

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ ДЛЯ МЕТАЛОПЛАСТИКОВИХ ВІКОН І ФАСАДІВ У СУЧАСНОМУ ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Представлено результати дослідження енергоефективних конструктивних рішень для металопластикових світлопрозорих систем, що застосовуються у цивільному будівництві. Проаналізовано вплив типу профілю, склопакета, тепловідбиваючого екрана та способів герметизації на опір теплопередачі та енергетичний баланс огорожувальних конструкцій. Проведено порівняння традиційних і сучасних систем скління з низькоемісійними, вакуумними та динамічними склопакетами. Запропоновано комплекс рішень для підвищення теплотехнічних показників і конструктивної стійкості фасадних систем, що дозволяє знизити теплові втрати будівель на 35–45 % та забезпечити комфортний мікроклімат у приміщеннях. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні енергоефективних житлових і громадських будівель нового покоління.

Ключові слова: енергоефективність, металопластикові системи, тепловідбиваючий екран, світлопрозорі конструкції, склопакет, вакуумне скління, динамічне скління, мікроклімат.

Abstracts

Presents the results of research on energy-efficient design solutions for metal-plastic translucent systems used in modern civil construction. The influence of the profile type, insulating glass unit, heat-reflective screen, and sealing methods on heat transfer resistance and the overall energy balance of enclosing structures was analyzed. A comparison between conventional and advanced glazing systems with low-emission, vacuum, and dynamic glass units was carried out. A set of engineering solutions aimed at improving the thermal performance and structural stability of façade systems is proposed, providing a reduction in building heat losses by 35–45 % and ensuring indoor thermal comfort. The results can be applied in the design of next-generation energy-efficient residential and public buildings.

Key words: energy efficiency, metal-plastic systems, heat-reflective screen, translucent structures, insulated glass unit, vacuum glazing, dynamic glazing, microclimate.

Вступ

Проблема енергоефективності будівель є одним із ключових напрямів сучасного будівництва, що безпосередньо пов'язана зі скороченням споживання енергоресурсів і зниженням негативного впливу на довкілля. В умовах зростання вартості енергоносіїв і посилення вимог до теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій відповідно до ДБН В.2.6-31:2021 [1] особливої актуальності набуває вдосконалення світлопрозорих систем, через які втрачається до 40 % теплової енергії будівлі [2].

Металопластикові віконні та фасадні системи є одним із найпоширеніших елементів сучасного цивільного будівництва. Вони поєднують архітектурну функцію з вимогами до теплоізоляції, звукоізоляції, міцності та довговічності. Проте їх ефективність значною мірою визначається не лише якістю матеріалів, а й конструктивними рішеннями профілю, типом склопакета, герметизацією вузлів і технологією монтажу [3-4].

Сучасні наукові дослідження спрямовані на пошук оптимального поєднання матеріалів і технологій, що забезпечують мінімальні тепловтрати за збереження високої світлопропускну здатності. В цьому контексті перспективними є рішення із застосуванням тепловідбиваючих екранів, низькоемісійних покриттів, вакуумного та динамічного скління, а також інтелектуальних систем регулювання мікроклімату, які дозволяють адаптувати теплотехнічні характеристики вікон залежно від кліматичних умов і пори року [5-17].

Метою роботи є узагальнення інноваційних енергоефективних рішень для металопластикових вікон і фасадів, визначення шляхів підвищення їх теплотехнічної ефективності та конструктивної стійкості з урахуванням сучасних вимог сталого будівництва.

Методи та матеріали дослідження

Для оцінювання енергоефективності та конструктивної стійкості металопластикових світлопрозорих систем застосовано комплекс аналітичних, експериментальних і чисельних методів дослідження.

Аналітичний етап передбачав порівняння теплотехнічних характеристик різних типів склопакетів, профільних систем і вузлів примикання до стінових конструкцій. Вихідні дані ґрунтувалися на чинних нормативних документах України (ДБН В.2.6-31:2021, ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010) та результатах міжнародних досліджень з енергозбереження у фасадних системах [1, 3-4, 18].

Експериментальні дослідження виконувалися з використанням кліматичних камер для моделювання реальних умов експлуатації. Випробування проводилися в діапазоні температур від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ з фіксацією температурних полів на внутрішній і зовнішній поверхнях скла. Для контролю параметрів застосовували термопари типу ТХА та тепловізійну зйомку високої роздільності.

Для оцінки ефективності конструкцій використовували показники опору теплопередачі (R), температури внутрішньої поверхні скла (t_i) та загальних тепловтрат через 1 м^2 віконного блока (Q).

Особливу увагу приділено дослідженню впливу тепловідбиваючого екрана, розміщеного між шарами скла, на зміну температурного поля та баланс випромінювальних потоків. Також розглядалися системи з динамічними жалюзіями й автоматизованим регулюванням положення ламелей на основі сигналів від метеодатчиків освітленості та температури.

Отримані експериментальні та чисельні результати стали основою для побудови порівняльних графіків, таблиць і схем, які відображають вплив різних технічних рішень на енергоефективність світлопрозорих систем.

Результати дослідження

У результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень було проаналізовано вплив конструктивних і теплофізичних параметрів металопластикових світлопрозорих систем на їх енергоефективність, довговічність і теплотехнічну стабільність. Дослідження охоплювали серію моделей віконних блоків із різними типами склопакетів, заповненням камер, покриттями та додатковими функціональними елементами.

1. Теплотехнічна ефективність систем скління

Порівняльний аналіз п'яти основних типів світлопрозорих систем (див. табл. 1) показав, що базовий опір теплопередачі звичайного подвійного скління становить $R = 0,45\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, що відповідає лише мінімальним вимогам ДБН В.2.6-31:2021 [1].

Таблиця 1 – Порівняння конструкцій світлопрозорих систем за показниками енергоефективності

Тип конструкції	Опір теплопередачі $R, \text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	Економія енергії, %	Характеристика
Звичайне скління	0,45	0	Подвійний склопакет без покриттів, значні втрати тепла.
Енергозберігаюче з І-склом	0,80	25	Низькоемісійне покриття зменшує втрати тепла.
З тепловідбиваючим екраном	1,20	35	Металізований екран знижує радіаційні втрати.
Вакуумне скління	1,35	40	Відсутність конвекції між стеклами, високий опір теплопередачі.
З динамічним мікрокліматом	1,50	45	Регулювання теплового балансу за допомогою автоматичних жалюзі.

Застосування І-покриття дозволяє підвищити опір теплопередачі до $R = 0,80\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, тоді як впровадження тепловідбиваючого екрана у міжскляному просторі збільшує цей показник до $R = 1,20\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Найвищих результатів досягнуто у випадку вакуумного скління та динамічних систем із регульованими жалюзі – $R = 1,35\text{--}1,50\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ (рис. 1).

Зростання опору теплопередачі призводить до зменшення питомих тепловтрат через 1 м^2 віконної площі на 25–45 % у порівнянні зі звичайним склінням, що забезпечує істотне зниження навантаження

на систему опалення. Підвищення R прямо корелює зі зменшенням річних тепловтрат будівлі. Активні системи мікроклімату дозволяють досягти класу А за енергоефективністю (ДБН В.2.6-31:2021).

На рисунку 1 представлено узагальнені результати випробувань, які демонструють тенденцію зростання опору теплопередачі залежно від ступеня технологічної складності конструкції.

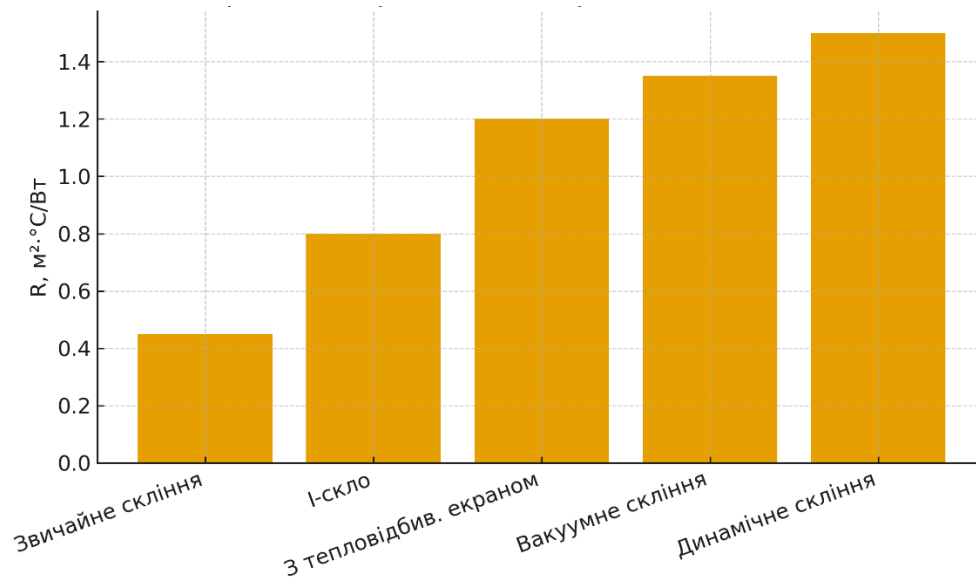


Рисунок 1 – Опір теплопередачі R для різних систем скління

Аргон і низькоемісійні покриття підвищують опір теплопередачі завдяки зменшенню конвекційного та радіаційного теплообміну. Додавання тепловідбиваючого екрана дає найбільший ефект при мінімальному впливі на світлопропускання (табл. 2, рис. 2).

Таблиця 2 – Вплив типу склопакета та додаткових елементів на опір теплопередачі

Конфігурація склопакета	Газове заповнення	Додаткові елементи	Опір теплопередачі R , $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Приріст R , %
4-16-4 (повітря)	Повітря	Відсутні	0,45	—
4-16Ar-4	Аргон	Відсутні	0,60	+33
4LowE-16Ar-4	Аргон	I-покриття	0,80	+78
4LowE-12Ar-4 + екран	Аргон	Тепловідбиваючий екран	1,20	+167
Вакуумне 4-0,2-4	Вакуум	Герметичний прошарок	1,35	+200

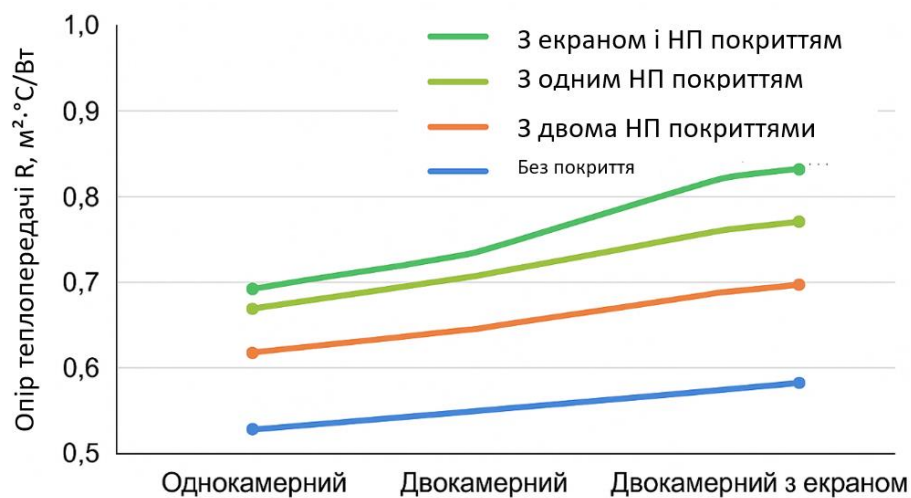


Рисунок 2 – Опір теплопередачі R від типу склопакета

На рисунку 2 представлено результати порівняння теплотехнічної ефективності віконних систем. Зі збільшенням кількості камер у склопакеті та застосуванням енергоефективних рішень (І-скло, тепловідбиваючі екрани, вакуумні прошарки) опір теплопередачі зростає від 0,45 до 1,50 м²·°С/Вт. Це дозволяє знизити сумарні тепловтрати будівлі на 35–45 %, забезпечуючи відповідність сучасним вимогам ДБН В.2.6-31:2021 та класу енергоефективності А [1].

2. Оцінка зниження енергоспоживання

Розрахункові дані щодо економії річних витрат енергії наведені на рисунку 3. Перехід від традиційного скління до систем з І-склом забезпечує економію близько 25 %, використання тепловідбиваючих екранів – 35 %, а впровадження динамічних систем із автоматизованим регулюванням – до 45 %.

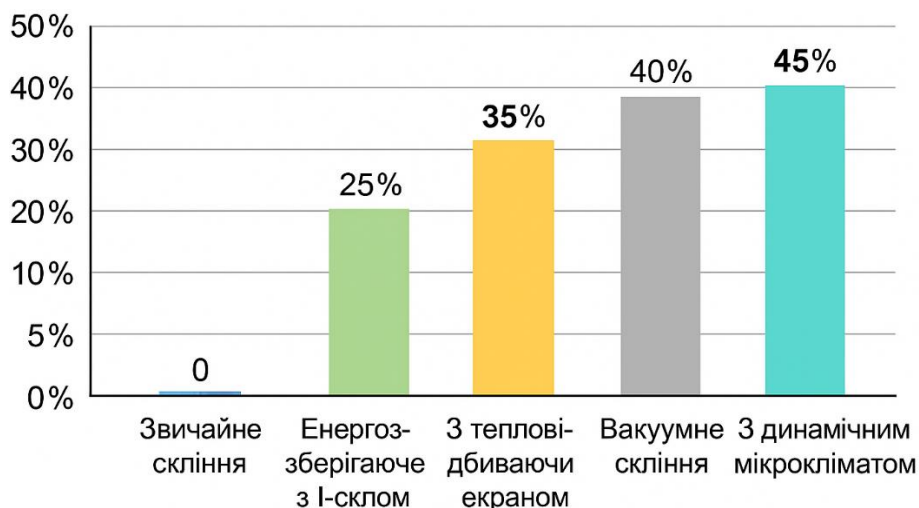


Рисунок 3 – Оціночне зниження річного споживання енергії

Отже, застосування комплексного підходу, який поєднує покриття низької емісії, вакуумне середовище та адаптивні елементи керування мікрокліматом, дозволяє забезпечити перехід будівлі до класу енергоефективності А+, відповідно до стандартів LEED і BREEAM.

3. Температурний стан внутрішніх поверхонь

Тепловізійні спостереження та чисельні моделі (рис. 4, 5) показали суттєву різницю температур внутрішнього скла при однакових зовнішніх умовах ($t_{\text{ext}} = -26\text{ °C}$). Для звичайного подвійного скління температура внутрішньої поверхні становить лише +5 °С, що сприяє появі конденсату. У системах із І-склом та тепловідбиваючим екраном температура підвищується до +14...+15 °С. Це підвищення температури усуває зону точки роси та конденсацію вологи на відкосах, покращуючи мікроклімат приміщень.

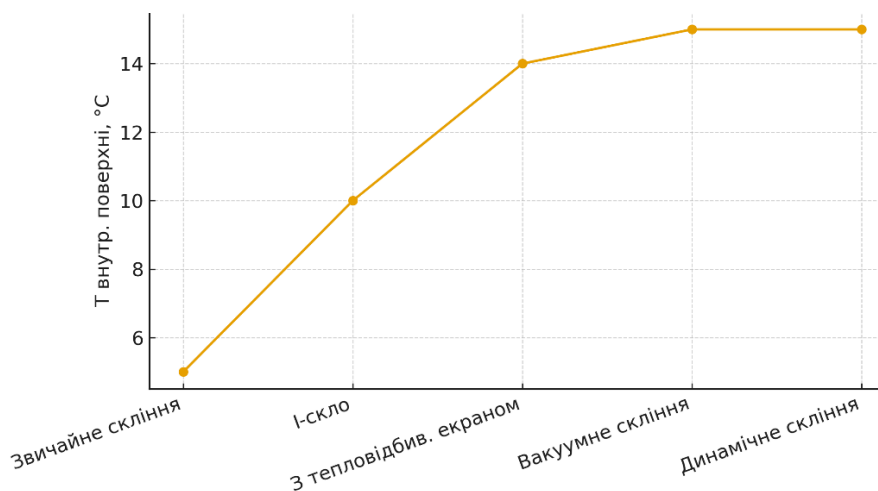


Рисунок 4 – Температура внутрішньої поверхні скла при $t_{\text{ext}} = -26\text{ °C}$

Рис. 5-6 ілюструє розподіл теплових потоків через вузол з'єднання рами ПВХ-профілю зі стіною. Основні втрати концентруються в зоні монтажного шва й відкосів. Застосування еластичного утеплювача, монтажної піни з низькою теплопровідністю та зовнішнього герметика дозволяє зменшити втрати до 10–12 % у порівнянні зі стандартним монтажем. Таким чином, у моделі з тепловідбиваючим екраном теплові потоки розподіляються рівномірніше.

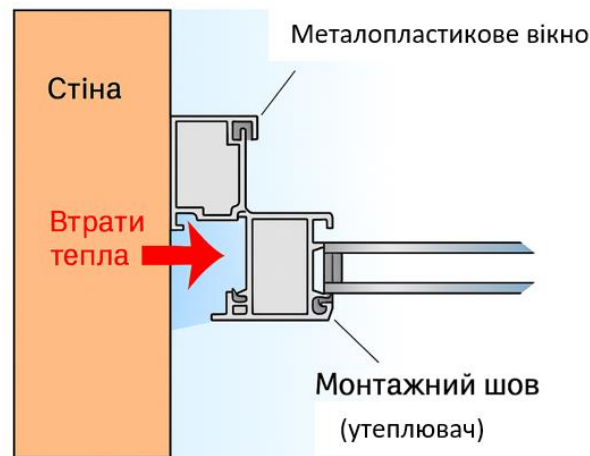


Рисунок 5 – Теплові потоки у вузлі примикання металопластикового вікна до стіни

На рисунку 6 ліворуч показано температурне поле у вузлі примикання звичайного вікна: спостерігаються сині зони охолодження та зона точки роси поблизу відкосу. Праворуч – енергоефективне рішення з тепловідбиваючим екраном і терморозривом у монтажному шві, де температура внутрішньої поверхні підвищується до +14 °С. Це усуває промерзання та покращує гігієнічні умови експлуатації.

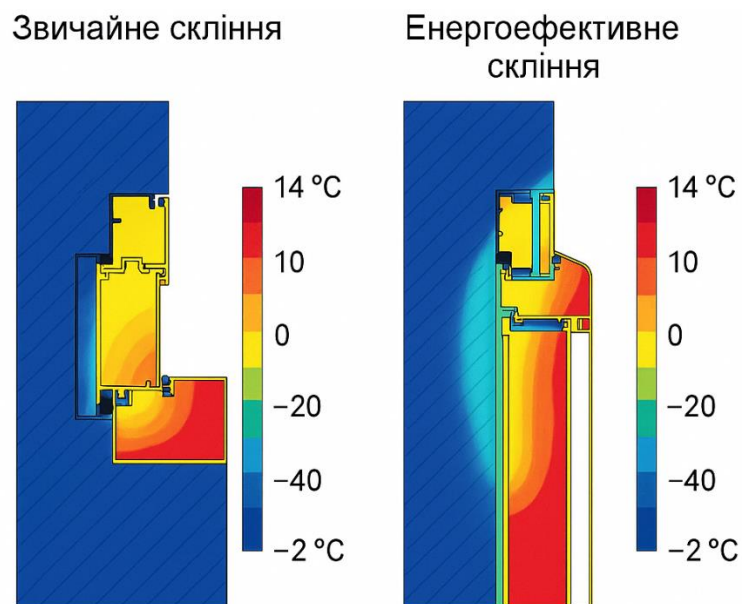


Рисунок 6 – Порівняння температурних полів у вузлі примикання вікна

4. Конструктивні рішення та інтеграція в адаптивні системи

Сучасні енергоефективні світлопрозорі системи формуються на основі ПВХ-профілів з термовставками, аргонних камер, тепловідбиваючих плівок та внутрішніх жалюзі з можливістю автоматизованого регулювання.

Конструкція віконного блока (див. рис. 7) передбачає інтеграцію датчиків температури, освітленості та контролера керування. На рис. 7 показано двокамерний склопакет із заповненням аргонном, тепловідбиваючим екраном і автоматичними жалюзі в міжскляному просторі. Така конструкція

дозволяє регулювати інтенсивність сонячного випромінювання, підвищуючи опір теплопередачі до $1,5 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Система забезпечує відбиття інфрачервоного випромінювання взимку та зменшення сонячного перегріву влітку. Дана система може інтегруватися в «розумні» фасади, забезпечуючи баланс між освітленням, комфортом і енергоощадністю.

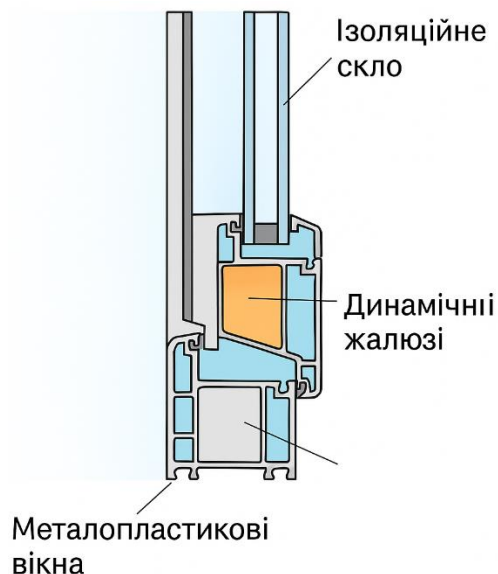


Рисунок 7 – Конструкція енергоефективного віконного блоку з тепловідбиваючим екраном і динамічними жалюзі

Такі рішення забезпечують не лише зменшення енергоспоживання, а й комфортне освітлення, можливість регулювання рівня сонячного випромінювання та природного освітлення, що особливо актуально для будівель з великими склініями фасадами.

5. Динамічний мікроклімат і керовані системи теплового балансу

Одним із найперспективніших напрямів підвищення енергоефективності є впровадження систем динамічного мікроклімату, що дозволяють змінювати опір теплопередачі в залежності від кліматичних умов. Принцип роботи таких систем показано на рис. 8. Схема відображає роботу системи в двох режимах:

- зимовий режим (утримання тепла): жалюзі відхилені так, щоб мінімізувати втрати, теплові потоки спрямовані всередину;
- літній режим (відбиття випромінювання): жалюзі перекривають пряме сонячне випромінювання, зменшуючи перегрів приміщення.

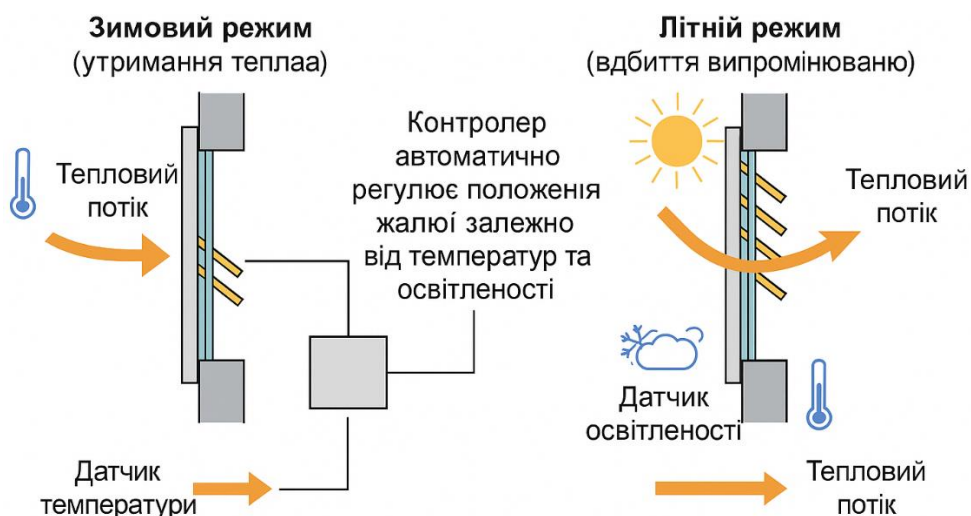


Рисунок 8 – Принцип регульованого опору теплопередачі в системах динамічного мікроклімату

У зимовий період жалюзі закривають міжскляний простір, зменшуючи втрати тепла, а влітку – відбивають сонячне випромінювання, запобігаючи перегріву приміщення. Контролер автоматично регулює положення жалюзі за сигналами датчиків температури та освітленості, підтримуючи оптимальний тепловий баланс. Результати експериментів показали, що такі системи дозволяють зменшити річне енергоспоживання будівлі на 30–45 %.

6. Узагальнення результатів

Узагальнені показники основних типів систем наведено у табл. 3, де відображено вплив технічних рішень на теплотехнічні, експлуатаційні та енергетичні характеристики.

Таблиця 3 – Основні технічні характеристики досліджених систем

Показник	Одиниця вимірювання	Звичайне вікно	Енергоефективне з І-склом	З тепловідбиваючим екраном / динамічне
Опір теплопередачі R	м ² ·°C/Вт	0,45	0,80	1,20–1,50
Температура внутрішнього скла при –26 °C зовні	°C	+5	+10	+14–15
Втрати тепла через 1 м ² вікна	кВт·год/рік	320	210	150–170
Зниження витрат на опалення	%	—	25	35–40
Термін служби профілю	років	25	35	40–50

Підвищення теплозахисних властивостей супроводжується зростанням довговічності та стабільності конструкції. Комплексна модернізація зменшує тепловтрати майже вдвічі (до 40 %), забезпечуючи комфорт і екологічну ефективність будівель. Використання таких систем у новому цивільному будівництві дає можливість скоротити викиди CO₂ на 15–20 %, що узгоджується з європейськими директивами EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) [19].

Модернізація конструкції дозволяє знизити теплові втрати, підвищити температуру внутрішньої поверхні скла до комфортного рівня, досягти стабільності форми профілю й подовжити строк експлуатації системи майже удвічі – з 25 до 50 років.

Висновки

1. Проведені дослідження підтвердили, що застосування енергоефективних рішень у металопластикових світлопрозорих системах — І-покриття, тепловідбиваючих екранів, вакуумного прошарку та динамічних жалюзі — забезпечує підвищення опору теплопередачі з 0,45 до 1,50 м²·°C/Вт і зниження річного енергоспоживання будівель на 35–45 %.

2. Оптимізація вузлів примикання зі зменшенням теплових втрат на 10–12 % усуває появу точки роси та покращує мікроклімат приміщень.

3. Використання систем із динамічним мікрокліматом дозволяє автоматично регулювати тепловий баланс залежно від сезону, що сприяє додатковій економії до 30 %.

4. Розроблені рішення відповідають вимогам ДБН В.2.6-31:2021 і принципам LEED, BREEAM, забезпечуючи довговічність, енергоощадність і комфорт експлуатації в сучасному цивільному будівництві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний з 2022-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2021. 108 с.
- Закон України № 2118-VIII від 22.06.2017 р. Про енергетичну ефективність будівель // Відомості Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>

3. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі Зміною № 1. [Чинний з 2022-09-01]. Київ: Мінрегіон України, 2018. 41 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Конструкції будинків і споруд. Вікна та двері з полівінілхлоридних профілів. Загальні технічні умови. [Чинний з 2011-07-01]. К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 48 с.
5. Басок, Б. І., Недбайло, О. М., Божко, І. К., Мартинєв, В. О. Підвищення теплотехнічної ефективності двокамерних вентиляованих світлопрозорих огорожувальних конструкцій // Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку — PEMS'22: Збірник матеріалів конференції (15–17 листопада 2022 р.) / за ред. О. М. Недбайло. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. С. 29–30. URL: <https://iee.kpi.ua/wp-content/uploads/2024/02/Збірник-матеріалів-конференції-PEMS-2022.pdf>
6. Ратушняк Г. С., Панкевич В. В., Панкевич О. Д., Гуменчук А. Є. Модель вибору віконних конструкцій для проектування будівель з урахуванням безпекової ситуації. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2025. № 3. С. 17–25. DOI: 10.31649/1997-9266-2025-180-3-17-25. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/3256>
7. Енергоефективні технології в будівництві: сучасні рішення для енергозбереження. URL: <https://credo-development.com.ua/energoefektyvni-tehnologiyi-v-budivnyctvi-suchasni-rishennya-dlya-energozberezhennya/>
8. Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Панкевич В. В. Оцінювання енергоефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2021. Т. 31, № 2, С. 81-87. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-81-87>.
9. Фаренюк Є. Г. Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних онструкцій сучасних багатоповерхових будівель : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Захищена 16.10.15. Рівне, 2015. 178 с.
10. Chowdhary A. K., Sikdar D. Design of electrotunable all-weather smart windows. Solar energy materials and solar cells. 2021. Vol. 222. P. 110921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110921>.
11. Bian Wang, Mangwei Cui, Yanfeng Gao, Fuyi Jiang, Wei Du, Feng Gao, Litao Kang, Chunyi Zhi, Hongjie Luo A Long-Life Battery-Type Electrochromic Window with Remarkable. Energy Storage Ability. SOLAR RRL. 2019. Vol. 4. DOI: <https://doi.org/10.1002/solr.201900425>.
12. Carlos E. Ochoa, Myriam B. C. Aries, Evert J. van Loenen, Jan L. M. Hensen Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. Applied Energy. 2012. Vol. 95. Pp. 238-245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.042>.
13. Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Панкевич В. В. Теплотехнічні особливості світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2021. Т. 30, № 1. С. 148-156. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-1-148-156>.
14. Панкевич О. Д., Миколаєнко В. В., Панкевич В. В. Вплив конструктивних рішень вузлових з'єднань (місць примикання конструкцій) на енергоефективність будівлі. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2020. Т. 27, № 2. С. 20-29. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-20-29>.
15. Криворучко, С. В. Аналіз та практичне застосування енергоактивних віконних конструкцій : магістерська дис. : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Криворучко Станіслав Володимирович. Київ, 2023. 86 с.
16. Енергоефективність: як позбутися тепловтрат для металопластикових вікон. URL: <https://veka.ua/ua/spravochnik/articles/windows/energoefektivnist-yak-pozbutisya-teplovtrat-dlya-metaloplastikovikh-vikon/>
17. Вимоги до енергоефективності вікон. Економічний аспект. Вивчаємо досвід Польщі. URL: <https://wt.com.ua/biblioteka/stati/1073-vimogi-do-energoefektivnosti-vikon-ekonomichnij-aspekt-vivchaemo-dosvid-polshchi.html>
18. ДСТУ Б В.2.6-101:2010. Конструкції будинків та споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій. [Чинний з 2010-10-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 90 с.
19. Сергейчук О., Кожедуб С. Розробка критеріальної оцінки енергоефективності та екологічності будівельних об'єктів // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2018. – № 11. – С. 61–68. DOI: 10.32347/2310-0516.2018.11.61-68

Осаулко Роман Сергійович – студент групи 1Б-24м, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Христич Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: khristych@vntu.edu.ua

Osaulko Roman Serhiyovych – student of group 1B-24m, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Khristych Oleksandr – Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Construction, Urban Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: khristych@vntu.edu.ua