УДК 537.876 **doi: 10.26906/SUNZ.2026.1.153**

Г. Ю. Краснянський, Н. Б. Бурдейна

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

МОДИФІКАЦІЯ РОЗРАХУНКОВОЇ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОІЗОЛЯЦІЇ СТІНИ БУДІВЛІ

Анотація. Критерієм ефективності термоізоляції стіни будівлі є зменшення теплових втрат стіни після покриття її поверхні шаром теплоізолюючого матеріалу. Теплові втрати визначаються товщиною і теплопровідністю матеріалів стіни і теплоізолятора та теплопередачею, пов'язаною із зовнішньою поверхнею стіни. Теплообмін між зовнішньою поверхнею будівлі та навколишнім середовищем ґрунтується на радіаційних та конвективних механізмах. Цей процес включає теплове випромінювання від сонця, теплообмін довгохвильовим випромінюванням з атмосферою, конвективний обмін із зовнішнім повітрям. Зазвичай, впливу падаючого сонячного випромінювання і обміну випромінюванням з атмосферою приділяється менше уваги ніж теплопередачі через стіну будівлі, обумовленій теплопровідністю. Для розрахунку теплових опорів зовнішньої поверхні стіни, пов'язаних з випромінюванням і конвекцією, прийнято користуватися спрощеною методикою, яку пропонують відповідні стандарти. Це при певних умовах може призводити до суттєвих похибок у визначенні теплових втрат будівлі. З іншого боку, не виправданим є використання емпіричних залежностей для визначення уявної температури атмосфери, необхідної для розрахунку теплового потоку довгохвильового випромінювання атмосфери. Ці залежності не є універсальними і були отримані для конкретних метеорологічних умов шляхом вимірювань у конкретних локаціях. Проведена модифікація розрахункової методики визначення ефективності термоізоляції стіни будівлі шляхом уточнення розрахунку теплопередачі між зовнішньою поверхнею стіни та навколишнім середовищем. Із рівняння теплового балансу для зовнішньої поверхні стіни з урахуванням теплового потоку поглинутого сонячного випромінювання і теплового потоку, обумовленого радіаційним охолодженням стіни отримані вирази, які дозволяють оцінювати ефективність термоізоляції стіни будівлі через зменшення теплових втрат стіни після покриття її зовнішньої поверхні шаром теплоізолюючого матеріалу.

Ключові слова: термоізоляція, теплові втрати, теплове випромінювання, конвекція, розрахункова методика.

Вступ

Забезпечення високої енергоефективності будівель в теперішній час набуває особливої актуальності. Це обумовлено, з одного боку, можливістю довгострокової економії енергії та коштів, з іншого – зменшенням впливу на оточуюче середовище завдяки скороченню викидів парникових газів через зниження залежності від викопного палива. Енергоефективні конструкції покращують тепловий комфорт та здоров'я людей за рахунок забезпечення оптимальної температури та кращої якості повітря всередині приміщення.

Для практичного вирішення задачі підвищення енергоефективності будівель та споруд велике значення має попередня оцінка ефективності термоізоляції стіни будівлі, покритої шаром теплоізолюючого матеріалу. Це доцільно робити розрахунковими методами, виходячи з фундаментальних співвідношень теплопередачі та теплофізичних характеристик будівельних, облицювальних та теплоізолюючих матеріалів. Раніше [1] при проведенні подібних розрахунків ми нехтували впливом сонячного випромінювання і радіаційного охолодження зовнішньої поверхні стіни. Ці фактори при певних умовах можуть істотно впливати на загальні теплові втрати будівлі.

Огляд літературних джерел. Критерієм ефективності термоізоляції стіни будівлі є зменшення теплових втрат стіни після покриття її поверхні шаром теплоізолюючого матеріалу. Теплові втрати визначаються товщиною і теплопровідністю матеріалів стіни і теплоізолятора та теплопередачею, пов'язаною із зовнішньою поверхнею стіни будівлі.

Теплообмін між зовнішньою поверхнею будівлі та навколишнім середовищем ґрунтується на радіаційних та конвективних механізмах. Цей процес включає теплове випромінювання від сонця, теплообмін довгохвильовим випромінюванням з атмосферою, конвективний обмін із зовнішнім повітрям [2, 3]. Історично, вплив падаючого сонячного випромінювання і обмін випромінюванням з атмосферою вивчались не так ретельно, як теплопередача через стіну будівлі, обумовлена теплопровідністю.

Тепловий потік від сонця змінюється залежно від географічної широти, пори року та часу доби. Так відповідно до кліматичних даних для України, щільність теплового потоку, що надходить на горизонтальну поверхню у випадку безхмарного неба, в окремих місцях доходить до 650 Вт/м^2. Взимку вища температура стіни будівлі, нагрітої сонячним випромінюванням, збільшує перепад температур між зовнішньою поверхнею стіни і атмосферним повітрям і, як наслідок, тепловий потік від стіни до зовнішнього середовища. І навпаки, завдяки сонцевому теплонадходженню зменшується різниця температур між внутрішнім повітрям і внутрішньою поверхнею стіни і відповідний тепловий потік від внутрішнього середовища до стіни. Це можна розглядати як виникнення додаткових теплових потоків до зовнішнього і внутрішнього середовищ, відповідно. Обидва є наслідком поглинутої сонячної енергії. Вони є особливо важливими для темних, погано ізольованих поверхонь [2].

Втрата тепла через довгохвильове інфрачервоне випромінювання, спрямоване у бік небосхилу призводить до радіаційного охолодження зовнішньої поверхні стіни [4]. Взимку радіаційне охолодження є негативним фактором, оскільки зниження температури на зовнішній поверхні стіни будівлі збільшує втрати тепла [5]. Воно найвище вночі, коли небо ясне, а вологість низька [6]. Довгохвильове теплове випромінювання виникає через різницю між температурою по-

вітря ззовні та уявною температурою атмосфери [5]. Ця величина є функцією зміни температури атмосфери з висотою і вертикального розподілу водяної пари в атмосфері. Уявна температура атмосфери є критично важливою характеристикою для коректної оцінки ефективності термоізоляції будівлі [6]. В той же час, вона не завжди відома із кліматичних даних. Для її оцінки існує велика кількість кореляцій, що співвідносять кліматичні параметри з інфрачервоним випромінюванням атмосфери [7, 8]. Ці кореляції прив'язані до місцевих кліматичних умов та точних локацій і відповідні емпіричні рівняння для визначення уявної температури атмосфери не є універсальними. При порівнянні уявних температур атмосфери, отриманих з даних про випромінювання, з даними, розрахованими за допомогою різних математичних моделей, було виявлено значні розбіжності [7].

Конвективний теплообмін є результатом різниці між температурою зовнішньої поверхні стіни та температурою навколишнього середовища. Для розрахунку теплового опору зовнішньої поверхні стіни, пов'язаного з конвекцією, зазвичай користуються спрощеною методикою, яку пропонує ДСТУ EN ISO 6946:2022. Це може призводити до суттєвих похибок у визначенні споживання енергії будівлею [9].

Метою дослідження є модифікація розрахункової методики визначення ефективності термоізоляції стіни будівлі шляхом уточнення розрахунку теплопередачі між зовнішньою поверхнею стіни та навколишнім середовищем.

Викладення основного матеріалу

Розглядали одновимірну задачу, тобто вважали, що теплота передається перпендикулярно до поверхні стіни, а ізотермами є площини, паралельні до неї. Крім того приймали, що умови ззовні і всередині будівлі, зокрема, температура і напрямок повітря, з часом не змінюються, тобто теплообмін є усталеним.

Припускали, що весь тепловий потік сонячного випромінювання поглинається лише зовнішньою поверхнею стіни. Тоді густина теплового потоку від внутрішнього середовища до стіни, яка відповідає тепловтратам стіни, повинна дорівнювати густині теплового потоку через стіну:

$$q_{in} = \frac{t_i - t_{se}}{R_{si} + R_1 + R_2}, \qquad (1)$$

де t_i – температура всередині приміщення; t_{se} – температура зовнішньої поверхні стіни; R_{si} – тепловий опір внутрішньої поверхні стіни, пов'язаний з конвекцією і випромінюванням; R_1 і R_2 – теплові опори матеріалів стіни і теплоізолятора, відповідно.

В цьому випадку рівняння теплового балансу для зовнішньої поверхні стіни набуває вигляду:

$$q_{in} + \alpha_{se} I_{sol} = q_{out} + q_{sky}, \qquad (2)$$

де $\alpha_{se} I_{sol}$ – тепловий потік поглинутого сонячного випромінювання; α_{se} – коефіцієнт поглинання сонячної енергії зовнішньою поверхнею стіни; I_{sol} – густина теплового потоку сонячного випромінювання;

$$q_{out} = \left(t_{se} - t_e\right) / R_{se} \; - \qquad (3)$$

густина конвекційного і радіаційного теплового потоку від зовнішньої поверхні стіни, обумовленого різницею температур t_{se}–t_e; t_e – температура оточуючого середовища; R_{se} – відповідний тепловий опір зовнішньої поверхні стіни;

$$q_{sky} = \left(t_e - t_{sky}\right) / R_r \; - \qquad (4)$$

густина теплового потоку, обумовленого радіаційним охолодженням зовнішньої поверхні стіни при $t_e \neq t_{sky}$; R_r – відповідний тепловий опір; t_{sky} – уявна температура атмосфери.

Із (1)–(4) отримуємо вираз для розрахунку зменшення теплових втрат стіни після покриття її зовнішньої поверхні шаром теплоізолюючого матеріалу:

$$\Delta q = \frac{1}{R_t (1-k)} \cdot \begin{pmatrix} k\left(t_i - t_e + \dfrac{R_{se}}{R_r}\left(t_e - t_{sky}\right)\right) - \\ -R_{se} I_{sol}\left(\alpha_{se}{}^{w} - (1-k)\alpha_{se}{}^{i}\right) \end{pmatrix}, \qquad (5)$$

де $R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + R_{se}$ – повний тепловий опір стіни; $k = R_2 / R_t$; a_{se}^{w} і a_{se}^{i} – коефіцієнти поглинання сонячної енергії зовнішньою поверхнею нетеплоізольованої і теплоізольованої стіни, відповідно.

Теплові опори матеріалів стіни і теплоізолятора згідно закону Фур'є розраховуються за формулами:

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_1}, \qquad R_2 = \frac{d_2}{\lambda_2}, \qquad (6)$$

де d_1 і d_2 – товщини нетеплоізольованої стіни і теплоізолятора, λ_1 і λ_2 – теплопровідності відповідних матеріалів.

Для оцінки величини теплового опору внутрішньої поверхні стіни з достатнім ступенем точності можуть бути використані типові значення для більшості прикладних задач, наведені в ДСТУ EN ISO 6946:2022. Так у випадку горизонтального потоку повітря R_{si} = 0,13 (м^2×К)/Вт, вертикального вгору – 0,10 (м^2×К)/Вт, вертикального вниз – 0,17 (м^2×К)/Вт. Дані, наведені в стандарті, розраховані для випромінювальної здатності внутрішньої поверхні стіни ε = 0,9, середньої температури внутрішньої поверхні і оточуючого середовища 20 °С.

Тепловий опір зовнішньої поверхні стіни, обумовлений конвекцією і випромінюванням може бути знайдений із співвідношення:

$$\frac{1}{R_{se}} = \frac{1}{R_{ce}} + \frac{1}{R_{re}}, \qquad (7)$$

де R_{ce} – тепловий опір, пов'язаний з конвекцією, R_{re} – тепловий опір, пов'язаний з випромінюванням.

При запису (7) враховано, що в електричній схемі заміщення ці опори з'єднуються паралельно оскільки відповідні процеси відбуваються незалежно один від одного. Для оцінки R_{ce} ДСТУ EN ISO 6946:2022 пропонує просте співвідношення:

$$1 / R_{ce} = 4 + 4v, \qquad (8)$$

де v – швидкість повітря біля зовнішньої поверхні стіни.

Відповідно до [7, 10], де порівнювались результати безпосередніх вимірювань з розрахунками за відомими моделями, (8) призводить до суттєвої похибки у визначення R_{ce}. В той же час, адекватні результати були отримані з використанням моделі ASHRAE (Американського товариства інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря), відповідно до якої [7]:

$$1/R_{ce} = 18,6(0,25v_{10})^{0,605}, \quad (9)$$

де $v_{10} \geq 2$ м/с – швидкість повітря на висоті 10 м і відстані 0,3 м від стіни.

Для знаходження виразу для R_{re} врахуємо, що відповідно до закону Стефана – Больцмана густина радіаційного теплового потоку від зовнішньої поверхні стіни визначається формулою:

$$q_{r,out} = \varepsilon\sigma(T_{se}^4 - T_e^4), \quad (10)$$

де ε – випромінювальна здатність зовнішньої поверхні стіни; σ – стала Стефана-Больцмана; T_{se} і T_e – відповідні термодинамічні температури. Після порівняння (10) і (3) з урахуванням (7) отримаємо:

$$\frac{1}{R_{re}} = \frac{\varepsilon\sigma(T_{se}^4 - T_e^4)}{T_{se} - T_e} = \varepsilon\sigma(T_{se} + T_e)(T_{se}^2 + T_e^2). \quad (11)$$

Відмітимо, що наближена формула для $1/R_{re}$, наведена в ДСТУ EN ISO 6946:2022, може бути отримана із (11) шляхом лінеаризації при $T_{se} - T_e << \overline{T}_{se,e}$, де $\overline{T}_{se,e}$ – середнє значення T_{se} і T_e. Остаточно, для розрахунку R_{se} із (7), (9), (11) маємо:

$$R_{se} = \frac{1}{18,6(0,25V_{10})^{0,605} + \varepsilon\sigma(T_{se} + T_e)(T_{se}^2 + T_e^2)}. \quad (12)$$

Для врахування внеску в тепловтрати радіаційного охолодження зовнішньої поверхні стіни небосхил розглядають як сіре тіло [2, 5], характеристикою якого є t_{sky}. В цьому наближенні для густини відповідного теплового потоку маємо:

$$q_{sky} = F_{r,se}\varepsilon\sigma\left(T_{se}^4 - T_{sky}^4\right), \quad (13)$$

де F_{se-sky} – кутовий коефіцієнт випромінювання між стіною і небосхилом; T_{se} і T_{sky} – термодинамічні температури. Порівнюючи з (4), отримуємо:

$$R_r = \frac{T_e - T_{sky}}{F_{r,se}\varepsilon\sigma\left(T_{se}^4 - T_{sky}^4\right)}. \quad (14)$$

Якщо припустити $T_{se} \simeq T_e$, то вираз (14) може бути перетворений аналогічно до (11):

$$R_r = \frac{1}{F_{r,se}\varepsilon\sigma(T_e + T_{sky})(T_e^2 + T_{sky}^2)}. \quad (15)$$

Спрощений лінеаризований вираз для R_r, наведений в ДСТУ EN ISO 52016-1:2022, може призводити до помітної похибки обчислень у випадку, коли не виконується співвідношення $T_e - T_{sky} << \overline{T}_{e,sky}$, де $\overline{T}_{e,sky}$ –середнє значення T_e і $\overline{T}_{e,sky}$. При розрахунку R_r за формулою (15) для кутового коефіцієнта випромінювання між стіною і небосхилом $F_{se\text{-}sky}$ використовують значення відповідно до ДСТУ EN ISO 52016-1:2022. Так для незатіненої вертикальної стіни стандарт дає $F_{se\text{-}sky}$ = 0,5. Використання значення кутового коефіцієнта випромінювання 0,5 для вертикальних поверхонь в енергетичному моделюванні – загальновживаний підхід. Він передбачає постійну уявну температуру атмосфери незалежно від напрямку поширення теплового потоку довгохвильового випромінювання атмосфери, що полегшує обчислювальний процес. Водночас цей потік змінюється від максимального у вертикальному напрямку до мінімального – у горизонтальному. Таким чином, такий підхід не можна вважати повністю репрезентативним, що потрібно враховувати при аналізі результатів розрахунків.

Коефіцієнти поглинання сонячної енергії зовнішньою поверхнею стіни a_{se}^w, a_{se}^i і випромінювальна здатність ε є табличними величинами. Для визначення густини теплового потоку сонячного випромінювання I_{sol} для даної локації і пори року використовують кліматичні бази даних, які є у широкому доступі.

Уявна температура атмосфери T_{sky} зазвичай є невідомою з кліматичних даних. Її є сенс оцінювати відповідно до ДСТУ EN ISO 52016-1:2022, де для помірних широт пропонується значення $T_e - T_{sky}$, яке дорівнює 11 К. Варто зазначити, що стандарт враховує кліматичну класифікацію, засновану лише на широтах, розрізняючи субполярні, помірні та тропічні зони. Розрахунки з використанням спрощеної моделі, наведеної у стандарті, не завжди адекватні для помірних регіонів з коливаннями вологості. В той же час, використання відомих емпіричних залежностей для визначення уявної температури атмосфери не є виправданим оскільки вони були отримані для конкретних метеорологічних умов шляхом вимірювань у конкретних місцях.

Висновки

1. Представлені результати розрахунків ефективності термоізоляції стіни будівлі з урахуванням впливу сонячного випромінювання і радіаційного охолодження зовнішньої поверхні стіни. Ці фактори при певних умовах можуть істотно впливати на загальні теплові втрати будівлі.

2. Проведена модифікація розрахункової методики визначення ефективності термоізоляції стіни будівлі шляхом уточнення розрахунку теплопередачі між зовнішньою поверхнею стіни та навколишнім середовищем.

3. Із рівняння теплового балансу для зовнішньої поверхні стіни з урахуванням теплового потоку поглинутого сонячного випромінювання і теплового потоку, обумовленого радіаційним охолодженням стіни отримані вирази, які дозволяють оцінювати ефективність термоізоляції стіни будівлі через зменшення теплових втрат стіни після покриття її зовнішньої поверхні шаром теплоізолюючого матеріалу.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Burdeina N., Glyva V., Levchenko L., Krasnianskyi G., Biruk Y., Zozulya S., Zozulya L., Kashlev M., Grzelakowski T. Innovative Approaches to Designing Sound Insulation in Historic Buildings during Reconstruction. International Journal of Conservation Science. 2025. Vol. 16, Special Issue. P. 373-382. https://doi.org/10.36868/IJCS.2025.si.01
2. Akbari H., Lodi C., Muscio A., Tartarini P. Analysis of a New Index for the Thermal Performance of Horizontal Opaque Building Components in Summer. Atmosphere. 2021. 12. 862. https://doi.org/10.3390/atmos12070862
3. MuscioA., Akbari H. An Index for the Overall Performance of Opaque Building Elements Subjected to Solar Radiation. Energy and Buildings. 2017. V. 157. P. 184-194. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.010
4. Asdrubali F., Evangelisti L., Grazieschi G., Guattari C. Influence of Sky Temperatures on Building Energy Needs. Proceedings of Building Simulation 2019. 16th Conference of IBPSA. Rome, Italy, Sept. 2-4, 2019. P.293-299. https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210326
5. Chen J., Lu L. Development of Radiative Cooling and Its Integration With Buildings: A Comprehensive Review. Solar Energy. 2020. 212. P. 125–151. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.013
6. Li M., Jiang Y., Coimbra C.F.M. On the Determination of Atmospheric Longwave Irradiance under All-Sky Conditions. Solar Energy 2017. 144. P. 40–48. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.006
7. De Cristo E., Evangelisti L., Guattari C., De Lieto V. R. An Experimental Direct Model for the Sky Temperature Evaluation in the Mediterranean Area: A Preliminary Investigation. Energies. 2024. 17. P. 2228-2043. https://doi.org/10.3390/en17092228
8. Evangelisti L., Guattari C., Asdrubali F. On the Sky Temperature Models and Their Influence on Buildings Energy Performance: A Critical Review. Energy and Buildings. 2019. 183. P. 607–625. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.037
9. Evangelisti L., Guattari C., Gori P., Bianchi F. Heat Transfer Study of External Convective and Radiative Coefficients for Building Applications. Energy and Buildings. 2017. 151. P. 429–438. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.004
10. Kahsay M.T., Bitsuamlak G, Tariku F. Numerical Analysis of Convective Heat Transfer Coefficient for Building Facades. Journal of Building Physics. 2018.42(6) .P. 727-749. https://doi.org/10.1177/1744259118791207

Received (Надійшла) 8.10.2025
Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.01.2026
Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Краснянський Григорій Юхимович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна;
Grygorii Krasnianskyi – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;
e-mail: krasnianskyi.giu@knuba.edu.ua, ORCID Author ID: https://orcid.org/0000-0002-2421-1270,
Scopus Author ID: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507131193.

Бурдейна Наталія Борисівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна;
Nataliia Burdeina – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;
e-mail: burdeina.nb@knuba.edu.ua, ORCID Author ID: orcid.org/0000-0002-2812-1387,
Scopus Author ID: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220047954.

Modification of the calculation method for determining the effectiveness of thermal insulation of a building wall

Grygorii Krasnianskyi, Nataliia Burdeina

Abstract. The criterion for the effectiveness of thermal insulation of a building wall is the reduction of heat loss from the wall after covering its surface with a layer of thermal insulating material. Heat loss is determined by the thickness and thermal conductivity of the wall and insulation materials, as well as the heat transfer associated with the outer surface of the wall. Heat exchange between the outer surface of the building and the surrounding environment is based on radiative and convective mechanisms. This process includes thermal radiation from the sun, heat exchange through long-wave radiation with the atmosphere, and convective exchange with the external air. Typically, less attention is paid to the effects of incident solar radiation and radiation exchange with the atmosphere than to heat transfer through the building wall caused by thermal conductivity. For calculating the thermal resistances of the outer surface of the wall related to radiation and convection, a simplified methodology proposed by relevant standards is usually employed. Under certain conditions, this can lead to significant errors in determining the heat loss of the building. On the other hand, the use of empirical dependencies to determine the apparent temperature of the atmosphere, necessary for calculating the thermal flow of long-wave radiation from the atmosphere, is unjustified. These dependencies are not universal and were obtained for specific meteorological conditions through measurements in specific locations. A modification of the calculation method for determining the effectiveness of thermal insulation of a building wall has been carried out by refining the calculation of heat transfer between the outer surface of the wall and the surrounding environment. From the thermal balance equation for the outer surface of the wall, considering the thermal flow of absorbed solar radiation and the thermal flow caused by the radiative cooling of the wall, expressions have been derived that allow for the assessment of the effectiveness of the thermal insulation of the building wall through the reduction of heat loss from the wall after covering its outer surface with a layer of thermal insulating material.

Keywords: thermal insulation, heat losses, thermal radiation, convection, calculation method.