

## **ВПЛИВ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ТЕПЛОВУ ІНЕРТНІСТЬ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЛІ**

### **INFLUENCE OF BUILDING MATERIALS ON THE THERMAL INERTIA OF BUILDING CONSTRUCTION**

**Горюн О. Ю.,** аспірантка, ORCID 0000-0002-3624-2293 (Вінницький національний технічний університет, Вінниця)

**Horiun O.,** PhD student, ORCID 0000-0002-3624-2293 (Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia)

У даній роботі розглядаються різні будівельні матеріали з точки зору їх інерційних властивостей. Особливу увагу приділено використанню теплоізоляційних і конструкційних матеріалів у стінах будівель. Метою даної роботи є порівняльний аналіз теплоізоляційних і стінових будівельних матеріалів для виявлення їхнього впливу на теплову інертність огорожувальних конструкцій. Отримані дані свідчать про те, що теплова інертність конструкції визначається фізичними властивостями стінових матеріалів. Для забезпечення комфортного мікроклімату у приміщеннях доцільно використовувати стінові матеріали з високою тепловою інертністю. Отримані результати можуть слугувати основою для проведення моделювання впливу теплової інертності на енергоефективність будівлі.

One of the important, but insufficiently studied factors affecting energy efficiency is the thermal inertia of building envelopes. Recent studies confirm the key role of thermal inertia in increasing the energy efficiency of buildings, especially in a changing climate and increasing demands for sustainable construction. This paper examines various building materials from the point of view of their inertial properties. Insufficient consideration of thermal inertia can lead to inefficient use of passive heating or cooling, and energy overconsumption by heating, ventilation and air conditioning systems. Particular attention is paid to the use of thermal insulation and structural materials in building walls. The purpose of this paper is to conduct a comparative analysis of thermal insulation and wall building materials to identify their impact on the thermal inertia of building envelopes. To analyze the thermophysical characteristics of the main thermal insulation and structural materials used in building envelopes. The obtained data allow us to state that the thermal inertia of the structure is largely determined by the physical properties of the structural layer (wall materials), primarily its

density and specific heat capacity. To ensure a comfortable microclimate in the premises, it is advisable to use wall materials with high thermal inertia. The obtained results can serve as the basis for modeling temperature changes in walls with different material options for a more accurate assessment of their real energy efficiency.

**Ключові слова:** теплова інертність, теплова інерція, енергозбереження, енергоефективність будівлі, теплова ізоляція, аерогель, теплоємність.

**Вступ.** У відповідності сучасним підвищеним вимогам до енергоефективності будівель особливого значення набуває здатність огорожувальних конструкцій забезпечувати стабільний мікроклімат при мінімальних витратах енергії. Одним із ключових факторів, що впливає на теплову стабільність приміщень, є теплова інертність будівельних матеріалів і конструкцій, яка визначає здатність будівлі акумулювати тепло, вирівнювати коливання температури повітря всередині приміщень протягом доби, зменшувати пікові навантаження на системи опалення та кондиціонування. Це особливо важливо в умовах перехідного періоду, добових температурних коливань, а також для будівель із перервним режимом експлуатації. Сьогодні більшість методів оцінки енергоефективності зосереджені переважно на коефіцієнтах теплопередачі, нехтуючи динамічними характеристиками огорожувальних конструкцій. Проте вплив теплової інертності може бути вирішальним у забезпеченні комфорту та зменшенні енерговитрат. Таким чином, дослідження теплової інертності як інтегральної характеристики конструкцій будівлі є актуальним завданням, що дозволяє оптимізувати конструктивні рішення з урахуванням не лише теплотехнічних, а й акумулюючих властивостей матеріалів. У даному дослідженні розглядаються різні будівельні матеріали з точки зору їх інерційних властивостей. Особливу увагу приділено поєднанню теплоізоляційних і конструкційних шарів у стінах будівель. Аналіз проводиться на основі довідкових даних та розрахункових показників, без використання чисельного моделювання.

**Аналіз останніх досліджень.** Останні дослідження підтверджують ключову роль теплової інертності в підвищенні енергоефективності будівель, особливо в умовах змінного клімату та зростаючих вимог до сталого будівництва.

Дослідження, проведене в Університеті Флориди[1], аналізує взаємодію теплової маси бетонних стін і теплової ізоляції в офісних будівлях. Результати показали, що в холодному кліматі поєднання теплоізоляції з тепловою масою значно знижує енергоспоживання, тоді як у спекотному кліматі даний ефект менш виражений.

У роботах [2-7] досліджували вплив матеріалів зі зміною фази на енергоефективність будівель. Автори роботи [2] провели моделювання енергоспоживання житлової будівлі для вивчення ефекту використання

матеріалів зі зміною фази (PCM) для покращення теплової інерції будівель у жарких і сухих регіонах. Використання матеріалів з високою теплоємністю, таких як будівельна цегла з пошарово інтегрованими PCM-матеріалами, може значно зменшити тепловий потік через цеглу. Покращена конфігурація цегли зі спеціальними включеннями PCM зменшила загальний тепловий потік до 71,53% протягом періоду моделювання порівняно з цеглою без PCM.

Результати моделювання енергопотребити житлової будівлі у м. Константіна, яке проводили за допомогою програмного забезпечення TRNSYS 16 свідчать про те, що поєднання глиняної цегли та зовнішньої ізоляції дозволяє максимально використовувати теплову інертність зовнішніх стін. Згідно [8] дане рішення призводить до заощадження значної кількості енергії, а саме 2355 кВт/год/рік, що відповідає 35% економії енергії.

**Постановка мети і задач досліджень.** У сучасному будівництві дедалі більше уваги приділяється енергоефективності будівель, зокрема шляхам зниження тепловтрат, підвищення теплового комфорту та зменшення енергоспоживання. Одним із важливих, але недостатньо досліджених факторів, що впливають на енергоефективність, є теплова інертність огорожувальних конструкцій. Попри наявність загальних уявлень про здатність матеріалів акумулювати тепло, в ході проєктування будівель переважно зосереджуються на показниках теплопровідності та опору теплопередачі, ігноруючи динамічні теплові процеси. Недостатній облік теплової інертності може призводити до неефективного використання пасивного нагрівання або охолодження, перевитрати енергії системами опалення, вентиляції та кондиціонування, а також зниження комфорту мешканців.

Метою даної роботи є порівняльний аналіз теплоізоляційних і стінових будівельних матеріалів з метою виявлення їхнього впливу на теплову інертність огорожувальних конструкцій і формування рекомендацій щодо вибору матеріалів, які дозволяють ефективно використовувати теплову інертність для зниження енерговитрат і забезпечення теплового комфорту. Проаналізувати теплофізичні характеристики основних теплоізоляційних і конструкційних матеріалів, що застосовуються в огорожувальних конструкціях. Для досягнення поставленої мети потрібно розрахувати інерційні показники для різних будівельних матеріалів; порівняти інерційні властивості одношарових і багатошарових конструкцій; виявити залежність між інерційними характеристиками матеріалів і потенційною стабільністю мікроклімату в приміщенні; сформулювати рекомендації щодо вибору матеріалів з урахуванням їхньої теплової інертності для забезпечення енергоефективності будівлі.

**Методика досліджень.** У даній роботі було застосовано аналітичні та розрахункові методи дослідження, які враховують теплофізичні властивості матеріалів та умови експлуатації. Огляд літератури, пов'язаний із вивченням наукових публікацій, державних будівельних норм та міжнародних стандартів

дозволив проаналізувати сучасні підходи до визначення теплової інертності та її впливу на мікроклімат і енергоспоживання будівель, а також виділити методи розрахунку, що базуються на класичних формулах теплопередачі та використовуються для визначення основних параметрів теплової інертності.

За показник теплової інерції було обрано коефіцієнт теплової інерції  $I$ , який розраховувався за формулою:

$$I = \sqrt{\lambda \rho c}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

$\rho$  – щільність матеріалу;

$c$  – питома теплоємність матеріалу.

На етапі визначення інерційних характеристик матеріалів та конструкцій було розраховано показники теплової інертності для типових огорожувальних конструкцій на основі фізичних властивостей матеріалів: густини, питомої теплоємності та теплопровідності.

**Результати досліджень.** В контексті дослідження впливу теплової інерції на енергоефективність будівлі, було встановлено вплив фізико-механічних властивостей теплоізоляційних матеріалів на теплову інертність огорожувальних конструкцій. Для цього проаналізовано декілька поширених теплоізоляційних матеріалів, а також інноваційний матеріал — аерогель. Порівняння проводилось за трьома основними параметрами: щільність, питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності. Дані властивостей матеріалів було прийнято згідно [9-13]. На основі цих показників розраховано умовний інерційний показник-коефіцієнт теплової інерції. Результати виконаних розрахунків для теплоізоляційних матеріалів наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Фізичні характеристики теплоізоляційних матеріалів та їх інерційні показники

| Матеріал                | Щільність,<br>кг/м <sup>3</sup> | Тепло-<br>ємність,<br>Дж/кг·К | Теплопро-<br>відність,<br>Вт/м·К | Коеф. теплової<br>інерції,<br>Дж·м <sup>-2</sup> ·К <sup>-1</sup> ·с <sup>-1/2</sup> |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Мінеральна<br>вата      | 80                              | 840                           | 0,040                            | 2688                                                                                 |
| Пінополістирол<br>(EPS) | 25                              | 1450                          | 0,035                            | 1268                                                                                 |
| Пінополіуретан          | 35                              | 1400                          | 0,028                            | 1372                                                                                 |
| Аерогель<br>сілікатний  | 30                              | 1000                          | 0,015                            | 450                                                                                  |

Найнижчий інерційний показник спостерігається у аерогелю та пінополіуретану, попри відмінні теплоізоляційні властивості. Найвище значення спостерігається у мінеральній ваті, що свідчить про її вищу акумулюючу здатність.

Крім того, було проведено порівняння основних фізичних характеристик та інерційних показників для деяких типових стінових будівельних матеріалів, результати яких наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Фізичні характеристики стінових будівельних матеріалів та їх інерційні показники

| Матеріал            | Щільність,<br>кг/м <sup>3</sup> | Тепло-<br>ємність,<br>Дж/кг·К | Теплопро-<br>відність,<br>Вт/м·К | Коеф. теплової<br>інерції,<br>кДж·м <sup>-2</sup> ·К <sup>-1</sup> ·с <sup>-1/2</sup> |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Газобетон<br>D400   | 400                             | 840                           | 0,13                             | 43,680                                                                                |
| Керамічна<br>цегла  | 1800                            | 880                           | 0,81                             | 1 283,040                                                                             |
| Силікатна<br>цегла  | 1800                            | 880                           | 0,87                             | 1 378,080                                                                             |
| Монолітний<br>бетон | 2400                            | 840                           | 1,86                             | 3 749,760                                                                             |

Газобетон має найнижчий інерційний показник. Це легкий матеріал, із низькою теплопровідністю, однак, не може акумулювати значну кількість тепла. Силікатна та керамічна цегла — найбільш збалансований варіант між значеннями теплоізоляції та інерційністю. Монолітний бетон має найвищу інерційність, але з високими тепловтратами без утеплення.

Теплова інертність матеріалу є важливою, якщо він виконує огорожувальну або акумулюючу функцію, наприклад у внутрішніх масивних стінах. Порівнюючи коефіцієнт теплової інерції різних матеріалів (рис. 1), (рис. 2) можна дійти висновку, що теплова інертність не завжди відповідає теплопровідності конструкцій.

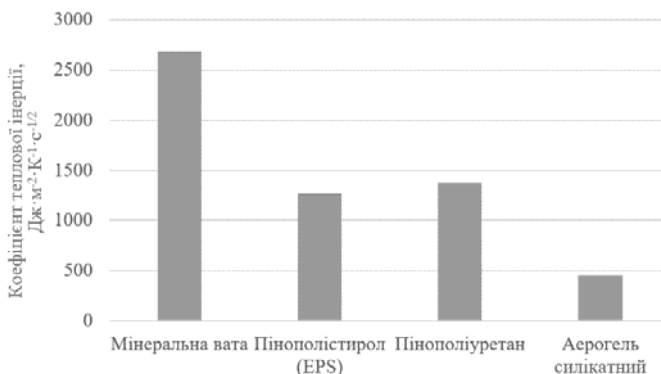


Рис.1. Порівняння теплової інерції теплоізоляційних матеріалів

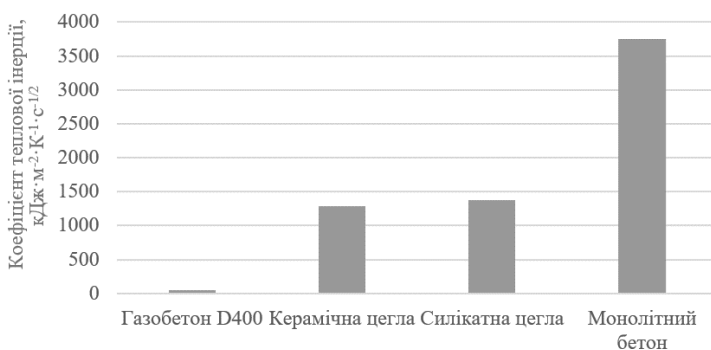


Рис.2. Порівняння теплової інерції стінових будівельних матеріалів

З огляду на це для зовнішньої теплової ізоляції будівлі необхідно обирати найбільш оптимальний варіант комбінації матеріалів, що дозволить підвищити енергоефективність конструкції.

**Висновки та рекомендації.** У результаті проведеного аналізу впливу теплофізичних характеристик матеріалів на теплову інертність огорожувальних конструкцій було розраховано коефіцієнти інерції різних матеріалів. Отримані дані дозволяють стверджувати, що теплова інертність конструкції значною мірою визначається фізичними властивостями конструкційного шару (стінових матеріалів), насамперед його щільністю та питомою теплоємністю. Саме ці параметри зумовлюють здатність матеріалу акумулювати тепло та підтримувати стабільний мікроклімат. Теплоізоляційні матеріали, попри низьку теплопровідність, здебільшого мають низьку теплову інертність через свою малу густину та теплоємність. Зокрема, такі матеріали, як аерогель чи пінополістирол, мають відмінні теплоізоляційні властивості, але не здатні ефективно акумулювати тепло.

Комбінування матеріалів у багатошаровій конструкції (наприклад, газобетон та утеплювач) дозволяє досягти балансу між теплоізоляцією та тепловою інерцією. При правильному підборі шарів конструкція може одночасно обмежувати тепловтрати і забезпечувати повільну зміну температури в приміщенні.

Для забезпечення комфортного мікроклімату у приміщеннях доцільно використовувати конструкційні стінові матеріали з високою тепловою інертністю, особливо у будівлях, які експлуатуються в умовах змінних температур (наприклад, сезонного використання, нічного охолодження тощо).

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на динамічному моделюванні температурних змін у стінах з різними варіантами матеріалів для більш точної оцінки їх реальної енергоефективності.

1. Sharston, R., Murray S. The combined effects of thermal mass and insulation on energy performance in concrete office buildings. *Advances in Building Energy Research*. 2019. vol. 14. № 3. pp. 322–337. DOI: <https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1547220>.
2. Necib H. Enhancing Building Thermal Inertia: Impact of Surface-to-Volume Ratio on Multi-Layered PCM-Integrated Brick Walls. *Annals of West University of Timisoara - Physics*. 2024. vol. 66, № 1. pp. 172–190. DOI: <https://doi.org/10.2478/awutp-2024-0011>
3. Zhan H., Mahyuddin N., Sulaiman R., Khayatian F. Phase change material (PCM) integrations into buildings in hot climates with simulation access for energy performance and 189 thermal comfort: a review. *Construction and Building Materials*. 2023. vol. 397, pp. 132–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132312>.
4. Necib H., Nouredine S., Nadia S., Djamila D. Experimental and numerical study of a usual brick filled with PCM to improve the thermal inertia of buildings. *Energy Procedia*. 2013. vol. 36. pp. 766–775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.089>.
5. Rehman A. U., Sheikh S. R., Kausar Z., Grimes M., McCormack S. J. Experimental Thermal Response Study of Multilayered, Encapsulated, PCM-Integrated Building Construction Materials. *Energies*. 2022. vol. 15. № 17. pp. 6356. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176356>.
6. Zhu N., Hu N., Hu P., Lei F., Li S. Experiment study on thermal performance of building integrated with double layers shape-stabilized phase change material wallboard. *Energy*. 2019. vol. 167. pp. 1164–1180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.042>.
7. Mukram T. A., Daniel J. Performance evaluation of a novel cement brick filled with micro-PCM used as a thermal energy storage system in building walls. *Journal of Energy Storage*. 2024. vol. 77. p. 109910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109910>.
8. Ahmarl I., Korichi A., Gasmi F., Krada S. E. Simulation of the impact of thermal inertia on the energy consumption of a residential building in a Mediterranean climate. *Revue Nature Et Technologie*. 2022. vol. 11. № 02. Pp. 12–27. URL: <https://journals.univ-chlef.dz/index.php/natec/article/view/97>.
9. Lamy-Mendes A., Dora A., Pontinha R., Alves P., Santos P. Progress in silica aerogel-containing materials for buildings' thermal insulation. *Construction and Building Materials*. 2021. vol. 286. p. 122815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122815>.
10. Протокол випробувань плит мінераловатних теплоізоляційних марки “Izovat Fasad” № 07-19/20. / Супрун Л.О. (Україна). № 20.19; заявл. 04.02.2019; опубл. 25.02.2019.  
Test report of mineral wool thermal insulation boards of the “Izovat Fasad” brand No. 07-19/20. / Suprun L.O. (Ukraine). No. 20.19; filed on 04.02.2019; published on 25.02.2019.
11. Протокол випробувань плит піно полістирольних екструзійних марки “Carbon Prof” № 205-25-17K. / Алексенко Л.Л. (Україна). № 78-18; заявл. 26.06.2018; опубл. 18.10.2018.  
Test report of extruded polystyrene foam boards of the “Carbon Prof” brand No. 205-25-17K. / Aleksenko L.L. (Ukraine). No. 78-18; filed on 26.06.2018; published on 18.10.2018.
12. Протокол випробувань пінополіуретанової теплоізоляції марки “Izopianol” № LZFO0-00703/16/ZOONZF. / Pietruzka B. (Польща). заявл. 23.05.2016; опубл. 14.07.2016.  
Test report of polyurethane foam thermal insulation of the “Izopianol” brand No. LZFO0-00703/16/ZOONZF. / Pietruzka B. (Poland). filed on 23.05.2016; publ. 07/14/2016.
13. Ратушняк Г.С., Горюн О. Ю. Використання теплоізоляційних матеріалів на основі аерогелю для зменшення тепловтрат будівель: тези доп. Міжнар. наук.-техн. Конф. (м. Вінниця, 13-15 листопада 2018 р.). Вінниця, 2018. С. 320-321.  
Ratushnyak G.S., Horiun O. Y. The use of thermal insulation materials based on aerogel to reduce heat loss in buildings: abstracts of the additional International Scientific and Technical Conference (Vinnytsia, November 13-15, 2018). Vinnytsia, 2018. P. 320-321.