

УДК 697.1:621.178:697.34

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.301024.44.1091

ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ ТА ВЕНТИЛЯЦІЇ ПРАЦІВНИКІВ У РОБОЧИХ ЗОНАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВИРОБНИЦТВ

БЄЛІКОВ А. С.¹, докт. техн. наук, проф.,
СТРЕЖЕКУРОВ Ю. Е.^{2*}, асп.

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

Анотація. Постановка проблеми. На виробництвах металургійних, петругійних та склоплавильних підприємств, де використовуються високотемпературні технологічні процеси, існує проблема перегрівання працівників через значні теплові навантаження. Для запобігання цій небезпеці застосовують великі промислові вентилятори, що встановлюються безпосередньо на виробничих ділянках та забезпечують циркуляцію повітря на значній площі. Проте не завжди їх характеристики, режими роботи та схеми розміщення дають належний ефект охолодження працівників. Необхідне вивчення цієї проблеми для розроблення заходів щодо підвищення ефективності таких пристроїв шляхом їх удосконалення та оптимізації застосування. **Мета статті** – комплексне дослідження можливості застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) для охолодження робочих зон на виробництвах із високими тепловими навантаженнями замість традиційних промислових вентиляторів. До основних завдань належить: проаналізувати сучасні системи охолодження робочих місць та виявлення їх недоліків; дослідити технічні характеристики дронів, що можуть бути використані для цієї мети; розробити концепт алгоритму системи керування дроном-вентилятором для забезпечення роботи в автоматичному режимі із заданими параметрами для робочого місця; провести експериментальну перевірку ефективності охолодження такою системою на лабораторній моделі. **Висновок.** Застосування дронів для локального охолодження робочих зон дозволить підвищити ефективність та гнучкість систем вентиляції порівняно з існуючими. Така система забезпечить оптимальні мікрокліматичні умови безпосередньо для кожного працівника. Енергоефективність такого підходу буде вищою, оскільки використовуватиметься лише необхідна потужність охолодження. Передбачається підвищення рівня охорони праці та зниження професійних ризиків унаслідок зниження температурних навантажень.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (дрони); система охолодження; локальне терморегулювання; промислові виробництва; вентиляція; охорона праці

APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR LOCALIZED THERMOREGULATION AND VENTILATION OF WORKERS AT JOBSITES OF HIGH-TEMPERATURE INDUSTRIES

BIELIKOV A.S.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
STREZHEKUROV Yu.E.^{3*}, Postgrad. Stud.

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 Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@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 Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: staty.mail.ua@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-1791-395X

Abstract. Problem statement. In metallurgical and petrochemical industries using high-temperature technological processes, there exists an issue of overheating of workers due to significant heat loads. To prevent such hazard, large industrial fans are installed directly at production sites providing air circulation over a wide area. However, their performance characteristics, operation modes and placement schemes do not always ensure adequate cooling of employees. There is a need to study this problem in order to develop measures for improving efficiency of such devices

through their enhancement and optimized application. The aim of the article is a comprehensive study of possibilities of applying unmanned aerial vehicles (drones) for cooling of working zones at productions with high heat loads instead of traditional industrial fans. **The main objectives include:** Conducting analysis of modern workplace cooling systems and identifying their shortcomings; Exploring technical characteristics of drones that can be used for this purpose; Developing a concept of algorithm for drone-fan control system to ensure operation in automatic mode with preset parameters for a working post; Experimental verification of efficiency of such system on a laboratory model. **Conclusion.** Application of drones for localized cooling of working zones will increase efficiency and flexibility of ventilation systems compared to existing ones; Such a system will provide optimal microclimatic conditions directly for each employee; Energy efficiency of this approach will be higher as only necessary cooling power will be used; Expected improvement of occupational safety and reduction of professional risks due to lower heat loads.

Keywords: *unmanned aerial vehicles (drones); cooling system; localized thermoregulation; industrial productions; ventilation; occupational safety*

Постановка проблеми. На сучасних виробництвах металургійної та петрургійної галузей, де застосовуються високотемпературні технологічні процеси, існує серйозна проблема перегрівання персоналу на робочих місцях. Високі температурні навантаження негативно впливають на працездатність та здоров'я людей, збільшуючи ризики професійних захворювань.

Для запобігання цьому застосовують великі промислові вентилятори, які створюють штучну вентиляцію на певній території. Проте такі системи мають низку недоліків – низьку гнучкість, неефективність у певних умовах, значні енерговитрати.

Це зумовлює актуальність пошуку більш досконалих інженерних рішень для забезпечення комфортних мікрокліматичних умов на робочих місцях.

Одним із сучасних та перспективних напрямів стало застосування дронів як інтерактивних рухомих локальних систем охолодження.

Аналіз публікацій. Дослідники [1] довели значення як спектрального складу випромінювання, так і конвективної передачі тепла під час формування фізіологічних реакцій тіла людини. Так, проф. В. А. Левицький запропонував концепцію відмінності впливу на людину променевого і конвекційного тепла, яке полягає у різному механізмі сприйняття цих видів тепла. Відмінність полягає в такому: місцем впливу конвекційного тепла стає вся поверхня тіла, яке нагрівається в результаті дотику шкіри з навколишнім повітряним середовищем; місцем дії ІЧ випромінювання стає не тільки шкіра, а й більш глибокі тканини під нею, але тільки ті, які опромінюються безпосередньо та

вторинними джерелами випромінювання за законами заломлення та розповсюдження освітленості.

Наразі найпоширенішими системами механічної вентиляції стали централізовані вентиляторні установки, які забезпечують загальну вентиляцію цехів. Це, як правило, потужні вентилятори аксіального типу, що працюють із низькими швидкостями.

Однак ці системи не забезпечують ефективного охолодження безпосередньо біля робочих місць. Температура повітря на деяких ділянках цехів, особливо поблизу джерел тепла, може значно перевищувати гранично допустимі норми.

Крім того, централізована вентиляція характеризується високою енергоємністю.

Ця проблема особливо гостра, в металургії усіх напрямків, петрургії тощо.

Існуючі локальні системи вентиляторів також не можуть забезпечити ефективну терморегуляцію через недоліки у гнучкості керування.

Таким чином, залишається актуальною проблема розроблення енергоефективних та безпечних рішень для терморегулювання на робочих місцях від конвекційного тепла.

Мета роботи – комплексне дослідження можливості застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) для охолодження робочих зон на виробництвах із високими тепловими навантаженнями замість традиційних промислових вентиляторів.

Основні завдання такі: провести аналіз сучасних систем охолодження робочих місць та виявити їх недоліки; дослідити технічні характеристики дронів, що можуть бути використані для цієї мети; розробити концепт алгоритму системи керування дроном-вентилятором для забезпечення роботи в автоматичному режимі із заданими

параметрами для робочого місця; провести експериментальну перевірку ефективності охолодження такою системою на лабораторній моделі.

Результати досліджень. За результатами досліджень [2–4], традиційні системи місцевої вентиляції переважно мають стаціонарне розташування, тобто не рухаються. Вони призначені для обдування ділянки безпосередньо біля печей чи устаткування з метою охолодження самого устаткування та попередження перегрівання. Проте такі стаціонарні вентилятори не забезпечують ефективного охолодження повітря на робочому місці оператора обладнання. Хоча деякі моделі мають рухому головку для зміни вектора потоку, це не вирішує проблеми через віддалене розташування від джерела тепла.

Традиційні системи місцевої вентиляції розташовуються на відстані 5–10 м від основних джерел тепла – печей, плавильних печей тощо. Така суттєва відстань не дозволяє досягти ефективного охолодження повітря безпосередньо на робочому місці. Навіть за наявності рухомого віяла вентилятора температура повітря на відстані 1–2 м перевищує допустимі норми на 10–15 °С.

Це пояснюється швидким розсіюванням теплового потоку на такій відстані від джерела. Тому діючі системи не можуть забезпечити комфортні умови праці безпосередньо біля осередків високих температур. Це одна з причин їх низької ефективності.

Досліджено [5–8] характеристики вентиляторів, що використовуються на типових металургійних та петрургійних виробництвах:

- відцентрові вентилятори потужністю 5–25 кВт, які застосовуються для загальної вентиляції цехів;
- аксіальні вентилятори потужністю 0,5–1,5 кВт для місцевої вентиляції.

Виміряно:

- інтенсивність повітряного потоку – від 0,5 до 4 м/с;

– розбіг швидкостей на різних відстанях у напрямку робочого місця 1–3 м від вентилятора, що характеризується високою нерівномірністю.

Проведено вимірювання температури та швидкості повітря на відстані 0,5–2,0 м від джерела тепла. Значення перевищували гранично допустимі норми на 15–20 °С, що створювало дискомфорт для працівників.

Підсумовуючи результати досліджень, можна зробити висновок, що існуючі системи механічної вентиляції на промислових підприємствах мають недоліки:

- віддалене розташування від джерела тепла;
- нерівномірний розподіл температурних полів;
- неможливість точного контролю та оптимізації обдування;
- не забезпечують належного терморегулювання безпосередньо на робочих місцях.

У зв'язку з цим доцільним бачиться впровадження інноваційних підходів, зокрема, застосування рухомих локальних систем охолодження на базі безпілотних літальних апаратів (квадрокоптерів).

Така система, розміщена безпосередньо над робочим місцем, здатна забезпечити точне контрольоване охолодження шляхом спрямованого потоку повітря. Це дозволить оптимізувати мікроклімат праці та підвищити безпеку операцій.

Отже, ми пропонуємо використовувати стабілізований квадрокоптер для вентиляції робочого місця і зменшення передачі конвекційного тепла робітнику.

Принцип роботи запропонованої системи охолодження повітря полягає у створенні квадрокоптера із системою стеження за рухомих об'єктом (у нашому випадку працівником, радіусом польоту над ареалом основного робочого місця), а також із куполом над квадрокоптером для захвату охолодженого сухого чистого повітря і направлення його безпосередньо над працівником. Загальна схема запропонованої концепції показана на рисунку 1.

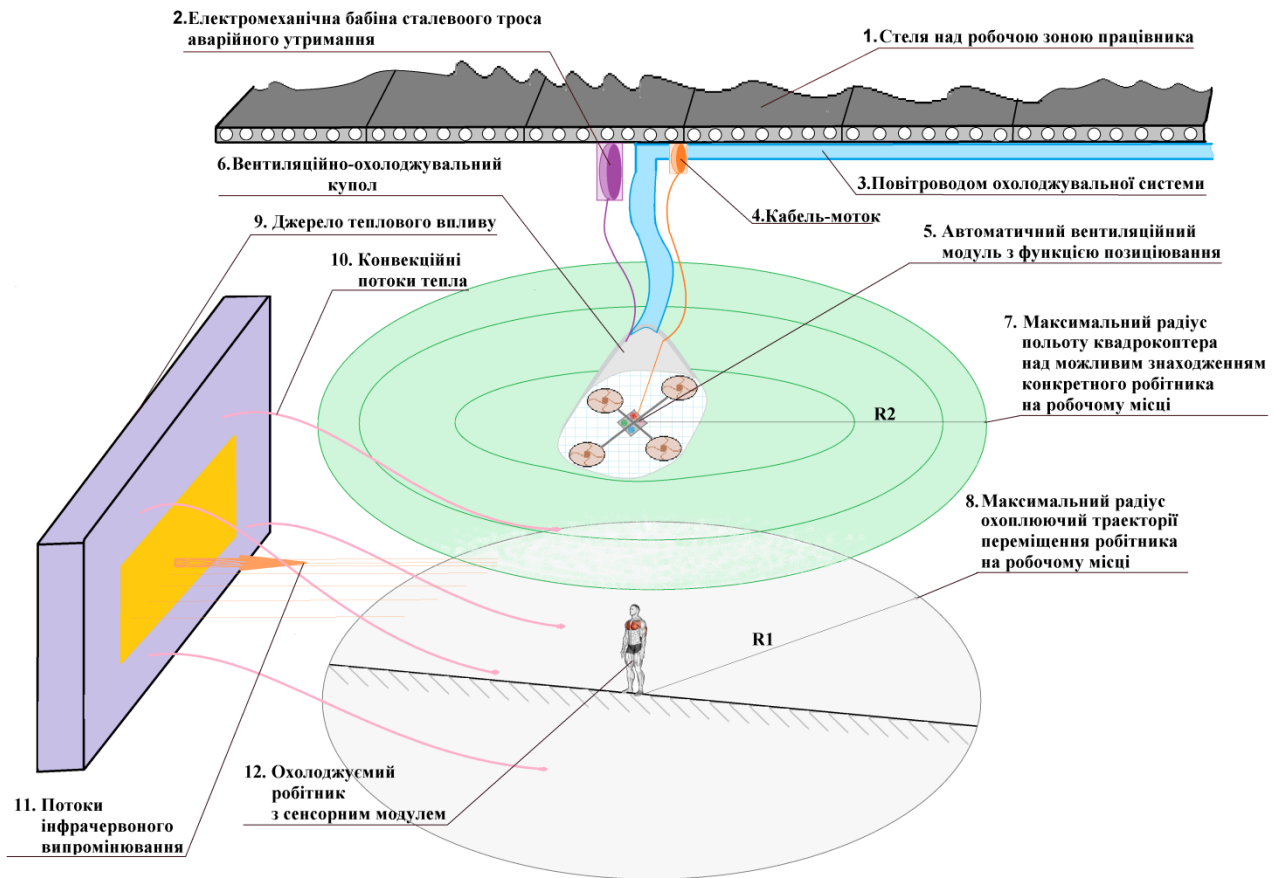


Рис. 1. Загальна схема концепції індивідуальної позиційної системи вентиляції для людини на робочому місці

Принцип роботи даної схеми полягає у тому, що працівник 12 на робочому місці, виконуючи технологічні операції згідно з посадовими обов'язками переміщується по цеху по непрямоїній траєкторії, яку не можна описати простою геометричною фігурою, але можна узагальнити в певний максимальний радіус відносно геометричного центра траєкторій переміщення 8.

Також деяке присутнє у цеху технологічне обладнання являє собою високотемпературне джерело 9 конвекційних теплових потоків 10 та інфрачервоного випромінювання 11.

На робітнику 12 закріплено радіомодуль стеження, який дозволяє квадрокоптеру 5 точно позиціонуватись над людиною. Квадрокоптер 5 обладнаний куполом 6, до якого підведений повітропровід 3 з очищеним та охолодженим повітрям, який має підвід зі стелі 1.

Електроживлення квадрокоптера організоване від стаціонарної мережі живлення через систему кабель-моток 4, що має економічну перевагу перед

аккумуляторними системами живлення, який закріплено на стелі 1.

Система загальної безпеки квадрокоптера від падіння у випадку аварійного відключення живлення або зношування лопатей забезпечується прикріпленням до нього сталевим тросом в електромеханічній бобіні з механічними гальмами у нормально затисненому стані 2, яка також закріплена на стелі 1.

На рисунку 2 показано детальну конструкцію автоматичного вентиляційного модуля з функцією позиціонування на базі квадрокоптера.

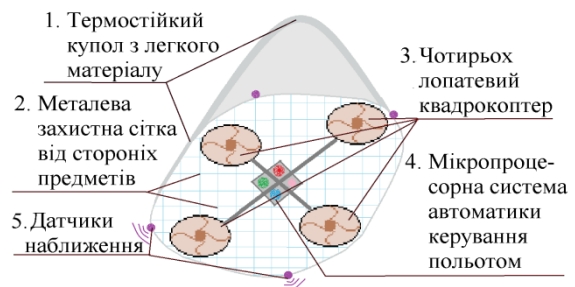


Рис. 2. Детальна конструкція автоматичного вентиляційного модуля

Основу автоматичного вентиляційного модуля (АВМ) складає чотирилопатевий

квадрокоптер 3, виготовлений з термостійкого пластику, який має розміри не менше 2×2 м, що забезпечує над людиною ефект «каверни».

До його основи закріплений купол із легкого негорючого матеріалу 1, у який входить дріт електроживлення, сталевий трос аварійного утримання та повітропровід.

Для забезпечення більшої надійності захисту людини нижня частина купола має захисну металеву сітку з розміром вікна, що не завадить аеродинамічним властивостям повітряного потоку, але забезпечить захист від потрапляння до лопатей сторонніх предметів у разі аварійної ситуації.

Купол по периметру з боків обладнаний датчиками наближення 5, які виключають аварійні зіткнення вентиляційного модуля не тільки з об'єктами та конструкціями приміщення, а й з іншими вентиляційними модулями у випадку перехрещення робочих зон різних працівників, які перебувають поблизу.

Мікропроцесорна система автоматики має декілька програмних забезпечень та алгоритмів забезпечення роботи:

– класична система керування польоту для плоскопаралельного польоту в певній області за алгоритмом «ПІД-регулятора»;

– алгоритм та математична модель для забезпечення, за допомогою датчика висоти, підтримки висоти польоту над працівником не менше 2 м та швидкості повітря на рівні його голови не більше ніж 2,5 м/с;

– алгоритм обробки даних із датчиків наближення та обходження перешкод забезпечує максимальне обдування працівника;

– алгоритм стеження по сигналу радіомодуля для максимального позиціонування робітника під центром купола.

Висновки.

1. Застосування автоматичного вентиляційного модуля з функцією позиціонування дозволяє забезпечити більш якісну вентиляцію приміщення порівняно зі стаціонарними і маломаневреними пристроями. Завдяки можливості цілеспрямованого переміщення над робочими зонами забезпечується набагато більша ефективність розсіювання тепла.

2. Використання сенсорної системи відстеження положення «Охолоджуваного робітника із сенсорним модулем» дозволяє автоматично регулювати траєкторію переміщення АВМ відповідно до руху персоналу, максимально точно забезпечуючи потрібну кількість охолоджуваного повітря.

3. Додаткове використання ефекту «каверни» над входом у приміщення доповнює ефект охолодження шляхом запобігання витоку нагрітого повітря під час відкривання/закривання дверей.

4. Запропонована система дозволить суттєво поліпшити мікроклімат у приміщеннях із високотехнологічним обладнанням та створити комфортні умови праці персоналу.

5. Пропоноване технічне рішення проходить процедуру авторського свідчення, але подальші дослідження мають перспективу бути спрямованими на розроблення оптимальних алгоритмів роботи АВМ із робітниками та удосконалення його конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стрежекуров Э. Е. Комплексное решение задач теплозащиты рабочих мест и охраны окружающей среды от теплового загрязнения. В кн.: Приборы для экологии – 92. Ужгород, 1992.
2. Біляєв М. М. Математичне моделювання розрахунку параметрів мікроклімату в робочих зонах. *Проблеми математичного моделювання: матер. Всеукр. наук.-метод. конф.* Кам'янське, 2020. С. 6–8.
3. Шаленний В. Т., Шаломов В. А., Папірник Р. Б. та ін. Напрямки удосконалення сучасних технологій, матеріалів і обладнання із врахуванням енергетичних витрат та умов праці будівельних робітників. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение.* 2010. Вып. 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 (231–232). С. 10–17.

5. Стрежекуров Ю. Е. Аналіз впливу негативних та шкідливих факторів на виникнення професійних захворювань. *Безпека життєдіяльності в XXI столітті : матер. студ. наук.-практ. конф.* Дніпро, 2024.
6. Стрежекуров Ю. Е. Ukrainian research schools negative thermal factors at workplaces. *Виклики та проблеми сучасної науки : зб. наук. пр.* Дніпро, 2023. С. 598–610.
7. Беліков А. С., Стрежекуров Ю. Е., Шаломов В. А., Рагімов С. Ю. До питання комплексного впливу негативних та шкідливих факторів на виникнення професійних захворювань. *Український журнал будівництва та архітектури.* 2024. № 1 (019). С. 26–32.
8. 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 (018). С. 7–15.

REFERENCES

1. Strezhekurov E.E. *Kompleksnoie reshenie zadach teplozashchity rabochikh mest i okhrany okruzhaiushchei sredy ot teplovogo zagriazaniia* [A comprehensive solution to the problems of thermal protection of workplaces and environmental protection from thermal pollution]. *V kn. : Priboru dlia ekologii–92* [In the book : Devices for Ecology–92]. Uzhgorod, 1992. (in Russian).
2. Bilaiev M.M. *Matematichne modeliuvanriia rozrachku parametriv mikroklimatu v robochikh zonakh* [Mathematical modeling of the calculation of microclimate parameters in working areas]. *Problemu Matematichnogo Modeliuвання : Materialy vseukrains'koi naukovo-metodichnoi konferentsii* [Problems of Mathematical Modeling : materials of the all-Ukrainian scientific and methodological conference]. Kam'ians'ke, 2020, pp. 6–8. (in Ukrainian).
3. Shalennuy V.T., Shalomov V.A., Papirnik R.B. and oth. *Napriamki udoskonalennia suchasnykh tekhnologiy, materialiv i obladannia iz vrakhuvanniam energetychnykh vutrat ta umov pratsi budivel'nykh robotnykiv* [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, vol. 52, pp. 127–131. (in Ukrainian).
4. Bielikov A.S., Shalomov V.A., Ragimov S.Yu. and Mukhaylov M.O. *Fizychne modeliuвання zminu energetychnogo vplyvu na robochi mista z urakhuvanniam vysokotemperaturnogo vyprominiuvannia* [Physical modeling of changes in energy impact on workplaces taking into account high-temperature radiation]. *Visnik Prydniprovskoi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, no. 4 (231–232), pp. 10–17. (in Ukrainian).
5. Strezhekurov Yu.E. *Analiz vplyvu nehatyvnykh ta shkidlyvykh faktoriv na vynyknennya profesiynykh zakhvoryuvan'* [Analysis of the influence of negative and harmful factors on the emergence of occupational diseases]. *Bezpeka zhyttyediyal'nosti v KHKHI stolitti : materialy students'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* [Life Safety in the XXI Century : materials of the student scientific and practical conference]. Dnipro, 2024. (in Ukrainian).
6. Strezhekurov Yu.E. Ukrainian research schools negative thermal factors at workplaces. *Vyklyky ta problemy suchasnoyi nauky : zbirnyk naukovykh prats'* [Challenges and Problems of Modern Science : collection of scientific works]. Dnipro, 2023, pp. 598–610. (in Ukrainian).
7. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Shalomov V.A. and Ragimov S.Yu. *Do pytannya kompleksnoho vplyvu nehatyvnykh ta shkidlyvykh faktoriv na vynyknennya profesiynykh zakhvoryuvan'* [To the question of the complex impact of negative and harmful factors on the emergence of occupational diseases]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no.1 (019), pp. 26–32. (in Ukrainian).
8. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Ragimov S.Yu. and Kharchenko V.V. *Do pytannya kompleksnoho otsinky vplyvu teplovoho vyprominyuvannia na robochikh mistyakh z urakhuvanniam zabrudnennia povitryanoho seredovyscha* [To the question of the complex assessment of the impact of heat radiation at workplaces taking into account air pollution]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 6 (018), pp. 7–15. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 02.09.2024.