

Л. О. Левченко¹, Н. М. Аушева¹, Т. М. Ткаченко²

¹ Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

² Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ НА ПОВЕРХНЯХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Анотація. На основі співвідношень теплопереносу встановлено найбільш прийнятні функції для визначення теплоізоляційних властивостей матеріалів і конструкцій. З використанням пакету Comsol розроблено моделі змін температури зовнішньої поверхні захисного матеріалу в залежності від часу переносу тепла. Встановлено, що на початковій стадії теплопереносу температура зовнішньої поверхні змінюється немонотонно. Тому при проєктуванні захисної конструкції слід приділяти увагу шарам матеріалу, який безпосередньо контактує з захисним шаром. Показано, що застосування у якості термоізолюючого матеріалу склотканини забезпечує практично однаковий рівень захисту людини при мінімальних (120 Вт) і максимально допустимих (400 Вт) фізичних навантаженнях. Отримано тривимірну модель, яка візуалізує залежність температури від часу теплопередачі по глибині. Це дозволяє раціоналізувати не тільки товщину захисного матеріалу, а й обрати найбільш прийнятні матеріали з точки зору їх термофізичних властивостей. Швидке отримання графічного матеріалу дозволяє методом перебору визначити найбільш прийнятні матеріали і конструкції у залежності від умов зовнішнього середовища та призначення засобу захисту.

Ключові слова: моделювання, термоізоляція, інфрачервоне випромінювання.

Вступ

Проєктування теплоізоляційних покриттів є однією з актуальних задач, вирішення яких спрямовано на підвищення енергоефективності будівель, зниження втрат у системах транспортування теплоносіїв тощо. Одним з аспектів цієї проблематики є створення спеціального одягу для захисту від впливу низьких та високих температур та розроблення інфрачервоного камуфляжу. Розроблення одягу є найбільш складною задачею. Це обумовлено необхідністю не тільки забезпечення високої ефективності, а й ергономічності конструкції для зручності використання – гнучкості, малої ваги, товщини тощо. Для обрання оптимальної конструкції необхідно виконати великі обсяги експериментальних робіт, що потребує створення відповідних умов, передбачених стандартом ДСТУ EN ISO 15831:2007. Такі роботи дуже витратні й потребують значного часу на їх реалізацію. Тому на першому етапі проєктування доцільно здійснити моделювання поширення теплового потоку крізь захисні шари й визначити зміни температури на зовнішній поверхні захисної конструкції. Це спростить процес вибору матеріалів для конструювання захисного одягу, його товщину та часові межі ефективності захисної конструкції. Передумовою такого моделювання є наявність коректних математичних функцій, які відповідають поставленій задачі й ефективно описують процеси теплопередачі крізь шарувату структуру.

Сучасний стан питання. Вимоги до захисного одягу регламентуються національними стандартами України, ідентичними загальноєвропейським [1, 2], тому усі проєктні роботи повинні відповідати їх вимогам. Але більшість розробок у цій галузі стосуються захисту від високих температур [3, 4]. Такі покриття мають великі коефіцієнти відбиття зовнішнього інфрачервоного випромінювання. Але їх застосування для запобігання витоку тепла неприйнятне через можливість порушення теплового балансу

людини. Розрахункове прогнозування захисних матеріалів на основі композитів складне [5, 6]. Це пояснюється тим, що термофізичні властивості таких матеріалів не є довідковими величинами, а вони обов'язково закладаються у розрахунки та відповідні моделі. Тому для прогнозування ефективності конструкцій, виготовлених з цих матеріалів, необхідне проведення комплексу експериментальних досліджень. При цьому незначна зміна складу композиту може критично змінювати його потрібні властивості. У роботах [7, 8] досліджено ефективність блокування інфрачервоних випромінювань стандартними матеріалами (скловолокна, нітрид бору, окис хрому) й показано їх прийнятні властивості щодо запобігання витоку тепла нагрітого об'єкта. Застосування таких матеріалів спрощує розроблення моделей для прогнозування захисних властивостей конструкцій. У роботі [9] запропоновано обґрунтування застосування скловолокна для розсіювання інфрачервоного випромінювання. Наведені дані переконливі й цей матеріал можна розглядати як базовий для проєктування засобів захисту. Задача полягає у визначенні залежностей температури зовнішніх поверхонь захисних матеріалів від часу теплопередачі та товщини захисного шару.

Мета роботи – розробити практично значущі моделі змін температури зовнішньої поверхні захисного матеріалу у залежності від часу переносу тепла, товщини матеріалу за різних енергетичних характеристик джерела тепла.

Виклад основного матеріалу

У загальному випадку усі процеси теплопереносу описуються рівнянням Фур'є-Кірхгофа. Варіанти його застосування залежать від того, який механізм теплопереносу є переважний у конкретному процесі – теплопровідність, конвекція, променевий теплообмін.

Конвекція, променевий теплообмін. За безпосереднього контакту захисного матеріалу з джерелом тепла процес теплопередачі описується рівнянням:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

де T – температура; t – час; λ – коефіцієнт теплопровідності у напрямку x .

Моделювання процесу теплопереносу здійснювалося для джерела тепла, яким є людина. Параметри джерела вважалися такими, що відповідають двом фізичним навантаженням людини – 120 Вт і 400 Вт (мінімальне та максимально допустиме), регламентованих стандартом ДСТУ EN ISO 15831:2007 [10].

Визначалася температура зовнішнього шару захисного матеріалу. Значення конвективного теплоо-

бміну поверхні приймалося у 2 Вт/м²·К, що відповідає майже повній відсутності руху повітря.

Моделювання здійснювалося за різницевою схемою із використанням пакету Comsol. На рис. 1 наведено зміни температури зовнішньої поверхні захисного матеріалу упродовж двох годин. Як видно з рис. 1 температура поверхні монотонно знижується до стану термодинамічної рівноваги з оточуючим середовищем. При цьому на початковій стадії (до 0,2 год.) матеріал частково нагрівається. Для більш детального визначення змін температури, що обумовлено переносом тепла у внутрішніх шарах захисної конструкції, цей часовий інтервал розглянуто на рис. 2.

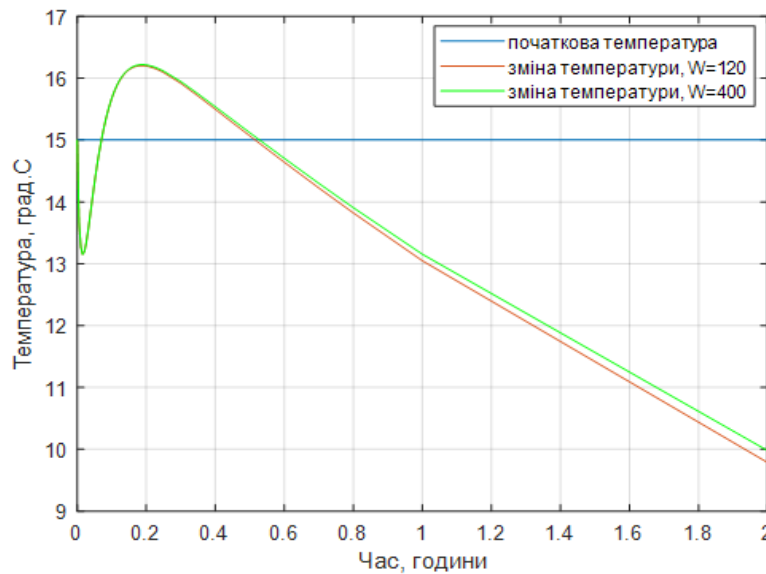


Рис. 1. Зміна температури зовнішньої поверхні захисного шару упродовж двох годин за різних потоків теплової енергії

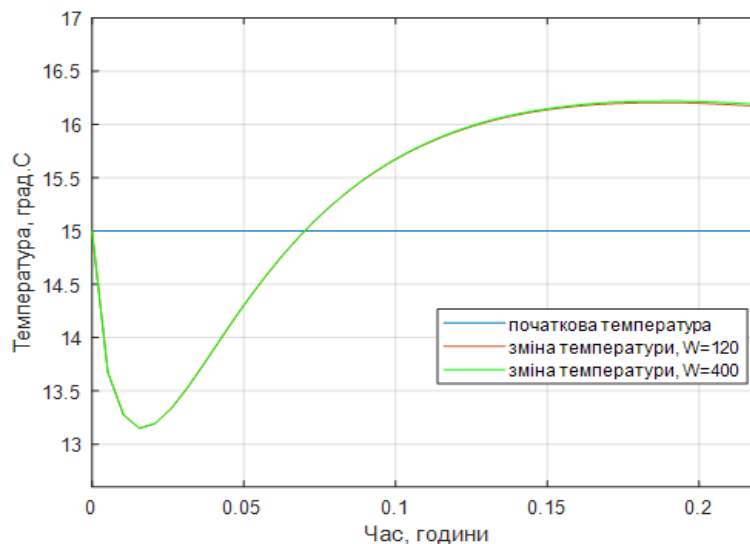


Рис. 2. Зміна температури зовнішньої поверхні захисного шару упродовж 0,2 години

Наведений результат доцільно використовувати у процесі визначення матеріалів для виготовлення внутрішніх шарів захисної конструкції.

Отриманий результат свідчить, що для обраного захисного матеріалу на основі скловолокна ступінь

термоізоляції практично не залежить від тепловиділення джерела. Слід враховувати, що у будь-якому випадку існує градієнт температури у товщі захисного матеріалу або кількох шарів, наприклад, одягу та захисного шару.

Зміни температури захисної конструкції у просторі і часі наведено на рис. 3.

Наведений графічний матеріал дозволяє оцінити термоізоляційні властивості як одношарового, так і кількшарового матеріалу у залежності від часових і просторових параметрів.

У дану модель закладено коефіцієнти теплопровідності, питомої теплоємності та товщини стандартних текстильних матеріалів та склотканини.

У реальних умовах експлуатації захисних конструкцій як призначення, так і параметри зовнішнього середовища можуть суттєво відрізнятися. Тому у розрахункові співвідношення вносяться інші параметри. Швидке отримання графічного матеріалу у залежності від закладених параметрів дозволяє отримати бажаний результат методом перебору. Це значно спрощує процес проєктування захисної конструкції й пришвидшує його реалізацію.

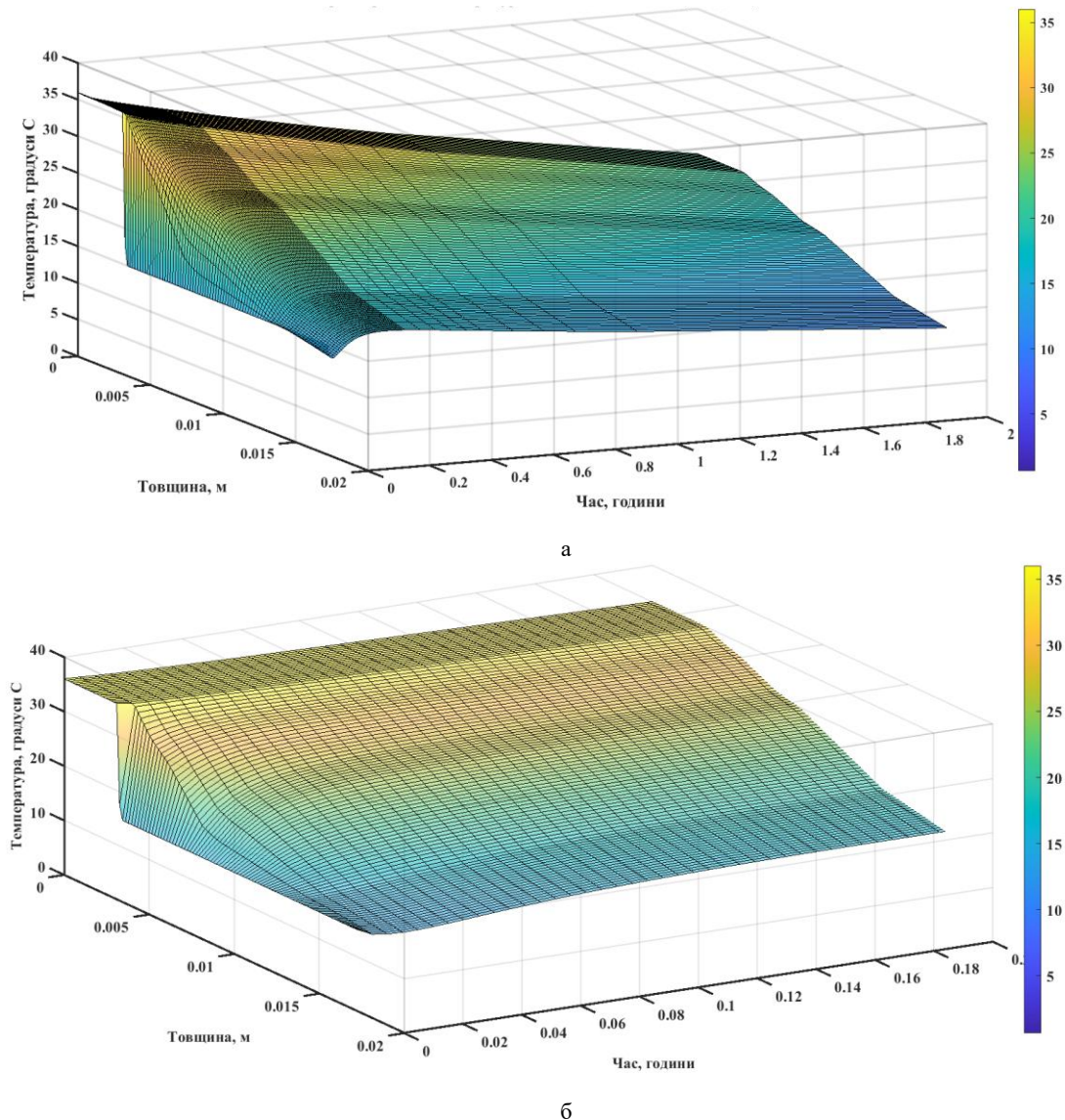


Рис. 3. Зміна температури по товщині захисної конструкції упродовж часових інтервалів: а – упродовж двох годин; б – упродовж 0,2 годин.

Висновки

1. На основі співвідношень теплопередачі крізь суцільну та шарувату структуру розроблено модель зміни температури зовнішньої поверхні термоізоляційної конструкції. Джерелом теплової енергії слугувало тіло людини за мінімального (120 Вт) та максимально допустимого (400 Вт) фізичного навантаження згідно міжнародним нормативам.

2. Проведено моделювання зміни температури зовнішньої поверхні захисного шару упродовж 2,0 та 0,2 годин. Встановлено складну залежність темпе-

ратури на початкових стадіях переносу тепла. Це необхідно враховувати при виборі матеріалів для внутрішніх шарів, які безпосередньо контактують із захисним шаром.

3. Отримано модель залежності температури від часу передачі тепла й глибини шару захисного матеріалу. Це дозволяє у процесі проєктування захисної конструкції отримати бажаний результат закладаючи у розрахункову схему термофізичні параметри різних матеріалів. Швидкий обрахунок різних варіантів дозволить обрати найбільш прийнятний варіант методом перебору.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ EN 342:2017 (EN 342:2004; AC:2008, IDT). Одяг захисний. Комплекти та предмети одягу для захисту від холоду. (прийнятий методом перекладу, ідентичний до EN 342:2004 (версія en) «Protective clothing – Ensembles and garments for protection against cold» зі зміною AC:2008 (версія en).
2. ДСТУ EN 14058:2019 (EN 14058:2017). Одяг захисний. Предмети одягу для захисту від холодного навколишнього середовища. [Чинний від 2019-11-19] Вид. офіц. Київ, 2019.
3. Peng, L., Jiang, S., Guo, R. et al. IR protection property and color performance of TiO₂/Cu/TiO₂ coated polyester fabrics. *J Mater Sci: Mater Electron* 29, 16188–16198 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9708-6>.
4. Jiang, S., Miao, D., Xu, J. et al. Preparation and characterization of shielding textiles to prevent infrared penetration with Ag thin films. *J Mater Sci: Mater Electron* 28, 3542–3547 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5955-6>.
5. Marco Caniato, Arianna Marzi, Sandra Monteiro da Silva, Andrea Gasparella. A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction. *Journal of Building Engineering*. Volume 43, 2021, 103066, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103066>.
6. Azim Rasulovich Abdullaev, ., Xayotbek Mansurjon O'g'li Rafiqov, ., & Isroiljonova Nizomjon Qizi Zulxumor, . (2021). A Review On: Analysis Of The Properties Of Thermal Insulation Materials. *The American Journal of Interdisciplinary Innovations and Research*, 3(05), 27–38. <https://doi.org/10.37547/tajir/Volume03Issue05-06>.
7. Glyva, V., Krasnianskyi, G., Dovhanovskyi, M., & Krasnianskyi, T. (2024). Розроблення і дослідження захисних властивостей матеріалів для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 3(77), 203-205. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.203>.
8. Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskyi, S., Biruk, Y., Dovhanovskyi, M., Zozulya, S., Klymchuk, A., Nikolaiev, K., & Osadchyi, D. (2024). Applying heterogeneous building materials for the protection of people against electromagnetic radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (131)), 45–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313629>.
9. G. Krasnianskyi, I. Aznauryan, M. Dovhanovskyi, O. Besarab, V. Okhrysko. Evaluation of the effectiveness of infrared radiation shielding with glass fiber. *REPORTS of the 5th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY*, November 27-29, 2024, KYIV, p. 102.
10. ДСТУ EN ISO 15831:2007. Одяг захисний. Фізіологічне оцінювання вимірюванням теплоізоляції на тепловому манекені. (прийнятий методом перекладу, ідентичний EN ISO 15831:2004 Clothing — Physiological effects — Measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin. Набув чинності з 2009-01-01 наказом Держспоживстандарту України від 6 липня 2007 р. № 147).

Received (Надійшла) 25.03.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.06.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Левченко Лариса Олексіївна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського, Київ, Україна;
Larysa Levchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department Digital Technologies in Energy, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
 e-mail: larlevch@ukr.net; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-7227-9472>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194577942>.

Аушева Наталія Миколаївна – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського, Київ, Україна;
Nataliia Ausheva – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department Digital Technologies in Energy, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
 e-mail: nataausheva@gmail.com; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0003-0816-2971>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57210707106>.

Ткаченко Тетяна Миколаївна – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури;
Tetiana Tkachenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety, Kyiv National University of Construction and Architecture,
 e-mail: tkachenkoknuba@gmail.com; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0003-2105-5951>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203135001>.

Modeling temperature changes on the surfaces of thermal insulation coatings

Larysa Levchenko, Nataliia Ausheva, Tetiana Tkachenko

Abstract. Based on the heat transfer ratios, the most acceptable functions for determining the thermal insulation properties of materials and structures were established. Using the Comsol package, models of changes in the temperature of the outer surface of the protective material depending on the heat transfer time were developed. It was established that at the initial stage of heat transfer, the temperature of the outer surface changes non-monotonically. Therefore, when designing a protective structure, attention should be paid to the layers of material that are in direct contact with the protective layer. It is shown that the use of fiberglass as a thermal insulation material provides almost the same level of human protection at minimum (120 W) and maximum permissible (400 W) physical loads. A three-dimensional model was obtained that visualizes the dependence of temperature on the time of heat transfer in depth. This allows us to rationalize not only the thickness of the protective material, but also to select the most acceptable materials in terms of their thermophysical properties. Rapid receipt of graphic material allows us to determine the most acceptable materials and structures by the method of brute force, depending on the environmental conditions and the purpose of the protective device.

Keywords: modeling, thermal insulation, infrared radiation.