

УДК 658.382:613.64:621.8.035

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.16.1156

ВИКОРИСТАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ ТА ДАТЧИКІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕРМОРАДІАЦІЙНОЇ НАПРУЖЕНОСТІ НА РОБОЧИХ МІСЦЯХ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,

СТРЕЖЕКУРОВ Ю. Е.^{2*}, *асп.*

ТОДОРОВ О. П.³, *асп.*,

ШАЛОМОВ В. А.⁴, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, 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) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 097-51-59, e-mail: staty.mail.ua@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-1791-395X

³ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, 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) 523-22-55, e-mail: 5232255@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

⁴ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, 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) 756-34-73, e-mail: shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

Анотація. Постановка проблеми. У сучасному світі, де висока технологічність та індустріалізація відіграють ключову роль у багатьох галузях, безпека праці та управління ризиками на робочому місці стають все важливішими питаннями. Один з найважливіших аспектів безпеки праці – це дослідження та контроль шкідливого впливу надмірного тепла та теплового випромінювання на робочому місці. Надмірне тепло та теплове випромінювання можуть мати серйозні негативні наслідки для здоров'я та безпеки працівників. Вони можуть спричиняти тепловий стрес, опіки, гострі та хронічні захворювання, а також збільшувати ризик нещасних випадків на робочому місці. Тому важливо мати належні вимірювальні прилади та методики для вимірювання цих параметрів. Що допомагає підвищити ефективність досліджень та забезпечити належний рівень безпеки на робочому місці. Також дозволяє фахівцям та початківцям з безпеки праці і управління ризиками вибрати відповідні прилади для методики проведення досліджень. Існують певні виклики та проблеми, пов'язані з температурою, опромінюванням та тепловим навантаженням на робочих місцях. Найважчі виклики та методи дослідження можуть бути недостатньо ефективними або незадовольняти потреби інженерів та дослідників для точного визначення рівня теплового впливу. **Мета статті** – Комплексне порівняння різних приладів, їх технічних можливостей та налаштування для дослідження надмірного впливу тепла та теплового випромінювання на робочому місці. **Висновок.** Радіометри і теплові камери є схожими пристроями, однак є різниця полягає у тому що: радіометри вимірюють інтенсивність випромінювання в видимому, інфрачервоному та радіочастотному діапазоні і генерують числові дані, які можуть бути оброблені та використані для аналізу. У свою чергу теплові камери візуально відображають на екрані розподіл лише інфрачервоного випромінювання поверхні об'єктів. Радіометри і теплові камери мають схожу функцію вимірювання теплового випромінювання, але застосовуються для різних завдань та ситуацій. Напів-провідникові термометри та терморезистори є складовими частинами складних цифрових вимірювальних пристроїв але також можуть використовуватись як самостійні зовнішні датчики температури.

Ключові слова: високотемпературні джерела випромінювання; алгоритм проведення калібровки терморезисторів; радіометр; теплові камери; калориметричні потокоміри; термометри; паспортизація робочого місця

IMPROVEMENT OF THERMAL IMAGING CAMERA FOR ASSESSING HEAT FLOW IN WORKPLACES

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

STREZHEKUROV Yu.E.^{2*}, *Postgrad. Stud.*,

TODOROV O.P.³, *Postgrad. Stud.*,

SHALOMOV V.A.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, 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) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, 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) 756-34-73, e-mail: staty.mail.ua@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-1791-395X

³ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, 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) 523-22-55, e-mail: 5232255@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

⁴ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, 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) 756-34-57, e-mail: shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

Abstract. Problem statement. In the modern world, where high technology and industrialization play a crucial role in many sectors, occupational safety and risk management in the workplace are becoming increasingly important issues. One of the most critical aspects of occupational safety is the study and control of the harmful effects of excessive heat and thermal radiation in the workplace. Excessive heat and thermal radiation can have serious negative consequences for the health and safety of workers. They can cause heat stress, burns, acute and chronic illnesses, and also increase the risk of accidents in the workplace. Therefore, it is important to have proper measuring instruments and methodologies for measuring these parameters. This helps to enhance the effectiveness of research and ensure an adequate level of safety in the workplace. It also enables safety and risk management professionals and novices to select the appropriate instruments for research methodologies. There are specific challenges and issues related to temperature, radiation, and thermal loads in workplaces. Existing research instruments and methodologies may be insufficiently effective or fail to meet the needs of engineers and researchers for accurately determining the level of thermal impact. **The main objectives include** – comprehensive comparison of various devices, their technical capabilities, and settings for studying the excessive impact of heat and thermal radiation in the workplace. **Conclusion.** Radiometers and thermal cameras are similar devices; however, the difference lies in the fact that radiometers measure the intensity of radiation in the visible, infrared, and radio frequency ranges and generate numerical data that can be processed and used for analysis. In contrast, thermal cameras visually display on the screen only the distribution of infrared radiation from the surfaces of objects. Radiometers and thermal cameras have a similar function of measuring thermal radiation but are used for different tasks and situations. Semiconductor thermocouples and thermistors are components of complex digital measuring devices but can also be used as standalone external temperature sensors.

Keywords: high-temperature radiation sources; thermistor calibration algorithm; radiometer; thermal cameras; calorimetric flowmeters; thermometers; workplace passportization

Постановка проблеми. У сучасному світі, де висока технологічність та індустріалізація відіграють ключову роль у багатьох галузях, безпека праці та управління ризиками на робочому місці стають все важливішими питаннями. Один з найважливіших аспектів безпеки праці - це дослідження та контроль шкідливого впливу надмірного тепла та теплового випромінювання на робочому місці.

Надмірне тепло та теплове випромінювання можуть мати серйозні негативні наслідки для здоров'я та безпеки працівників. Вони можуть спричиняти тепловий стрес, опіки, гострі та хронічні захворювання, а також збільшувати ризик нещасних випадків на робочому місці. Тому важливо мати належні вимірювальні прилади та методики для вимірювання цих параметрів [2]. Що допомагає підвищити ефективність досліджень та забезпечити належний рівень безпеки на робочому місці. Також дозволяє фахівцям та

початківцям з безпеки праці і управління ризиками вибрати відповідні прилади для методики проведення досліджень.

Аналіз публікацій. Існують певні виклики та проблеми, пов'язані з температурою, опромінюванням та тепловим навантаженням на робочих місцях. Наявні прилади та методи дослідження можуть бути недостатньо ефективними або незадовольняти потреби інженерів та дослідників для точного визначення рівня теплового впливу [3; 4].

Мета дослідження – комплексне порівняння різних приладів, їх технічних можливостей та налаштування для дослідження надмірного впливу тепла та теплового випромінювання на робочому місці.

Результати досліджень. Для дослідження шкідливого впливу надмірного тепла та теплового випромінювання на робочому місці на підприємствах, існує декілька приладів, які можна використовувати. Деякі з них включають: радіометри, теплові камери,

теплові дозиметри, безконтактні термометри та напів провідникові терморезистори [1].

1. Радіометри є приладами, призначеними для вимірювання інтенсивності теплового випромінювання. Які використовуються для оцінки теплових навантажень або вимірювання температури поверхні об'єктів. Варто зазначити, що переваги та недоліки будуть залежати від конкретної моделі та виробника радіометрів. Радіометри можуть бути різних типів залежно від принципу дії та методу вимірювання теплового випромінювання [1]. Основні деякі загальні типи радіометрів включають наступні:

- Радіометри на основі пірозондів використовують теплочутливі пірозонди, які реагують на теплове випромінювання об'єктів і генерують електричний сигнал, який відповідає температурі.

Переваги: висока стійкість до високих температур та екстремальних умов; вимірювання високих температур з високою точністю.

Недоліки: складніша конструкція та висока вартість пристроїв; обмежений діапазон вимірювання температур; вплив емісійних властивостей поверхні об'єкта на точність вимірювань.

- Оптичні пірометри використовуються для вимірювання температур віддалених об'єктів оптичні системи для фокусування теплового випромінювання на детекторі, що дозволяє використовувати для вимірювання температури на великій відстані [1].

Переваги: безконтактне вимірювання температури з віддалі; задовільна точність вимірювань температури; здатність вимірювати високі температури.

Недоліки: обмежений діапазон вимірювання температур; вплив атмосферних умов та забруднень повітряного середовища на точність вимірювань; потреба у прямій видимості до об'єкта.

2. Теплові камери, також відомі як інфрачервоні камери або термальні камери, є пристроями, призначеними для вимірювання та візуалізації теплових розподілів на поверхні об'єктів [1]. Основні типи теплових камер включають наступні:

- Суперпровідні теплові камери використовують особливі матеріали, які проявляють нульовий електричний опір при

дуже низьких температурах. Це дозволяє досягти високої чутливості і низького рівня шуму в теплових камерах. Суперпровідні детектори забезпечують високу роздільну здатність і швидкість зчитування, що робить їх ефективними для динамічних досліджень теплових процесів.

Переваги: суперпровідні детектори мають високу чутливість до інфрачервоного випромінювання, що дозволяє виявляти слабкі теплові сигнали; висока роздільна здатність; суперпровідні детектори мають малий розмір елементів, що дозволяє досягти високої роздільної здатності в теплових зображеннях; швидкість зчитування; суперпровідні детектори забезпечують швидке зчитування даних, що дозволяє використовувати їх для динамічних досліджень теплових процесів.

Недоліки: потребують низьких температур; суперпровідні теплові камери потребують дуже низьких температур для забезпечення своєї суперпровідної властивості, що може вимагати складних систем охолодження; висока вартість; використання суперпровідних матеріалів та технологій призводить до високої вартості суперпровідних теплових камер.

3. Калориметричні потокоміри є пристроями, які використовуються для вимірювання доз теплового випромінювання, яка отримується протягом певного часу. Використовуючи термопари для точного вимірювання різниці температур, пропорційної тепловому потоку [1].

Переваги: основними перевагами такого підходу є висока точність, надійність та широкий діапазон вимірювання - до 10 000 Вт/м². Це дозволяє застосовувати HFM-375 для контролю теплових потоків у будівлях, промислових процесах тощо.

Недоліки: калориметричні потокоміри громіздкими та потребують більше часу для встановлення, ніж інші типи датчиків. Також вони потребують регулярного обслуговування та калібрування для підтримання заявлених характеристик.

4. Термометри є важливими приладами для вимірювання температури повітря, поверхонь або об'єктів на робочому місці та у робочому просторі. Існує кілька сучасних типів термометрів, які можуть бути використані залежно від потреб і умов дослідження [1]:

– Електронні термометри використовують електронні сенсори, такі як терморезистори або термопари, для вимірювання температури. Вони можуть мати цифровий дисплей, який відображає точну виміряну температуру. Електронні термометри зазвичай мають широкий діапазон вимірювання і високу точність.

Переваги: широкий діапазон вимірювання температури; висока точність вимірювання; швидка реакція на зміни температури; можливість зручного відображення виміряної температури на цифровому дисплеї.

Недоліки: потребують джерела живлення, такого як батарея; необхідність калібрування для забезпечення точності вимірювання.

– Безконтактні термометри вимірюють температуру без прямого контакту з об'єктом. Вони використовують інфрачервоне випромінювання, щоб оцінити теплову енергію, яку випромінює об'єкт. Безконтактні термометри зручні для вимірювання температури об'єктів, які знаходяться на великій відстані або важкодоступних місцях [1].

Переваги: безпечність не вимагають прямого контакту з об'єктом; швидкість вимірювання температури поверхні; можуть бути використані для вимірювання великих відстаней або на важкодоступних місцях; портативність.

Недоліки: менша точність порівняно з іншими типами термометрів; вплив зовнішніх факторів повітряного середовища; потребує знання правильного відстані та кута спрямування для точного вимірювання; потребують джерела живлення; вимірюють лише точково температуру поверхні.

5. Терморезистори є одним з найпоширеніших типів електронних сенсорів для вимірювання температури. Вони являють собою резистори, опір яких змінюється залежно від температури навколишнього середовища. Це дозволяє використовувати терморезистори для точного вимірювання температурних параметрів [1].

Переваги: широкий діапазон вимірюваних температур; висока точність і стабільність показань; швидка реакція на зміни температури; простота конструкції та низька вартість.

Недоліки: необхідність калібрування для забезпечення точності.

Оскільки точність моніторингу теплових полів на робочих місцях є критично важливою для забезпечення безпеки та комфорту працівників. Серед таких пристроїв особливе місце займають терморезистори завдяки їх простоті, надійності та доступній вартості. Проте для отримання достовірних даних про температурні характеристики необхідно ретельно підходити до процесу калібрування терморезисторів перед введення в експлуатацію систему вимірювання та контролю параметрів. Саме це питання розкрито у наступній частині статті.

При проведенні нашого дослідження просторового розповсюдження і проникнення теплових полів, було проведено калібрування та зчитування показників терморезисторів. У роботі запропоновано використовувати термодатчиків типу терморезистор з NTC-чипів моделі SMD NTC Thermistors BE50K3S40473ABEAA. Терморезистори цього типу мають такі технічні характеристики: діапазон вимірювань від -55 до $+150$ °C; невеликі розміри датчиків ($5 \times 5 \times 3$ мм), що дозволяє їх установлювати всередині об'єктів; допустима похибка виміру $\pm 0,15$ °C.

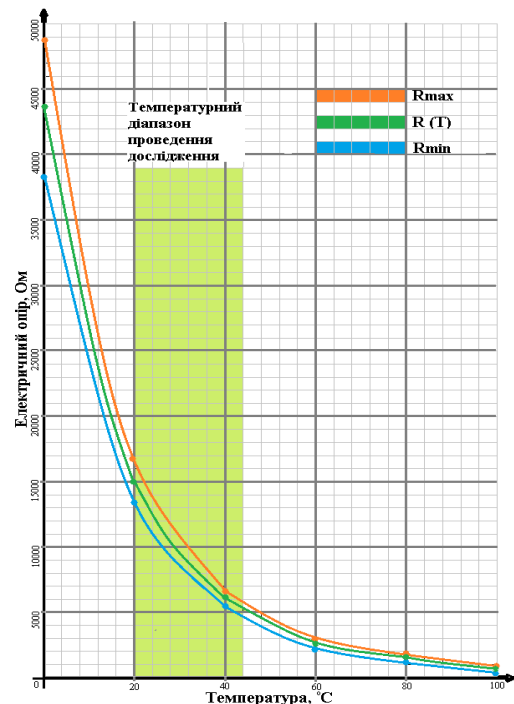


Рис. 1. Індивідуальні калібрувальні криві терморезисторів у калібрувальній камері нагріву відповідно до температури камери при нагрівання від 0 до 100 °C

З огляду на використання терморезисторів для вимірювання температури, калібрування здійснюватиметься наступним чином:

- терморезистори калібруються шляхом порівняння з еталонними термометрами при нагріванні та охолодженні з різних температур з інтервалом 10 °C від 20 до 100 °C;

- для цього створюється термостатна камера з можливістю установки термопар та термометрів;

- отримані дані використовують для побудови калібрувальних кривих залежності сигнал-температура для кожного терморезистора. А саме:

- терморезистори були розподілені на 3 групи по 52 штук;

- кожен терморезистор поміщали в калібрувальну камеру нагріву окремо;

- проводили 5 циклів нагрівання-охолодження в діапазоні 0–100 °C із фіксацією температури та сигналів кожної термопари;

- отримані дані апроксимували методом найменших квадратів для побудови індивідуальних залежностей сигнал – температура;

- додатково кожен терморезистор «калібрували» при трьох рівнях температури для побудови калібрувальних точок;

- індивідуальні калібрувальні криві зберігалися в пам'яті комп'ютера для подальшої корекції вимірів (рис. 1);

- періодично при використанні для досліджень і переміщені між різними підприємствами проводиться повторне калібрування для врахування зміни чутливості;

- дані з терморезисторів порівнювались з фіксаціями з інфракамери для додаткової перевірки;

- результати калібрувань використовуються для нормування даних терморезисторів перед подальшим аналізом розподілу температур;

- дослідження проводились з урахуванням температури сприйняття тіла людини до максимальної температури 40–45 °C.

Для визначення реальної вимірювальної температури $R(T)$ потрібно визначити коефіцієнт чутливості терморезистора β .

Коефіцієнт чутливості терморезистора β розрахований нами на основі вимірюного опору терморезисторів при двох значень температури. Отже для терморезисторів BE50K3S40473ABEAA розраховано коефіцієнт температурної корекції на основі електричного опору при температурі 200 °C та 1 000 °C за допомогою рівняння Стейнхарта – Харта, де температура представлена у Кельвінах за формулою:

$$\beta = \frac{\ln(R1) - \ln(R2)}{\frac{1}{T1} - \frac{1}{T2}} [\text{Ом/K}] \quad (1)$$

де $T1$ – температура першого заміру за допомогою терморезистора у Кельвінах; $\ln(R1)$ – логарифмічне значення опору терморезистора за $T1$; $T2$ – температура другого заміру за допомогою терморезистора у Кельвінах; $\ln(R2)$ – логарифмічне значення опору терморезистора за $T2$.

$$\beta = \frac{\ln(4700) - \ln(328.3)}{\frac{1}{20 + 273.1} - \frac{1}{100 + 273.1}} = 3948 [\text{Ом/K}] \quad (2)$$

Розрахунок реального значення температури через опір терморезистора у нагрівальній камері визначається залежністю:

$$R(T) = \frac{1}{\frac{\ln(R) - \ln(R373)}{\beta} + \frac{1}{373}} [\text{Ом}] \quad (3)$$

де $\ln(R)$ – логарифмічне значення опору за поточної температури терморезистора; $\ln(R373)$ – логарифмічне значення опору терморезистора за температури 373 K; β – коефіцієнт чутливості терморезистора.

Для побудови схеми зчитувань даних з терморезисторів нами було використано вимірювальний міст постійного струму та аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) до мікроконтролера запису та автоматичного розрахунку і використання в програмі Microsoft Office Excel. На рисунку 2 наведено залежність одиниць аналого-цифрового перетворювача від температури.

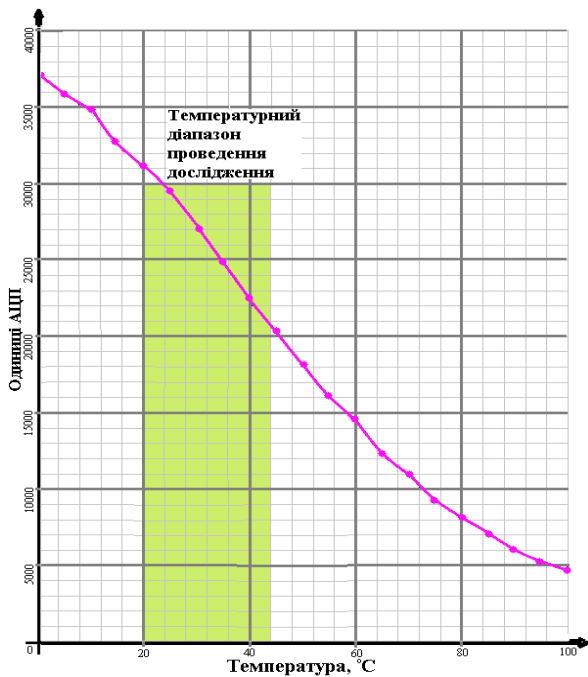


Рис. 2. Залежність одиниць аналого-цифрового перетворювача від температури

Висновки

1. Радіометри і теплові камери є схожими пристроями, однак є різниця полягає у тому що: радіометри вимірюють інтенсивність випромінювання в видимому, інфрачервоному та радіочастотному діапазоні і генерують числові дані, які можуть бути оброблені та використані для аналізу. У свою чергу теплові камери візуально відображають на екрані розподіл лише інфрачервоного випромінювання поверхні об'єктів.

2. Радіометри і теплові камери мають схожу функцію вимірювання теплового випромінювання, але застосовуються для різних завдань та ситуацій.

3. Напів-провідникові терморезистори є складовими частинами складних цифрових вимірювальних пристроїв але таких можуть використовуватись як самостійні зовнішні датчики температури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антонов В. С. Короткий курс загальної метеорології. Чернівці : „Рута”, 2004. 335 с.
2. Беліков А. С., Стрежекуров Ю. Е., Рагімов С. Ю., Харченко В. В. До питання комплексного оцінки впливу теплового випромінювання на робочих місцях з урахуванням забруднення повітряного середовища. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 6. С. 7–15.
3. Шаленний В. Т., Шаломов В. А., Папірник Р. Б. Напрямки удосконалення сучасних технологій, матеріалів і обладнання із врахуванням енергетичних витрат та умов праці будівельних робітників. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. 2010. Вип. 52. С. 127–131.
4. Беліков А. С., Шаломов В. А., Рагімов С. Ю., Михайлов М. О. Фізичне моделювання зміни енергетичного впливу на робочі місця з урахуванням високотемпературного випромінювання. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. № 4. С. 10–17.

REFERENCES

1. Antonov V.S. *Korotkiy kurs zagalnoy metrologii* [Short Course in General Meteorology]. Chernivtsi : “Ruta” Publ., 2004, 335 p. (in Ukrainian).
2. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Ragimov S.Yu. and Kharchenko V.V. *Do pitanya kompleksnogo ocinki vplivu teplovogo viprominyuvanya na robochih miscyah z urahuvanyam zabrudneniya povitryanogo seredovisha* [To the question of the complex assessment of the impact of heat radiation at workplaces taking into account air pollution]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 6, pp. 7–15. (in Ukrainian).
3. Shalennuy V.T., Shalomov V.A. and Papirnyuk R.B. *Napriamki udoskonalennia suchasnykh tekhnologiy, materialiv i obladannia iz vrakhuvanniam energetychnykh vutrat ta umov pratsi budivel'nykh robnyukiv* [Directions for improving modern technologies, materials and equipment, taking into account energy costs and working conditions of construction workers]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie* [Construction. Materials Science. Mechanical Engineering]. 2010, no. 52, pp. 127–131. (in Ukrainian).
4. Bilikov A.S., Shalomov V.A., Ragimov S.Yu. and Mukhaylov M.O. *Fizychne modeliuvannia zminu energetychnogo vplivu na robochi mista z urakhuvanniam vysokotemperaturnogo vyprominiuvannia* [Physical modeling of changes in energy impact on workplaces taking into account high-temperature radiation]. *Visnik Prudniprovsk'oi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, no. 4, pp. 10–17. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 03.04.2025.