

УДК 624.01

О. Ю. Співак, канд. техн. наук, доц.; О. І. Ободянська, канд. техн. наук, доц.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ НАВІСНИХ ВЕНТИЛЬОВАНИХ ФАСАДІВ НА ПОВІТРЯНИЙ РЕЖИМ ПРОШАРКУ В НИХ

У зв'язку із застосуванням в конструкціях НВФ вітрозахисних мембран є актуальним питання про доцільність їх використання, оскільки воно має ряд суттєвих недоліків. Основними аргументами для відмови від мембрани були повздовжня фільтрація в утеплювачі і можлива емісія волокон. Хоча вплив руху повітря в прошарку на довговічність мінераловатного утеплювача за відсутності вітрозахисних мембран досліджувався різними дослідниками, ці дослідження не привели до узагальнення результатів і до розрахунків сумарного ефекту від цього явища. Для вивчення впливу повітряного режиму в прошарку на викид волокна з утеплювача необхідно враховувати максимально можливі систематично діючі швидкості руху повітря, в тому числі і в теплий період року, з урахуванням впливу сонячної радіації.

Метою роботи є дослідження впливу ширини повітряного прошарку між утеплювачем і мембраною навісного вентилязованого фасаду на швидкість і тепловолігнісні характеристики повітря в таких прошарках.

Для розроблення математичної моделі руху повітря за природної конвекції в вентилязованому прошарку навісного вентилязованого фасаду за основу було прийнято метод складання теплового балансу для елементарного шару повітря в прошарку.

Числові дослідження проводились на математичній моделі, реалізованій в прикладному пакеті Mathcad, з врахуванням впливу температурного режиму як внутрішньої стіни так і навколишнього середовища на параметри повітря в прошарку. Отримані за описаною методикою значення можна використовувати при оцінці можливого видування мінераловатного утеплювача з подальшим розрахунком зменшення його товщини та опору теплопередачі огорожувальної конструкції.

Розроблені методи розрахунку дозволяють аналізувати вплив конструктивних особливостей НВФ на повітряний режим в прошарку повітря між утепленою стіною і навісним вентиляваним фасадом.

Визначено, що вплив вітру не викликає помітного підвищення швидкості руху повітря в прошарку порівняно з гравітаційним, що підтверджує правильність прийнятих вихідних положень.

Ці методи розрахунку повітряного режиму вентилязованого прошарку НВФ дозволяють використовувати результати під час проектування НВФ і оцінювання впливу руху повітря на якість роботи утеплювачів, що застосовуються у НВФ.

Ключові слова: *навісний вентиляований фасад, природна конвекція, швидкість руху повітря, емісія волокон теплової ізоляції.*

Вступ

Останнім часом в будівництві житлових та адміністративних споруд активно впроваджуються прогресивні технічні та технологічні рішення. Одним з них є система навісного фасаду з повітряним вентиляваним прошарком (НВФ). Ця система дозволяє надати будівлі сучасного архітектурно-виразного вигляду та забезпечити надійність і довговічність конструкції фасадів за рахунок використання нових, стійких до атмосферного впливу та температурних перепадів матеріалів.

Конструкція стіни цієї системи має високі теплоізоляційні та звукоізоляційні характеристики, легко монтується та демонтується при реставрації. Безремонтний термін експлуатації систем підвісних вентиляваних фасадів становить від 20 до 50 років [1].

Активно вентилявані фасади почали розробляти в Європі з 1940 р. За ідею взяли захист зовнішніх стін екраном з ефектом водовідштовхування, який би одночасно підвищував теплозахисні властивості комбінованої стіни і покращував зовнішній вигляд будівель. Застосовуватися у вітряному та досить вологому кліматі Канади а також і в Європі

вентильовані фасади почали з середини 1950-х років.

Навісний вентильований фасад є багатошаровою конструкцією, яка включає кріпильні елементи, фасадні профілі, утеплювач, вітровологозахисну мембрану, повітряний зазор і зовнішній облицювальний шар.

Повітряний прошарок у системі НВФ призначений для перенесення та видалення вологи із системи утеплення. Основна проблема, пов'язана з повітряним прошарком, полягає у складності визначення його розрахункової величини з врахуванням факторів, що забезпечують якісну роботу НВФ. У випадку надмірної ширини повітряного прошарку, за певної сили вітру, в системі створюється потужний повітряний потік, що знижує теплові характеристики вентильованого фасаду, і може також спричинити руйнування утеплювача [2]. Це може бути викликано великою довжиною кронштейнів для кріплення підвісних елементів, а також недостатньою жорсткістю плит утеплювача.

Досліджень фасадів з непрозорим облицюванням відносно великої висоти (мін. 3 м) в спеціальній літературі описано мало. Більшість досліджень описують фасади меншого розміру або заклені фасади меншої висоти, здебільшого до 2 м, а також зі змінною шириною зазору. Наприклад, у [3] описано експерименти, проведені на заклених двохшарових фасадах для зазорів шириною 0,3, 0,6 та 0,9 м. У дослідженні [4] визначено усереднені за часом та локальні загальні коефіцієнти теплопередачі для сонячного випромінювання, що посилюють турбулентні змішані конвекційні потоки в прозорих вертикальних каналах.

Деякі дослідження також стосуються непрозорих фасадів, наприклад, [5], де описано фасад з вентильованим повітряним зазором 40 мм та висотою 2,75 м. У статті досліджуються теплові характеристики вентильованого фасаду за допомогою експериментальної та симуляційної моделі, хоча швидкість потоку повітря не досліджується.

Оцінювання впливу кліматичних та геометричних параметрів на аеродинамічні характеристики повітряної прошарку представлено у [6 – 8]. Ці параметри безпосередньо впливають на оцінювані аеродинамічні характеристики. Як правило, спочатку визначається область та конструктивний тип вентильованої фасадної системи з повітряною порожниною, а потім розробляється алгоритм його оцінки [9,10].

Протилежною проблемою є недостатня величина зазору, при цьому волога з утеплювача та стіни не видалятиметься, перезволожений утеплювач швидко руйнується, не виконуючи свою пряму функцію [2].

Основні причини для відмови від мембрани були повздовжня фільтрація в утеплювачі і можлива емісія волокон. Дослідження впливу руху повітря в прошарку на довговічність мінераловатного утеплювача за відсутності вітрозахисних мембран були проведені в [10].

З метою виключення проблем, пов'язаних з вентильованим зазором, необхідно врахувати вітрові навантаження, добові та сезонні перепади температур, а також геометричні та теплотехнічні параметри будівлі з урахуванням її розташування у просторі [2].

Мета роботи: дослідження впливу ширини повітряного прошарку між утеплювачем і мембраною навісного вентильованого фасаду на швидкість і тепловологісні характеристики повітря в таких прошарках.

Математична модель і результати числових досліджень

Для розроблення математичної моделі руху повітря за природної конвекції в вентильованому прошарку НВФ за основу було прийнято метод складання теплового балансу для елементарного шару повітря в прошарку.

Введено поправку в модель шляхом врахування прямої і розсіяної сонячної радіації, яка діє на облицювання фасаду (рис. 1). Рівняння теплового балансу для елементарного шару повітря в прошарку має вигляд:

$$\left(t_{bn(x)} - t_{bn(x+\Delta x)}\right) \cdot c_n \cdot \omega \cdot d \cdot \gamma_n + \frac{t_n - t_{bn}}{R_{0kon}} \cdot \Delta x - \frac{t_{bn} - t_n^y}{R_{0obl}} \cdot \Delta x = 0, \quad (1)$$

де $t_{bn(x)}$, $t_{bn(x+\Delta x)}$, t_{bn} – температури повітря у вентилязованому прошарку, відповідно на вході, на виході і середнє значення, °С; c_n – масова ізобарна теплоємність повітря, кДж/(кг·К); d – ширина вентилязованого прошарку, м; γ_n – густина повітря, кг/м³; ω – швидкість руху повітря в прошарку, м/с; t_n – температура повітря в приміщенні, °С; t_n^y – умовна температура зовнішнього повітря з врахуванням сонячної радіації, що попадає на стіну; R_{0kon} ; R_{0obl} – опори теплопередачі частин конструкції від внутрішнього повітря приміщення до повітряного прошарку і від повітряного прошарку до зовнішнього повітря відповідно, (м²·К)/Вт; Δx – товщина розрахункового шару у вентилязованому прошарку.

За умови $\Delta x \rightarrow 0$ перетворення рівняння (1) приводить до диференційного рівняння:

$$x_0 \frac{dt_{bn}}{dx} + t_{bn} = t_0. \quad (2)$$

Параметри рівняння (2) можна визначити так:

$$t_0 = \frac{t_b / R_{0kon} + t_n^y / R_{0obl}}{1/R_{0kon} + 1/R_{0obl}} = \frac{t_b \cdot K_{kon} + t_n^y \cdot K_{obl}}{K_{kon} + K_{obl}}, \quad (3)$$

$$x_0 = \frac{c_n \cdot \omega \cdot d \cdot \gamma_b}{K_{kon} + K_{obl}}, \quad (4)$$

де K_{kon} , K_{obl} – коефіцієнти теплопередачі від внутрішнього повітря приміщення до повітряного прошарку і від повітряного прошарку до зовнішнього повітря відповідно, Вт/(м²·К).

Параметр t_0 повинен бути чисельно рівний температурі повітря в прошарку за відсутності в ньому вентиляції. Умовна температура зовнішнього середовища з врахуванням сонячної радіації:

$$t_n^y = t_z + \frac{I_c \cdot \vartheta_c}{\alpha_z}, \quad (5)$$

де t_z – температура зовнішнього повітря, °С; α_z – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні огородження, Вт/(м²·К); ϑ_c – коефіцієнт поглинання сонячної радіації, частки; I_c = інтенсивність прямої і розсіяної сонячної радіації на поверхню заданої орієнтації, Вт/м².

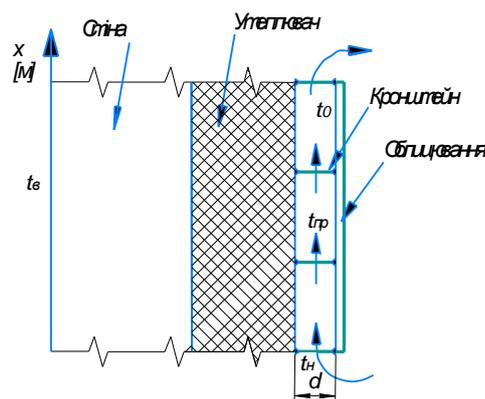


Рис. 1. До складання математичної моделі

Розв'язок рівняння (2) для початкових умов $t|_{x=0} = t_z$ має такий вигляд:

$$t_{bn}(x) = t_0 - (t_0 - t_z) \cdot e^{-x/x_0}, \quad (6)$$

Зміна температури повітря в прошарку по висоті, що описується (6), залежить від теплофізичних властивостей конструкції стіни та облицювання, геометричних розмірів прошарку та швидкості руху повітря в прошарку. Вигляд цієї залежності за різних значень швидкості представлений на рис. 2. Для розрахунків застосовано пакет Mathcad.

Рівняння (7) описує середню за висотою температуру повітря у прошарку:

$$t_{cp} = \frac{1}{L} \int_0^L t_{np}(x) \cdot dx = t_0 - (t_0 - t_z) \cdot \frac{x_0}{L} \cdot \left[1 - e^{-L/x_0} \right], \quad (7)$$

де L – висота фасаду, м.

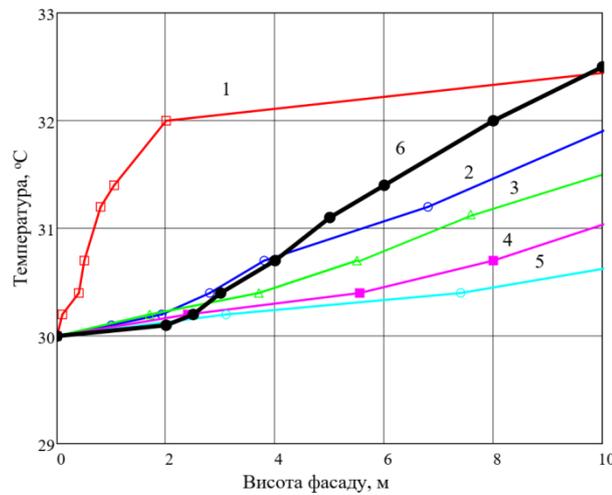


Рис. 2. Залежність температури повітря в прошарку від висоти фасаду за різних швидкостей повітря в ньому
1 – $\omega = 0,1$ м/с; 2 – $\omega = 0,5$ м/с; 3 – $1,0$ м/с; 4 – $1,5$ м/с; 5 – $2,0$ м/с;
6 – експериментальні результати для швидкості $0,4$ м/с [11]

Рівняння, яке зв'язує швидкість руху повітря і середню температуру повітря в прошарку:

$$\omega = \sqrt{\frac{0,08 \cdot L \cdot (t_{cp} - t_z)}{\sum_i \xi_i}}, \quad (8)$$

де $\sum_i \xi_i$ – сума місцевих аеродинамічних опорів.

Спільним вирішенням рівнянь (7) та (8) отримана формула для безпосереднього розрахунку швидкості руху повітря у прошарку. Таке рішення можливе, якщо знехтувати в правій частині (7) величиною e^{-L/x_0} , яка в практичних задачах є величиною досить малою (менше 0,1), і не суттєво впливає на кінцевий результат. Наближена формула для розрахунку швидкості руху повітря в повітряному прошарку має вигляд:

$$\omega = \sqrt{\frac{0,0016 \cdot (t_0 - t_z)^2 \cdot k_0^2}{\left(\sum_i \xi_i\right)^2} + \frac{0,08 \cdot L \cdot (t_0 - t_z) \cdot k_0}{\sum_i \xi_i} - \frac{0,04 \cdot (t_0 - t_z) \cdot k_0}{\sum_i \xi_i}}, \quad (9)$$

$$\text{де } k_0 = \frac{c_n \cdot d \cdot \gamma_n}{\frac{1}{R_{0kon}} + \frac{1}{R_{0obl}}}$$

Для точнішого розрахунку можна спільно вирішити рівняння (7) та (8) методом ітерацій значення t_{cp} за рівнянням (7) за довільно взятого значення швидкості ω , потім швидкості ω з отриманим значенням t_{cp} , потім знову розрахунок t_{cp} з отриманим значенням ω до отримання заданої точності.

Процес такого ітераційного розрахунку сходиться, оскільки величина t_{cp} зменшується за збільшення ω , а значення ω зростає за збільшення t_{cp} .

За такого розрахунку використовуються ряд рівнянь, що зв'язують теплофізичні та геометричні параметри НВФ, коефіцієнти теплообміну в прошарку, температури

зовнішнього та внутрішнього повітря та повітря у прошарку. Частина цих величин також змінюються у процесі розрахунку і потребують перерахунку. Такий розрахунок дозволяє провести аналіз повітряного режиму у прошарку. Цей аналіз можна використати у випадках, коли необхідно визначити мінімально можливі швидкості у прошарку, наприклад, під час прогнозування вологісного режиму НВФ.

Порівняння результатів розрахунків за наближеною формулою (9) та за ітераційною методикою для різних місяців року наведено на рис. 3.

Рівняння (7) і (8) дозволяють визначити максимально можливу швидкість руху повітря в прошарку, яка залежить від теплофізичних властивостей конструкції, температури повітря і сонячної радіації. З (8) випливає, що ω_{\max} буде досягнуте за максимального значення $(t_{cp} - t_z)$, яке визначається із (7).

$$t_{cp} - t_z = \left[1 - \frac{x_0}{L} \cdot \left(1 - e^{-\frac{L}{x_0}} \right) \right] \cdot (t_0 - t_z). \quad (10)$$

Максимальне значення Δt в рівнянні (10) досягається за $\frac{x_0}{L} \rightarrow 0$

$$(t_{cp} - t_z)_{\max} = \lim_{\frac{x_0}{L} \rightarrow 0} \left[1 - \frac{x_0}{L} \cdot \left(1 - e^{-\frac{L}{x_0}} \right) \right] \cdot (t_0 - t_z) = (t_0 - t_z). \quad (11)$$

Підставимо (11) і (3) в (8), отримаємо:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot L}{\sum_i \xi_i}} \cdot \sqrt{\frac{(t_n - t_z) \cdot K_{kon} + (t_n^y - t_z) \cdot K_{obl}}{K_{kon} + K_{obl}}}. \quad (12)$$

Врахуємо, що K_{obl} набагато більший від K_{kon} . Тоді:

$$\begin{aligned} \omega_{\max} &= \sqrt{\frac{0,08 \cdot L}{\sum_i \xi_i}} \cdot \sqrt{(t_n - t_z) \cdot \frac{K_{kon}}{K_{obl}} + (t_n^y - t_z)} = \\ &= \sqrt{\frac{0,08 \cdot L}{\sum_i \xi_i}} \cdot \sqrt{(t_n - t_z) \cdot \frac{K_{kon}}{K_{obl}} + \frac{\rho \cdot I}{\alpha_z}}. \end{aligned} \quad (13)$$

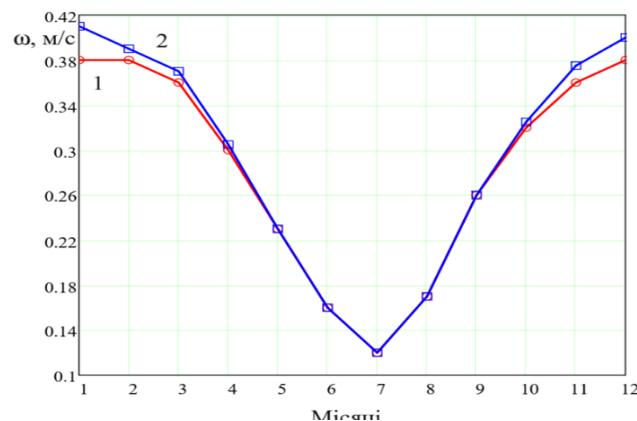


Рис. 3. Швидкість повітря в прошарку НВФ
1 – наближена формула; 2 – ітераційний розрахунок

Рівняння (13) дозволяє виявити вплив сонячної радіації на формування швидкості руху повітря у прошарку у теплий період року. У той же час, в опалювальний сезон, за невеликої інтенсивності сонячної радіації швидкість руху повітря визначається різницею температури

внутрішнього і зовнішнього повітря та співвідношення коефіцієнтів теплопередачі конструкції стіни з утеплювачем та облицювання НВФ. Приклад зміни швидкості руху повітря у прошарку НВФ протягом року наведено на рис. 4.

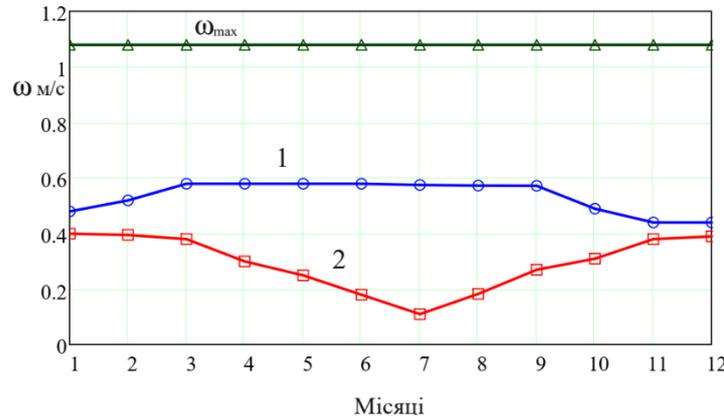


Рис. 4. Середньомісячна швидкість руху повітря в прошарку
1 – з врахуванням сонячної радіації; 2 – без врахування сонячної радіації

Максимальне значення швидкості руху повітря в прошарку спостерігатиметься за максимального значення різниці температур повітря і одночасного максимального за рік значення сонячної радіації.

На рис. 5, як приклад, наведено результати розрахунків швидкості руху повітря в прошарку за різної ширини прошарку.

Результати розрахунків швидкості руху повітря у прошарку НВФ порівнювалися з експериментальними даними різних дослідників [12, 13]. Результати збігаються за порядком величин. Більш повного збігу не можна очікувати через велику кількість випадкових факторів, що впливають на результати експерименту.

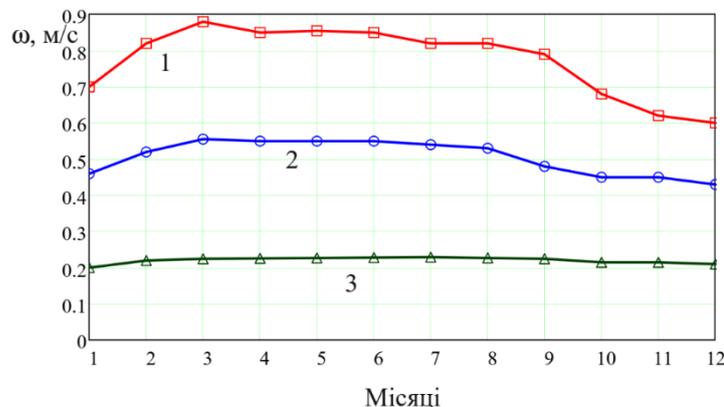


Рис. 5. Розрахунок середньомісячних швидкостей повітря в прошарку за різної її товщини
1 – $d = 0,01$ м; 2 – $d = 0,06$ м; 3 – $d = 0,1$ м

Висновки

Розробка швидких, надійних та точних інструментів для оцінки ефективності конструкцій двохшарових фасадів з природною вентиляцією є досить актуальним завданням в галузі будівельної фізики, теплотехніки та, загалом і цивільного будівництва. Однак природна конвекція повітря в прошарках двохшарових фасадів є однією з найбільш чутливих характеристик цього типу систем, для яких тепловий та масовий баланс системи передбачити досить важко.

Отримані за описаною методикою значення можна використовувати при оцінюванні можливого видування мінераловатного утеплювача з подальшим розрахунком зменшення його товщини та опору теплопередачі огорожувальної конструкції.

Розроблені методи розрахунку дозволяють аналізувати вплив конструктивних

особливостей НВФ на повітряний режим прошарку.

Важливо відзначити, що, за даними експериментальних досліджень, вплив вітру не викликає помітного підвищення швидкості руху повітря в прошарку порівняно з гравітаційним, що підтверджує правильність прийнятих вихідних положень.

Ці методи розрахунку повітряного режиму вентильованого прошарку НВФ дозволяють використовувати результати під час проєктування НВФ і оцінювання впливу руху повітря на утеплювачі, що застосовуються у НВФ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вентильований фасад. Технологія. URL: https://cut-facade.com.ua/?gad_source=1. (дата звернення 07.01.2026).
2. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний від 2022-09-01]. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 27 с. URL: https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2022/08/DBN-V_2_6-31-2021.pdf.
3. Zöllner A., Winter E. R. F., Viskanta R. Experimental studies of combined heat transfer in turbulent mixed convection fluid flows in double-skin-façades. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002. Volume 45, Issue 22. P. 4401–4408. URL: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00160-6).
4. Wind-induced responses of a tall building with a double-skin façade system / Hu Gang et al. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017. Volume 168. P. 91–100. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.05.008>.
5. Seferis P., Strachan P., Dimoudi A. Androutopoulos, Investigation of the performance of a ventilated wall. *Energy and Buildings*. 2011. Volume 43, Issue 9. P. 2167–2178. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.023>.
6. Tuğba İnan, Tahsin Başaran, Mehmet Akif Ezan. Experimental and numerical investigation of natural convection in a double skin façade. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Volume 106. P. 1225–1235. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.124>.
7. Experimental evaluation of ventilated walls with an external clay cladding / F. Stazi et al. *Renewable Energy*. 2011. Volume 36, Issue 12. P. 3373–3385. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.016>.
8. Assessment of Aerodynamic Properties of the Ventilated Cavity in Curtain Wall Systems Under Varying Climatic and Design Conditions / N. Zhangabay et al. *Buildings*. Volume 15, Issue 15. P. 2637. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings15152637>.
9. Abdou A., Budaiwi I. The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content. *Construction and Building Materials*. 2013. Volume 43. P. 533–544. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.058>.
10. Nagy B., Karoly Simon T., Nemes R. Effect of built-in mineral wool insulations durability on its thermal and mechanical performance. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Volume 139. P. 169–181. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-019-08384-5> (дата звернення 09.01.2026).
11. Heat Flow through a Facade with a Controlled Ventilated Gap / A. Rubina et al. *Buildings*. 2023. Volume 13 (3). P. 817. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13030817>.
12. Пушкарьова К. К. Сучасні українські будівельні матеріали, виробы та конструкції. Київ: Асоціація «ВСВБМВ», 2012. 664 с.
13. Замкове з'єднання профілів : пат. 39568 Україна : МПК E04F 13/00. № u200814597 ; заявл. 18.12.2008 ; опубл. 25.02.2009, Бюл. № 4/2009.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2026.

Стаття пройшла рецензування 19.02.2026.

Співак Олександр Юрійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: spivak@vntu.edu.ua.

Ободянська Ольга Ігорівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інженерних систем у будівництві, e-mail: olha.obodyanska@i.ua.

Вінницький національний технічний університет.