

УДК 697.1:621.178:697.34

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.40.1127

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ КАМЕРИ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕПЛОГО ПОТОКУ НА РОБОЧИХ МІСЦЯХ

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 петургійних, метаталурійних та склоплавних виробництвах де використовуються високотемпературні технологічні процеси існує проблема перегріву працівників через значне теплове навантаження. При паспортизації робочих місць виникає необхідність вивчення та перевірка впливу теплового потоку на людину. А отже існує необхідність у розробці або модернізації приладів для оцінки терморадіаційної напруженості на робочих місцях та проведення досліджень в лабораторних умовах наближених до реальної виробничої обстановки, а саме: з урахуванням впливу атмосферних факторів; особливості геометрії приміщення; геометрії первинного та вторинних джерел ІЧ випромінювання; температури джерел випромінювання. **Мета статті** – з урахуванням визначення і візуалізації експрес методом не лише температури джерела випромінювання, а і теплового високотемпературного обладнання на працівника в реальних умовах – модернізація інфрачервоної камери. До основних завдань належить: розробка функціональної схеми; розробка конструкції установки; розробка алгоритма визначення теплового потоку з урахуванням факторів впливу на розповсюдження ІЧ променів. **Висновок.** На основі проведених досліджень модернізована тепла камера яка забезпечує здатність вимірювати розподіл температур на досліджуваній поверхні та інтенсивність теплового випромінювання, а також відстань до об'єкта. Забезпечувати одночасний збір даних про температуру та її зміни в часі в області яку охоплює тепла камера. Здійснювати візуалізацію розподілу теплового потоку на екрані для оперативної інтерпретації; Забезпечувати точність вимірювань 1 °С та роздільність 10 см на відстані від 10 м. Інтенсивність теплового потоку поверхні джерела випромінювання яку охоплює тепла камера може відображатись як інтегральне значення всієї поверхні так і згруповано за ділянками значення температури. Це істотно розширює функціонал порівняно з традиційними тепловими потокомірами.

Ключові слова: високотемпературні джерела випромінювання; алгоритм проведення розрахунку теплового потоку; термодинамічне навантаження на робочих місцях; модернізація інфрачервоної камери; 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.*

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

Abstract. Problem statement. In petrochemical, metallurgical, and glass production industries where high-temperature technological processes are employed, there is a problem of overheating of workers due to significant thermal loads. When certifying workplaces, there is a need to study and verify the impact of heat flow on humans. Therefore, there is a need for the development or modernization of devices for assessing thermal radiation stress in workplaces and conducting research in laboratory conditions close to real production situations, taking into account

atmospheric factors, the geometry of the premises, the geometry of primary and secondary IR radiation sources, and the temperature of radiation sources. When certifying workplaces, there is a need to study and verify the impact of heat flow on humans. **The main objectives include** – Modernization of an infrared camera for determining and visualizing, by express method, not only the temperature of the radiation source but also the thermal impact of high-temperature equipment on a worker in real conditions. The main tasks include: developing a functional diagram, designing the installation, and creating an algorithm to determine heat flow considering factors influencing the spread of IR radiation. Modernization of an infrared camera for determining and visualizing, by express method, not only the temperature of the radiation source but also the thermal impact of high-temperature equipment on a worker in real conditions. **Conclusion.** The modernized thermal camera enables the measurement of temperature distribution on the examined surface, the intensity of thermal radiation, as well as the distance to the object. It allows for simultaneous data collection on temperature and its changes over time in the camera's coverage area. Visualizing the distribution of heat flow on the screen for real-time interpretation; Ensuring measurement accuracy of 1 °C and a resolution of 10 cm at a distance of 10 m. The intensity of the thermal flux on the surface of the radiation source captured by the thermal camera can be displayed as both an integral value of the entire surface and grouped temperature values by sections. This significantly expands the functionality compared to traditional heat flux meters.

Keywords: *high-temperature radiation sources; thermal flux calculation algorithm; thermodynamic load on workplaces; infrared camera modernization; workplace certification*

Постановка проблеми. На петургійних, метаталурнійних та склоплавних виробництвах де використовуються високотемпературні технологічні процеси існує проблема перегріву працівників через значне теплове навантаження [5; 7]. При паспортизації робочих місць виникає необхідність вивчення та перевірка впливу теплового потоку на людину [2]. А отже існує необхідність у розробці або модернізації приладів для оцінки терморадіаційної напруженості на робочих місцях та проведення досліджень в лабораторних умовах наближених до реальної виробничої обстановки, а саме: з урахуванням впливу атмосферних факторів; особливості геометрії приміщення; геометрії первинного та вторинних джерел ІЧ випромінювання; температури джерел випромінювання [1].

Аналіз публікацій. Виходячи з проведеного аналізу сучасних приладів для вимірювання теплового потоку було визначено, що вони не в повній мірі дозволяють оцінити температуру та інтенсивність теплового потоку, з урахуванням відстані заміру від джерела випромінювання [3]. Крім того, відсутній прилад оцінки інтегрального значення накопичення теплової енергії об'єктом [4; 6]. Тому, нами було запропоновано концепцію удосконалення приладів для вирішення цієї задачі.

Працівники зазвичай на робочих місцях постійно підпадають під вплив різних спектральних частот випромінювання від нагрітих об'єктів у діапазоні від 3 до 15 мкм. Тому, в переважній більшості використовують два типи тепловізійних систем за діапазонами довжини хвилі від 3 до 5 мкм та від 8 до 12 мкм. Також, існують на підприємствах металургійної, петургійної та скло промисловостях короткохвильові тепловізійні системи, які працюють у діапазоні спектра від 1 до 3 мкм [8].

Мета дослідження – модернізація інфрачервоної камери для визначення і візуалізації експрес методом не лише температури джерела випромінювання а і теплового високотемпературного обладнання на працівника в реальних умовах. До основних завдань належить: розробка функціональної схеми; розробка конструкції установки; розробка алгоритма визначення теплового потоку з урахуванням факторів впливу на розповсюдження ІЧ променів.

Результати досліджень. Згідно проведеного нами аналізу літературних джерел [1] визначено, що на даний час тепловізійні системи умовно поділяються на декілька груп:

- перша група, за методом створення двомірного зображення спостережуваного простору. Тепловізійні системи поділяються на тепловізійні камери та тепловізійні скаксканери;

- друга група, за використанням технологічної бази побудови тепловізійної

системи. I-покоління, II-покоління, III-покоління;

– третя група, за типом спектральної частоти при вимірювання. Короткохвильові тепловізійні системи (SW), середньохвильові тепловізійні системи (MW), довгохвильові тепловізійні системи (LW);

– четверта група, за областю використання теплових систем. Тепловізійні системи спостереження та вимірювальні тепловізійні системи.

Умовний розподіл існуючих тепловізійних систем зображено на рисунку 1.

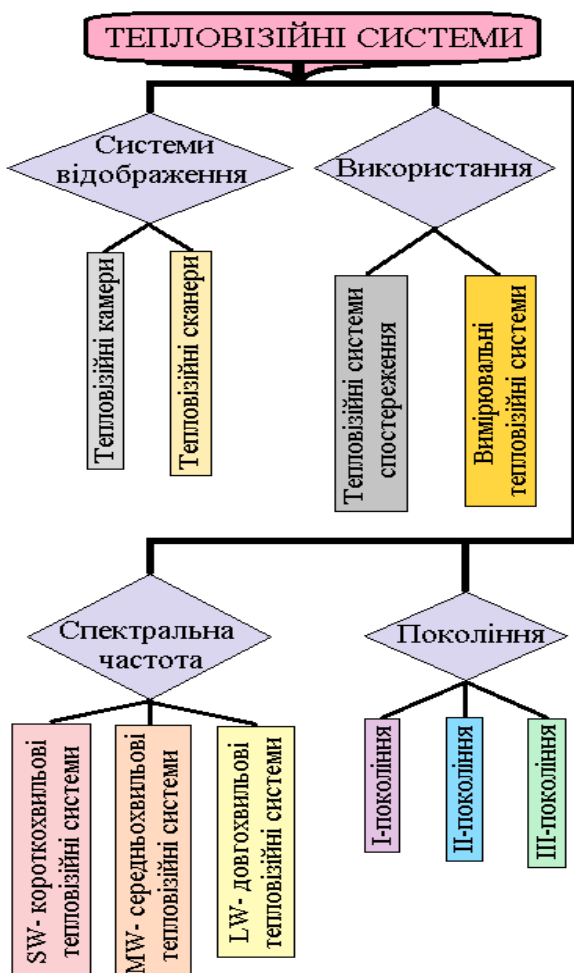


Рис. 1. Умовний розподіл тепловізійних систем

При виборі тепловізійної системи ми керувались закономірностями, основними перевагами та недоліками у їх технічних характеристиках:

– чим вищий призначений температурний діапазон роботи тепловізійної камери тим

вища роздільна здатність матриці, що забезпечить більш високу контрастність зображення та зменшення оптичного спотворення; більшу здатність до візуалізації об'єктів при багатьох об'єктах з більш високими температурами; але потребують більш якісну систему охолодження матриці;

– чим нищий призначений температурний діапазон роботи тепловізійної камери тим більше візуалізація в холодні періоди року та в умовах непогоди; більша стійкість до бликів сонця та вогню; більша візуалізація дрібних предметів; але більші завади візуалізації якщо у об'єктиві камери поряд з низькотемпературними об'єктами дослідження присутній високотемпературний об'єкт що переважає основний інформаційний сигнал більш ніж на порядок.

Вхідними даними для алгоритму удосконалення приладу нами визначені:

– термограми, які несуть інформацію про розподіл температури від джерела теплового випромінювання кожну секунду;

– частота отримання знімків (кількість кадрів за секунду) – 1 кадр за секунду;

– визначення відстані до досліджуваного об'єкта;

– отримання геометричних параметрів досліджуваної ділянки;

– розрахунок теплового потоку від джерела випромінювання.

Такі конкретні вимоги дозволять підібрати потрібну базу приладу та побудувати математичну модель для програмного забезпечення мікропроцесорної системи приладу.

При удосконаленні приладу нами було прийнято допущення:

1. Як базова конструкція приладу для оцінки терморадіаційної напруженості на робочих місцях прийнято інфрачервону камеру MLX-90640-D100 з можливістю роботи через I2C, яка при своїй невеликій роздільній здатності забезпечує достатній рівень визначення температури на відстані до 10 м з урахуванням розрахунку теплового потоку та геометрії джерела випромінювання. Зовнішній вигляд та умовно графічне зображення показано на рисунку 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд інфрачервоної камери MLX90640-D110

2. Прийнятий екран для виводу термограми 2,8'' 240x320 TFT ILI9341 з можливістю підключення сенсорної панелі та карти пам'яті. Зовнішній вигляд та умовно графічне зображення показано на рисунку 3.

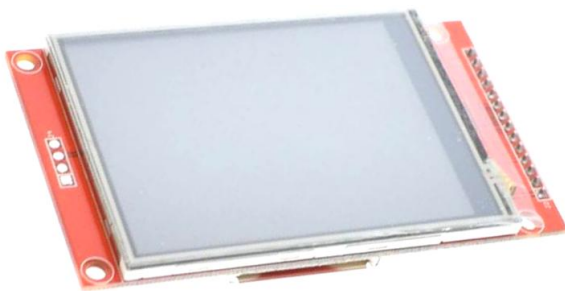


Рис. 3. Зовнішній вигляд екрана для виводу термограм 2,8'' TFT ILI9341

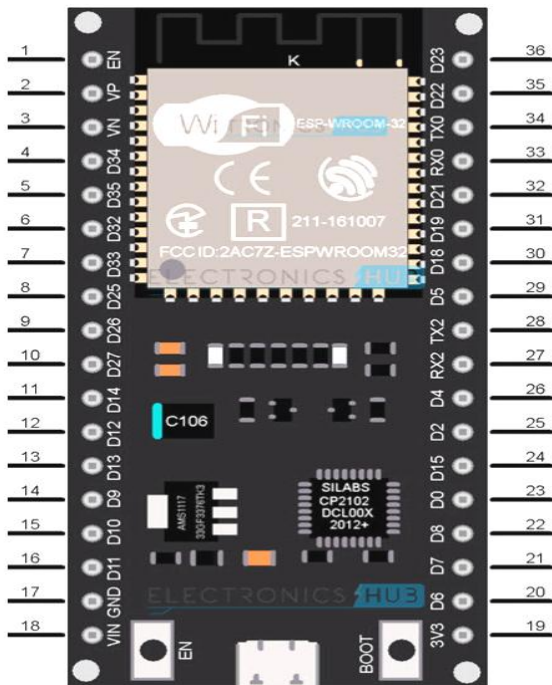


Рис. 4. Зовнішній вигляд мікроконтролера ESP32

3. Для обробки сигналів та даних обрано використовувати мікроконтролер ESP32. Він має у наявності WiFi, Bluetooth, можливість

обчислювати формули і виводити термограми на дисплей. Зовнішній вигляд та умовно графічне зображення показано на рисунку 4.

4. Як інтерфейс для передачі даних та підключення до ПК приймається протокол передачі через USB роз'єм та WiFi радіоканал.

5. Для визначення відстані до вимірювальної поверхні та обчислення геометричних розмірів. Приймаємо лазерний модуль LIDAR Lite v3. Зовнішній вигляд та умовно графічне зображення показано на рисунку 5.



Рис. 5. Зовнішній вигляд лазерного модуля LIDAR Lite v3

6. Елементи зібраного пристрою встановлені в пластиковий корпус, виготовлений за допомогою 3D-друку.

7. Запропонований нами алгоритм обробки сигналу на мові C++ рисунок 6, який враховує відстань і закон Стефана – Больцмана та перераховує покази камери не тільки в температуру, а і безпосередньо у значення теплового потоку ($Вт/м^2$). А саме перетворювати значення RGB матриці камери у $Вт/м^2$ шляхом підстановки у формулу Стефана – Больцмана.

На основі проведених досліджень та компоновки тепловізійної системи нами вперше запропонована структурна схема модернізованого тепловізійного вимірювального прилада, яка зображена на рисунку 7.

Згідно запропонованого нами алгоритма для визначення теплового поторку, нами розроблена математична модель, яка згідно закону Стефана – Больцмана визначає кількість теплової енергії яку випромінює об'єкт з урахуванням геометричних властивостей джерела випромінювання теплового потоку в реальних умовах.

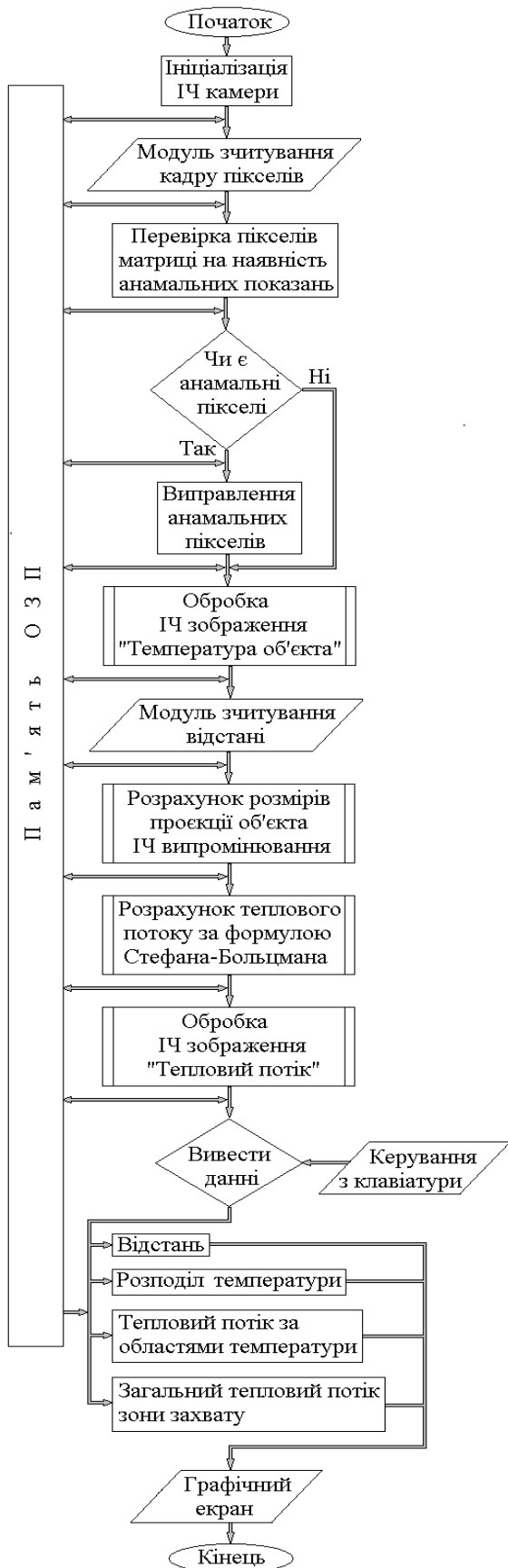


Рис. 6. Алгоритм обробки сигналу з тепловізійної камери

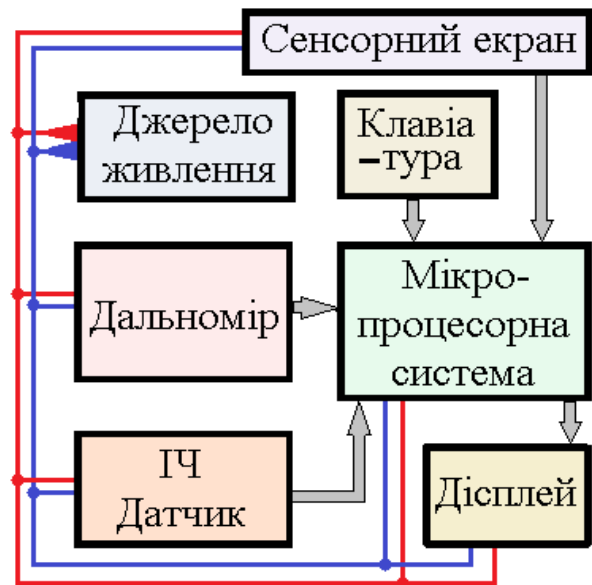


Рис. 7. Структурна схема побудови модернізації тепловізійного приладу

Тому після перетворення формула має вигляд :

$$Q = C_1 \times S \times ((T_1 \div 100)^4 - (T_2 \div 100)^4), \quad (1)$$

де:

C_1 – коефіцієнт випромінювання у Вт/(м²*ср*μ);

S – площа випромінювальної поверхні у м²;

T_1 – температура джерела випромінювання у Кельвінах;

T_2 – температура навколишнього середовища, в якому знаходиться джерело випромінювання у Кельвінах.

При розрахунках теплового потоку нами враховано коефіцієнт випромінювання при температурі в конкретний момент часу робочого процесу об'єкта випромінювання, який залежить від випромінювальної здатності матеріала ϵ [4].

Проведений нами аналіз програмного забезпечення для моделювання теплового випромінювання систем опалення. Встановлено лінійну залежність ϵ від температури джерела. При різних значеннях температури змінюється лише кут k нахилу графіку залежності ϵ (рис. 8).

Тобто, кут k є нахилом прямої, який розраховується як відношення різниці прямокутних координат точок до різниці їх абсцис. Але для його визначення потрібно знати коефіцієнт випромінювання при діючому значенні температури при дослідженні $C_1(T_2)$.

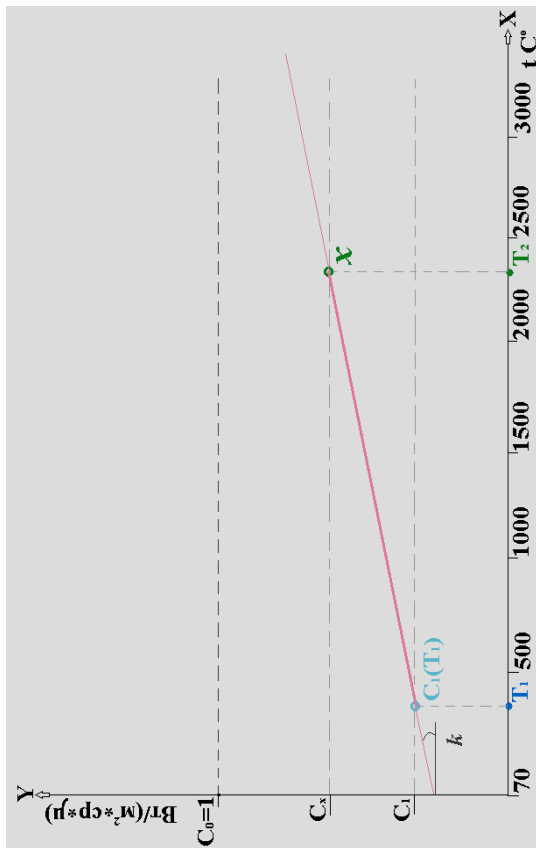


Рис. 8. Залежність випромінювальної здатності матеріала ϵ від температури об'єкта

Для визначення ϵ , знаючи температуру, матеріал та довідникові данні C_1 для цього матеріалу нами пропонується така послідовність розрахунків:

- визначаємо C_1 із довідника та приймаємо, що $C_1 = C_1(T_1)$;
- приймаємо припущення, що залежність $C_1(T)$ є лінійною;
- побудувати пряму, що проходить через точки $(T_1, C_1(T_1))$ та (T_2, x) , де x – невідоме;
- за формулою прямої функції розраховуємо x та отримуємо $C_1(T_2)$;
- підставляємо $C_1(T_2)$ у функцію для ϵ .

Тоді формула лінійної функції для ϵ буде мати вигляд:

$$Y_x - Y_1 = k(X_x - X_1), \quad (2)$$

де:

Y_1, X_1 – координати однієї з відомих точок $(T_1, C_1(T_1))$;

Y_x, X_x – координати не відомої точки $(T_2, C_1(T_2))$;

k – кут нахилу прямої лінійної функції ϵ .

Підставимо:

$$C_1(T_2) - C_1(T_1) = k(T_2 - T_1), \quad (3)$$

де:

$C_1(T_1)$ – коефіцієнт випромінювання з довідника у $Вт/(м^2 \cdot ср \cdot \mu)$;

$C_1(T_2)$ – коефіцієнт випромінювання при діючому значенні температури при дослідженні у $Вт/(м^2 \cdot ср \cdot \mu)$.

Тоді знайдемо кут нахилу прямої лінійної функції k :

$$k = (Y_2 - Y_1) \div (X_2 - X_1). \quad (4)$$

Підставляємо визначені величини у формулу:

$$k = (C_1(T_2) - C_1(T_1)) \div (T_2 - T_1). \quad (5)$$

Тому формула після скорочення для визначення другої точки $C_1(T_2)$ лінійної функції ϵ буде мати такий вигляд:

$$C_1(T_2) = C_1(T_1) + k(T_2 - T_1). \quad (6)$$

Таким чином, підставляючи k в формулу, ми обчислюємо значення C_1 для другої температури T_2 , використовуючи лінійну залежність від відомого з довідника $C_1(T_1)$. Тоді ми можемо побудувати пряму, яка проходить через відомі точки $(T_1, C_1(T_1))$ та (T_2, x) , де x – обчислений параметр $C_1(T_2)$.

Висновки

1. На основі проведеного дослідження модернізована теплова камера, яка дозволяє вимірювати розподіл температур на досліджуваній поверхні та інтенсивність теплового випромінювання, а також відстань до об'єкта. Забезпечувати одночасний збір даних про температуру та її зміни в часі в області яку охоплює теплова камера. Та здійснювати візуалізацію розподілу теплового потоку на екрані для оперативної інтерпретації.

2. Створений алгоритм обробки сигналів з камери дозволив переводити отримувані дані у фізичні одиниці теплового потоку та температури. Що дозволяє проводити якісний аналіз отриманих значень.

3. Інтерфейсне програмування дає змогу виводити термограми у реальному масштабі та часі на зовнішні пристрої. Це суттєво розширює функціонал пристрою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. 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. Вип. 4. С. 10–17.
3. Стрежекуров Э. Е. Комплексное решение задач теплозащиты рабочих мест и охраны окружающей среды от теплового загрязнения. *Приборы для экологии-92*. 1992.
4. Біляєв М. М. Математичне моделювання розрахунку параметрів мікроклімату в робочих зонах. *Проблеми математичного моделювання*. 2020. С. 6–8.
5. Стрежекуров Ю. Е. Аналіз впливу негативних та шкідливих факторів на виникнення професійних захворювань. *Безпека життєдіяльності в XXI столітті*. 2024.
6. Стрежекуров Ю. Е. Ukrainian research schools negative thermal factors at workplaces. *Виклики та проблеми сучасної науки*. 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. Вип. 1. 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. Вип. 6. С. 7–15.

REFERENCES

1. Shalenniy V.T., Shalomov V.A. and Papirnik R.B. *Napriamki udoskonalennia suchasnykh tekhnologiy, materialiv i obladannia iz vrakhuvanniam energetychnykh vutrat ta umov pratsi budivel'nykh robnikiv* [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).
2. Bilikov A.S., Shalomov V.A., Ragimov S.Yu. and Mukhaylov M.O. *Fizychne modeliuвання zminu energetychnogo vplivu na robochi mista z urakhuvanniam vysokotemperaturnogo vyprominiuвання* [Physical modeling of changes in energy impact on workplaces taking into account high-temperature radiation]. *Visnyk Prudniprovsk'oi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitekturn* [Bulletin of the Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, no. 4, pp. 10–17. (in Ukrainian).
3. 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]. *Priboru dlia ekologii-92* [Devices for Ecology-92]. 1992. (in Russian).
4. Bilaiev M.M. *Matematichne modeliuвання rozrachku parametriv mikroklimatu v robochikh zonakh* [Mathematical modeling of the calculation of microclimate parameters in working areas]. *Problemu matematichnogo modeliuвання* [Problems of Mathematical Modeling]. 2020, pp. 6–8. (in Ukrainian).
5. Strezhekurov Yu.E. *Analiz vplivu negativnih ta shkidlivih faktoriv na viniknennia profesiynih zahvoryuvan* [Analysis of the influence of negative and harmful factors on the emergence of occupational diseases]. *Bezpeka zhitediyalnosti v XXI stoliti* [Life Safety in the XXI Century]. 2024. (in Ukrainian).
6. Strezhekurov Yu.E. *Ukrainian research schools negative thermal factors at workplaces. Vikliki ta problemi suchasnoy nauki* [Challenges and Problems of Modern Science]. 2023, pp. 598–610.
7. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Shalomov V.A. and Ragimov S.Yu. *Do pitanya kompleksnogo vplivu negativnih ta shkidlivih faktorivna viniknennia profesiynih zahvoryuvan* [To the question of the complex impact of negative and harmful factors on the emergence of occupational diseases]. *Ukrainskiy zhurnal budivnytstva ta arkhitekturn* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 1, pp. 26–32. (in Ukrainian).
8. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Ragimov S.Yu. and Kharchenko V.V. *Do pitanya kompleksnogo ocinki vplivu teplovogo viprominyuvannya 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]. *Ukrainskiy zhurnal budivnytstva ta arkhitekturn* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 6, pp. 7–15. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.12.24.