

УДК 697:004.942

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.129.1169

МОДЕЛЮВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ДИНАМІЧНОГО КАЛОРИМЕТРА

СОЛОД Л. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
ТКАЧОВА В. В.², канд. техн. наук, доц.,
ПРОКОФ'ЄВА Г. Я.³, канд. техн. наук, доц.,
БЕРЕЗЮК Г. Г.⁴, ст. викл.

^{1*} Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 681-12-02, e-mail: solod.leontina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

² Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-92, e-mail: tkachova.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

³ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-92, e-mail: chornomorets.halyna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

⁴ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-92, e-mail: bereziuk.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

Анотація. Постановка проблеми. Пошук енергоефективних рішень є актуальною задачею сучасного етапу розвитку будівництва та цивільної інженерії. Одним з важливих параметрів, які необхідно знати є теплопровідність виробів і матеріалів. Цей параметр залежить від температури та інших чинників, що зумовлює потребу у швидких засобах його визначення для оцінки енергоефективності рішень або в процесі досліджень. Одним із таких засобів є застосування моделювання. У статті описано постановку задач моделювання та представлено комп'ютерну модель, створену на основі реального приладу для вимірювання теплопровідності методом динамічного калориметра. Математична основа моделі базується на законі Фур'є, залежностях теплових параметрів сформульованих та задокументованих в документації до приладу, а також отриманих за результатами еталонних експериментів на приладі. Модель реалізовано в середовищі LabVIEW. протестовано шляхом проведення дослідів в різних режимах, що продемонструвало значне прискорення отримання результатів порівняно з дослідженнями на реальному приладі та корисність застосування моделювання для досліджень. **Мета статті.** Представлення постановки задач та результатів моделювання для дослідження теплопровідності твердих матеріалів. **Висновок.** Сформульовані задачі моделювання та створено комп'ютерну модель для дослідження теплопровідності твердих матеріалів. Моделюються процеси, що відбуваються в реальному приладі для вимірювань теплопровідності твердих матеріалів. Дослідження процесів на приладі використані для забезпечення адекватності моделі. Отримана модель може використовуватись, як для навчального процесу, так і для отримання даних щодо теплопровідних/теплоізоляційних властивостей ряду твердих матеріалів.

Ключові слова: теплопровідність; постановка задач моделювання; моделювання

MODELING THE STUDY OF SOLID MATERIALS' THERMAL CONDUCTIVITY USING THE DYNAMIC CALORIMETRY METHOD

SOLOD L.V.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
TKACHOVA V.V.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
PROKOFIEVA H.Ya.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
BEREZIUH H.H.⁴, Senior Lect.

^{1*} Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, and Heat and Gas Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 681-12-02, e-mail: solod.leontina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

² Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, and Heat and Gas Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-92, e-mail: tkachova.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

³ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, and Heat and Gas Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-92, e-mail: chornomorets.halyna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

⁴ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, and Heat and Gas Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-92, e-mail: berezuik.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

Abstract. Statement of the Problem. The search for energy-efficient solutions is relevant at the current construction and civil engineering development stage. One of the key parameters to be determined is the thermal conductivity of materials and products. This parameter depends on temperature and other factors, necessitating the need for fast and reliable methods to determine it for energy efficiency assessments or research purposes. One such method is using the modeling. This paper describes the formulation of modeling tasks and presents a computer model based on a real device for measuring thermal conductivity via the dynamic calorimetry method. The mathematical foundation of the model is based on Fourier’s law, thermal parameter dependencies documented in the device specifications, and data obtained from benchmark experiments. The model is implemented in the LabVIEW environment and has been tested through experiments in various operational modes. The results demonstrate a significant reduction in time required to obtain data compared to studies conducted using the physical device, highlighting the effectiveness of modeling for research purposes. **The purpose of the article.** To present the problem formulation and modeling results for studying the thermal conductivity of solid materials. **Conclusion.** The modeling tasks have been formulated, and a computer model has been developed to study the thermal conductivity of solid materials. The model simulates the processes occurring in a real thermal conductivity measurement device. Experimental studies on the actual instrument have been used to validate the model’s accuracy. The developed model can be utilized both for educational purposes and for obtaining data on the thermal conductivity and thermal insulation properties of various solid materials.

Keywords: thermal conductivity; modeling problem formulation; modeling

Постановка проблеми. Пошук енергоефективних рішень при новому будівництві або рішень з підвищення енергоефективності існуючих будівель є актуальною задачею сучасного етапу розвитку будівництва та цивільної інженерії. Згідно з Законом України від 22.06.2017 № 2118-VIII «Про енергетичну ефективність будівель» та ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель», «енергетична ефективність будівлі – це властивість будівлі, що характеризується кількістю енергії, необхідної для створення належних умов проживання та/або життєдіяльності людей у такій будівлі». Ця кількість енергії залежить від архітектурно-конструктивних рішень, застосованих технологій, будівельних матеріалів і виробів та ефективності інженерних систем. Причому високі показники енергоефективності будівлі можуть бути досягнуті при комплексному розгляді цих чинників, які можна вважати складовими енергоефективності будівлі.

При розробці, оцінці, виборі рішень та дослідженнях в кожній зі складових

енергоефективності потрібні дані щодо теплопровідних або теплоізолюючих властивостей виробів та матеріалів. Такі дані потрібні для рішень щодо збереження теплової енергії в будівлі або при її транспортуванні, забезпечення потрібної тепловіддачі опалювальних приладів та теплообмінного обладнання тощо.

Як відомо, теплопровідність матеріалу залежить від температури та інших чинників. Наприклад, у СНиП 2.04.14-88 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. (Затверджено постановою Державного комітету СРСР у справах будівництва від 09.08.88 № 155 (статус документа в Україні – чинний)) коефіцієнти теплопровідності матеріалів в конструкції наведені для поверхонь з температурою 20 °C та вище у вигляді функції температури теплоізоляційного шару, що залежить від температури речовини, місця розташування поверхні та пори року; для поверхонь з температурою 19 °C та нижче – надається діапазон можливих коефіцієнтів теплопровідності. Таким чином, наявна потреба у засобах відносно швидкого визначення

теплопровідності матеріалів у визначених умовах для оцінки енергоефективності певного проєктного або технічного рішення, а також в процесі досліджень. На наш погляд, таким засобом є застосування моделювання.

Аналіз публікацій. Дослідженням теплопровідності та методам, що використовуються для цього присвячено багато публікацій в різних галузях. В роботі [1] автор досліджує властивості будівельних розчинів для оздоблення, в тому числі їх теплопровідність. Для визначення теплопровідності використовувався прилад ISOMET 2104 виробництва компанії ZwickRoell (Німеччина). Прилад використовує метод імпульсної термометрії для вимірювання швидкості розповсюдження тепла в матеріалі. На поверхню зразка подається короткий тепловий імпульс та фіксується зміна температури в різних точках зразка, математична модель, закладена в програмне забезпечення приладу, обчислює теплопровідність. Подібний метод описаний також в [2]. Визначення теплопровідності за допомогою стаціонарного вимірювального приладу з подальшим її прогнозуванням аналітичним методом описано також в [3], автори досліджують теплопровідність композитів.

В [4] розрахунок температурного поля для задач стаціонарної теплопровідності виконується з використанням спеціального програмного забезпечення – підсистема «Теплопровідність» РПК «Ліра-Сапр 2020» [5]. В [6] представлено підхід до визначення теплопровідності ґрунту для проєктування геотермальних теплонасосних установок. Теплопровідність ґрунту визначається за виміряною його температурою шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності з використанням методів математичного моделювання, обчислювальних методів та ідентифікації теплофізичних процесів.

Можна бачити, що для визначення теплопровідності різних матеріалів в різних сферах затребуваним є застосування математичного моделювання та комп'ютерних технологій, комбінування

приладового та аналітичного методів. Таким чином, продовження досліджень в цьому напрямку є перспективним.

Мета статті. Представлення постановки задач та результатів моделювання дослідження теплопровідності твердих матеріалів.

Виклад матеріалу. Одним з напрямів діяльності лабораторії кафедри опалення, вентиляції, кондиціювання та теплогазопостачання ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій є комп'ютерне моделювання для навчального процесу. На підґрунті реального обладнання створюються моделі для закріплення знань зі спеціальних дисциплін [7; 8]. Останнім часом ця діяльність отримує розвиток в напрямку удосконалення моделей для можливості їх застосування не тільки в навчальних цілях, а й для досліджень інженерних систем та їх елементів [9; 10].

Однією з розробок є комп'ютерна модель для визначення теплопровідності твердих матеріалів. Як зазначено вище, визначення теплопровідності необхідно при дослідженні різних об'єктів, а також для вирішення прикладних задач. Основою моделі є реальний прилад в якому для вимірювання теплопровідності використано метод динамічного калориметра.

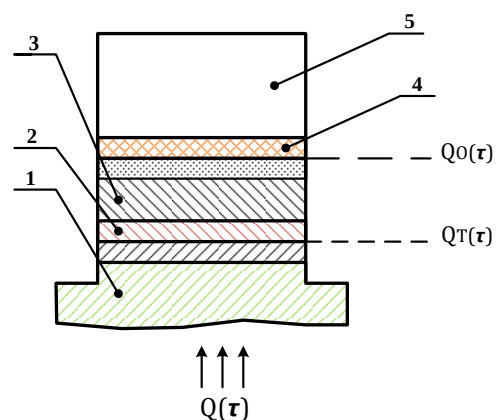


Рис. 1. Теплова схема вимірювання теплопровідності приладом: 1 – основа; 2 – пластина-тепломір; 3 – пластина контактна; 4 – зразок, що досліджується; 5 – стрижень

Опис та принцип дії приладу. Теплову схему з документації приладу показано на рисунку 1.

Досліджуваний зразок, контактна пластина та стрижень монотонно розігріваються тепловим потоком $Q(\tau)$, що йде від основи. Бокові поверхні стрижня, зразка та пластин адіабатно ізольовані. Перепади температур на стрижні та контактній пластині незначні, оскільки ці елементи виконані з міді, тобто мають високий коефіцієнт теплопровідності. Тепловий потік $Q_T(\tau)$, який йде через середній перетин пластини частково поглинається нею, а потім розігріває контактну пластину, зразок та стрижень.

Теплові потоки, що акумулюються зразком та пластиною принаймні у 5–10 разів менші ніж потік, що поглинається стрижнем, в приладі це забезпечується розмірами системи. Таким чином, всі елементи розігріваються з близькими швидкостями, температурне поле зразка та пластини наближене до стаціонарного лінійного.

Тепловий потік йде від електричного нагрівача в основі приладу, який забезпечує монотонний нагрів зі швидкістю близько 0,1 К/с. Для визначення теплопровідності у вигляді залежності від температури, прилад в процесі розігріву вимірює перепад температури на зразку та на пластині – тепломірі на фіксованих рівнях температури, використовуються термопари хромель – алюмель. Передбачено охолодження робочої частини приладу зрідженим азотом. Температурний діапазон вимірювань становить від –100 до +400 °С, діапазон виміру теплопровідності від 0,1 до 5 Вт/(м·К).

Постановка задачі моделювання. Мета – на основі аналізу об'єкту моделювання (реального приладу) розробити комп'ютерну модель для дослідження теплопровідності твердих матеріалів.

Процес моделювання організовано на основі теорії моделювання систем [11].

Опис моделі:

– вхідні змінні: матеріал, його маса, розміри та теплоємність, напруга нагрівача (U);

– вихідні змінні: перепади температури на зразку (Δt_z) та на пластині – тепломірі (Δt_T);

– параметри: необхідний діапазон температур для вимірювань, електричний опір нагрівача (R), коефіцієнт теплопередачі тепломіра k_T , чутливість термопар (A) та інші постійні приладу;

– залежності вихідних змінних від вхідних: $\Delta t_z, \Delta t_T = f(U)$.

Формалізація моделі (фіксація зв'язків між елементами системи, формальне представлення):

– основа математичної моделі – закон Фур'є, $\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T$ (густина теплового потоку (q) прямо пропорційна градієнту температури (**grad T**) та направлена в сторону меншої температури, λ – коефіцієнт теплопровідності);

– потік теплоти визначається параметрами нагрівача (U, R);

– перепад Δt_T залежить від Q, k_T , A; перепад Δt_z залежить від Q, A, λ та розмірів зразку (F – площа, h – висота);

– залежності теплових параметрів при забезпеченні рівномірного теплового потоку через тепломір і через зразок сформульовані і задокументовані в документації до приладу;

– модель реалізується в моделювальному конструкторі LabViEW.

Основні залежності математичної моделі:

$$Q = U^2/R,$$

$$\Delta t_T = Q / k_T,$$

$$\Delta t_z = Q \times A / \lambda \times h / F,$$

$$\lambda(t) = \Delta t_T / \Delta t_z \times k_T \times h / F.$$

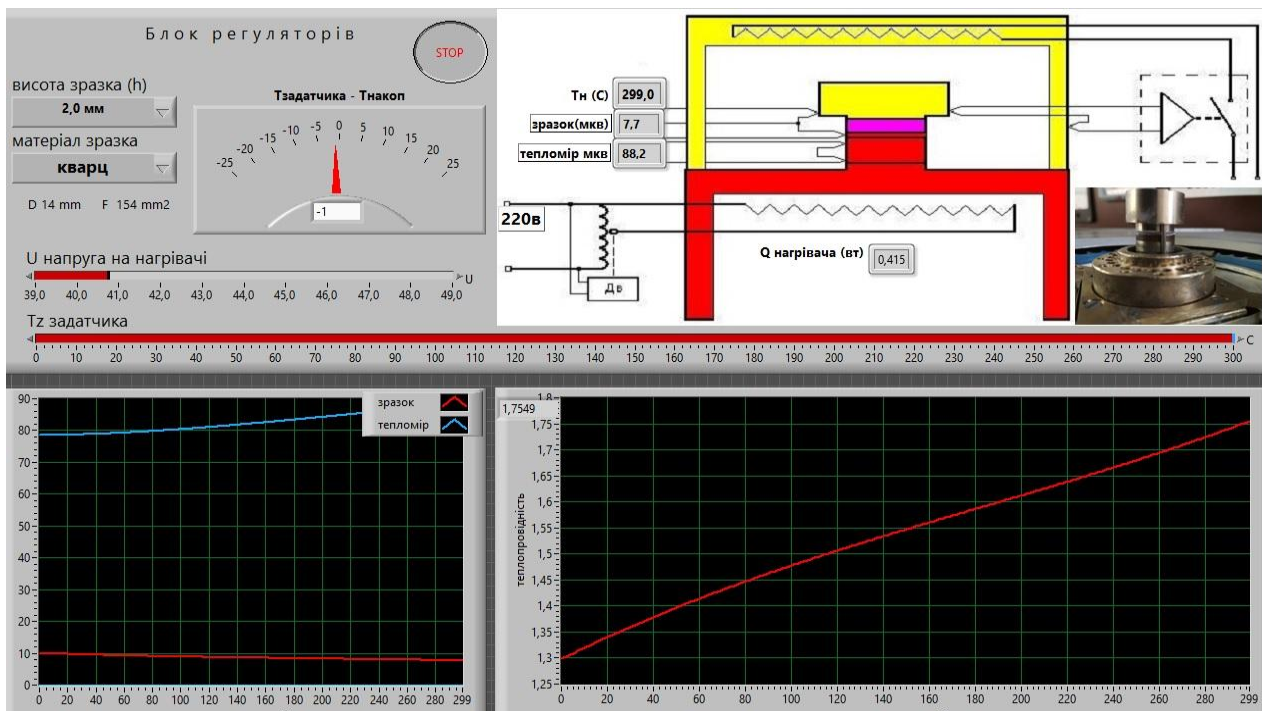


Рис. 2. Інтерфейс комп'ютерної моделі для дослідження теплопровідності твердих матеріалів

Інтерфейс комп'ютерної моделі показано на рисунку 2.

На фронтальній панелі моделі розташовані регулятори для задання необхідних параметрів досліду. Поруч розміщена схема та фото робочого вузла приладу, а внизу дві осцилограми: на лівій демонструється залежність перепадів температур тепломіра та досліджуваного зразка від плинної температури нагріву, на правій – залежність коефіцієнту теплопровідності досліджуваного зразка від температури.

Реалізація та верифікація моделі відбувалися в ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи здобувача Крестинської А. «Дослідження коефіцієнту теплопровідності за допомогою комп'ютерної моделі». Для тестування моделі були проведені численні досліди в різних режимах, при задаванні різних вхідних змінних. Зокрема, досліджувались зразки з оргскла та кварцевого скла, матеріалів, що застосовуються в сонячних панелях.

Для забезпечення адекватності моделі до її алгоритму закладаються залежності

$\lambda = f(t)$, отримані за результатами еталонних експериментів з різними матеріалами на приладі.

Використання для досліджень представленої моделі значно скорочує отримання результатів порівняно з дослідженнями на реальному приладі.

Висновки

Сформульовані задачі моделювання та створено комп'ютерну модель для дослідження теплопровідності твердих матеріалів. Моделюються процеси, що відбуваються в реальному приладі для вимірювань теплопровідності твердих матеріалів. Дослідження процесів на приладі використані для забезпечення адекватності моделі. Отримана модель може використовуватись, як для навчального процесу, так і для отримання даних щодо теплопровідних/теплоізоляційних властивостей ряду твердих матеріалів.

Отримана модель може використовуватись, як для навчального процесу, так і для отримання даних щодо теплопровідних/теплоізоляційних властивостей ряду твердих матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ranesi A. Eco-efficient plasters for increased indoor air quality and comfort : Doctoral dissertation. NOVA School of Science and Technology, NOVA University Lisbon, 2023. URL: https://run.unl.pt/bitstream/10362/163251/1/Ranesi_2023.pdf.
2. Cintura E., Faria P., Duarte M., Nunes L. Bio-wastes as aggregates for eco-efficient boards and panels : screening tests of physical properties and bio-susceptibility. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7, № 3. P. 26. URL: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030026>.
3. Mi Zhaoguo, Chen Zhenhua, Yang Weihua. Experimental and Numerical Analysis of the Thermal Conductivity of SiCf/SiC Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. April. 2023. Article ID 6522013. 11 p. DOI: 10.1155/2023/6522013. URL: https://www.researchgate.net/publication/370408445_Experimental_and_Numerical_Analysis_of_the_Thermal_Conductivity_of_SiCfSiC_Composites.
4. Лугченко О. І., Кулаков О. Ю. Термомодернізація при відновленні об'єктів, пошкоджених в період воєнної агресії. *Theoretical methods of research of the latest problems : abstracts of the XXI International scientific and practical conference*. May 27–29, Prague, Czech Republic, 2024. P. 635. URL: <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2024/04/9-789-40372-404-1.pdf>
5. Городецький О. С., Шмуклер В. С., Бондарев О. В. Інформаційні технології розрахунку та проєктування будівельних конструкцій : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2003. 889 с.
6. Костіков А. О., Сафонов М. О., Тарасова В. О. Ідентифікація теплофізичних характеристик ґрунту розв'язанням оберненої задачі теплопровідності. *Theoretical methods of research of the latest problems : abstracts of the XXI International scientific and practical conference*. May 27–29, Prague, Czech Republic, 2024. P. 635. URL: <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2024/04/9-789-40372-404-1.pdf>
7. Сокурєнко В. І., Солод Л. В., Чорнойван А. А. Використання комп'ютерних моделей лабораторних робіт в навчальному процесі денної форми навчання. *Дистанційна освіта у ВНЗ : інноваційні та психолого-педагогічні аспекти : зб. наук. праць Міжнар. наук.-метод. конф.* 19–20 листопада 2015 р. Харків : Харківський нац. автомобільно-дорожній ун-т, 2015. С. 181–184.
8. Солод Л. В., Черчата А. О. Теоретичні та практичні аспекти застосування інноваційних технологій навчання в закладах вищої освіти. Інструменти та методи комерціалізації інноваційної продукції : монографія за ред. Ілляшенка С. М., Біловодської О. А. Суми : Триторія, 2018. С. 370–379. ISBN 978-966-97865-2-4.
9. Солод Л. В., Адегов О. В., Березюк Г. Г., Ткачова В. В., Прокоф'єва Г. Я. Постановка задач моделювання для дослідження інженерних систем. *Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України : матер. наук.-практ. конф.* 13 березня 2024 р. Дніпро : Енерго-інноваційний хаб ПДАБА, 2024. С. 113–116.
10. Ткачов М. С., Солод Л. В., Березюк Г. Г. Розробка моделі для дослідження систем теплопостачання. *Актуальні проблеми сучасної енергетики : матер. VIII Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. студ., аспір. і мол. вч.* 23 травня 2024 р. Хмельницький – Херсон : Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2024. С. 141–144. ISBN 978-617-8187-15-6.
11. Стеценко І. В. Моделювання систем : навч. посіб. [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2010. 399 с. URL: <http://surl.li/rewmp>

REFERENCES

1. Ranesi A. Eco-efficient plasters for increased indoor air quality and comfort : Doctoral dissertation. NOVA School of Science and Technology, NOVA University Lisbon, 2023. URL: https://run.unl.pt/bitstream/10362/163251/1/Ranesi_2023.pdf.
2. Cintura E., Faria P., Duarte M. and Nunes L. Bio-wastes as aggregates for eco-efficient boards and panels : screening tests of physical properties and bio-susceptibility. *Infrastructures*. 2022, no. 7 (3), p. 26. URL: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030026>
3. Mi Z., Chen Z. and Yang W. Experimental and Numerical Analysis of the Thermal Conductivity of SiCf/SiC Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2023, art. ID 6522013, 11 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2023/6522013>
4. Luhchenko O.I. and Kulakov O.Yu. *Termomodernizatsiya pry vidnovlenni ob'yektiv, poshkodzhennykh v period voyennoyi ahresiyi* [Thermomodernization during the restoration of objects damaged during military aggression]. *Theoretical Methods of Research of the Latest Problems : abstracts of the XXI International scientific and practical conference*. May 27–29, Prague, Czech Republic, 2024, p. 635. URL: <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2024/04/9-789-40372-404-1.pdf>. (in Ukrainian).
5. Horodetskyi O.S., Shmukler V.S. and Bondarev O.V. *Informatsiyi tekhnolohiyi rozrakhunku ta proyektuvannya budivel'nykh konstruksiy : navch. posib.* [Information technologies for calculation and design of building structures : textbook]. Kharkiv : NTU “KhPI”, 2003, 889 p. (in Ukrainian).
6. Kostikov A.O., Safonov M.O. and Tarasova V.O. *Identyfikatsiya teplofizychnykh kharakterystyk gruntu rozv'yazannyam obernenoyi zadachi teploprovodnosti* [Identification of Thermophysical Characteristics of Soil by

Solving the Inverse Problem of Heat Conduction]. Theoretical methods of research of the latest problems : abstracts of the XXI International scientific and practical conference. May 27–29, Prague, Czech Republic, 2024, p. 635. URL: <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2024/04/9-789-40372-404-1.pdf>. (in Ukrainian).

7. Sokurenko V.I., Solod L.V. and Chornoivan A.A. *Vykorystannya komp'yuternykh modeley laboratornykh robot v navchal'nomu protsesi dennoyi formy navchannya* [Use of computer models of laboratory works in the educational process of full-time education]. *Dystantsiyna osvita u VNZ : innovatsiyni ta psykholoho-pedahohichni aspekty : zb. nauk. prats' Mizhnar. nauk.-metod. konf.* [Distance Education in Higher Educational Institutions : Innovative and Psychological-Pedagogical Aspects : collection of scientific papers of the International scientific-methodical conference]. Kharkiv : Kharkiv National Automobile and Highway University, 2015, pp. 181–184. (in Ukrainian).

8. Solod L.V. and Cherchata A.O. *Teoretychni ta praktychni aspekty zastosuvannya innovatsiynykh tekhnolohiy navchannya v zakladakh vyshchoyi osvity. Instrumenty ta metody komertsializatsiyi innovatsiynoyi produktsiyi : monohrafiya za red. Illyashenka S.M., Bilovods'koyi O.A.* [Theoretical and practical aspects of the application of innovative teaching technologies in higher education institutions. Tools and methods for commercialization of innovative products : monograph in S.M. Illiashenko and O.A. Bilovodska (Eds.)]. Sumy : Tritoria Publ., 2018, pp. 370–379. ISBN 978-966-97865-2-4. (in Ukrainian).

9. Solod L.V., Adehov O.V., Bereziuk H.H., Tkachova V.V. and Prokofieva H.Ya. *Postanovka zadach modelyuvannya dlya doslidzhennya inzhenernykh system* [Setting modeling tasks for the study of engineering systems]. *Prosvannya enerhoefektyvnosti ta pidhotovka fakhivtsiv dlya vidbudovy Ukrayiny : materialy naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* [Promoting Energy Efficiency and Training Specialists for the Reconstruction of Ukraine : proceedings of the scientific-practical conference]. Dnipro : Energy-Innovation Hub PSACEA, 2024, pp. 113–116. (in Ukrainian).

10. Tkachov M.S., Solod L.V. and Bereziuk H.H. *Rozrobka modeli dlya doslidzhennya system teplopostachannya* [Development of a model for the study of heat supply systems]. *Aktual'ni problemy suchasnoyi enerhetyky : materialy VIII Vseukrayins'koyi nauk.-prakt. internet-konf. studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh* [Actual Problems of Modern Energy : proceedings of the VIII All-Ukrainian scientific-practical internet-conference of students, postgraduates and young scientists]. Kherson : Book Publishing House FOP Vishemyrskyi V.S., 2024, pp. 141–144. ISBN 978-617-8187-15-6. (in Ukrainian).

11. Stetsenko I.V. *Modelyuvannya system : navch. posib.* [Modeling of systems : textbook]. Cherkasy: ChDTU, 2010, 399 p. URL: <http://surl.li/rewmp>. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 22.04.2025.