УДК 536.24:621.18
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).24

THERMOGRAPHIC MONITORING AS A TOOL FOR DIAGNOSING THE CONDITION OF THERMAL INSULATION OF CHP EQUIPMENT

ТЕРМОГРАФІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ЯК ІНСТРУМЕНТ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ТЕЦ

Inna S. Bednarska
bednarska.inna@lll.kpi.ua
ORCID: 0000-0002-5558-4467

Tetiana V. Sheleshei
sheleshey_tanya@ukr.net
ORCID: 0000-0002-7242-4107

Dmitro V. Rindyuk
rel_dv@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7770-7547

Serhii R. Lishchuk
Serg23li9710@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7874-5019

І. С. Беднарська,
докт. філ., ст. викладач

Т. В. Шелешей,
канд. техн. наук, доцент

Д. В. Риндюк,
канд. техн. наук, доцент

С. Р. Ліщук,
докт. філ.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Abstract. *Purpose*. Substantiation, development and implementation of a comprehensive engineering methodology for remote non-destructive monitoring of the state of thermal insulation of technological equipment and branched pipelines of thermal power plants based on quantitative thermographic monitoring to increase energy efficiency and operational reliability of energy enterprises. *Methodology*. The study is based on a comprehensive approach that combines the fundamental laws of thermodynamics and the theory of heat and mass transfer to describe the processes of radiation-convective heat transfer at the interface of the outer surface of the protective insulation casing with the environment. *Results*. A step-by-step calculation algorithm has been created that transforms the array of radiation temperatures of each pixel of the thermogram into true values of surface temperatures, and then into quantitative indicators of total specific heat losses. A four-level classification of the technical condition of insulating structures has been developed based on the coefficient of exceeding the standard heat losses, which allows to clearly differentiate the condition of the object from serviceable to emergency. Tools for graphical interpretation of monitoring results in the form of digital maps of thermal defects with the calculation of the integral indicator of excess heat power losses have been proposed. *Scientific novelty*. The mathematical apparatus of quantitative infrared thermography has been improved by implementing an algorithm for separate calculation of the convective and radiation components of the heat flow on metal protective casings with a low degree of blackness, which allowed to reduce the error in determining the actual energy losses from 30–50 % to 7–10 %. *Practical significance*. The developed methodology allows to quickly carry out an express assessment of the condition of thermal insulation of large areas of complex equipment without stopping the technological process and destroying structures. The practical use of digital defect cards provides automated conversion of lost Watts of thermal power into financial losses from overconsumption of conventional fuel at the enterprise.
Key words: temperature; infrared thermography; thermal imaging monitoring; thermal insulation; CHP; non-destructive testing; heat loss; radiation coefficient; radiation-convective heat transfer; defect card; energy efficiency.

Анотація. *Мета*. Обґрунтування, розробка та впровадження комплексної інженерної методики дистанційного неруйнівного контролю стану теплової ізоляції технологічного обладнання та розгалужених трубопроводів теплоелектроцентралів на основі кількісного термографічного моніторингу для підвищення енергетичної ефективності та експлуатаційної надійності підприємств енергетики. *Методика*. Дослідження базується на комплексному підході, що поєднує фундаментальні закони термодинаміки та теорії тепломасообміну для опису процесів радіаційно-конвективного перенесення тепла на межі розділу зовнішньої поверхні захисно-

го кожуха ізоляції з навколишнім середовищем. *Результати*. Створено покроковий розрахунковий алгоритм, який трансформує масив радіаційних температур кожного пікселя термограми в істинні значення температур поверхні, а потім у кількісні показники сумарних питомих теплових втрат. Розроблено чотирирівневу класифікацію технічного стану ізоляційних конструкцій на основі коефіцієнта перевищення нормативних теплових втрат, що дозволяє чітко диференціювати стан об'єкта від справного до аварійного. Запропоновано інструменти графічної інтерпретації результатів моніторингу у вигляді цифрових карт теплових дефектів із розрахунком інтегрального показника надлишкових втрат теплової потужності. *Наукова новизна*. Удосконалено математичний апарат кількісної інфрачервоної термографії за рахунок впровадження алгоритму роздільного обчислення конвективного та радіаційного компонентів теплового потоку на металевих захисних кожухах з низьким ступенем чорноти, що дозволило знизити помилку визначення фактичних енергетичних втрат з 30–50 % до 7–10 %. *Практична значимість*. Розроблена методика дозволяє оперативно здійснювати експрес-оцінювання стану теплоізоляції великих площ складного обладнання без зупинки технологічного процесу та руйнування конструкцій. Практичне використання цифрових карток дефектів забезпечує автоматизовану конвертацію втрачених Ватів теплової потужності у фінансові збитки від перевитрати умовного палива на підприємстві.
Ключові слова: температура; інфрачервона термографія; тепловізійний моніторинг; теплова ізоляція; ТЕЦ; неруйнівний контроль; теплові втрати; коефіцієнт випромінювання; радіаційно-конвективний теплообмін; карта дефектів; енергоефективність.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Ефективність роботи сучасних теплових електростанцій (ТЕС) та теплоелектроцентралей (ТЕЦ) значною мірою залежить від стану теплової ізоляції технологічного обладнання та розгалужених мереж трубопроводів. Надійна теплоізоляція забезпечує не лише зниження енергетичних втрат, а й підтримання безпечних умов експлуатації, оскільки температура на її поверхні за умов нормативного теплоносія не повинна перевищувати +45 °С (при базовій температурі навколишнього середовища +25 °С). Проте в процесі експлуатації, а також після капітальних ремонтів, ізоляційні конструкції зазнають механічних пошкоджень, зволоження та руйнування металевого захисного покриття, що призводить до виникнення локальних теплових аномалій.

Традиційні методи контролю стану ізоляції, які часто базуються на вибірковому демонтажі захисних кожухів або використанні контактних методів вимірювання, є трудомісткими, локальними та неефективними для оперативної діагностики великих площ поверхонь складного обладнання (такого як циліндри турбін, котельні агрегати, газоходи). Крім того, просте фіксування значень температур за допомогою пірометрів не дає цілісного представлення про характер дефектів та фактичні енергетичні втрати. У зв'язку з цим постає завдання розробки та наукового обґрунтування комплексної методики дистанційного неруйнівного контролю на основі термографічного моніторингу. Основне завдання дослідження полягає у переході від констатації факту підвищеної температури («поміряли») до створення чіткого алгоритму оцінювання стану теплової ізоляції.

Для досягнення цього необхідно вирішити такі науково-практичні завдання:

• обґрунтувати умови проведення тепловізійної зйомки для великогабаритного обладнання ТЕЦ (циліндрів високого, середнього тиску турбін, паропроводів «гострої» пари, газоходів тощо) за стаціонарних режимів роботи енергоблоку;

• розробити математичний апарат для перерахунку виміряних температурних полів поверхні ізоляції у фактичні питомі втрати тепла з урахуванням мінливості температур навколишнього середовища та коефіцієнтів випромінювання захисної кулі;

• сформувати систему критеріїв та верифікованих показників для класифікації технічного стану ізоляції за визначеними категоріями (від справного до аварійного) на основі порівняння фактичних та нормативних теплових втрат;

• створити наочні інструменти інтерпретації результатів моніторингу через побудову карт дефектів та блок-схем алгоритму оцінювання для інтеграції термографії у систему планово-попереджувальних ремонтів.

Об'єктом дослідження є процеси теплоперенесення через багатошарові захисні конструкції теплотехнічного обладнання та трубопроводів енергоблоків ТЕЦ. Предметом дослідження є методи, критерії та алгоритми тепловізійного діагностування для ідентифікації локальних та розподілених дефектів теплової ізоляції без її руйнування та демонтажу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Забезпечення енергетичної ефективності та надійності теплотехнічного обладнання та трубопроводів на підприємствах теплоенергетики є важливим предметом уваги як вітчизняних, так і зарубіжних науковців. Зважаючи на тенденцію цифровізації промисловості та перехід до концепції «Індустрія 4.0» (зокрема, NDE 4.0 – неруйнівний контроль нового покоління), тепловізійний моніторинг [1] (інфрачервона термографія) дедалі частіше розглядається як ключовий елемент систем превентивного технічного обслуговування.

Теоретичні та практичні засади неруйнівного контролю, оцінювання технічного стану промислових

теплових мереж та енергетичного обладнання за допомогою тепловізійних методів детально висвітлені у працях сучасних українських дослідників. Зокрема, аналіз нормативно-правової бази, критеріїв класифікації теплоізоляційних матеріалів та їх експлуатаційних властивостей в умовах модернізації промислових об'єктів системно проведено у роботах колективів авторів під керівництвом провідних фахівців галузі [наприклад, 2].

Питаннями математичного моделювання теплових втрат через огороджувальні та захисні конструкції, а також розробкою настанов з проведення енергетичного аудиту та оцінювання теплотехнічних параметрів активно займаються дослідники Інституту технічної теплофізіки НАН України, ДП «НІІСП» та профільних технічних університетів. Вони вказують на необхідність точного врахування радіаційно-конвективного теплообміну на зовнішній поверхні кожуха ізоляції для мінімізації хиб дистанційного вимірювання. Водночас, в вітчизняній практиці термографічний контроль обладнання ТЕС і ТЕЦ (циліндрів турбін, паропроводів, газоходів) часто обмежується якісним аналізом – виявленням аномальних температурних зон («гарячих точок») без глибокого кількісного оцінювання фактичних втрат енергії в реальному часі.

У зарубіжній науковій спільноті за останні роки (2020–2026 рр.) спостерігається чіткий вектор на перехід від пасивної фіксації дефектів до кількісної інфрачервоної термографії та автоматизації обробки даних [3].

Дослідження руйнування ізоляційних шарів під впливом високих температур, циклічних навантажень і вологості, що призводить до значних втрат енергії та корозії під ізоляцією, детально описані у працях Cadelano G., Bortolin A. [4], а також в оглядах матеріалів високої термічної стійкості. Автори доводять, що інфрачервона оцінка є найбільш чутливим інструментом для фіксації ранніх стадій зволоження та руйнування ізоляції на трубопроводах високого тиску.

Щодо теплофізичного моделювання та перерахунку втрат, то питання зв'язку між внутрішніми дефектами стінок (корозійні каверні, локальне стоншення) чи теплоізоляції та розподілом температурних полів на поверхні досліджено у роботі [5], де за допомогою скінченно-елементного моделювання у програмних комплексах доведено пряму математичну залежність між геометричними параметрами дефекту та термічним контрастом. Аналогічний підхід із застосуванням нестаціонарної термографії та спектрального аналізу теплових часових констант для ідентифікації внутрішніх руйнувань у трубопроводах запропоновано у дослідженні [6], що дозволяє кількісно оцінювати ступінь знесення конструкції без зупинки технологічного процесу.

Сучасний етап розвитку методу (2024–2026 рр.) характеризується масовим впровадженням алгоритмів штучного інтелекту та комп'ютерного зору для автоматичного розпізнавання термограм. Як зазначають дослідники систем моніторингу великих промислових об'єктів (наприклад, у роботах [7] та аналітичних звітах VisionPlatform [8]), інтеграція інтенсивних нейронних мереж дозволяє досягти точності понад 90 % в автоматичній класифікації теплових аномалій, оцінюванні ремонтів.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

При значній кількості публікацій, присвячених як загальної теорії термографії, так і локальним експериментам на лабораторних стендах, залишається недостатньо вивченим та обґрунтованим питання створення комплексної інженерної методики експрес-оцінювання для великогабаритного обладнання ТЕЦ в умовах реальних експлуатаційних завад (зміна параметрів навколишнього середовища об'єктів) [9–10]. Відсутні чіткі стандартизовані алгоритми швидкого перерахунку відносного розподілу температур поверхні в кількісні показники питомих втрат теплової потужності (Вт/м² або Вт/м).

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є підвищення енергетичної ефективності та експлуатаційної надійності теплотехнічного обладнання та трубопроводів теплоелектроцентралей шляхом розробки, наукового обґрунтування та впровадження комплексної методики дистанційного експрес-оцінювання стану їхньої теплової ізоляції на основі кількісного термографічного моніторингу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Обґрунтувати оптимальні умови та режими проведення тепловізійної зйомки для різних типів великогабаритного обладнання ТЕЦ (циліндрів високого, середнього тиску турбін, паропроводів «гострої» пари, газоходів тощо) з урахуванням експлуатаційних факторів, геометрії поверхонь та радіаційно-конвективного теплообміну з навколишнім середовищем.

2. Розробити математичну модель та інженерний апарат для оперативної трансформації зафіксованих термографічних полів захисних кожухів у кількісні показники фактичних питомих втрат.

3. Сформувати систему верифікованих критеріїв і показників для класифікації технічного стану ізоляційних конструкцій (справний, працездатний, непрацездатний, аварійний) на основі порівняння фактичних енергетичних втрат із нормативними значеннями.

4. Розробити алгоритм та наочні інструменти інтерпретації результатів моніторингу (зокрема, карти теплових дефектів та блок-схему оцінювання) для інтеграції термографічних даних у сучасні автоматизовані системи планування ремонтів підприємств енергетики.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для вирішення поставлених завдань у роботі застосовано комплексний підхід, який базується на поєднанні теоретичних та експериментальних методів:

- методи теорії тепломасообміну та термодинаміки [11] (для аналізу радіаційно-конвективних процесів на межі «захисний кожух ізоляції – навколишнє середовище» та розробки математичного апарату перерахунку температурних полів у питомі теплові втрати);
- методи інфрачервоної термографії [12] (тепловізійного контролю) – для дистанційного вимірювання розподілу радіаційних температур на поверхнях великогабаритного обладнання ТЕЦ;
- методи математичного та комп'ютерного моделювання [13] (зокрема, чисельні методи скінченних елементів) – для верифікації теплових потоків, аналізу впливу геометричних параметрів дефектів на температурний контраст та оцінювання похибок вимірювання;
- методи математичної статистики та теорії похибок [14] (для обробки результатів експериментальних вимірювань, оцінювання достовірності отриманих даних та калібрування тепловізійної техніки з урахуванням мінливості коефіцієнта випромінювання поверхонь);
- системний аналіз та алгоритмізація (для розробки блок-схеми оцінювання стану ізоляції та інтеграції карт дефектів у структуру планово-попереджувальних ремонтів).

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для переходу від якісного термографічного спостереження (фіксації «гарячих точок») до кількісного аналізу фактичних втрат енергії необхідно детально описати теплові процеси, що відбуваються на межі розподілу «зовнішня поверхня захисного кожуха ізоляції – навколишнє середовище».

У стаціонарному режимі роботи енергоблоку ТЕЦ сумарний тепловий потік q_Σ (Вт/м^2), який втрачається через ізоляційну конструкцію в навколишнє середовище, дорівнює тепловому потоку, що передається від зовнішньої поверхні кожуха за рахунок конвекції (q_c) та радіаційного випромінювання (q_r) [15]:

$$q_\Sigma = q_c + q_r. \tag{1}$$

Компонент конвективного теплообміну визначається за законом Ньютона–Ріхмана:

$$q_c = \alpha_c \cdot (T_s - T_a), \tag{2}$$

α_c – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/(м^2 · К);

T_s – термодинамічна (фактична) температура зовнішньої поверхні ізоляції, К;

T_a – температура навколишнього повітря (середовище), К.

Значення α_c залежить від режиму руху повітря. Для умов закритих поміщень ТЕЦ (турбінні та котельні цехи), де переважає природна конвекція, коефіцієнт α_c є функцією критеріїв Нуссельта, Грасгофа та Прандтля:

$$\alpha_c = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{L}, \tag{3}$$

де λ_a – теплопровідність повітря, а L – визначальний геометричний розмір об'єкта (наприклад, діаметр трубопроводу чи висота циліндра турбіни). Для практичних інженерних розрахунків у закритих приміщеннях часто застосовують напівемпіричну залежність:

$$\alpha_c = C \cdot (T_s - T_a)^n, \tag{4}$$

де коефіцієнти C та n визначаються просторовою орієнтацією поверхні (вертикальна стінка, горизонтальний трубопровід).

Радіаційний компонент теплових втрат описується законом Стефана–Больцмана для сірих тіл, що знаходяться у великій оболонці:

$$q_r = \varepsilon_s \cdot \sigma_0 \cdot \left(\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right) \right)^4, \tag{5}$$

де ε_s – ступінь чорноти (коефіцієнт випромінювання) матеріалу захисного кожуха теплоізоляції;

σ_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла (5,67 Вт/(м^2 · К^4)).

Головною проблемою дистанційної інфрачервоної діагностики на ТЕЦ є висока мінливість та невизначеність коефіцієнта ε_s. Захисні кожухи найчастіше виготовляють із листового алюмінію, оцинкованої або нержавіючої сталі. Для чистих, неолокислених металевих поверхонь ε_s може становити 0,05…0,15, що спричиняє значне відбиття фонового випромінювання оточуючого обладнання та призводить до критичних похибок вимірювання температури. Проте в процесі експлуатації під дією високих температур, пилу та вологості поверхня окислюється, і ε_s зростає до 0,4…0,6.

Для отримання достовірних термографічних даних, які підлягають кількісному перерахунку, зйомку необхідно проводити за чітко визначених умов:

1) Стабілізація режиму об'єкта. Суть полягає в тому, що вимірювання виконуються виключно під час стаціонарної роботи енергоблока (навантаження не повинно коливатися більше ніж на 5 % протягом 2 годин до початку зйомки).

2) Компенсація перешкод випромінювання. Перед початком вимірювань виконується визначення локального коефіцієнта випромінювання шляхом порівняння з показниками контактного термометра або за допомогою нанесення на тестову ділянку кожуха термостійкої стрічки чи фарби з відомим $\varepsilon_{ref} = 0{,}95$.

3) Врахування фонової температури. У цехах ТЕЦ є велика кількість сторонніх джерел тепла.

Температура відбитого фону ($T_{вф}$) має бути виміряна (наприклад, за методом дифузного відбивача) та внесена до налаштування тепловізора.

В таблиці 1 запропонована матриця параметрів зйомки для основного обладнання.

Для автоматизації обробки термограм розроблено покроковий розрахунковий алгоритм, який трансформує кожний піксель матриці розподілу радіаційних температур у значення втрат енергії (зображений на рис. 1).

Таблиця 1. Матриця параметрів зйомки для основного обладнання ТЕЦ

Об'єкт моніторингу	Характерний дефект	Рекомендована відстань, м	Оптимальний діапазон температур, °C
ЦВТ / ЦСТ турбіни	Руйнування матів, щілини в стиках	3–7	+40 … +250
Паропроводи гострої пари	Провисання ізоляції, наявність вологи	2–5	+40 … +180
Газоходи котельного агрегату	Локальне прогорання, знесення футерування	5–12	+50 … +350

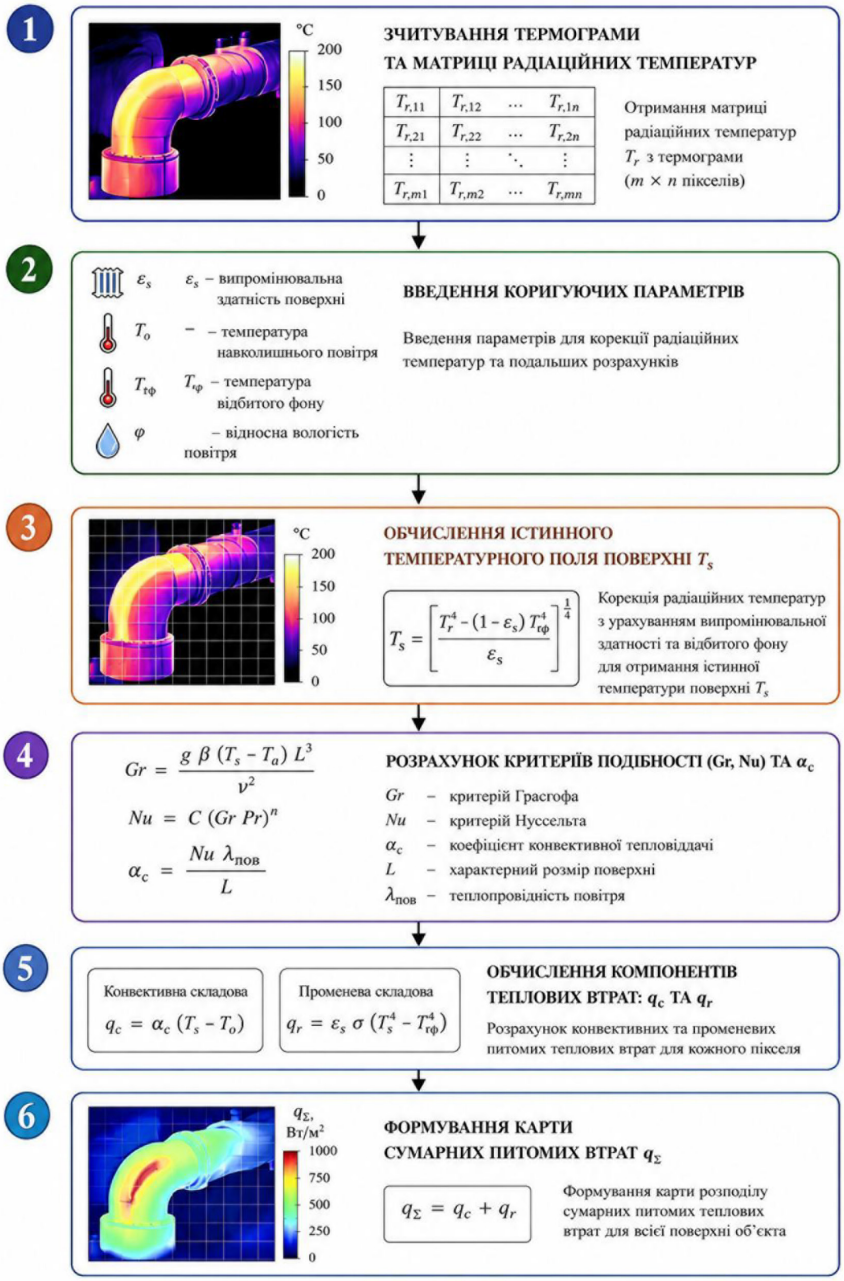


Рис. 1. Алгоритм автоматизованої обробки термограм для розрахунку питомих втрат енергії

Фактична температура поверхні T_s у кожній точці розраховується тепловізором автоматично за загальним рівнянням теплорадіометрії:

$$U_\Sigma = \varepsilon_s \cdot \tau_a \cdot f(T_s) + (1 - \varepsilon_s) \cdot \tau_a \cdot f(T_{вф}) + (1 - \tau_a) \cdot f, \quad (6)$$

де: U_Σ – сумарна енергія випромінювання, що потрапила на матрицю приладу;

τ_a – коефіцієнт пропускання атмосфери (на коротких відстанях 1…5 м приймається $\tau_a \approx 1$);

$f(T)$ – функція калібрування камери.

Після отримання масиву істинних температур T_s, програма обчислює сумарний потік для кожної дискретної зони (пікселя) за формулою:

$$q_{\Sigma,i} = \alpha_{c,i} \cdot \left(T_{s,i} - T_a\right) + \varepsilon_s \cdot \sigma_0 \cdot \left(\left(\frac{T_{s,i}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a}{100}\right)^4\right). \quad (7)$$

Далі варто визначити критерії оцінювання технічного стану теплової ізоляції. Класифікація стану ізоляційних конструкцій базується на визначенні коефіцієнта перевищення нормативних теплових втрат (K_v):

$$K_v = \frac{q_\Sigma}{q_{n\ або\ m}}, \quad (8)$$

де $q_{n\ або\ m}$ – нормативні питомі втрати тепла для даного типу обладнання та температури теплоносія, визначені чинними нормами проектування та теплових випробувань (наприклад, ДКД 34.20.507–2003).

Для комплексного оцінювання розроблено чотирирівневу шкалу категорій технічного стану теплової ізоляції обладнання ТЕЦ.

Категорія I. Справний стан ($K_v \le 1{,}1$): температура на поверхні кожуха відповідає нормативній (+45 °C при базових +25 °C), а теплові втрати у межах допусків. Ремонт не потрібний.

Категорія II. Працездатний стан ($1{,}1 < K_v \le 1{,}4$): спостерігаються незначні локальні теплові аномалії в місцях встановлення опор або фланцевих з'єднань. Експлуатація дозволена. Моніторинг проводитиметься під час планових обходів.

Категорія III. Непрацездатний стан ($1{,}4 < K_v \le 2{,}5$): наявні значні дефекти: просідання мінераловатної ізоляції всередині кожуха, локальне руйнування ізоляційної кулі. Об'єкт включається до відомості дефектів для проведення ремонту під час найближчої планової зупинки енергоблока.

Категорія IV. Аварійний стан ($K_v > 2{,}5$): повне руйнування або відсутність ізоляційного матеріалу, температура на поверхні наближається до температури теплоносія. Високий ризик травмування персоналу (опіки) та критичні втрати робочого тіла. Необхідне негайне відновлення ізоляції.

Результатом практичного застосування розробленої методики є генерація карти теплових дефектів. Програмне забезпечення на основі масиву q_Σ створює бінарне або багатоколірне графічне зображення об'єкта, де виділяються виключно зони, що належать до III та IV категорій стану.

На базі отриманих карток дефектів розраховується інтегральний показник надлишкових теплових втрат для конкретного вузла (ΔQ, Вт):

$$\Delta Q = \sum_{j=1}^{M} (q_{\Sigma,j} - q_{n\ або\ m,j}) \cdot \Delta F_j, \quad (9)$$

де: ΔF_j – площа поверхні, що охоплена дефектом j; M – кількість виявлених дефектних зон.

Знаючи вартість умовного палива (вугілля чи природного газу) на ТЕЦ та ККД котельного агрегату, інтегральний показник ΔQ легко перераховується у фінансові втрати підприємства. Це дає можливість технічному менеджменту ТЕЦ ранжувати черговість ремонтних робіт не за суб'єктивними ознаками, а на основі прямого економічного ефекту від відновлення ізоляції (періоду окупності витрат на ремонт).

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розробка та теоретичне обґрунтування комплексної методики дистанційного неруйнівного контролю стану теплової ізоляції на основі кількісного термографічного моніторингу дозволяє переосмислити підходи до експлуатації теплотехнічного обладнання ТЕЦ. Отримані результати відкривають нові можливості для переходу від констатації локальних температурних аномалій до системного енергетичного та фінансового аналізу втрат.

Запропонований математичний апарат, що базується на роздільному обчисленні конвективної та радіаційної складових теплового потоку дозволяє мінімізувати похибки, притаманні класичній «пасивній» термографії. У більшості практичних випадків на підприємствах теплоенергетики оцінка стану ізоляції обмежувалася вимірюванням радіаційної температури за допомогою пірометрів або тепловізорів із базовим налаштуванням ступеня чорноти ($\varepsilon = 0{,}95$), що є грубою помилкою для захисних металевих кожухів.

Аналіз розробленого алгоритму показує, що для оцинкованих та алюмінієвих поверхонь із низьким коефіцієнтом випромінювання ($\varepsilon_s = 0{,}15…0{,}4$) радіаційна складова теплових втрат може бути меншою за конвективну. Водночас для окислених або запилених поверхонь частка випромінювання у сумарному балансі різко зростає. Спроба оцінити теплові втрати без динамічного перерахунку коефіцієнта α_c (який змінюється залежно від просторової орієнтації об'єкта та температурного тиску (T_s–Ta)) призводить до помилок визначення теплового потоку в межах 35…50 %. Застосування запропонованого покрокового алгоритму з корекцією за відбитим фоном та критеріальними рівняннями Нуссельта дозволяє зменшити сумарну помилку розрахунку втрат q_Σ до прийнятного інженерного рівня – не більше 7–10 %.

Впровадження чотирирівневої шкали оцінювання на основі коефіцієнта перевищення нормативних втрат $\left(K_v = \frac{q_\Sigma}{q_{n\ або\ т}} \right)$ усуває неоднозначність під час прийняття рішень ремонтним персоналом. Таким чином **категорія I** (справний стан) підтверджує якість виконання ізоляційних робіт (наприклад, після капітального ремонту). **Категорія II** (працездатний стан) відображає природне старіння матеріалів або наявність конструктивних містків холоду (опори, підвіски, арматура). Такі зони не потребують негайного втручання, що дозволяє уникнути лишніх витрат на передчасний ремонт. **Категорія III** (непрацездатний стан) є найбільш інформативною для планування контуру планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Фіксація таких зон дозволяє заздалегідь внести об'єкт до відомості дефектів, закупити необхідні матеріали та виконати ремонти під час найближчого планового зупинення енергоблока, запобігаючи переходу дефекту в аварійну стадію. **Категорія IV** (аварійний стан) потребує негайного виведення обладнання для ремонту або локального відновлення ізоляції «на ходу» (якщо це дозволяють правила техніки безпеки). Температури в таких зонах можуть значно перевищувати критичні обмеження, створюючи пряму загрозу життю та здоров'ю персоналу (ризик важких термічних опіків), а також зумовлюючи експоненційне зростання втрат палива.

Переваги інтеграції карт дефектів у виробничий процес ТЕЦ. Традиційні підходи до складання відомостей дефектів зазвичай спираються на візуальний огляд чи суб'єктивні скарги обхідників цехів. Побудова цифрових карток дефектів на основі інтегрального показника надлишкових теплових втрат повністю змінює цю парадигму. Головна перевага полягає у можливості економічного обґрунтування ремонтів. Переведення втрачених Ватів енергії в конкретні обсяги спаленого палива (вугілля чи газу) дозволяє розрахувати термін окупності витрат на відновлення теплоізоляції. Наприклад, якщо інвестиції у заміну 10 метрів ізоляції паропроводу «гострої» пари окуплятимуться за 2 місяці за рахунок економії палива, цей об'єкт отримає найвищий пріоритет у системі управління ремонтами, навіть якщо візуально кожух виглядає неушкодженим.

Обмеження методу та напрямки подальших досліджень. Незважаючи на високу ефективність розробленої методики, необхідно чітко окреслити межі її застосування:

- вплив динамічних режимів: методика демонструє високу точність лише за стаціонарних або близьких до них режимів роботи обладнання. У періоди пуску, зупину або різких змін навантаження енергоблока (на 5 %) температурні поля на поверхні ізоляції перебувають у перехідному стані, що унеможливлює використання класичних критеріальних рівнянь теплообміну;
- метеорологічні фактори для відкритих майданчиків. Для обладнання та трубопроводів, розташованих поза приміщеннями (на відкритому повітрі), на точність вимірювань критично впливає швидкість вітру та сонячна інсоляція. Вітер різко збільшує конвективну складову, «змиваючи» тепловий контраст, а сонячне проміння створює фальшиві зони перегріву на металевому кожусі.

Напрямки подальших досліджень будуть зосереджені на адаптації математичної моделі до умов динамічної зміни вітрового навантаження для відкритих естакад ТЕЦ, а також на автоматизації процесу розпізнавання між дефектними зонами на термограмах за допомогою згорткових нейронних мереж, що дозволить виключити людський фактор під час обробки великих масивів діагностичних даних.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження вирішено важливе науково-практичне завдання – розроблено та обґрунтовано комплексну методику дистанційного неруйнівного контролю теплової ізоляції обладнання та трубопроводів ТЕЦ на основі кількісного термографічного моніторингу. Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Обґрунтовано умови термографічної зйомки. Визначено, що для отримання достовірних даних моніторинг великогабаритного обладнання (циліндрів турбін, паропроводів, газоходів) необхідно проводити за стаціонарного режиму роботи енергоблоку (коливання навантаження не більше 5 %). Обов'язковим є введення компенсації фонової температури цеху та попереднє калібрування коефіцієнта випромінювання захисного металевого кожуха.

2. Розроблено розрахунковий математичний апарат. Створено покроковий алгоритм, який трансформує радіаційну температуру кожного пікселя термограми на істинну температуру поверхні, а потім – у значення сумарних теплових втрат. Роздільне обчислення конвективного та радіаційного компонентів дозволило знизити інженерну похибку визначення енерговтрат з 35–50 % до 7–10 %.

3. Сформовано критерії оцінювання технічного стану. Запропоновано чотирирівневу класифікацію стану ізоляції на основі коефіцієнта перевищення нормативних втрат. Чітке розділення на справний, працездатний, непрацездатний та аварійний стани дозволяє однозначно визначити пріоритетність та терміновість ремонтних робіт.

4. Розроблено інструменти інтеграції в систему ППР. Запропоновано методику побудови цифрових карт дефектів та розрахунку інтегрального показника надлишкових теплових втрат. Це забезпечує можливість конвертації втраченої теплової енергії

у фінансові збитки від перевитрати палива (вугілля, газу), що дає технічному менеджменту ТЕЦ чітке економічне обґрунтування для формування планів ремонтних робіт.

REFERENCES

[1] MFE Inspection Solutions. (2026). Thermographic inspection: An in–depth guide. https://mfe–is.com/thermographic–inspection/

[2] Kaniuk H., Mezeria A., Kniazieva V., Blyznychenko O., Fursova T. Osoblyvosti kharakterystyk teploizoliatsiinykh materialiv, yaki vykorystovuiutsia na elektrostantsiiakh. [Features of thermal insulation materials used at power plants]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia*. 2026; (1): 85–92. https://doi.org/10.20998/2078–774X.2026.01.09

[3] Sadeghi, R., Memme, S., Morchio, S., Fossa, M., & Parenti, M. (2026). Infrared Thermography in Photovoltaic Systems: A Review for Maximizing Energy Yield and Long–Term Reliability. *Energies*, 19(6), 1570. https://doi.org/10.3390/en19061570

[4] Cadelano, G., Bortolin, A., Ferrarini, G., Molinas, B.J., Giantin, D., Zonta, P., & Bison, P. (2016). Corrosion Detection in Pipelines Using Infrared Thermography: Experiments and Data Processing Methods. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 35. DOI:10.1007/s10921–016–0365–5

[5] Shen, Gongtian & Li, Tao. (2007). Infrared thermography for high–temperature pressure pipe. *Insight*. 49. 151–153. 10.1784/insi.2007.49.3.151

[6] Michał KOPEĆ, Panagiotis CHATZIPANAGIOTOU, Gilbert DE MEY, Bogusław WIĘCEK (2017). Detection of inner defects in industrial pipelines using transient IR thermography. *Measurement Automation Monitoring*. № 03, vol. 63, ISSN 2450–2855. P. 115–118

[7] Zhao, X., Zhao, Y., Hu, S., Wang, H., Zhang, Y., & Ming, W. (2023). Progress in Active Infrared Imaging for Defect Detection in the Renewable and Electronic Industries. *Sensors*, 23(21), 8780. https://doi.org/10.3390/s23218780

[8] Visionplatform.ai. (03.12.2026). Thermal imaging for leak and hotspot detection in warehouses. https://visionplatform.ai/thermal–leak–hotspot–detection–in–warehouses/

[9] Bednarska I. S., Sheleshei T. V., Ryndiuk D. V., Lishchuk S. R. Analiz prychyn dehradatsii teplovoi izoliatsii enerhetychnoho obladnannia TETs. [Analysis of the causes of thermal insulation degradation of thermal power plant equipment]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni Admirala Makarova*. 2026; 2(505): 129–136. https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).14

[10] Bednarska I.S., Lishchuk S.R. Otsinka enerhetychnoi efektyvnosti teplovoi izoliatsii obladnannia enerhobloku TETs u pisliaremontnyi period. [Assessment of the energy efficiency of thermal insulation of thermal power plant unit equipment during the post–repair period]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky*. 2026; 37(76), Part 2(3): 132–136. https://doi.org/10.32782/2663–5941/2026.3.2/19

[11] Lou C. Thermal insulation design for superheated steam pipe–line transport: Balancing technical and economic factors for optimal performance / C. Lou, C. Zhai, L. Li, Y. Shang, X. Li, D. Li // Applied Thermal Engineering. 2025. Vol. 269, Part B. Paper No. 126134. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126134.14

[12] Firat Akin, Oktay Arikan. The effect of thermal aging on solid insulating materials: A case study for dielectric loss and dissipation factor based evaluations under different voltage levels and frequencies. *Engineering Failure Analysis*. Volume 148, June 2023, 107222. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107222

[13] Leem, Y., Kitagaki, R., Ishida, T., & Hagihara, H. (2024). Long–term stability and water vapor induced degradation of physico–chemical properties of XPS and PF. *Developments in the Built Environment*, 18, 100429. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100429

[14] Wagner, C., Obermeyer, M., & Lüchinger, R. (2020). A methodology for the assessment of multiple benefits of industrial energy efficiency measures. *SN Applied Sciences*, 2(2), 270. https://doi.org/10.1007/s42452–020–2071–2

[15] Naik, S., & Mallur, S. B. (2018, June). The benefits of energy efficiency in small and medium enterprises. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* (Vol. 376, No. 1, p. 012116). IOP Publishing. DOI 10.1088/1757–899X/376/1/012116PTM 24.020.16–73.

[16] Lementar S. Yu., Bednarska I. S., Rindyuk D. V. Modeliuvannia hazodynamiky volohoi pary v holovnykh paroprovodakh atomnoi elektrostantsii. [Modeling of wet steam gas dynamics in main steam pipelines of a nuclear power plant]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: tekhnichni nauky*. 2021; 5(32): 159–167. https://doi.org/10.32838/2663–5941/2021.5/25

[17] Bednarska I. S., Rindyuk D. V. Analiz pidkhodiv do otsinky teplovoho ta napruzheno–deformovanoho stanu elementiv paroprovodiv AES. [Analysis of approaches to assessment of thermal and stress–strain state of NPP steam pipeline elements]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: tekhnichni nauky*. 2019; 30(69), Part 2: 12–16.

[18] Gao, J., Wang, X., Sun, T., Guo, Z., Yang, L., Ali, A., & Han, Y. (2026). A New Sensor for Harmonic Magnetic Field Detection in Pipelines Without Removing Insulation Layer. IEEE Transactions on Magnetics, 62, 1–11. DOI: 10.1109/TMAG.2025.3644349

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] MFE Inspection Solutions. (2026). Thermographic inspection: An in–depth guide. https://mfe–is.com/thermographic–inspection/

[2] Канюк, Г., Мезеря, А., Князєва, В., Близниченко, О., & Фурсова, Т. (2026). Особливості характеристик теплоізоляційних матеріалів, які використовуються на електростанціях. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, (1), 85–92. https://doi.org/10.20998/2078–774X.2026.01.09

[3] Sadeghi, R., Memme, S., Morchio, S., Fossa, M., & Parenti, M. (2026). Infrared Thermography in Photovoltaic Systems: A Review for Maximizing Energy Yield and Long–Term Reliability. Energies, 19(6), 1570. https://doi.org/10.3390/en19061570

[4] Cadelano, G., Bortolin, A., Ferrarini, G., Molinas, B.J., Giantin, D., Zonta, P., & Bison, P. (2016). Corrosion Detection in Pipelines Using Infrared Thermography: Experiments and Data Processing Methods. Journal of Nondestructive Evaluation, 35. DOI:10.1007/s10921–016–0365–5

[5] Shen, Gongtian & Li, Tao. (2007). Infrared thermography for high–temperature pressure pipe. Insight. 49. 151–153. 10.1784/insi.2007.49.3.151

[6] Michał KOPEĆ, Panagiotis CHATZIPANAGIOTOU, Gilbert DE MEY, Bogusław WIĘCEK (2017). Detection of inner defects in industrial pipelines using transient IR thermography. Measurement Automation Monitoring. № 03, vol. 63, ISSN 2450–2855. P. 115–118.

[7] Zhao, X., Zhao, Y., Hu, S., Wang, H., Zhang, Y., & Ming, W. (2023). Progress in Active Infrared Imaging for Defect Detection in the Renewable and Electronic Industries. Sensors, 23(21), 8780. https://doi.org/10.3390/s23218780

[8] Visionplatform.ai. (2026, 3 січня). Thermal imaging for leak and hotspot detection in warehouses. https://visionplatform.ai/thermal–leak–hotspot–detection–in–warehouses/

[9] І. С. Беднарська, Т. В. Шелешей, Д. В. Риндюк, С. Р. Ліщук. (2026) Аналіз причин деградації теплової ізоляції енергетичного обладнання ТЕЦ. *Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова*. № 2 (505) 2026. 129–136. https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).14

[10] Беднарська І. С., Ліщук С. Р. Оцінка енергетичної ефективності теплової ізоляції обладнання енергоблоку ТЕЦ у післяремонтний період. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 37 (76) № 3 2026. Частина 2. 132–136. https://doi.org/10.32782/2663–5941/2026.3.2/19

[11] Lou C., Zhai C., Li L., Shang Y., Li X., Li D. (2025). Thermal insulation design for superheated steam pipe–line transport: Balancing technical and economic factors for optimal performance. *Applied Thermal Engineering*, 269, Part B, 126134. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126134.14.

[12] Firat Akin, Oktay Arikan. The effect of thermal aging on solid insulating materials: A case study for dielectric loss and dissipation factor based evaluations under different voltage levels and frequencies. *Engineering Failure Analysis*. Volume 148, June 2023, 107222. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107222

[13] Leem, Y., Kitagaki, R., Ishida, T., & Hagihara, H. (2024). Long–term stability and water vapor induced degradation of physico–chemical properties of XPS and PF. *Developments in the Built Environment*, 18, 100429. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100429

[14] Wagner, C., Obermeyer, M., & Lüchinger, R. (2020). A methodology for the assessment of multiple benefits of industrial energy efficiency measures. *SN Applied Sciences*, 2(2), 270. https://doi.org/10.1007/s42452–020–2071–2

[15] Naik, S., & Mallur, S. B. (2018, June). The benefits of energy efficiency in small and medium enterprises. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* (Vol. 376, No. 1, p. 012116). IOP Publishing. DOI 10.1088/1757–899X/376/1/012116PTM 24.020.16–73

[16] Лементар С. Ю., Беднарська І. С., Риндюк Д. В. Моделювання газодинаміки вологої пари в головних паропроводах атомної електростанції. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2021. № 5 (32). С. 159–167. https://doi.org/10.32838/2663–5941/2021.5/25

[17] Беднарська І. С., Риндюк Д. В. Аналіз підходів до оцінки теплового та напружено–деформованого стану елементів паропроводів АЕС. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. № 30 (69). Ч. 2. С. 12–16.

[18] Gao, J., Wang, X., Sun, T., Guo, Z., Yang, L., Ali, A., & Han, Y. (2026). A New Sensor for Harmonic Magnetic Field Detection in Pipelines Without Removing Insulation Layer. IEEE Transactions on Magnetics, 62, 1–11. DOI: 10.1109/TMAG.2025.3644349

© Беднарська І. С., Ліщук С. Р., Риндюк Д. В., Шелешей Т. В.
Дата першого надходження статті до видання: 15.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.08.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)