)
5. “Tsiny na enerhonosii: Komisiia proponuie ekstrene vtruchannia u rynek, shchob zmenshyty yevropeitsiam rakhunky za enerhiu” European Commission - Press release. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/uk/ip\\_22\\_5489](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/uk/ip_22_5489) . Bruselles. September 2022. Accessed 31 August 2025. (in Ukrainian/English)

6. Shevchenko A. “Sklopakety z obihrivom abo tepli vikna” Standart Vikna <https://standartvikna.com.ua/uk/blog/steklopakety-s-obogrevom> Accessed 31 August 2025. (in Ukrainian)
7. “Yak vlashtovani sklopakety z pidihivom ta yikh perevahy” Viknaland <https://viknaland.ua/yak-vlashtovani-sklopakety-z-zpidigrivom/> Accessed 31 August 2025. (in Ukrainian)
8. Ponomarchuk I. “Vikno-teploobminnyk” Derzhavnyi departament intelektualnoi vlasnosti: patent UA 6603 U; applied on 15.10.2004 ; published on 16.05.2005. (in Ukrainian)
9. Kripak I., Priymak O., “Analiz konstruktсии ta teplovykh protsesiv u energetuchnomu vikni” Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi, Iss. 9, 2017, pp. 115-118. (in Ukrainian)
10. “Vikna ta dveri. Vymohy. Chastyna 1. Vikna ta zovnishni dveri (EN 14351-1:2006 + A2:2016, IDT)” DSTU EN 14351-1:2020 . Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Dveri ta vikna» (TK 300), 2021. (in Ukrainian)
11. “Electricity-generating liquid coating & processes” Solar Window. <https://www.solarwindow.com/technology/> . Accessed 31 August 2025. (in English)
12. Kryvosheiev M., Gryshchenko R., Ivashchenko N., Samiilenko S., “Metody rozrakhunku teplovykh vtrat i teplonadkhodzhen v budivliakh. Ohliad, normatyvni vymohy i praktychni pidkhody v ukraini ta sviti.” Kholodylna tekhnika i tekhnologiiia, Iss 60, 2024, pp. 53-69 (in Ukrainian)
13. “Efektyvnist soniachnykh panelei” Solar Garden. <https://www.solargarden.com.ua/vid-chogo-zalezhyt-kkd-sonyachnyh-panelej/> . Accessed 31 August 2025. (in Ukrainian)
14. Bee E. “Heat pump and photovoltaic systems in residential applications” Doctoral Thesis. University of Trento, Italy. April 2019 (in English)
15. “Teplovyi nasos. Efektyvnist” OViK. <https://ovik.com.ua/teplovij-nasos-efektivnist/> . Accessed 31 August 2025. (in Ukrainian)

UDC 622.997

Dr. Hab., Prof. **Oleksandr Priymak**,

02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3081-6057,

postgraduate **Ivan Kripak**,

kripakivan1995@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4702-700X,

Kyiv National University of Construction and Architecture

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.19-29>

## **ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY INDICATORS OF A HEAT-GENERATING WINDOW**

*The growth of technological progress leads to continuous improvement not only of enclosing structures, but also of engineering life support systems. Any building in the cold season constantly loses internal thermal energy from the heating system due to the transfer of heat from the warmer internal environment of the premises to the colder outside air. Heat losses through enclosing structures and the negative contribution of each of its elements are specific to each building. However, in the vast majority of cases, the greatest heat losses occur in translucent enclosing structures (windows). Such elements are the objects of scientific research in greater numbers. The global increase in the cost of energy carriers and the need to reduce greenhouse gas emissions stimulate the development of systems that combine functionality and environmental friendliness. The “heat-generating window” offers a promising approach to ensuring the energy efficiency of buildings that meets the needs of modern society. The introduction of this type of structure can help optimize the distribution of heat flows and reduce overall heat losses by external building enclosures. Analysis and deep understanding of heat balances in such a system is the basis for its effective implementation and expansion of the scope of application. This design, combining the main functions of a translucent enclosing structure (as the most vulnerable, in terms of heat loss, element of the enclosure) with elements of heating and air conditioning systems, can significantly increase the energy efficiency of windows, but, at the same time, requires a new approach to determining the level of energy efficiency of such a system. The purpose of this work is to obtain and analyze key indicators of energy efficiency of a heat-generating window based on traditional thermophysical parameters. The following criteria are proposed for use: the light transmittance of the window structure, taking into account the coating of the glass with a film photovoltaic surface; assessment of the efficiency of heat flow distribution in the system; the efficiency of the translucent photovoltaic surface; the coefficient of conversion of electrical energy into generated thermal power (COP).*

**Keywords:** *heat-generating window, energy efficiency, heat pump, window, translucent enclosing structure, renewable energy, photovoltaic surface.*

Received/Надійшла до редакції 01.09.2025

Reviewed/Рецензована 06.11.2025

Accepted/Прийнята 26.11.2025