

DOI: 10.32347/2786-7269.2024.8.328-337

УДК 697.9:621;697:621

Мироненко О.П.,

myronenko.oleksandr@gmail.com, ORCID: 0009-0007-9814-895X,

Київський національний університет будівництва і архітектури

АНАЛІЗ СТУПЕНЯ ВИВЧЕНОСТІ ТА СВІТОВОГО ДОСВІДУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ МІКРОКЛІМАТУ ДЛЯ КАБІН КРАНІВНИКІВ В ЦЕХАХ ЗІ ЗНАЧНИМИ ТЕПЛОАДЛИШКАМИ

Досліджується ефективність енергозберігаючих систем автономного клімат-контролю для кабін операторів кранів у умовах високої температури. Піддаються аналізу різні підходи та методи з метою забезпечення комфортних умов для операторів. Результати дослідження можуть бути корисні для підприємств, де важливо забезпечити оптимальний клімат у кабінах кранів.

Ключові слова: енергозберігаючі системи; автономний клімат-контроль; кабіни операторів кранів; висока температура.

Постановка проблеми. Оператори кранів відіграють важливу роль у промислових умовах, маневруючи важкими вантажами з точністю та безпечністю. Їхня робота часто відбувається в закритих кабінах, розташованих відносно високо над землею. Однак у цих кабінах може стати нестерпно жарко, особливо в середовищах, де надлишок тепла генерується обладнанням, процесами чи зовнішніми факторами, що знаходяться поблизу. Завдання полягає в підтримці комфортного мікроклімату для кранівників без шкоди для енергоефективності.

Найбільшим фактором виділення надлишків тепла в кабіні крана - є тепло навколишнього середовища: у цехах із високою температурою навколишнього середовища (часто в металообробці, ливарних цехах та інших галузях важкої промисловості) кабіна поглинає тепло з навколишнього середовища.

Наслідками накопичення тепла є дискомфорт оператора: надмірне тепло впливає на комфорт оператора, його концентрацію та загальне самопочуття. Потовиділення, втома та зниження когнітивних функцій можуть поставити під загрозу промислову безпеку. Традиційні системи клімат-контролю, такі як кондиювання повітря, є енергоємними. Охолодження кабіни в нагрітому середовищі потребує значних витрат електроенергії.

Нові можливості для вирішення проблеми нормалізації мікроклімату, звичайно, з'являються з розвитком інформаційно-телекомунікаційних

технологій, засобів і методи математичного та комп'ютерного моделювання. Математичне та комп'ютерне моделювання тепломасообмін і визначення термодинамічних параметрів, рухливість повітряних потоків в кабіні крана є важливим етапом на шляху проектування, а кліматична система з можливістю управління нею в залежності від зміни параметрів навколишнього середовища.

Метою статті є аналіз вивчених математичних моделей теплових радіації, газодинаміки та тепломасообміну, а також скінчено-елементні 3D моделі враховуючи взаємозв'язок теплообміну організму людини та мікрокліматичними факторами кабіні металургійного крана. Вирішуючи завдання енергоефективних систем мікроклімату для кабін кранів, ми сприяємо як благополуччю оператора, так і екологічній стійкості. Це дослідження має на меті функціональне покращення контролю мікроклімату кабіні крана. його дизайну та підвищення безпеки оператора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досліджуючи кабінні технологічних машин, де спостерігається несприятливий мікроклімат, група дослідників[2] звертають увагу на ефективність систем кондиціонування повітря в кабінах металургійних кранів [2]. Зокрема, вони здійснили адаптацію відомих математичних моделей теплового випромінювання та моделі суцільного середовища на основі рівнянь Нав'є-Стокса та теплообміну до розв'язання задачі визначення термодинамічних параметрів у кабінах технологічних машин. «Використання дозволу моделювання значно прискорює процес проектування» [2]

Моделювання автоматизованого клімат-контролю на основі штучного інтелекту з енергоспоживанням, присвячене дослідження Ш. Джастіна. [7]. Також, проблематика нашого дослідження в різних аспектах висвітлена в наукових доробках О. Возняка, А. Кравця, О. Маковського, Х. Митронюка, Ю. Масуді, А. Тіварі, А. Шлютера та ін.

Основна частина. Локалізований обігрів і охолодження: системи мікроклімату покращують час до здобуття комфорту, одночасно будучи енергоефективними [8]. У цих системах використовуються мікрокліматичні пристрої в поєднанні з електричною системою опалення, вентиляції, вентиляції та кондиціонування повітря або теплового насоса. Цей підхід може надати додаткові переваги, такі як розширена персоналізація разом із економією енергії та скороченням часу для досягнення комфорту [8].

Розроблені в опрацьованих дослідженнях тривимірні 3D-моделі кабін металургійного крана та джерел теплового випромінювання, що впливають на них, цеху металургійного виробництва електросталеплавильного заводу спочатку розраховували тепловий потік на поверхнях кабіні, а потім визначали параметри мікроклімату у її внутрішньому об'ємі, де розташоване робоче місце

оператора. Граничні умови моделей теплового впливу задавалися температурами джерел. Враховувалися розміри джерел випромінювання та об'єктів опромінення та їх взаємне розташування. Розрахункові теплові потоки на зовнішніх поверхнях стін, температуру навколишнього повітря та коефіцієнти тепловіддачі задали при розрахунку температурних полів всередині кабін технологічних машин як граничні умови. Оскільки в області стін передбачається великий градієнт полів, обов'язковою вимогою дослідження було будівництво стінових шарів. Розрахункова сітка скінченних елементів була представлена комірками у формі тетраедрів. Проблема була вирішена в статичній установці. Температуру зовнішнього повітря встановили рівною 45°C. Сонячне випромінювання приймалося у вигляді теплового потоку від сонця (800 Вт/м²), спрямованого під кутом 45 °С до kabіни.

Розрахунки проводились для металургійного крана з різними варіантами роботи джерел тепла. На рис.1 зображені стінки kabіни, повернуті в сторону металургійної печі; можна спостерігати максимальні теплові потоки, що виникають на підлозі kabіни крана.

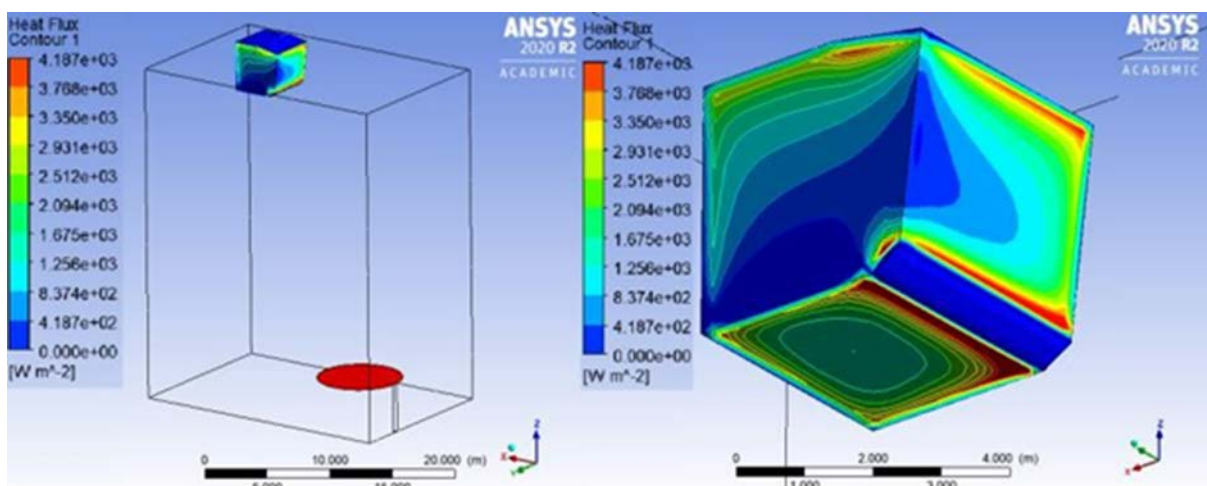


Рис.1. Кінцево-елементна модель kabіни крана під дією теплового навантаження від ливарної печі

Температури повітря біля зовнішніх поверхонь, які становили 36,5 °С для металургійного крана, в свою чергу, є граничними умовами для подальшого розрахунку температури повітря всередині кабін. Результати розрахунків показали, що максимальному тепловому випромінюванню піддаються стіни kabіни, повернуті до джерел тепла, це підлога, передня і права поверхня.

На основі розроблених кінцево-елементних 3D моделей кабін в дослідженні[2] було уточнено методику розрахунку та вибору основного обладнання кліматичної системи кабін кранів. Також були розраховані елементи термозахисту, щоб зменшити навантаження на кліматичну систему.

При цьому при використанні методу діаграм теплового опромінення зменшення теплового потоку тепловідбивним екраном або склопакетом розраховується з урахуванням приведеної випромінювальної здатності. Результати оцінки ефективності елементів теплового захисту кабіни металургійного крана наведено на рис. 2.

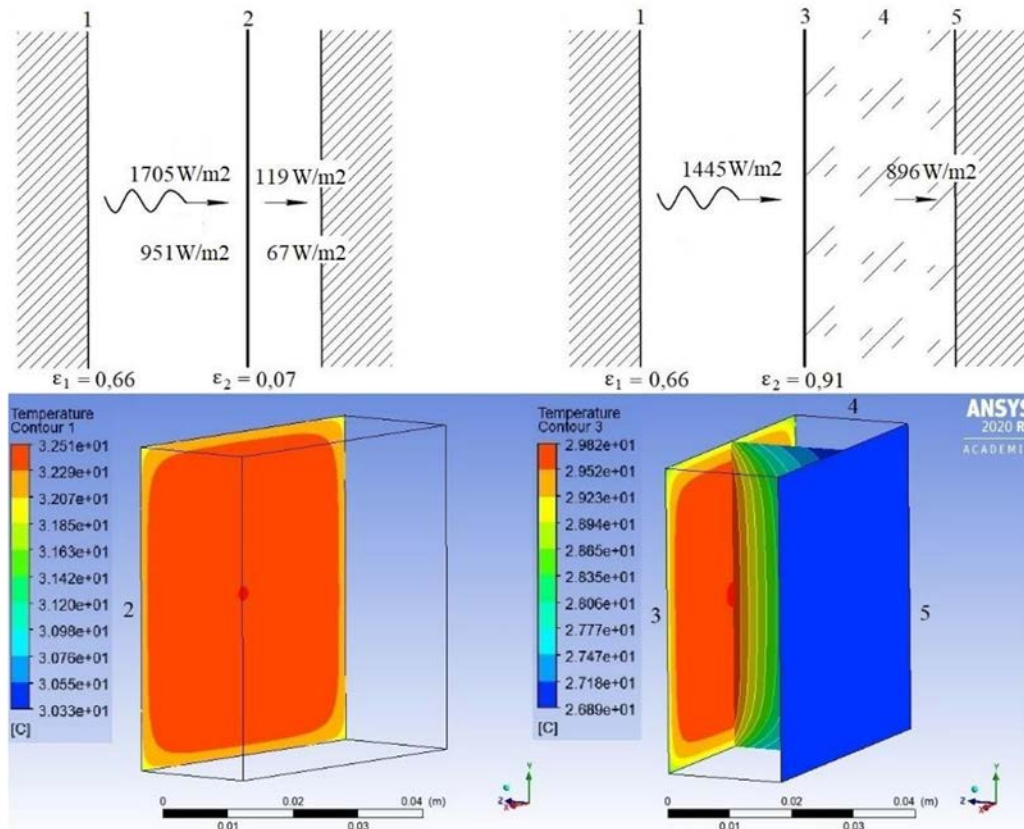


Рис. 2. Зменшення теплового випромінювання і температури: а) з тепловідбивним екраном, б) зі склопакетом з повітряним зазором. 1 — джерело випромінювання, 2 — екран, 3, 5 — перший і другий ряд стекол, 4 — повітряний зазор.

Так, алюмінієвий екран товщиною 3 мм, встановлений на зовнішній поверхні підлоги та правій стінці кабіни металургійного крана, знизить рівень теплового випромінювання до 119 Вт/м² внаслідок низької емісійної здатності алюмінію ($\epsilon = 0,07$). При цьому температура за екраном досягне 32,4°C, що на 4,1°C нижче температури зовнішньої поверхні підлоги та правої стінки кабіни до встановлення тепловідбивного екрана. Після заміни фасадного одинарного склопакета на подвійний, з товщиною кожного скла 3 мм, з товщиною повітряного зазору 20 мм теплопроникність дещо зменшилася (в 1,6 рази) і склала 896 Вт/м². З боку, завдяки низькій теплопровідності скла і повітря температура на поверхні другого ряду стекол може бути знижена на 9,5°C. В результаті після впровадження елементів термозахисту тепловий потік через огорожувальні поверхні кабіни металургійного крана зменшиться в 1,6 рази.

Надходження тепла від джерел тепла в сталеплавильному цеху зменшиться в 2,1 рази. Це дозволить усунути надмірне навантаження на проєктовану кліматичну систему. Таким чином, загальна теплова потужність kabіни металургійного крана становитиме 3229 Вт

Дослідження яке вивчає взаємозв'язок між теплообміном організму людини і мікрокліматичними факторами в приміщенні показує результати розрахунків взаємозв'язку параметрів повітря в приміщенні, за прийнятими початковими даними, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 [1]

Взаємозв'язок параметрів повітря у приміщенні

Параметри	Система забезпечення мікроклімату				Система кондиціонування повітря (СКП)				Система вентиляції (СВ)			
	25	30	35	38	22	24	26	28	25	27	29	31
Зовнішня температура $t_z, ^\circ\text{C}$	25	30	35	38	22	24	26	28	25	27	29	31
Внутрішня температура $t_{в}, ^\circ\text{C}$	19	22	25	26	25	27	29	31	27	27	31	33
Радіаційна температура $t_p, ^\circ\text{C}$	21,7	25,4	29,1	30,9	27	27	31	33	27	27	31	33
Швидкість руху повітря $V, \text{ м/с}$	0,15	0,28	0,72	1,3	0,5	1,0	2,3	7,0	0,5	1,0	2,3	7,0

Як видно із наведених розрахункових даних, швидкість руху повітря залежить від внутрішньої температури (СВ або СКП), а також від радіаційної температури і променевої сонячної теплоти, які залежать від теплоізоляції огорожень, затінювальних пристроїв тощо. Підтримання швидкості руху повітря в обслуговуваній зоні в межах 2–7 м/с при зовнішній температурі 26–28 $^{\circ}\text{C}$ є реально складним завданням, тому при обладнанні приміщення системою вентиляції слід досягати максимального зниження радіаційної температури. Знайдені швидкості руху повітря в обслуговуваній зоні є початковими даними для розрахунку повітродозподілу. Враховуючи короткочасність перебування людей, можна допустити деяку напруженість процесу терморегуляції, тобто незначний дискомфорт теплового стану приміщення.

Крім цього, при розрахунку теплового стану слід враховувати інтенсивність роботи людей (табл. 2).

Таблиця 2 [1]

Явна тепловіддача від людини, $Q_a, \text{ Вт}$

Інтенсивність Роботи	Температура середовища t					
	10 $^{\circ}\text{C}$	15 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$	35 $^{\circ}\text{C}$
Стан спокою	130 Вт	105 Вт	80 Вт	55 Вт	35 Вт	0 Вт
Легка робота	150 Вт	125 Вт	95 Вт	65 Вт	37 Вт	0 Вт
Робота середньої важкості	170 Вт	140 Вт	105 Вт	71 Вт	43 Вт	0 Вт
Важка робота	185 Вт	150 Вт	115 Вт	75 Вт	48 Вт	0 Вт

Створення універсальних діаграм параметрів комфорту як об'єднання взаємозв'язку між всіма факторами мікроклімату описано вище, а також

розрахунок будь-яких значень кожного фактора з неперервного інтервалу як розв’язок цієї задачі.

Першим кроком є таблиці, в яких наведено дані метаболічної теплоти відповідно до виконуваної роботи і термічні властивості одягу. Вони показують відношення між цими параметрами і є базовими для створення діаграм. [1].

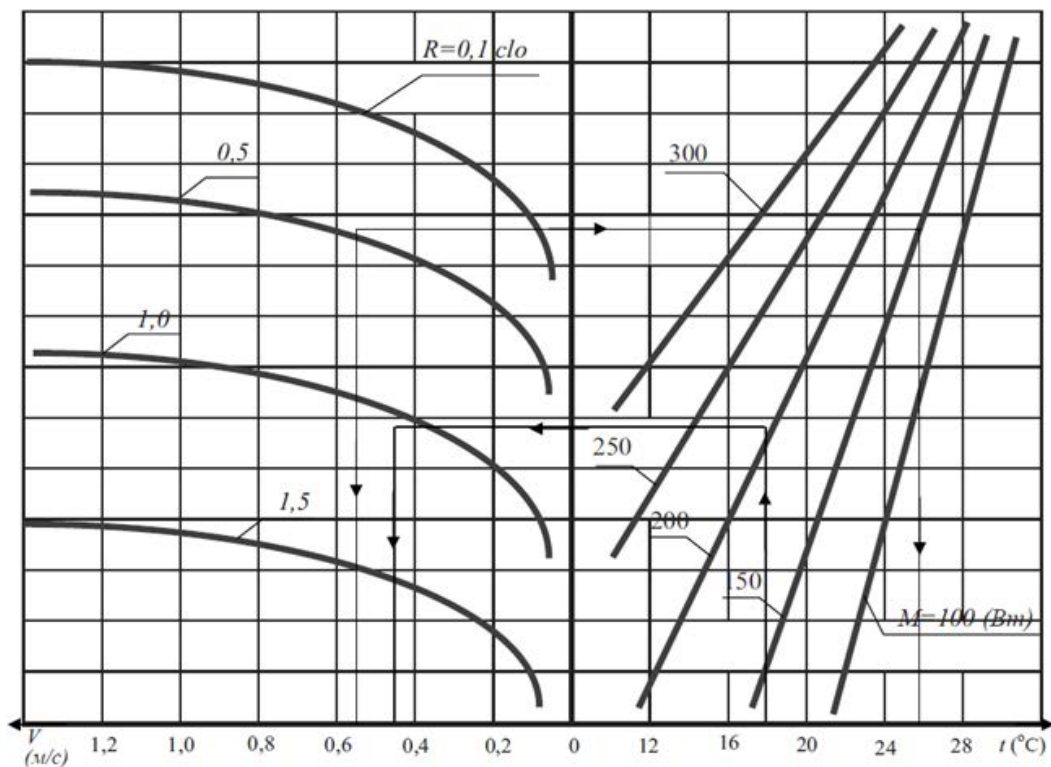
Припустимо, що знаходження швидкості руху повітря в приміщенні є кінцевим завданням. Діаграма є функцією швидкості руху повітря від трьох незалежних визначних факторів: 1 – теплової ізоляції одягу R , 2 – інтенсивності роботи (метаболічна теплота) M ; 3 – температура навколишнього середовища t .

Отже, констатуємо, що швидкість руху повітря V залежить від цих визначених факторів, описаних вище, тобто $V = f(M, t, R)$.

Таблиця 3 [1]

Термічний опір різного виду одягу

№	Одяг	Термічний опір R , [clo]
1	Шорти	0,1
2	Шорти, сорочка на короткий рукав	0,3-0,4
3	Літні штани, сорочка на короткий рукав	0,5
4	Літні штани, легка білизна, шкарпетки, бавовняні сорочка і штани	0,6
5	Легка білизна, бавовняні сорочка і штани, шкарпетки, мешти	0,7
6	Костюм	1,0
7	Традиційний європейський одяг: бавовняна білизна з довгим рукавом, сорочка, краватка, шерстяні шкарпетки, мешти, костюм з плащем	1,0-1,5



Універсальна діаграма комфорту $V = f(t, M, R)$

Рис.4. Трифакторна діаграма комфорту [1]

Для корисності розрахунку, дослідники [8] пропонують універсальну діаграму параметрів комфорту (див. рисунок), яка ґрунтується на дослідженнях і поєднує функціональні залежності між різними параметрами мікроклімату. Ця трифакторна діаграма, що зображена на рисунку, створена за допомогою застосування традиційних математичних методів для створення діаграм. Вона замінює деякі двофакторні діаграми з і дає змогу визначити швидкість руху повітря V залежно від трьох факторів, які можуть змінюватись одночасно: температура повітря в приміщенні t_B , метаболічна теплота M і теплоізоляційні властивості одягу R .

$$V = (0,45 + 0,18R) \left(2,2R - 3,82 + 9,89 \lg \left(\frac{M}{200} - 0,37 \right) + \frac{0,38 t_n}{\frac{M}{200} + 0,38} \right)^2 \quad (1), [1]$$

Висновки та перспективи подальших досліджень. Зазначимо, що проблема енергоефективних автономних систем мікроклімату для кабін кранівників в цехах зі значними теплонадлишками ще недостатньо досліджена як в українській так і зарубіжній науковій спільноті. Збалансування комфорту оператора та енергоефективності в кабінах кранівника є багатограним завданням. Дослідники, інженери та зацікавлені сторони галузі повинні співпрацювати для розробки інноваційних рішень. Вирішуючи цю проблему, ми можемо створити безпечніші та стійкіші робочі умови для кранівників, мінімізуючи втрату енергії. Запропоновані технології та рішення в поєднанні можуть значно підвищити енергоефективність систем мікроклімату кабін кранів у цехах. Важливо відзначити, що ефективність цих рішень може змінюватись залежно від конкретних умов і вимог кожного окремого цеху. Загалом вектор подальших досліджень по даній темі буде направлений на вивчення та впровадження дослідної практичної моделі в трьох основних напрямках:

1. Матеріали та конструкція кабіни, яка забезпечує мінімізацію теплового впливу оточуючого середовища шляхом внесення конструктивних змін в існуючі кабіни та при проектуванні нових.

2. Впровадження засобів штучного інтелекту для управління мікрокліматом в кабіні оператора (кранівника) враховуючи взаємозв'язок між теплообміном організму людини і мікрокліматичними факторами, а саме регулювання необхідної швидкості руху повітря, яку можна визначити завдяки діаграмі (див. рис.4) або рівнянню (1).

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. О.Т. Возняк. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ВНУТРІШНЬОГО МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕННЯ НА ТЕПЛООБМІН ЛЮДИНИ. Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра теплогазопостачання і вентиляції.
2. Маковський О.М. Основи експлуатації і технічна діагностика вантажопідійомних кранів: монографія. Краматорськ: ДДМА, 2009. 164 с
3. Bulygin Y., Maslensky V., Shchekina E., Ashikhmin D. Finite element simulation for microclimate normalization at the crane operator workplace. 2023 E3S Web of Conferences 376(1). URL: <http://surl.li/umwtj> (дата звернення 12.05.2024)
4. Chabane F, Noureddine M., A. Brima, J. Experimental study of thermal efficiency of a solar air heater with an irregularity element on absorber plate. 2018. 36(3), P. 855–860. <https://doi.org/10.18280/ijht.360311>
5. Nia F., Nassab S., Ansari A., J. Therm, Transient combined natural convection and radiation in a double space cavity with conducting walls, 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072917318896> (дата звернення 05.06.2024)
6. Park N., Ko S. Large eddy simulation of turbulent premixed combustion flows over backward facing step. Vol. 25. P. 713-719 (2011) <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0106-8>
7. Shekaina Justin Sh. Modeling of Artificial Intelligence-Based Automated Climate Control with Energy Consumption Using Optimal Ensemble Learning on a Pixel Non-Uniformity Metro System. 2023. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/18/13302> (дата звернення 24.03.2024)
8. Tiwari, A., Varandani, V., Mandali, S., and Arsenault, J., "Design of a Human-Centric Auto-Climate Control System for Electric Vehicles," SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility. 2023. 5(2):748-761. <https://doi.org/10.4271/2022-01-0194>. ANALYSIS OF THE DEGREE OF STUDY AND WORLDWIDE EXPERIENCE OF ENERGY-EFFICIENT AUTONOMOUS MICROCLIMATE SYSTEMS FOR OPERATORS' CABS IN SHOPS WITH SIGNIFICANT HEAT SURPLUS

Myronenko Oleksandr

Kyiv National University of Construction and Architecture

**ANALYSIS OF THE DEGREE OF STUDY AND WORLDWIDE
EXPERIENCE OF ENERGY-EFFICIENT AUTONOMOUS
MICROCLIMATE SYSTEMS FOR OPERATORS' CABS IN SHOPS WITH
SIGNIFICANT HEAT SURPLUS**

The article examines the effectiveness of energy-saving autonomous climate control systems for cabins of crane operators in high temperature conditions. An

analysis of various comfortable approaches and methods for ensuring conditions for operators is suitable. The results of the research can be useful for enterprises where it is necessary to ensure an optimal climate in the cabins of cranes.

Crane operators perform an important role in industrial settings, maneuvering heavy loads with precision and safety. Their work is often carried out in closed cabins, located separately high above the ground. However, these cubicles can become unbearably hot, especially in environments where excess heat is generated by nearby equipment, processes, or external factors. The task is to maintain a comfortable microclimate for crane operators without compromising energy efficiency.

The biggest factor in the release of excess heat in the crane cabin is ambient heat: in shops with high ambient temperature (often in metalworking, foundry shops and other branches of heavy industry), the cabin absorbs heat from the environment.

Conclusions and prospects for further research. It should be noted that the problem of energy-efficient autonomous microclimate systems for crane operators' cabins in workshops with significant excess heat has not yet been sufficiently investigated both in the Ukrainian and foreign scientific communities. Balancing operator comfort and energy efficiency in crane cabins is a multifaceted task. Researchers, engineers and industry stakeholders must collaborate to develop innovative solutions. By solving this problem, we can create safer and more sustainable working conditions for crane operators while minimizing energy loss. The proposed technologies and solutions in combination can significantly increase the energy efficiency of crane cabin microclimate systems in workshops. It is important to note that the effectiveness of these solutions may vary depending on the specific conditions and requirements of each individual workshop. In general, the vector of further research on this topic will be directed to the study and implementation of the experimental practical model in three main directions:

Materials and construction of the cabin, which ensures the minimization of the thermal impact of the surrounding environment by making structural changes to existing cabins and when designing new ones.

Implementation of artificial intelligence tools for managing the microclimate in the cabin of the operator (crane operator), taking into account the relationship between the heat exchange of the human body and microclimatic factors, namely the regulation of the necessary air movement speed, which can be determined thanks to the diagram

Keywords: energy-saving systems; autonomous climate control; cabins of crane operators; high temperature.

REFERENCES

1. O.T. Vozniak. VPLYV PAPAMETPIV VNUTPISHNOHO MIKROKLIMATU PPYMISHchENNIa NA TEPLOOBMIN LIuDYNY. Natsionalnyi universytet "Lvivska politekhnikha", kafedra teplohozopostachannia i ventyliatsii. {in Ukrainian}
2. Makovskyi O.M. Osnovy ekspluatatsii i tekhnichna diahnostyka vantazhopidiomnykh kraniv: monohrafiia. Kramatorsk: DDMA, 2009. 164 s. {in Ukrainian}
3. Bulygin Y., Maslensky V., Shchekina E., Ashikhmin D. Finite element simulation for microclimate normalization at the crane operator workplace. 2023 E3S Web of Conferences 376(1). URL: <http://surl.li/umwtj> (data zvernennia 12.05.2024). {in English}
4. Chabane F., Nouredine M., A. Brima, J. Experimental study of thermal efficiency of a solar air heater with an irregularity element on absorber plate. 2018. 36(3), P. 855–860. <https://doi.org/10.18280/ijht.360311>. {in English}
5. Nia F., Nassab S., Ansari A., J. Therm, Transient combined natural convection and radiation in a double space cavity with conducting walls, 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072917318896> (data zvernennia 05.06.2024). {in English}
6. Park N., Ko S. Large eddy simulation of turbulent premixed combustion flows over backward facing step. Vol. 25. P. 713-719 (2011) <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0106-8>. {in English}
7. Shekaina Justin Sh. Modeling of Artificial Intelligence-Based Automated Climate Control with Energy Consumption Using Optimal Ensemble Learning on a Pixel Non-Uniformity Metro System. 2023. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/18/13302> (data zvernennia 24.03.2024). {in English}
8. Tiwari, A., Varandani, V., Mandali, S., and Arsenault, J., "Design of a Human-Centric Auto-Climate Control System for Electric Vehicles," SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility. 2023. 5(2):748-761. <https://doi.org/10.4271/2022-01-0194>. ANALYSIS OF THE DEGREE OF STUDY AND WORLDWIDE EXPERIENCE OF ENERGY-EFFICIENT AUTONOMOUS MICROCLIMATE SYSTEMS FOR OPERATORS CABS IN SHOPS WITH SIGNIFICANT HEAT SURPLUS. {in English}