

УДК 697.1:699.86

доц., к.т.н. **Юлія Кольчик**

kolchik.iium@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4559-5725,

доц. к.т.н. **Олександр Погосов**,

pohosov.oh@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2158-8897,

студентка **Марина Берестова**

berestovaia_ms-2023@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0007-9450-6879

аспірант **Микола Кольчик**,

nkolchik@gmail.com ORCID: 0009-0008-9272-2399,

Київський національний університет будівництва і архітектури

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.6-25>

ВПЛИВ РОЗТАШУВАННЯ ОПАЛЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ТЕПЛОЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЛІ

***Анотація.** У статті розглядається актуальна проблема підвищення енергоефективності будівель шляхом оптимізування теплових режимів світлопрозорих огороджувальних конструкцій. В умовах зростання вартості енергоносіїв та посилення нормативних вимог до теплоізоляції, критично важливим стає дослідження факторів, що впливають на тепловтрати через найбільш вразливі елементи оболонки будівлі – вікна. Особлива увага приділяється взаємодії системи теплопостачання, зокрема опалювальних приладів, з віконними блоками, оскільки конвективні потоки від радіаторів суттєво змінюють аеродинаміку та теплообмін у привіконній зоні. Метою роботи є експериментальне визначення впливу розташування опалювального приладу на величину приведенного опору теплопередачі світлопрозорих конструкцій. Методологія дослідження базується на проведенні натурних вимірювань температурних полів на внутрішніх і зовнішніх поверхнях скління з використанням спеціалізованого вимірювального комплексу (блоку теплової реєстрації та датчиків теплового потоку). Змодельовано різні умови експлуатації: дослідження проводилися як у неопалювальний період (для встановлення базових стаціонарних умов), так і під час роботи системи теплопостачання. Результати дослідження демонструють чітку кореляцію між відстанню розташування радіатора та теплозахисними властивостями вікна. При мінімальній відстані (130 мм) спостерігається максимальний коефіцієнт конвективної тепловіддачі на внутрішній поверхні, що сприяє підвищенню температури внутрішнього скла та, як наслідок, зростанню опору теплопередачі конструкції. При збільшенні відстані до 330 мм зафіксовано зниження ефективності теплового захисту. Опалювальний прилад*

безпосередньо під вікном підвищує опір теплопередачі мінімум у два рази порівняно з умовами, коли опалення працює, але прилад відсутній або віддалений. уточнено коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні віконної конструкції – близько $17,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, що суттєво відрізняється від нормативного показника $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Надано рекомендації щодо розміщення приладів системи теплопостачання для забезпечення нормативного мікроклімату та запобігання конденсації вологи.

Ключові слова: енергоефективність, система теплопостачання, світлопрозорі огорожувальні конструкції, опір теплопередачі, опалювальний прилад, віконні конструкції, конвективний теплообмін, склопакет, мікроклімат, термомодернізація.

Постановка проблеми. Підвищення енергоефективності будівель залишається ключовим завданням сучасної інженерії, особливо в контексті мінімізації трансмісійних тепловтрат крізь оболонку будівлі. Як зазначено в роботі [1], теплові містки та недостатня ізоляція світлопрозорих конструкцій залишаються критичними факторами, що впливають на загальний енергетичний баланс споруд. Сучасні тенденції в архітектурі, спрямовані на збільшення площі скління, загострюють проблему «низхідних потоків холодного повітря», що виникають біля високих фасадних вікон у холодному кліматі. Це суттєво знижує рівень локального теплового комфорту, регламентованого стандартами [2] і систематизованого в роботі [3].

Значна частина сучасних досліджень фокусується на вдосконаленні внутрішньої структури вікон, зокрема:

- використанні вакуумного скління [4, 5];
- застосування матеріалів зі змінним фазовим станом [6–8];
- оптимізації віконних рам для зменшення теплових містків [9, 10].

Водночас питання взаємодії системи опалення, зокрема радіаторів, з огорожувальними конструкціями часто розглядається відокремлено. Наприклад, дослідження [11] аналізують втрати емісії радіаторів через температурну стратифікацію, а в статті [12] автори досліджують вплив екранування радіаторів (шторами або екранами) на їхню теплову потужність. Однак, у цих роботах недостатньо уваги приділяється зворотному впливу: як саме розташування джерела теплоти змінює теплофізичні характеристики самої світлопрозорої конструкції.

Чисельне моделювання широко застосовується для аналізу вентилятованих вікон [13–16] та оцінювання теплового комфорту [3]. Проте, як вказують автори досліджень коефіцієнтів конвективного теплообміну [17], стандартні методики часто використовують спрощені граничні умови без урахування складної аеродинаміки конвективного факела від радіатора, який безпосередньо омиває

внутрішню поверхню скла.

Існує прогалина в експериментальних даних щодо того, як геометрична відстань між опалювальним приладом та площиною скління впливає на локальні коефіцієнти тепловіддачі та, як наслідок, на сумарний опір теплопередачі конструкції. Більшість досліджень розглядають радіатор лише як джерело теплоти для компенсації тепловтрат без оцінювання його ролі як активного елемента, що здатен змінювати теплотехнічні властивості огороження за рахунок модифікації прилежового шару повітря. Це зумовлює необхідність проведення натурних експериментів для встановлення кореляції між розташуванням опалювального приладу та теплозахисними якостями вікна.

Актуальність дослідження. Сучасний етап розвитку будівельної індустрії та теплоенергетики характеризується жорсткими вимогами до енергоефективності будівель. Світлопрозорі огорожувальні конструкції залишаються найбільш вразливим елементом теплоізоляційної оболонки: їхній нормативний мінімальний опір теплопередачі, згідно з чинними ДБН В.2.6-31:2021, є значно меншим за аналогічний показник для непрозорих стін, що зумовлює значну частку трансмісійних тепловтрат. Забезпечення комфортного мікроклімату та запобігання конденсації вологи на внутрішніх поверхнях скління потребує не лише вибору енергоефективних склопакетів, а й оптимізування роботи системи тепlopостачання, зокрема правильного розміщення опалювальних приладів. Взаємодія висхідних конвективних потоків від радіатора з поверхнею вікна суттєво впливає на коефіцієнт тепловіддачі і, як наслідок, на результатний опір теплопередачі конструкції. Дослідження цього впливу є критично важливим для розроблення рекомендацій щодо термомодернізації наявного житлового фонду.

Останні дослідження та публікації. Проблематика теплопереносу крізь огорожувальні конструкції та підвищення ефективності систем тепlopостачання широко висвітлена у науковій літературі. У статті [18] систематизуються шляхи зниження тепловтрат у зарядіаторній ділянці стіни та розглядаються особливості теплообміну опалювального приладу з непрозорим огороженням, але не приділяється достатня увага питанню взаємодії конвективних потоків від радіатора безпосередньо зі склопакетом віконного блоку та впливу цієї взаємодії на опір теплопередачі вікна.

У дослідженні [13] проводиться ґрунтовний аналіз аеродинаміки та теплопередачі крізь віконні конструкції, зокрема чисельне моделювання вентиляованих двокамерних склопакетів. Проте недостатня увага приділяється питанню впливу геометричної відстані розташування традиційного опалювального приладу відносно площини скління на зміну теплотехнічних характеристик у натурних умовах.

У роботі [19] формується тема визначення енергетичних показників підсистеми тепловіддачі на основі чисельного моделювання та аналізується розподіл температури в приміщенні, але не приділяється достатня увага питанню локальної зміни приведенного опору теплопередачі саме світлопрозорі конструкції залежно від дистанції до радіатора.

У роботі [20] проводиться аналіз впливу геометричних розмірів вікон на приведений опір теплопередачі зовнішньої стіни, але недостатня увага приділяється питанню впливу роботи системи теплопостачання та розташування нагрівальних приладів на теплотехнічні характеристики цих вікон у динаміці.

У роботі [21] детально досліджуються закономірності теплопередачі крізь віконні конструкції та аеродинаміка у міжскляному просторі. Проте потребує подальшого розвитку питання впливу зовнішніх факторів системи опалення, як-от відстань від радіатора, на інтегральні показники опору теплопередачі в експлуатаційних умовах.

У навчальних посібниках, зокрема [22], систематизуються загальні методики розрахунку теплофізичних властивостей будівельних матеріалів та огорожувальних конструкцій, але не приділяється достатня увага питанню експериментального уточнення коефіцієнтів тепловіддачі на внутрішній поверхні скління при різних конфігураціях розміщення опалювальних приладів.

Таким чином, існує потреба в експериментальному дослідженні впливу відстані між опалювальним приладом та вікном на теплозахисні якості світлопрозорих конструкцій в умовах реальної експлуатації.

Основна частина. Теплопередача крізь віконні конструкції є складним процесом, що здійснюється трьома шляхами: теплопровідністю, конвекцією та тепловим випромінюванням. Інтенсивність теплопередачі залежить від багатьох факторів, зокрема товщини скла та газового прошарку, кількості камер, наявності покриття на поверхні скла тощо.

Для визначення специфіки теплопереносу проводять математичне та фізичне моделювання за відомими моделями [23, 24]. Найпростішою й одночасно ефективною вважається одновимірною модель, яка ґрунтується на основних законах теплопровідності (Фур'є), конвекції (Ньютона-Ріхмана) та випромінювання (Стефана Больцмана). В одновимірній моделі тепловий потік вважається прямонаправленим та однорідним [25]. Модель [25] розглядає склопакет як послідовне розміщення шарів скла та повітряних прошарків.

На склопакет з боку приміщення та на зовнішній поверхні діють конвективний та променевий теплові потоки. Процес перенесення теплоти між поверхнею та середовищем, що його омиває, здійснюється конвекцією та тепловим випромінюванням.

Теплопередача від внутрішнього середовища до внутрішньої поверхні має вигляд:

$$q_{int, si} = h_{si} \cdot (\theta_{int} - \theta_{si}), \quad (1)$$

де $h_{si} = h_{si\kappa} + h_{sin}$ – коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні, Вт/(м²·К); $h_{si\kappa}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на внутрішній поверхні, Вт/(м²·К); h_{sin} – коефіцієнт променевого теплообміну між внутрішнім середовищем та поверхнею, Вт/(м²·К); θ_{int} , θ_{si} – температури внутрішнього середовища та на внутрішній поверхні, °С.

Тепловий вплив Сонця призводить до зменшення тепловтрат у зимовий період, температура скла може перевищувати температуру приміщення. У цьому випадку виникає зворотній тепловий потік від склопакету до приміщення. Зміна напрямку вектору густини теплового потоку зумовлює зміну температури склопакету. У роботі [24] рекомендовано для рівномірної зміни теплових параметрів склопакету не враховувати дію сонячної радіації, що дозволяє відображати реальну картину зміни температури та швидкості руху зовнішнього повітря. Теплопередача від зовнішньої поверхні до зовнішнього середовища може бути представлена у вигляді:

$$q_{se, ext} = h_{se} \cdot (\theta_{se} - \theta_{ext}) - q_s, \quad (2)$$

де q_s – тепловий потік від сонячної радіації, Вт; $h_{se} = h_{se\kappa} + h_{sen}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на зовнішній поверхні, Вт/(м²·К); $h_{se\kappa}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на внутрішній поверхні, Вт/(м²·К); h_{sen} – коефіцієнт променевого теплообміну між зовнішнім середовищем та поверхнею, Вт/(м²·К); θ_{se} , θ_{ext} – температури зовнішньої поверхні та зовнішнього середовища, °С.

Через шари скла передача теплоти здійснюється теплопровідністю. Густина теплового потоку може бути представлена у вигляді

$$q_{12} = \frac{\lambda_{12}}{d_{12}} (\theta_1 - \theta_2), \quad (3)$$

$$q_{34} = \frac{\lambda_{34}}{d_{34}} (\theta_3 - \theta_4), \quad (4)$$

$$q_{56} = \frac{\lambda_{56}}{d_{56}} (\theta_5 - \theta_6), \quad (5)$$

де λ_{ij} – коефіцієнт теплопровідності шару (скла) між поверхнями i та j , Вт/(м·К); d_{ij} – товщина шару ij , м; λ_{ij}/d – термічний опір шару скла, (м²·К)/Вт; θ_i, θ_j – температури на поверхнях i та j , °С; індекси 1-6 – позначають порядковий номер поверхні шарів.

В газових прошарках теплопередача здійснюється трьома способами: теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням. Газ є рухомих середовищем, рух якого здійснюється внаслідок природної конвекції, що виникає за рахунок різниці температур між прилеглими поверхнями скла.

Газові прошарки є замкненими і мають незначну товщину, тобто в них спостерігається механічна рівновага повітря. У роботах Дж. Бетчелора [26] при розв'язанні задачі гідродинаміки та перенесення теплоти для достатньо тонкої прямокутної замкненої області було показано, що конвекція в горизонтальному напрямі відсутня. Перенесення теплоти відбувається теплопровідністю та випромінюванням:

$$q_{23} = \left(\frac{\lambda_{23}}{\delta_{23}} + h_{sen2-3} \right) (\theta_2 - \theta_3), \quad (6)$$

$$q_{45} = \left(\frac{\lambda_{45}}{\delta_{45}} + h_{sen4-5} \right) (\theta_4 - \theta_5), \quad (7)$$

де h_{sen2-3}, h_{sen4-5} – коефіцієнт променевого теплообміну в послідовних повітряних прошарках, Вт/(м²·К).

Загальний тепловий потік проходить крізь кожен шар без зміни напрямку та величини. Стационарний режим в одновимірній моделі описується балансом енергетичних потоків, Вт:

$$q_{int,si} = q_{12} = q_{23} = q_{34} = q_{45} = q_{56} = q_{se,ext} = q. \quad (8)$$

Тепловий потік в основному формується конвективною та радіаційною складовими, які змінюються залежн від температурних умов навколишнього середовища. Таким чином тепловий потік, що проходить крізь шар скла, є змінним у часі.

Одновимірною моделлю не враховується неоднорідності температурного поля, зміну величини теплового потоку та наявність радіаційного потоку теплоти ззовні. Ці недоліки можна усунути з використанням двовимірної постановки задачі теплопереносу [27].

Двовимірною моделлю застосовується для більш точного аналізу перенесення теплоти крізь віконні конструкції. Основою для чисельного моделювання є математична модель, яка складається з диференціальних рівнянь:

- для газового середовища:
 - енергії;
 - нерозривності;
 - руху (Нав'є — Стокса);
- для скла:
 - теплопровідності Фур'є.

Граничні умови на зовнішніх поверхнях скла в бік зовнішнього та внутрішнього середовища задають у вигляді:

- умов першого роду – температурою на зовнішній і внутрішній поверхні скла;
- умов третього роду – шляхом завдання температури навколишніх середовищ та коефіцієнтів тепловіддачі [27].

За результатами двовимірної моделювання теплопереносу через склопакети зі звичайного скла, які наведені в роботі [28], було виявлено, що радіаційний потік становить для однокамерного склопакету до 70 %, а для двокамерного – до 65 % від загального теплового потоку. Зменшення цієї складовою можна досягти зниженням випромінювальної здатності або ступеня чорноти поверхні скла в камерах. Дієвим методом є нанесення низькоемісійного покриття з боку повітряного прошарку в склопакеті.

Формулювання цілей статті. Метою даного дослідження є визначення фактичного впливу розташування опалювального приладу на величину приведенного опору теплопередачі світлопрозорих огорожувальних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

1. Проведення натурних експериментальних вимірювань температурних полів на поверхнях однокамерних та двокамерних склопакетів.
2. Виконання вимірювань у два етапи: в неопалювальний період (для фіксування базових характеристик конструкцій) та в опалювальний період при роботі системи теплопостачання.
3. Дослідження зміни теплотехнічних характеристик вікна при варіюванні відстані від опалювального приладу до площини скління (на відстанях 130 мм, 230 мм та 330 мм).

4. Розрахунок приведенного опору теплопередачі ($R_{\Sigma пр}$) та коефіцієнтів тепловіддачі на внутрішній (h_{si}) та зовнішній (h_{se}) поверхнях для кожного сценарію.

5. Порівняльний аналіз отриманих результатів з нормативними значеннями та оцінка ефективності розміщення радіаторів.

Експериментальне дослідження. Експериментальним майданчиком було обрано лабораторію будівельної теплофізики та енергоефективних будівель та споруд, що знаходиться в третьому навчальному корпусі Київського національного університету будівництва і архітектури. Період проведення експериментів – листопад 2025 року.

Проведено дослідження середнього за добу опору теплопередачі при зміні температури зовнішнього та внутрішнього середовища. Метою було визначення впливу розташування опалювального приладу на різних відстанях відносно зовнішньої стіни на величину опору теплопередачі світлопрозорої конструкції.

Випробувальний стенд призначений для проведення вимірювань температури на поверхнях світлопрозорих огорожувальних конструкцій та у внутрішньому й зовнішньому середовищах.

Основні можливості випробувального стенду:

- вимірювання швидкості руху повітря в об'ємі приміщення та ззовні;
- вимірювання температури внутрішнього та зовнішнього повітря;
- вимірювання температури поверхонь опалювальних приладів;
- вимірювання температури на поверхнях огорожувальних конструкцій та в їхній товщі;
- оброблення, збереження та видавання результатів експерименту в електронному вигляді.

Вимірювання температури на поверхнях світлопрозорих конструкцій у внутрішньому середовищі здійснювалися за допомогою 13 термопар ХА. Схема розміщення термопар на поверхнях вікна показана на рис. 1. Температури зовнішнього повітря й поверхні радіатора вимірювалися двома термометрами опору REGMiK ТСП 101 Pt 100-B3-D4 L10-30-200. Усі зазначені давачі було приєднано до вторинного приладу И8-01 виробництва ТОВ «НВФ РЕГМІК», що забезпечує передавання виміряних величин до встановленого в лабораторії персонального комп'ютера за допомогою інтерфейсу RS-485 ModBus RTU для їх подальшого оброблення.

Як досліджувані опалювальні прилади використано чавунний секційний радіатор MC-140M2-500, що був приєднаний до централізованої системи опалення, та електричний інфрачервоний випромінювач переносного типу - Електрон ІП-700МК виробництва ТОВ «Інноваційна компанія «Електрон».

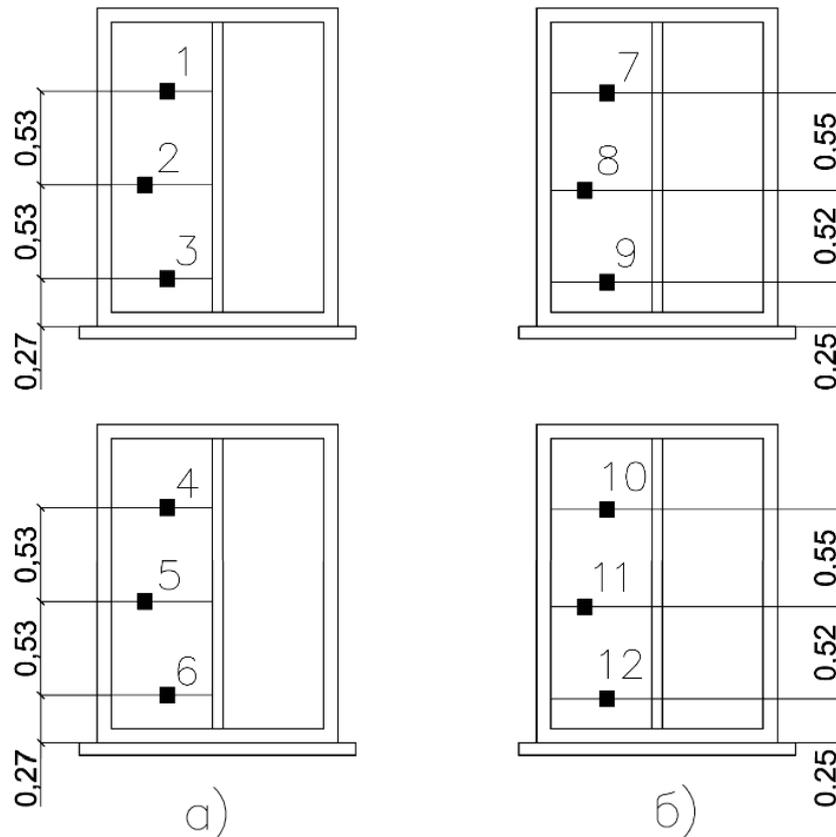


Рис. 1. Схема розміщення термопар на поверхнях склопакету:
 а) однокамерний склопакет ззовні (1,2,3) та всередині (4,5,6);
 б) двокамерний склопакет ззовні (7,8,9) та всередині (10,11,12)

Витрата теплоносія крізь секційний радіатор та його температурний графік залишалися незмінними протягом усього періоду дослідження (43 °С в подавальному трубопроводі).

Інфрачервоний випромінювач як нагрівальний елемент використовує аморфну металеву стрічку, що розташована в середині приладу. Випромінювальною поверхнею є дві шорсткі металеві пластини, що розташовані симетрично відносно нагрівального елемента. Максимальна довжина хвилі випромінювання $\lambda_{max} > 8,0$ мкм. Експериментальне дослідження однокамерного склопакету виконувалось упродовж тижня.

30 жовтня було встановлено випромінювач під однокамерним вікном. Період з 30.10 по 02.11 вважається неопалювальним, оскільки в лабораторії встановлювався стаціонарний стан. З графіку зміни температури внутрішнього повітря за цей період було встановлено, що температура суттєво зростала протягом доби 30-31 жовтня, с подальшим уповільненням. Це стало свідченням досягнення стаціонарного стану.

Після цього проводилось експериментальне дослідження однокамерного склопакету. Вимірювання складалося з трьох етапів, кожен з яких тривав добу.

Відстань між випромінювачем та зовнішньою стіною збільшувалася з кроком 100 мм. З 2.11 по 3.11 випромінювач розташовувався на відстані 130 мм, з 3.11 по 4.11 на відстані 230 мм, 4.11 по 5.11 на відстані 330 мм. Для двокамерного склопакету вимірювання проводилось у період 05-28.11.25. У добу 05-06.11. випромінювач розташували під двокамерним склопакетом на відстані 230 мм. У зв'язку з тим, що 10 грудня почався опалювальний сезон в місті Києві, на відстані 130 мм дослідження виконувалося при роботі секційного радіатора протягом доби 12-13.11.25.

Після вимкнення опалення внаслідок пошкодження систем теплопостачання 24.11.25 на відстані 330 мм дослід проводився впродовж доби 27-28.11 з випромінювачем Електрон ІП-700МК. Також було проведено додаткове дослідження для виявлення, як опалювальний прилад, що встановлений під двокамерним склопакетом, впливає на однокамерний склопакет. За результатами добових вимірювань значень температури було отримано масив даних та сформовані таблиці даних.

Побудовано графіки, на яких наочно продемонстровано коливання температури на внутрішній та зовнішній поверхнях скла при зміні зовнішньої температури повітря. Нижче наведені приклади графіків розподілу температур по внутрішній та зовнішній поверхнях скла, внутрішнього та зовнішнього середовища, опалювального приладу при різному розташуванні для однокамерного (рис. 2) та двокамерного склопакету (рис. 3).

З графіків видно, що впродовж доби є періоди часу коли спостерігається суттєве зростання температури на зовнішній поверхні скла при незначних коливаннях температури ззовні. Ці сплески пояснюються впливом сонячної радіації. З урахуванням рекомендації [24] при визначенні середньодобової температури поверхні скла періоди впливу Сонця були вилучені.

Для Києва, який знаходиться в першій температурній зоні, опір теплопередачі визначається коли температура ззовні $\theta_{ext} = -22$ °С, але на основі отриманих даних можна інтегрувати розрахунки при середньодобових температурах зовнішнього повітря які були під час дослід. Результати розрахунку будуть ідентичні, тобто інтеграція не знижує цінність дослід.

Загальний приведений опір теплопередачі визначається, як сума:

$$R_{\Sigma np} = R_{si} + R_{ck} + R_{se}, \quad (9)$$

де $R_{si} = 1/h_{si}$ – внутрішній опір теплопередачі, (м²·°С)/Вт; $R_{se} = 1/h_{se}$ – зовнішній термічний опір, (м²·°С)/Вт; R_{ck} – термічний опір склопакету, (м²·°С)/Вт.

Для розрахунку опору теплопередачі склопакету застосовувався вираз

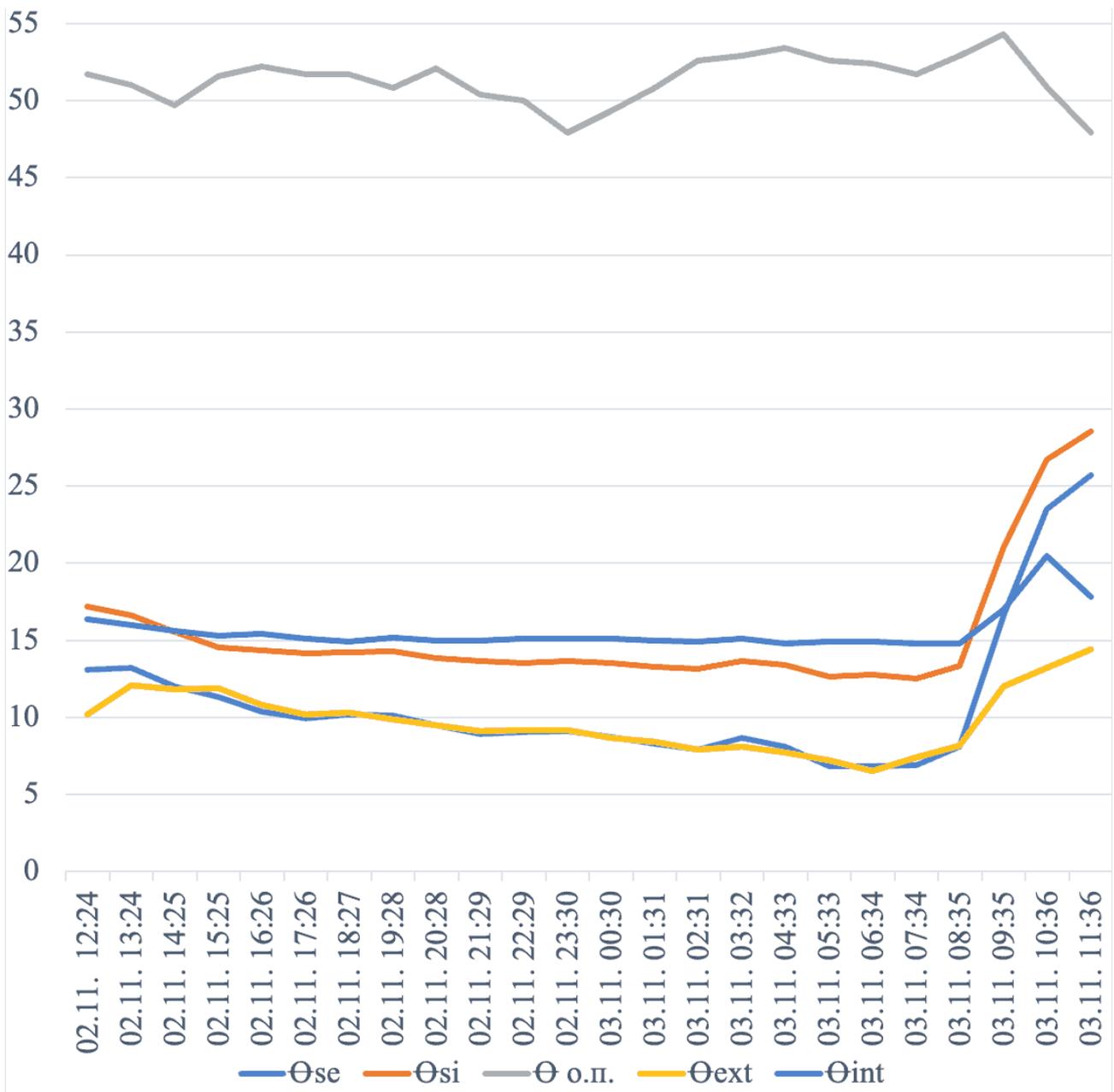


Рис. 2. Приклад отриманих даних при розміщенні опалювального приладу на відстані 130 мм від однокамерного склопакету

$$R_{ск} = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{q}, \quad (10)$$

де θ_{si} , θ_{se} – середня температура на внутрішній та зовнішній поверхнях скла, °С; q – тепловий потік, що передається через склопакет, Вт, який визначається з рівняння Ньютона-Ріхмана.

$$q = h_{si} \cdot (\theta_{int} - \theta_{si}), \quad (11)$$

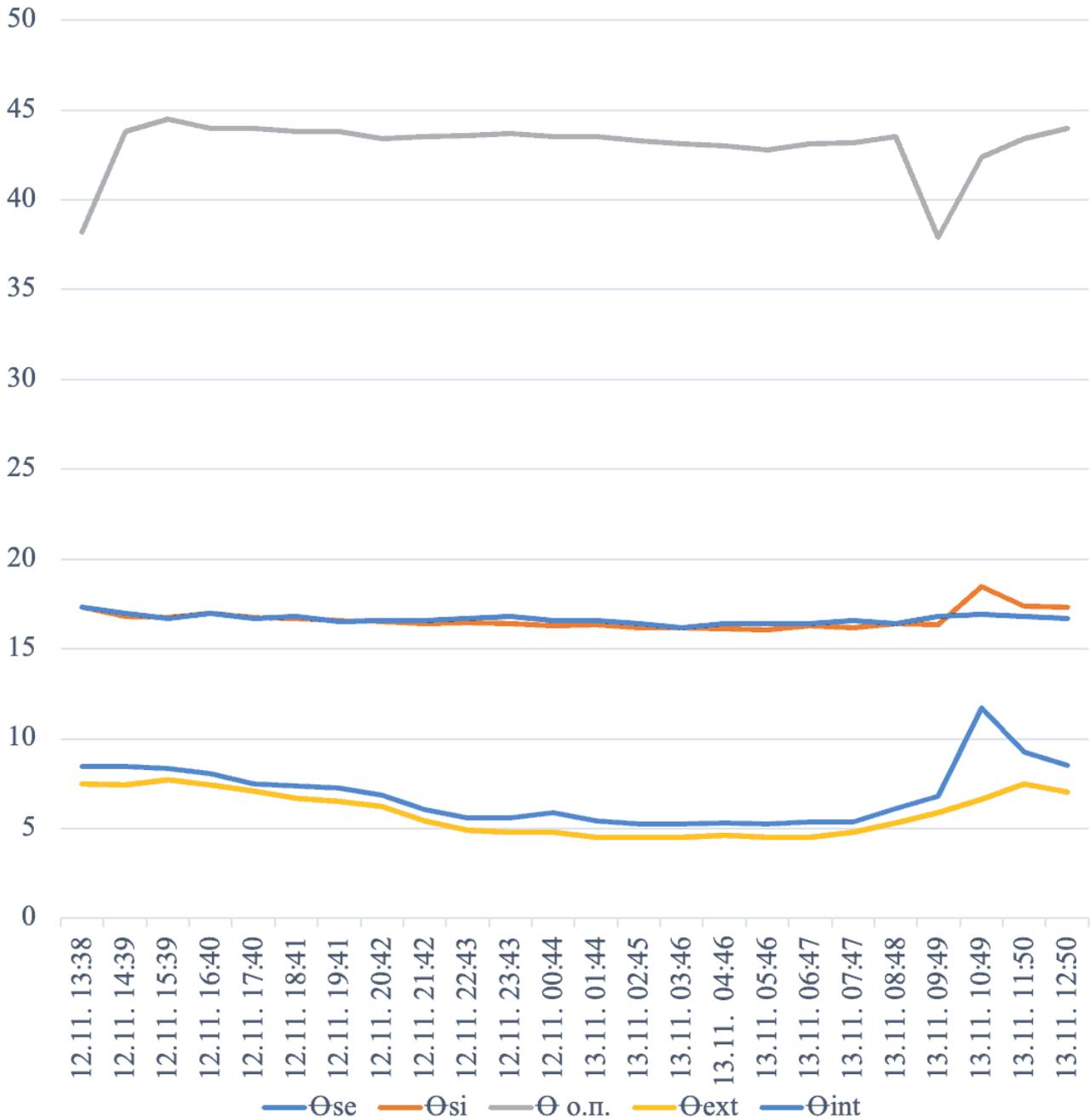


Рис. 3. Приклад отриманих даних при розміщенні опалювального приладу на відстані 130 мм від двокамерного склопакету

де h_{si} – коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні, Вт/(м²·°C).

Для коефіцієнтів тепловіддачі були розраховані реальні значення за умов теплообміну, що досліджувалися, з використанням формул, наведених у [25].

Коефіцієнт тепловіддачі враховує конвективну та променеву складову й має вигляд суми цих складових:

$$h_{si} = h_{sik} + h_{sin} \quad (12)$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на внутрішній поверхні розраховується за формулою:

$$h_{sik} = 1,163 \cdot 1,43 \cdot \sqrt[3]{(\theta_{int} - \theta_{si})}. \quad (13)$$

Розрахунок коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням на внутрішній поверхні проводився за формулою в якій уже враховані ступені чорноти навколишніх поверхонь

$$h_{sin} = \frac{1,163}{\left(\frac{1}{4,50} + \frac{1}{4,65} - \frac{1}{4,96}\right) \cdot (\theta_{int} - \theta_{si})} \cdot \left[\left(\frac{\theta_{int} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_{si} + 273}{100}\right)^4 \right]. \quad (14)$$

Коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні має аналогічний вигляд суми:

$$h_{se} = h_{sek} + h_{sen}. \quad (15)$$

Формула для променевої складової коефіцієнта тепловіддачі на зовнішній поверхні:

$$h_{sen} = \frac{1,163}{\left(\frac{1}{4,65} + \frac{1}{4,96} - \frac{1}{4,96}\right) \cdot (\theta_{se} - \theta_{ext})} \cdot \left[\left(\frac{\theta_{se} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_{ext} + 273}{100}\right)^4 \right]. \quad (16)$$

Конвективна складова коефіцієнту тепловіддачі на зовнішній поверхні розраховується за формулою з урахуванням швидкості:

$$h_{sek} = 1,163 \cdot (6,31 v^{0,656} + 3,25 e^{-1,91v}), \quad (17)$$

де v – швидкість зовнішнього повітря м/с.

У процесі дослідів швидкість вітру вимірювалася і її величина змінювалася в межах від 0,1 до 2 м/с. Однак, будівлі, які примикають до лабораторії та наявні кути змінюють швидкість та не відображають реальні значення. Тому для

розрахунку коефіцієнта тепловіддачі приймалася середня швидкість вітру для міста Києва для місяця - листопад $v = 2,3$ м/с [29].

За наведеними залежностями було пораховано середньодобові значення опорів теплопередачі для однокамерного та двокамерного склопакетів. Результати розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати проведеного експериментального дослідження

Відстань, мм	Опір теплопередачі $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$				q , Вт	Коефіцієнт тепловіддачі, $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$					
	$R_{\Sigma np}$,	R_{si} ,	R_{se} ,	$R_{ск}$,		h_{si} ,	$h_{si\kappa}$,	h_{sin} ,	h_{se} ,	$h_{se\kappa}$,	h_{sen} ,
Неопалювальний період											
-	0,894	0,158	0,057	0,679	6,33	6,33	1,66	4,67	17,58	12,72	4,86
Однокамерний склопакет (нестационарний режим)											
130	0,804	0,155	0,057	0,592	7,76	6,47	1,77	4,70	17,59	12,72	4,87
230	0,915	0,158	0,057	0,701	5,71	6,34	1,61	4,73	17,65	12,72	4,93
330	0,952	0,159	0,057	0,736	5,02	6,28	1,54	4,74	17,67	12,72	4,95
Однокамерного склопакету (стаціонарний режим)											
130	0,955	0,158	0,057	0,740	5,68	6,31	1,61	4,70	17,62	12,72	4,90
230	0,871	0,156	0,057	0,658	6,88	6,43	1,72	4,71	17,62	12,72	4,90
330	0,747	0,155	0,057	0,536	7,10	6,45	1,72	4,73	17,65	12,72	4,93
Двокамерний склопакет											
130	1,801	0,180	0,057	1,777	0,56	5,57	0,77	4,80	17,43	12,72	4,71
230	1,520	0,160	0,057	1,303	4,38	6,25	1,48	4,77	17,62	12,72	4,90
330	1,517	0,154	0,057	1,305	7,13	6,48	1,72	4,76	17,4	12,72	4,68

Але провести чіткий аналіз впливу відстані розташування опалювального приладу на зміну опору теплопередачі досить складно внаслідок впливу зміни середньодобової температури зовнішнього та внутрішнього середовища впродовж тижня. У зв'язку з цим було проведено моделювання одноманітних умов для однокамерного склопакету. Для кожної доби точково вибрано години з майже однаковими температурами зовнішнього та внутрішнього середовища, в яких розходження не перевищує 5%.

Висновки. Аналіз отриманих даних демонструє суттєвий вплив розташування джерела тепла. При розміщенні радіатора на відстані 130 мм від площини вікна спостерігається максимальне значення опору теплопередачі ($R_{\Sigma np}=0,955$ ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$) для однокамерного склопакету). Це пояснюється тим, що висхідний потік теплого повітря створює "теплову завісу", інтенсивно

омиваючи внутрішню поверхню скла, що підвищує температуру поверхні θ_{si} та знижує температурний напір між кімнатою та внутрішнім склом. При перенесенні приладу на відстань 330 мм опір теплопередачі знижується до 0,747 (м²·К)/Вт. Це свідчить про те, що конвективний потік розсіюється і менше взаємодіє зі склом, дозволяючи холодному повітрю від вікна опускатися в зону перебування людей.

Найбільш показовим є порівняння з варіантом, коли опалення в приміщенні працює, але безпосередньо під досліджуваним вікном прилад відсутній (або впливає радіатор сусіднього вікна). У цьому випадку опір теплопередачі склав лише 0,428 (м²·К)/Вт. Тобто наявність радіатора під вікном на правильній відстані підвищує теплозахисні властивості конструкції більш ніж удвічі.

Також, в ході обробки результатів було розраховано коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні (h_{se}). Експериментальні дані показали, що для досліджуваних умов він становить близько 17,4–17,6 Вт/(м²·К), що відрізняється від нормативного значення 23 Вт/(м²·К), прийнятого в ДСТУ та ДБН для зимових умов. Це вказує на те, що реальні умови тепловіддачі на фасаді можуть бути менш інтенсивними, ніж закладено в нормах, що впливає на точність теплотехнічних розрахунків. Звісно подібне твердження потребує обробки набагато більшого масиву даних, але вказує на існуючу проблематику іноді кратного перевищення нормативних вимог над реально необхідними. Загальні висновки можуть бути сформульовані наступним чином:

1. Експериментально підтверджено, що розташування опалювальних приладів системи теплопостачання є визначальним фактором формування теплозахисних якостей світлопрозорих конструкцій. Оптимальна відстань від радіатора до площини вікна в межах дослідження становить 130 мм, що забезпечує максимальний приведений опір теплопередачі.

2. Встановлено, що робота опалювального приладу безпосередньо під світлопрозорою конструкцією підвищує її опір теплопередачі в 1,7–2 рази порівняно з умовами, коли опалення працює, але конвективний потік від приладу не омиває скло безпосередньо.

3. Збільшення відстані між радіатором та вікном понад 230–330 мм призводить до зниження температури на внутрішній поверхні скління, що підвищує ризик випадіння конденсату.

4. Виявлено розбіжність між експериментально отриманим коефіцієнтом тепловіддачі зовнішньої поверхні (~17,5 Вт/(м²·К)) та нормативним значенням (23 Вт/(м²·К)), що потребує врахування при уточненні методик енергетичного аудиту будівель.

References

1. Alvrur, Emre, Pinar Mert Cuce, Erdem Cuce, Abdallah Bouabidi, Manzoore Elahi M. Soudagar. “Thermal Bridging in Windows: A Critical Review on Mitigation Strategies for Enhanced Building Energy Efficiency.” *Sustainable and Clean Buildings*, Review, vol. 1, no. 1, Dec. 2024, pp. 176–93, <https://ojs.wiserpub.com/index.php/scb/article/view/6066>.
2. ISO. *Ergonomics of the Thermal Environment - Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*. 4th ed., ISO 7730:2005, ISO, Sept. 2025, <https://www.iso.org/standard/85803.html>.
3. Vösa, Karl-Villem, Andrea Ferrantelli, Jarek Kurnitski. “Assessment of Downward Draught in High-Glazing Facades in Cold Climates – Experimental and CFD Study into Draught Control with a 21-Type Radiator.” *E3S Web of Conferences*, edited by J. Kurnitski, M. Thalfeldt, vol. 246, 2021, p. 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124602002>.
4. Zheng, Yanhong, Pengfei Si, Yin Zhang, Lijun Shi, Changjiajin Huang, Dongsheng Huang, Zhineng Jin. “Study on the Effect of Radiant Insulation Panel in Cavity on the Thermal Performance of Broken-Bridge Aluminum Window Frame.” *Buildings*, vol. 13, no. 1, Dec. 2022, p. 58. <https://doi.org/10.3390/buildings13010058>.
5. Reddy, Vennapusa Jagadeeswara, N. P. Hariram, Mohd Fairusham Ghazali, Sudhakar Kumarasamy. “Pathway to Sustainability: An Overview of Renewable Energy Integration in Building Systems.” *Sustainability*, vol. 16, no. 2, Jan. 2024, p. 638. <https://doi.org/10.3390/su16020638>.
6. Goia, Francesco. “Thermo-Physical Behaviour and Energy Performance Assessment of PCM Glazing System Configurations: A Numerical Analysis.” *Frontiers of Architectural Research*, vol. 1, no. 4, Dec. 2012, pp. 341–47. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2012.10.002>.
7. Michael, Michalis, Fabio Favoino, Qian Jin, Alessandra Luna-Navarro, Mauro Overend. “A Systematic Review and Classification of Glazing Technologies for Building Façades.” *Energies*, vol. 16, no. 14, July 2023, p. 5357. <https://doi.org/10.3390/en16145357>.
8. Robinson, P. D., M. G Hutchins. “Advanced Glazing Technology for Low Energy Buildings in the UK.” *Renewable Energy*, vol. 5, nos. 1–4, Aug. 1994, pp. 298–309. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90387-5](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90387-5).
9. Moutzakakis, Anastasios, Stamatis Zoras, Vasilis Evagelopoulos, Argyro Dimoudi. “Experimental Investigation of Thermal Bridges and Heat Transfer through Window Frame Elements at Achieving Energy Saving.” *Energies*, vol. 15, no. 14, July 2022, p. 5055. <https://doi.org/10.3390/en15145055>.

10. Milovanović, Bojan, Marina Bagarić, Mergim Gaši, Nikolina Vezilić Strmo. “Case Study in Modular Lightweight Steel Frame Construction: Thermal Bridges and Energy Performance Assessment.” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 20, Oct. 2022, p. 10551. <https://doi.org/10.3390/app122010551>.
11. Maivel, Mikk, Andrea Ferrantelli, Jarek Kurnitski. “Experimental Determination of Radiator, Underfloor and Air Heating Emission Losses Due to Stratification and Operative Temperature Variations.” *Energy and Buildings*, vol. 166, May 2018, pp. 220–28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.061>.
12. Orłowska, Magdalena, Paweł Szałański, Wojciech Capiński. “Testing the Temperature Fields and Power of a Flat Radiator Covered With and Without a Curtain.” *Rocznik Ochrona Środowiska*, vol. 27, Nov. 2025, pp. 705–21. <https://doi.org/10.54740/ros.2025.057>.
13. Basok, Borys, Oleksandr Obodovych, Dmytro Davydenko, Olesya Stepanova, Hanna Koshlak. “Numerical Modeling of Heat Transfer Through Ventilated Double-Chamber Windows.” *Rocznik Ochrona Środowiska*, vol. 27, Nov. 2025, pp. 693–704. <https://doi.org/10.54740/ros.2025.056>.
14. Carlos, Jorge S., Helena Corvacho, Pedro D. Silva, J. P. Castro-Gomes. “Modelling and Simulation of a Ventilated Double Window.” *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 1, Jan. 2011, pp. 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.08.021>.
15. Carlos, Jorge S., Helena Corvacho, Pedro D. Silva, J. P. Castro-Gomes. “Real Climate Experimental Study of Two Double Window Systems with Preheating of Ventilation Air.” *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 6, June 2010, pp. 928–34. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.003>.
16. Davydenko, B. V. “Tridiagonal Matrix Method for Solving Grid Equations of Hydrodynamics.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5(35), 2008, pp. 7–11.
17. Michalak, Piotr. “Experimental and Theoretical Study on the Internal Convective and Radiative Heat Transfer Coefficients for a Vertical Wall in a Residential Building.” *Energies*, vol. 14, no. 18, Sept. 2021, p. 5953. <https://doi.org/10.3390/en14185953>.
18. Glamazdin, Pavlo, Pavlo Pasichnyk. “Ways to Reduce Heat Loss in the Radiator Section of the Building Envelope.” *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, vol. 0, no. 31, Dec. 2019, pp. 55–62. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.31.55-62>.
19. Deshko, V. I., Sukhodub I. O., Yatsenko O. I. “Study of part efficiencies of the heat emission system using room CFD-model” *Technologies and Engineering*, no. 5, May 2023, pp. 17–26. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.2>.
20. Ratuszniak, H. S., V. V. Pankevych. “Modeliuvannia vplyvu rozmiru vikon na

- pryvedenyi termichniy opir zovnishnoi stiny.” [Vinnytsia], 2024, p. 20418, <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/42183>.
21. Kuzhel, Lilia. *Regularities of heat transfer through window constructions*. 2017, https://web.archive.org/web/20240608021248/https://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/09/dissert_kuzhel_liliya-1.pdf, https://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/09/dissert_kuzhel_liliya-1.pdf. Institute of Engineering Thermophysics, PhD Thesis.
 22. Maliarenko, V., O. Herasymova, O. Maleev. *Budivelna Teplofizyka*. KHNAMG, <https://web.archive.org/web/20241211201049/https://eprints.kname.edu.ua/2883/>, <https://eprints.kname.edu.ua/2883/>. Accessed 20.11.2025.
 23. Nakorchevskiy, A., A. Nedbailo. “Teploperedacha cherez bahatosharovi vikonni sklopakety z urakhuvanniam dii soniachnoi radiatsii.” *Inzhenerno-fizychnyi zhurnal*, vol. 86, no. 6, 2013, <https://web.archive.org/web/20220323204009/https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/19399>, pp. 1282–87, <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/19399>.
 24. Basok, B. I., B. V. Davydenko, A. M. Pavlenko, L. M. Kuzhel, V. H. Novikov, S. M. Goncharuk, B. K. Iliencko, Ye. Ye. Nikitin, H. M. Veremiichuk. “Reduced heat loss through window structures.” *Energy Technologies & Resource Saving*, vol. 76, no. 3, Sept. 2023, pp. 43–57. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.04>.
 25. Basok, Borys, Borys Davydenko, Volodymyr Novikov, Anatoliy M. Pavlenko, Maryna Novitska, Karolina Sadko, Svitlana Goncharuk. “Evaluation of Heat Transfer Rates through Transparent Dividing Structures.” *Energies*, vol. 15, no. 13, July 2022, p. 4910. <https://doi.org/10.3390/en15134910>.
 26. Batchelor, G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. 1st ed., Cambridge University Press, 2000. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511800955>.
 27. Basok, B., I. Nakorchevskiy. *Teplofizyka Vplyvu Soniachnoho Vyprominiuvannia Na Budivli*. Naukova Dumka, 2016.
 28. Basok, B. B., B. V. Davydenko, L. M. Kuzhel, S. M. Goncharuk, T. G. Belyaeva. “Experimental studies of heat energy efficient glass units with low soft surface.” *Industrial Heat Engineering*, vol. 39, no. 1, Feb. 2017, pp. 41–48. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2017.06>.
 29. Minrehionbud. *Protection against the dangerous geological processes, harmful operational influences, against the fire. Building climatology*. DSTU DSTU-N B V.1.1-27:2010, Ukrarkhbudininform, <https://finance.smr.gov.ua/files/%D0%95%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D0%B7%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F/dstu-n-b-v11-27-2010-budivelna-klimatologiya.pdf>. Accessed 20.11.2025.
-

UDC 697.1:699.86

PhD, Assoc. Prof. **Yuliia Kolchyk**

kolchyk.iium@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4559-5725,

PhD, Assoc. Prof. **Oleksandr Pohosov**,

pohosov.oh@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2158-8897,

student **Maryna Berestovaia**

berestovaia_ms-2023@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0007-9450-6879

post-graduate **Mykola Kolchyk**,

nkolchik@gmail.com ORCID: 0009-0008-9272-2399,

Kyiv National University of Construction and Architecture

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.6-25>

INFLUENCE OF THE LOCATION OF HEATING APPLIANCES OF THE HEAT SUPPLY SYSTEM ON THE THERMAL PROTECTION PROPERTIES OF TRANSLUCENT BUILDING ENVELOPE STRUCTURES

Abstract. *The presented scientific work considers the urgent problem of increasing the energy efficiency of buildings by optimizing the thermal regimes of translucent envelope structures. In the context of rising energy costs and tightening regulatory requirements for thermal insulation, it becomes critical to investigate the factors influencing heat losses through the most vulnerable elements of the building envelope — windows. Special attention is paid to the interaction of the heat supply system, specifically heating appliances, with window blocks, since convective flows from radiators significantly alter the aerodynamics and heat exchange in the near-window zone. The aim of the work is the experimental determination of the influence of the geometric location of the heating appliance relative to the glazing plane on the value of the reduced heat transfer resistance of translucent structures. The object of study is single-chamber and double-chamber double-glazed windows (glass units) under real operating conditions. The research methodology is based on conducting field measurements of temperature fields and heat flux density on the internal and external surfaces of the glazing using a specialized measuring complex consisting of a thermal registration block and heat flux sensors. During the experiment, various operating conditions were simulated: measurements were taken both during the non-heating period (to establish baseline stationary conditions) and during the active operation of the heat supply system. A key stage was varying the distance from the heating appliance to the window plane (130 mm, 230 mm, and 330 mm). The results of the study demonstrate a clear correlation between the radiator placement distance and the thermal protection properties of the window. It was established that at the minimum distance (130 mm), an intensification of convective heat exchange on the*

inner surface is observed, which contributes to an increase in the temperature of the inner glass and, as a consequence, an increase in the structure's heat transfer resistance. With an increase in distance to 330 mm, a decrease in thermal protection efficiency was recorded. In particular, comparative analysis showed that the presence of an operating heating appliance directly under the window increases the heat transfer resistance by at least two times compared to conditions where the heating in the building is working, but the appliance is distant from the investigated window (values increased from 0.428 m²·K/W to over 0.8 m²·K/W). A separate scientific result is the refinement of the heat transfer coefficient on the external surface of the window structure. Calculated data showed a value of approximately 17.4 W/(m²·K), which differs from the standard indicator of 23 W/(m²·K) regulated by current building codes. This indicates the expediency of revising approaches to calculating heat losses through vertical translucent surfaces. The practical value of the work lies in providing recommendations regarding the placement of heat supply system appliances to ensure standard heat transfer resistance and prevent moisture condensation, which can serve as an effective thermal modernization measure without expensive glazing replacement.

Keywords: *energy efficiency, heat supply system, translucent building envelope structures, thermal resistance, heating appliance, window structures, convective heat exchange, double-glazed window, glass unit, microclimate, thermal modernization.*

Received/Надійшла до редакції 21.11.2025

Reviewed/Рецензована 12.12.2025

Accepted/Прийнята 26.12.2025