

УДК 697.1:621.178:697.34

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.26.1020

ДО ПИТАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ТЕПЛОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РОБОЧИХ МІСЦЯХ З УРАХУВАННЯМ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

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

СТРЕЖЕКУРОВ Ю. Е.^{2*}, *асп.*,

ШАЛОМОВ В. А.³, *канд. техн. наук, доц.*,

РАГІМОВ С. Ю.⁴, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, 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, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: staty.mail.ua@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-1791-395X

³ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, 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

⁴ Кафедра організації і технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт, Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, 61023, Харків, Україна, тел. +38 (057) 370-50-52, e-mail: sergragimov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

Анотація. Постановка проблеми. Дослідження доводять, що існуючі методи визначення розповсюдження інтенсивності теплового випромінювання не враховують вплив забруднення повітря, що не дозволяє в повній мірі оцінити вплив опромінювання на робочих місцях за допомогою номограм й формул, які містять значні спрощення. Це має місце через прийняття ряду спрощень стосовно численних взаємозалежних параметрів, зокрема розміри люків та температури всередині печей тощо. При цьому виникає необхідність вимірювань інтенсивності теплового опромінювання на відстанях 5–10 м та ін. **Мета статті** – запропонувати концепцію експериментальної методики оцінки інтенсивності теплового випромінювання з урахуванням забруднення повітряного середовища при дослідженні інтенсивності опромінювання працівника на робочих місцях. Водночас, для вирішення задач теплозахисту працівників потрібні фактичні дані вимірів рівнів терморадіаційного навантаження на кожному робочому місці при реальних умовах робочого простору. **Висновок.** Запропоновано новий підхід оцінки інтенсивності теплового випромінювання на робочих місцях з урахуванням забрудненості повітряного середовища. Важливою характеристикою є склад газового середовища, оскільки його домішки можуть спотворювати розподіл променевої енергії через інтерференційні та дифракційні ефекти, що необхідно враховувати для оптимізації мікроклімату. Присутність пилових часток ускладнює прямолінійний перенос тепла через розсіювання та сцинтиляцію променів, що потребує удосконалення моделей. Турбулентність, домішки та неоднорідність атмосфери є важливими факторами, які необхідно детальніше дослідити та врахувати при моделюванні процесів переносу тепла. Сцинтиляція впливає на якість передачі випромінювання, що вимагає подальшого вивчення цього явища. Локальні особливості складу атмосфери потребують розробки моделей з урахуванням цих варіацій. Отримані експериментальні дані дозволяють підвищити точність моделювання та поліпшити умови праці. Для отримання достовірної інформації необхідно подальше вдосконалення методик вимірювань.

Ключові слова: *перенос теплової енергії; випромінювання; склад газів; аерозолі; турбулентність; сцинтиляція; моделювання терморадіаційного навантаження*

ON THE ISSUE OF COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THERMAL RADIATION AT WORKPLACES, TAKING INTO ACCOUNT AIR POLLUTION

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

STREZHEKUROV Yu.E.^{2*}, *Postgraduate Student*,

SHALOMOV V.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

RAGIMOV S.Yu.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, 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.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, 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, 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

⁴ Department of Organization and Technical Support Rescue Operations, National University of Civil Defence of Ukraine, 94, St. Chernyshevsky, Kharkiv, 61023, Ukraine, tel.: +38 (057) 370-50-52, e-mail: sergragimov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

Abstract. Problem statement. The research demonstrates that existing methods for determining the distribution of thermal radiation intensity using nomograms and formulas contain significant errors. This is due to the adoption of a number of simplifications regarding numerous interdependent parameters, including the temperature inside furnaces, the size of openings and shafts, etc. As a result, there is a need for measurements of thermal radiation intensity at distances of 5–10 meters and beyond. **The purpose of the article.** The objective of the article is to propose a concept for a new experimental methodology to investigate the intensity of radiation exposure to workers at their workplaces. Simultaneously, in order to address the issues of thermal protection for workers, actual measurement data of thermal radiation levels are necessary for each workstation under real working conditions within the workspace. **Conclusion.** It is important to characterize the composition of the gas environment, as its impurities can distort the distribution of radiant energy through interference and diffraction effects, which need to be considered for microclimate optimization. The presence of dust particles complicates the straight-line heat transfer through scattering and scintillation of rays, requiring further improvement of models. Turbulence, impurities, and atmospheric heterogeneity are important factors that need to be further investigated and taken into account in heat transfer process modeling. Scintillation affects the quality of radiation transmission, necessitating further study of this phenomenon. Local atmospheric composition peculiarities require the development of models that consider these variations. The obtained experimental data will contribute to improving the accuracy of modeling and enhancing working conditions. Further refinement of measurement techniques is necessary for obtaining reliable information.

Keywords: *heat transfer; radiation; gas composition; aerosols; turbulence; scintillation; modeling of thermal and radiation load*

Постановка проблеми. Аналіз наукових досліджень суттєво підсилив необхідність обґрунтування та розроблення перспективної експериментальної системи оцінки рівнів теплового опромінення на робочих місцях. Наші дослідження доводять, що існуючі методи визначення інтенсивності теплового випромінювання не враховують вплив забруднення повітря, що не дозволяє повною мірою оцінити вплив опромінення на робочих місцях за допомогою номограм й формул, які містять значні спрощення. Це має місце через прийняття ряду спрощень стосовно численних взаємозалежних параметрів, зокрема розміри люків та температури всередині плавильних печей тощо. Водночас, для вирішення задач теплозахисту працівників потрібні фактичні дані вимірів рівнів терморадіаційного навантаження на кожному робочому місці при реальних умовах робочого простору, через те, що людина проводить значну частину свого робочого часу в закритих приміщеннях, перебуваючи під впливом

різних факторів штучного середовища. Одним із ключових з них є тепловий режим, оскільки температура безпосередньо впливає на здоров'я, працездатність та комфорт перебування працівників [1–4].

Аналіз публікацій. Важливо враховувати, що перенос тепла відбувається здебільшого через випромінювання. При цьому склад газової суміші безпосередньо навколо печей та приміщення може суттєво впливати на розподіл променевої енергії через явища інтерференції та дифракції. Основними факторами, які характеризують повітряне середовище, є: температурно-вологісний режим у приміщеннях, рівень запиленості та загазованості повітря робочої зони, розміри площі та об'єму виробничих приміщень, рівень ергономічної організації робочого місця, режим праці та відпочинку, оформлення внутрішніх поверхонь цехів [5–9].

Використання графіків, існуючих розрахункових методик для формування паспортів джерел теплового опромінення є недосконалим для практичного впровадження. Похибки результатів та зниження їх достовірності відбуваються, через те, що

значення окремих параметрів (температура всередині печі, ступінь чорності джерела випромінювання тощо) базуються на усереднених даних таблиць і не враховують специфіки кожного конкретного виробництва. Згідно проведеного аналізу, прямолінійність розповсюдження теплового випромінювання знаходиться у прямому співвідношенні щодо умов навколишнього середовища та може знижуватися через відхилення від оптимальних параметрів метеорологічних умов (до 15–20 %), інтенсивного теплового випромінювання, запиленості та інших факторів.

Тому для комплексної оцінки теплового впливу на робочих місцях пропонується новий підхід, який поєднує експериментальні та обчислювальні методи, забезпечуючи безпеку вимірювань і більшу достовірність.

Мета дослідження – запропонувати концепцію експериментальної методики з урахуванням забруднення повітряного середовища при дослідженні інтенсивності опромінення працівників на робочих місцях. Це забезпечує при вирішенні задач теплозахисту працівників виміряти фактичні дані вимірювання рівнів терморадіаційного навантаження на робочому місці при реальних умовах в робочому просторі.

Результати досліджень. За основу визначення інтенсивності теплового випромінювання прийнято вираз:

$$E_0 = L \int_{\Omega} \cos \alpha d\Omega, \quad (1)$$

де E_0 – енергетична освітленість, Вт/м²; L – яскравість випромінювання джерела, Вт/(м²•стер); α – кут під яким опромінюється об'єкт щодо нормалі, рад.; Ω – тілесний кут, під яким видно джерело випромінювання, стерадіан (стер).

Отже, для оцінки теплового опромінення у робочих зонах доцільно застосувати підхід, що ґрунтується на фізичному моделюванні та теплових вимірах енергетичної інтенсивності опромінення у встановлених точках робочого простору.

Проведення вимірювань безпосередньо біля відкритого шлюзу печі термічної

обробки на відстані 1,5–2 м є очевидно ризикованим і, головне, знижує достовірність отриманих результатів внаслідок погіршення умов експерименту в екстремальних робочих ситуаціях. На рисунку 1 зображено як визначаються прямі вимірювання енергії, утворюючи матрицю інтенсивності, яка призводить до профілю розподілу та поширення.

Отже, для повноцінного опису фізичних процесів необхідно враховувати особливості поширення теплової енергії в реальних умовах.

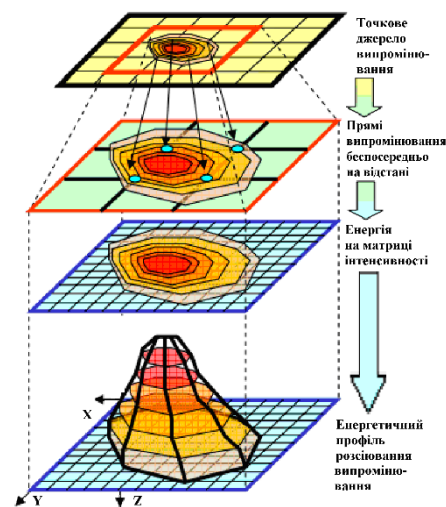


Рис. 1. Визначення вимірювання прямих розподілу та поширення енергії

Практична реалізація теплопереносу при комплексній взаємодії чинників в системі «джерело випромінювання – атмосфера – об'єкт опромінення» істотно відрізняється від ідеалізованої моделі. Зокрема, на характер поширення теплових потоків впливають:

- турбулентність газового середовища, що призводить до нестационарності його оптичних характеристик;

- неоднорідність властивостей атмосфери в залежності від присутніх домішок, які варіюють у залежності від умов виробництва конкретного приміщення.

Інфрачервоне випромінювання, яке стикається із пиловими часточками у повітрі приміщення виробництва вздовж оптичної траєкторії, змінює прямолінійність поширення через три явища: розсіювання променя, сцинтиляцію та мінливість інфрачервоного (ІЧ) – випромінювання.

Сцинтиляцію та розсіювання можна наочно пояснити як короткочасний імпульс та тривалий час експозиції відповідно.

Розсіювання є наслідком дифракції, тоді як сцинтиляція потребує подальшого дослідження, оскільки пов'язана з коливаннями показника заломлення внаслідок теплових ефектів.

При сцинтиляції на довгих траєкторіях окремі ділянки діють наче слабкі лінзи, відхиляючи промінь протягом певного періоду через інтенсивні переміщення повітря. Це необхідно враховувати при моделюванні.

Проаналізувавши характеристики турбулентності атмосферних аерозолів, виявлено можливості поширення інфрачервоного променя випромінювання. Як показано на рисунку 2, істотними параметрами ІЧ-випромінювання є робоча довжина хвилі λ , фокусна відстань оптичної системи f що враховує застосування розширювача променя, та діаметр пучка променів, які передаються d . Турбулентні характеристики, описані вище, включають: структурний коефіцієнт зміни показника заломлення C_n^2 , внутрішній l_0 та зовнішній L_0 масштаби турбулентних вихорів [4].

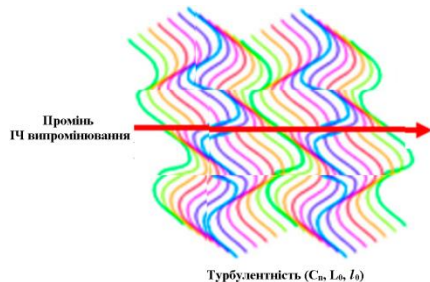


Рис. 2. Характеристика променя ІЧ випромінювання крізь повітряну турбулентність

Для ІЧ променів, які пропускаються крізь великомасштабні турбулентні утворення з пиловими часточками уздовж оптичної траєкторії, де масштаб перевищує довжину хвилі, призводить до їх мінливості. Таке відбувається, коли турбулентні неоднорідності спричиняють слабкий лінзовий ефект, спотворюючи через це траєкторію променя випадковим чином, проте довжина хвилі залишається сталою, як показано на рисунку 3.

Робота В. Колобродова [10] становить основу для опису мінливості пучка шляхом розгляду колімованого променя. Ці дослідження числовими методами довели, що найбільший вплив на

мінливість променя роблять коливання показника заломлення. Це також призводить до інтерференції та створює у просторі розповсюдження мінливі максимуми й мінімуми інтенсивності.

Радіальна дисперсія від цілі виражається як :

$$\sigma_r^2 = 1,90 \times C_n^2 \frac{L^3}{2\omega_0}, \quad (2)$$

де L – відстань до об'єкта опромінення, C_n^2 – структурний коефіцієнт показника заломлення, ω_0 – розмір довжини хвилі променя у точці передачі.

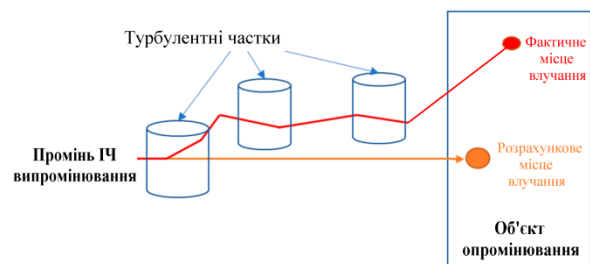


Рис. 3. Блукання ІЧ променя в результаті відхилення турбулентними осередками, більшими за діаметр променя

Як альтернативу виразимо блукання променя як функцію довжини хвилі, λ . Це демонструє незалежний зв'язок із довжиною хвилі:

$$\sigma_r^2 = 1,83 \times C_n^2 \sqrt[6]{\frac{L^{17}}{\lambda}}. \quad (3)$$

З іншого боку, коли ІЧ промінь стикається з турбулентними утвореннями, меншими за його діаметр, спостерігається явище сцинтиляції. При цьому інтенсивність випромінювання деформується, як показано на рисунку 4.

Сцинтиляція відбувається за рахунок того, що дрібні турбулентні неоднорідності виступають наче локальні лінзи, які спотворюють промінь і викликають короточасні коливання його інтенсивності. Це явище є предметом подальшого дослідження, оскільки впливає на якість передачі випромінювання на відстані.

Внаслідок явища сцинтиляції виникає дифракція, яка спричиняє відхилення інтенсивності інфрачервоного променя та утворення у просторі максимумів та мінімумів

щільності ІЧ променів. Це можна математично описати за допомогою:

- логарифмічно-нормального розподілу для незначних флуктуацій;
- гама-гама моделі для середньої та сильної турбулентності.

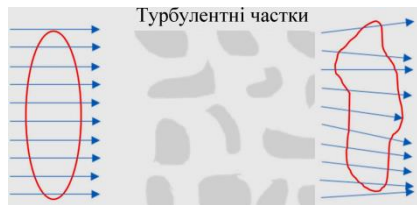


Рис. 4. Профіль інтенсивності променя створюється турбулентними осередками, меншими за діаметр променя

При цьому відхилення від прямолінійного розповсюдження ІЧ-випромінювання багатоспектрального джерела призведе до розподілу окремих хвиль різної довжини на різні кути відхилення.

Турбулентність атмосфери також спричиняє розповсюдження інфрачервоного променя, що перевищує розрахункове на підставі виключно дифракції. Дифракційне розповсюдження променя для круглої апертури з діаметром d визначається функцією фокусної відстані f та довжини хвилі λ випромінювання [9].

$$d_0 = \frac{f\lambda}{d}. \quad (4)$$

На практиці під час експериментів спостерігають турбулентні утворення, що спричиняють посилене та розповсюдження інфрачервоного променя більшої площі. Існують різні математичні моделі, розроблені для прогнозування розсіювання пучка внаслідок розповсюдження, викликаного турбулентністю. Проте, дані моделі ґрунтуються на припущеннях однорідності турбулентності та масштабу її утворень. На практиці ж, у різних точках виробничого приміщення, склад атмосфери може суттєво відрізнятися. Саме тому для адекватного опису процесів необхідно розробляти моделі з урахуванням локальних особливостей турбулентності в різних зонах.

Нами було проведено значну кількість проміжних обчислень для визначення інтенсивності теплового опромінення, а також використання декількох діаграм та номограм. Це ускладнило процес моделювання та

обмежило можливості практичного застосування отриманих результатів.

Тому виникла потреба розробки єдиного комп'ютерного інструментарію, що дозволить в одному алгоритмі стисло формалізувати усі етапи обчислень на основі вхідних параметрів та одержувати результати в зручному для аналізу вигляді. Це спростить практичне застосування математичних моделей теплового випромінювання та дозволить ефективніше розв'язувати актуальні інженерні завдання.

У цій статті ми намагалися узагальнити результати попередніх досліджень з цієї проблематики, поліпшивши модель опромінення шляхом спрощення її параметрів. Метою було зменшити кількість змінних параметрів у моделі для спрощення її параметризації та прогнозувань. Також ми оптимізували протокол вимірів шляхом ефективнішого використання наявного в лабораторії обладнання. Це дозволило суттєво поліпшити умови експериментальної перевірки розробленої моделі опромінення.

Проведені нами експериментальні дослідження інтенсивності теплового випромінювання на робочих місцях показали, що з високою точністю можливо визначити відстань до джерела теплового опромінення та кут його розташування від точки спостереження за умови забезпечення належних вимог безпеки.

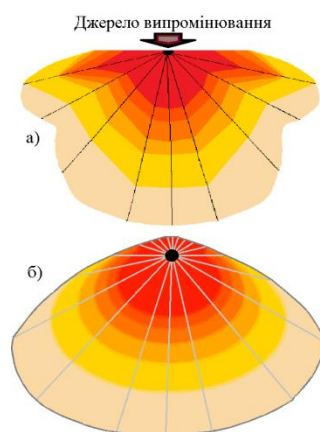


Рис. 5. Діаграми енергетичного профілю розсіювання теплового випромінювання на робочих місцях з виробництва феросплавів: а – розрахункові – модульовані; б – фактичні вимірювання

На рисунку 5 наведено діаграми опромінення робочих ділянок термічних процесів в секторі 360° по сітці координат через 45° у горизонтальній площині, розрахункові (рис. 5, а), виходячи з

конструкції плавильної печі та температури плавки і фактичні вимірювання (рис. 5, б) відповідно.

Результати цих вимірювань демонструють нерівномірний розподіл потоків теплового випромінювання та ділянок підвищеної температури на робочих місцях. На рисунку 6 наведено розрахункові та експериментальні дані зонального розподілу енергії термічних печей.

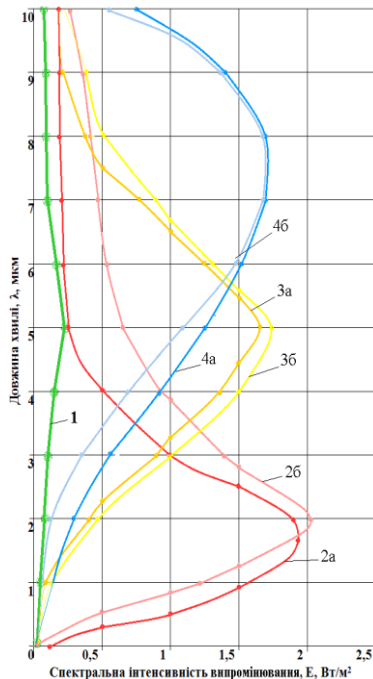


Рис. 6. Експериментальні та розрахункові дані зонального розподілу енергії випромінювання плавильних печей при відчинених вікнах на робочих місцях: 1 – нормативна крива; 2 – крива експериментальних замірів, 2 а – розрахункова крива (феросплави, $t = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$); 3 а – крива експериментальних замірів, 3 б – розрахункова крива (базальт, $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$); 4 а – крива експериментальних замірів, 4 б – розрахункова крива (скло, $t = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Отже, безпосереднє проведення вимірів інтенсивності опромінення в таких умовах є складними, оскільки потрібно враховувати локальні особливості розподілу параметрів термічного поля.

Саме на цих результатах ґрунтується розроблення концепції експериментальної методики та установки, призначеної для детального вивчення терморадіаційного навантаження на працівника в робочій зоні.

Для отримання достовірних даних необхідно розробити спеціальну методику вимірювань з урахуванням варіацій факторів терморадіаційного навантаження на робочому місці. Це дозволить мати комплексне уявлення про фактичні умови праці.

Висновки

1. Запропоновано новий підхід оцінки інтенсивності теплового випромінювання на робочих місцях з урахуванням забрудненості повітряного середовища.

2. Важливою характеристикою є склад газового середовища, оскільки його домішки можуть спотворювати розподіл променевої енергії через інтерференційні та дифракційні ефекти.

3. Присутність пилових часток ускладнює прямолінійний перенос тепла через розсіювання та сцинтиляцію променів, що потребує урахування і удосконалення існуючих моделей.

4. Сцинтиляція впливає на якість передачі випромінювання, що вимагає подальшого вивчення цього явища.

5. Локальні особливості складу атмосфери потребують розробки моделей з урахуванням цих варіацій для конкретного виробництва.

6. Турбулентність, домішки та неоднорідність атмосфери є важливими факторами, які необхідно детальніше дослідити під час проектування захисних засобів з урахуванням забруднення повітряного середовища при моделюванні процесів переносу тепла.

7. Отримані експериментальні дані дозволять підвищити точність оцінки інтенсивності теплового випромінювання на робочих місцях з урахуванням забрудненості повітряного середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Беліков А. С., Стрежекуров Ю. Е., Рагімов С. Ю., Харченко В. В. До питання комплексного впливу негативних та шкідливих факторів на виникнення професійних захворювань. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 6 (018). С. 7–15.
- Стрежекуров Е. С., Шаломов В. А., Рагімов С. Ю., Приходченко В. І. До питання розроблення засобів контролю, випробування теплозахисних матеріалів для захисту працівників ДСНС України. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 6 (271–272). С. 148–155.

3. Escudero C., Martin K., Erkoreka A., Floresb I., Sala J. M. Experimental thermal characterization of radiant barriers for building insulation. *J. Energy Build.* 2013. № 59. 62–72.
4. Ficker T. Numerical study of heat losses of building walls containing reflective foils. *Indoor Build Environ.* 2022. № 31. Pp. 1932–1948.
5. ISO 6946:2017. Building Components and Building Elements – Thermal Resistance and Thermal Transmittance-Calculation Methods-Annex D-Thermal Resistance of Airspaces. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2017.
6. Saber H. H. Overview of Thermal Performance of Air Cavities and Reflective Insulations. In *Thermal Insulation and Radiation Control Technologies for Buildings*. Ko'sny J., Yarbrough D.W., Eds. ASIN: B0B3HN6W4J; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2022. Chapter 3. Pp. 55–82.
7. ASTM C518. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. ASTM-International : West Conshohocken, PA, USA, 2021. Vol. 04.06. Pp. 163–178.
8. Saber H. H., Yarbrough D. W. Advancements in the evaluation of reflective insulation assemblies. *Constr. Specif.* 2022. № 75. Pp. 20–27.
9. Sabatini R., Richardson M. A., Gardi A., Ramasamy S. Airborne laser sensors and integrated systems. *Prog. Aerosp. Sci.* 2015. № 79. Pp. 15–63.
10. Колобродов В. Г., Кравченко І. В., Микитенко В. І. Розроблення та контроль автоматизованих оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі. Київ : Інтерсервіс, 2021. 170 с.

REFERENCES

1. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Rahimov S.Yu. and Kharchenko V.V. *Do pytannia kompleksnoho vplyvu nehatyvnykh ta shkidlyvykh faktoriv na vynyknennia profesiynykh zakhvoriuvan* [On the issue of the complex impact of negative and harmful factors on the occurrence of occupational diseases]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 6 (018), pp. 7–15. (in Ukrainian).
2. Strezhekurov E.Ie., Shalomov V.A., Rahimov S.Yu. and Prykhodchenko V.I. *Do pytannia rozroblennia zasobiv kontroliu, vyprovuvannia teplozakhysnykh materialiv dlia zakhystu pratsivnykiv DSNS Ukrainy* [On the development of control means and testing of heat-protective materials for the protection of SES of Ukraine employees]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 6 (271–272), pp. 148–155. (in Ukrainian).
3. Escudero C., Martin K., Erkoreka A., Floresb I. and Sala J.M. Experimental thermal characterization of radiant barriers for building insulation. *J. Energy Build.* 2013, no. 59, pp. 62–72.
4. Ficker T. Numerical study of heat losses of building walls containing reflective foils. *Indoor Build Environ.* 2022, no. 31, pp. 1932–1948.
5. ISO 6946:2017. Building Components and Building Elements-Thermal Resistance and Thermal Transmittance-Calculation Methods-Annex D-Thermal Resistance of Airspaces. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2017.
6. Saber H.H. Overview of Thermal Performance of Air Cavities and Reflective Insulations. In *Thermal Insulation and Radiation Control Technologies for Buildings*. Ko'sny J., Yarbrough D.W. Eds. ASIN: B0B3HN6W4J, Springer : Berlin/Heidelberg, Germany, 2022; Chapter 3; pp. 55–82.
7. ASTM C518. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. ASTM-International : West Conshohocken, PA, USA, 2021, vol. 04.06, pp. 163–178.
8. Saber H.H. and Yarbrough D.W. Advancements in the evaluation of reflective insulation assemblies. *Constr. Specif.* 2022, no. 75, pp. 20–27.
9. Sabatini R., Richardson M.A., Gardi A. and Ramasamy S. Airborne laser sensors and integrated systems. *Prog. Aerosp. Sci.* 2015, no. 79, pp. 15–63.
10. Kolobrodov V.H., Kravchenko I.V. and Mykytenko V.I. *Rozroblennia ta kontrol avtomatyzovanykh optyko-elektronnykh system dystantsiinoho zonduvannia Zemli* [Development and control of automated optoelectronic systems for remote sensing of the Earth]. Kyiv : Interservis Publ., 2021, 170 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 02.03.2024.