

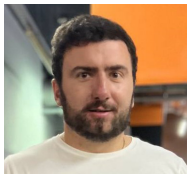
Inna S. Bednarska
Беднарська Інна Станіславівна



Tetiana V. Sheleshei
Шелешей Тетяна Вікторівна



Dmitro V. Rindyuk
Риндюк Дмитро Вікторович



Serhii R. Lishchuk
Ліщук Сергій Русланович



Stanislav S. Yatsenko
Яценко Станіслав Сергійович

УДК 536.24:621.18

PRIORITIZATION OF REPAIR OF THERMAL INSULATION OF CHP POWER EQUIPMENT BASED ON HEAT LOSS ESTIMATION

ПРІОРИТИЗАЦІЯ РЕМОНТУ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕЦ НА ОСНОВІ ОЦІНКИ ТЕПЛОВТРАТ

DOI https://doi.org/10.15589/smi2026.2(23).03

Inna S. Bednarska	Беднарська Інна Станіславівна, докт. філос., ст. викл. bednarska.inna@lll.kpi.ua ORCID: 0000-0002-5558-4467
Tetiana V. Sheleshei	Шелешей Тетяна Вікторівна, канд. техн. наук, доц. sheleshey_tanya@ukr.net ORCID: 0000-0002-7242-4107
Dmitro V. Rindyuk	Риндюк Дмитро Вікторович, канд. техн. наук, доц. rel_dv@ukr.net ORCID: 0000-0001-7770-7547
Serhii R. Lishchuk	Ліщук Сергій Русланович, докт. філос. serg23li9710@gmail.com ORCID: 0000-0001-7874-5019
Stanislav S. Yatsenko	Яценко Станіслав Сергійович, магістр yatsenkostas4@gmail.com ORCID: 0009-0000-2450-1326

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

Abstract. ***Aim.*** Substantiation and development of a mathematical apparatus for prioritizing repairs of thermal insulation coatings of power equipment of thermal power plants in conditions of strict limitation of financial resources of the enterprise. ***Methodology.*** The study is based on the use of quantitative infrared thermography methods for remote measurement of temperature fields and local heat losses on protective metal casings. Contact thermometry is used to calibrate thermal imaging equipment and determine the real degree of blackness of surfaces. Mathematical modeling of convective-radiative heat transfer was implemented using classical criterion equations of heat transfer. Statistical processing of experimental data was carried out using the least squares method and assessment of the adequacy of the developed models. ***Results.*** Experimental data on actual temperature fields and heat losses on steam pipes of sharp steam, turbine cylinders and heat exchangers of thermal power plants were obtained. Local excesses of the design standard indicators of heat loss from one point sixty-three hundredths to five point seventy-five hundredths were recorded. An integral index of the technical condition of thermal insulation was constructed, which combines temperature deviations from the safe limit, specific energy losses and the degree of physical demolition of the structure into a single scale from zero to one. Defects were categorized by the degree of urgency for repairs with the allocation of critical areas, where the index exceeds zero by seventy-five hundredths. ***Scientific novelty.*** For the first time, an integral criterion for assessing the condition of industrial thermal insulation was proposed and mathematically described, which comprehensively takes into account thermographic parameters, energy losses and the visual and physical condition of the protective

coating. A system of differentiated weight coefficients for different temperature groups of equipment was substantiated, which allows taking into account the destruction of exergy in high-temperature circuits. A mathematical algorithm for automatic ranking of repair work was developed. ***Practical significance.*** The implementation of the proposed methodology allows generating companies to rationally distribute a limited repair budget by first eliminating the most critical defects with a quick payback period. This ensures a reduction in fuel consumption, a reduction in greenhouse gas emissions into the atmosphere, and an increase in the overall efficiency of thermal power plants without the need for a complete renewal of the insulation ball of all equipment.

Key words: temperature; infrared thermography; thermal imaging monitoring; thermal insulation; CHP; non-destructive testing; heat loss; radiation coefficient; radiation-convective heat transfer; energy efficiency.

Анотація. ***Мета.*** Обґрунтування та розроблення математичного апарату пріоритетизації ремонтів теплоізоляційних покриттів енергетичного обладнання теплоелектроцентралей в умовах жорсткого лімітування фінансових ресурсів підприємства. ***Методика.*** Дослідження базується на використанні методів кількісної інфрачервоної термографії для дистанційного вимірювання температурних полів і локальних теплових втрат на захисних металевих кожухах. Контактна термометрія застосовується для калібрування тепловізійної техніки та визначення реального ступеня чорноти поверхонь. Математичне моделювання конвективно-радіаційного теплообміну реалізовано за допомогою класичних критеріальних рівнянь теплопередачі. Статистична обробка експериментальних даних проведена із застосуванням методу найменших квадратів і оцінки адекватності розроблених моделей. ***Результати.*** Отримано експериментальні дані щодо фактичних температурних полів і теплових втрат на паропроводах гострої пари, циліндрах турбін і теплообмінниках теплоелектроцентралей. Зафіксовано локальні перевищення проєктних нормативних показників втрат теплоти від одного цілого шістдесяти трьох сотих до п'яти цілих сімдесяти п'яти сотих разів. Побудовано інтегральний індекс технічного стану теплоізоляції, який об'єднує відхилення температури від безпечної межі, питомі енерговтрати та ступінь фізичного знесення конструкції в єдину шкалу від нуля до одиниці. Проведено категоризацію дефектів за ступенем терміновості проведення ремонтів із виділенням критичних ділянок, де індекс перевищує значення нуль цілих сімдесят п'ять сотих. ***Наукова новизна.*** Уперше запропоновано та математично описано інтегральний критерій оцінювання стану промислової теплоізоляції, який комплексно враховує термографічні параметри, енергетичні втрати та візуально-фізичний стан захисного покриття. Обґрунтовано систему диференційованих вагових коефіцієнтів для різних температурних груп обладнання, що дозволяє враховувати деструкцію ексергії у високотемпературних контурах. Розроблено математичний алгоритм автоматичного ранжування ремонтних робіт. ***Практична значимість.*** Упровадження запропонованої методики дозволяє генеруючим компаніям раціонально розподіляти обмежений ремонтний бюджет шляхом першочергового усунення найбільш критичних дефектів зі швидким терміном окупності інвестицій. Це забезпечує зниження витрат органічного палива, зменшення викидів парникових газів в атмосферу та підвищення загального коефіцієнта корисної дії теплоелектроцентралів без необхідності повного оновлення ізоляційної кулі всього обладнання.

Ключові слова: температура; інфрачервона термографія; тепловізійний моніторинг; теплова ізоляція; ТЕЦ; неруйнівний контроль; теплові втрати; коефіцієнт випромінювання; радіаційно-конвективний теплообмін; енергоефективність.

References

[1] Nardi, I., Lucchi, E., de Rubeis, T., Ambrosini, D. (2018). Quantification of Heat Energy Losses through the Building Envelope: A State-of-the-Art Analysis with Critical and Comprehensive Review on Infrared Thermography. *Building and Environment*. Vol. 146. P. 190–205. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.050

[2] Lucchi, E. (2018). Applications of Infrared Thermography in the Energy Audit of Buildings: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 82. P. 3077–3090. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031

[3] Kirimtat, A., Krejcar, O., Ekici, B., Tasgetiren, M. (2018). A Review of Infrared Thermography for the Investigation of Building Envelopes: Advances and Prospects. *Energy and Buildings*. Vol. 176. P. 390–406. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.052

[4] Yang, Y., Chen, Z., Wu, T., Semprey, A., Batsale, J.-C. (2022). In Situ Methodology for Thermal Performance Evaluation of Building Walls: A Review. *International Journal of Thermal Sciences*. 107687. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107687

[5] Lu, F., Kaviany, M., Williams, J., Addison-Smith, T. (2024). Heat, mass and momentum transport in wet mineral-wool insulation: Experiment and simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 228, 125644. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125644

[6] Jervell, V. G., Gjennestad, M. A., Trinh, T., Wilhelmsen, Ø. (2024). The influence of thermal diffusion on water migration through a porous insulation material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 227, 125576. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125576

[7] Cai, S., Xia, L., Xu, H., Li, X., Liu, Z., Cremaschi, L. (2022). Effect of internal structure on dynamically coupled heat and moisture transfer in closed-cell thermal insulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 187, 122391. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122391

[8] Fang, R., et al. (2024). Modeling and calculation of thermal insulation performance of aramid aerogel fibers based on fabric structural parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Volume 235. 126200. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126200

[9] Lou, C., Zhai, C., Li, L., Shang, Y., Li, X., Li, D. (2025). Thermal Insulation Design for Superheated Steam Pipeline Transport: Balancing Technical and Economic Factors for Optimal Performance. *Appl. Therm. Eng*. 269, 126134. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126134

[10] Fan, Lu, Massoud, Kaviany, Williams, J., Addison-Smith, Th. (2024). Heat, mass and momentum transport in wet mineral-wool insulation: Experiment and simulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 228. 125644. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125644

[11] Lou, C., Li, Y., Zhang, X., et al. (2024) Life cycle cost approach involving steam transport model for insulation thickness optimization of steam pipes. *Energy*, 299, 133658. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133658

[12] Bagge, H., Johansson, D. (2017) Moisture redistribution and thermal performance of mineral wool insulation under long-term conditions. *Energy and Buildings*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.024

[13] Zhang, T., et al. (2022) Economic thickness and life cycle cost analysis of insulating layer for the urban district steam heating pipe. *Case Studies in Thermal Engineering*, 34, 102058. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102058

[14] Terhan, M., Abak, S.S. (2023) Energy, exergy analysis and optimization of insulation thickness on buildings in a low-temperature district heating system. *Journal of Thermal Engineering*, 9(1), 161–178. https://doi.org/10.18186/thermal.1243502

[15] Kirimtat, A., Krejcar, O., Ekici, B., Tasgetiren, M. (2018) Future Trends and Current State of Infrared Thermography for Building Diagnostics. *Energy and Buildings*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.052

[16] 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

[17] Bednarska, I. S., Sheleshei, T. V., Ryndiuk, D. V., Lishchuk, S. R. (2026). 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*. 2(505): 129–136. https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).14 [in Ukrainian].

[18] Bednarska, I. S., Lishchuk, S. R. (2026) 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*. 37(76), Part 2(3): 132–136. https://doi.org/10.32782/2663–5941/2026.3.2/19 / [in Ukrainian].

Постановка завдання. Ефективне функціонування теплоелектроцентралей (далі – ТЕЦ) у сучасних умовах безпосередньо пов'язане з мінімізацією теплових втрат у навколишнє середовище через зовнішні поверхні високотемпературного обладнання та паропроводів. Проте тривала експлуатація, вібраційні навантаження та вплив вологи неминуче призводять до деградації теплоізоляційних конструкцій. Як показують інструментальні обстеження, реальний стан ізоляції після капітальних ремонтів часто не відповідає проєктним показникам, а локальні теплові втрати на дефектних ділянках можуть перевищувати нормативні значення на 150–300 %.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема підвищення енергетичної ефективності теплоелектроцентралей і зниження теплових втрат є одним із пріоритетних напрямів сучасних наукових досліджень. В умовах декарбонізації енергетики, зростання вартості енергоносіїв і переходу до сталого розвитку технічний стан теплоізоляції високотемпературного обладнання розглядається як важливий резерв підвищення ККД електростанцій.

Основні напрями досліджень охоплюють методи неруйнівної діагностики, моделювання деградації ізоляції та оптимізацію її технічного обслуговування.

Основою оцінювання стану теплоізоляції є методи інфрачервоної термографії, які забезпечують дистанційний контроль обладнання без зупинки технологічного процесу.

Значна увага приділяється підвищенню точності термографічних вимірювань. Зокрема, у роботах І. Нарді й інших досліджено вплив випромінювальної здатності металевих кожухів на точність визначення температури й теплових втрат, а також обґрунтовано необхідність застосування коригувальних коефіцієнтів і алгоритмів обробки зображень [1; 2]. Альтернативний підхід, що поєднує тепловізійний аналіз із прямими вимірюваннями теплового потоку, дозволяє підвищити точність калібрування моделей конвективно-радіаційного теплообміну [3; 4].

Важливий напрям сучасних досліджень пов'язаний із деградацією теплоізоляційних матеріалів. Робота F. Lu та співавторів [5] показала, що навіть незначне зволоження мінераловатної ізоляції різко збільшує теплові втрати, а CFD-моделювання ефективно описує процеси тепло- і масопереносу. Дослідження V. G. Jervell та співавторів [6] довели, що температурний градієнт спричиняє перерозподіл вологи у волокнистій ізоляції, що необхідно враховувати у прогнозуванні її довговічності. S. Cai та співавтори встановили, що внутрішня структура матеріалу істотно впливає на накопичення вологи й ефективну теплопровідність [7].

Перспективним напрямом є застосування аерогелевих матеріалів, які зберігають високі теплоізоляційні властивості навіть після тривалої експлуатації [8; 9]. Водночас численні дослідження свідчать, що локальні дефекти ізоляції здатні суттєво посилювати конвективний теплообмін, тому сучасні моделі враховують як теплопровідність матеріалу, так і рух повітря у внутрішніх порожнинах конструкції [10].

Сучасні підходи до оптимізації теплоізоляції базуються на аналізі вартості життєвого циклу, який ураховує капітальні й експлуатаційні витрати, зміну цін на енергоносії та термін окупності інвестицій [11].

C. Lou та співавтори запропонували математичні моделі оптимізації теплоізоляції паропроводів, що поєднують модель транспортування пари з економічним аналізом. Показано, що використання багатошарової ізоляції на основі аерогелю забезпечує мінімальні сумарні витрати протягом життєвого циклу та скорочує термін окупності до трьох років [12]. Аналогічні результати отримано T. Zhang зі співавторами для підземних паропроводів систем централізованого теплопостачання, де застосування композитної ізоляції дозволяє знизити повні витрати життєвого циклу [13].

Перспективним напрямом також є використання ексергетичного аналізу, який дає змогу оцінювати не лише величину теплових втрат, а й втрати корисного енергетичного потенціалу, що забезпечує більш обґрунтований вибір параметрів теплоізоляції [14; 15].

Отже, сучасні дослідження демонструють перехід від традиційних емпіричних методів до комплексних моделей, які поєднують термографічну діагностику, чисельне

моделювання, аналіз життєвого циклу й ексергетичне оцінювання [17; 18]. Це створює наукову основу для підвищення енергоефективності теплоенергетичного обладнання та обґрунтованого планування модернізації теплоізоляційних систем.

Відокремлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість фундаментальних і прикладних досліджень у галузі промислового теплообміну та неруйнівного контролю, низка питань, що мають критичне значення для практичної діяльності ТЕЦ в умовах жорсткого дефіциту фінансових ресурсів, залишається нерозв'язаною.

Наявні методики тепловізійного контролю здебільшого обмежуються фіксацією температурних аномалій і локальних теплових втрат. Вони не забезпечують автоматичного переведення цих фізичних величин у чіткий пріоритетний рейтинг ремонту.

Існуючі моделі обслуговування за фактичним станом не враховують комплексний вплив конструкційних особливостей високотемпературного обладнання ТЕЦ (наприклад, стиків матів турбін чи вібраційного ущільнення мінеральної вати на паропроводах) на швидкість деградації ізоляції.

У вітчизняній і світовій практиці бракує експрес-методів, які б дозволяли оперативно пов'язати виявлений за допомогою термографії дефект із конкретними фінансово-екологічними показниками: терміном окупності його усунення, обсягом збереженого палива (у тонах умовного палива) та кількістю викидів CO_2, яких вдалось уникнути.

Саме ці невирішені аспекти зумовлюють необхідність розроблення та наукового обґрунтування методики ранжування ремонтних робіт на основі запропонованого інтегрального індексу технічного стану теплоізоляції (далі – ІТС).

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення та наукове обґрунтування методики пріоритетизації ремонтів теплової ізоляції енергетичного обладнання ТЕЦ на основі інтегрального індексу її технічного стану (ІТС) та кількісного розрахунку фактичних теплових втрат. Реалізація цього підходу дозволить оптимізувати розподіл обмеженого бюджету підприємства, забезпечити максимальний енергетичний, економічний і екологічний ефект від інвестицій у реновацію теплоізоляційних конструкцій.

Методи, об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процеси деградації теплоізоляційних конструкцій і виникнення додаткових теплових втрат на зовнішніх поверхнях високотемпературного обладнання і паропроводів ТЕЦ в умовах реальної експлуатації.

Предметом дослідження є теплофізичні закономірності формування температурних полів на поверхні ізоляції, методи їх інструментального контролю, а також математичні моделі багатокритеріальної оптимізації та пріоритетизації ремонтних робіт.

Для забезпечення високої точності результатів і усунення систематичних і випадкових похибок у роботі застосовано комплексний підхід:

– визначення температурних полів проводилося методом кількісної інфрачервоної термографії з використанням тепловізора промислового класу (спектральний діапазон 7,5–14 мкм, температурна чутливість *NET D* ≤ 0,03 °C за 30 °C, похибка вимірювань – ±2 %);

– для нівелювання впливу низької випромінювальної здатності металевих захисних кожухів (ε ≈ 0,15…0,25) та відбитого фонового випромінювання паралельно застосовували контактну термометрію за допомогою каліброваної термопари ХК (хромель-копель) із цифровим перетворювачем (точність – ±0,5 °C). Це дозволило локально визначити реальний коефіцієнт випромінювання для кожної ділянки. Вплив швидкості вітру (руху повітря в цеху) контролювався за допомогою крильчастого анемометра з похибкою ±0,1 м/с, а отримані дані вводилися в розрахункові рівняння конвективного теплообміну;

– розрахунок питомих теплових втрат виконувався на основі критеріальних рівнянь теплообміну (числа Нуссельта, Грасгофа, Прандтля). Статистична обробка експериментальних даних здійснювалася методом найменших квадратів, а оцінювання адекватності розроблених моделей – за допомогою критерію Фішера та коефіцієнта детермінації R^2.

Для забезпечення високої репрезентативності та валідності вибірки експериментальні вимірювання проводилися протягом опалювального сезону на трьох однотипних енергоблоках ТЕЦ. Досліджено понад 120 локальних ділянок паропроводів гострої пари (температура теплоносія становить 540 °С), 18 мережевих підігрівників і 6 циліндрів високого і середнього тиску парових турбін. Кожне термографічне вимірювання на дефектних ділянках повторювалося не менше 5 разів за стабільного технологічного режиму роботи обладнання (коливання навантаження не перевищували ±3 %).

Отриманий масив первинних даних (понад 1 500 термограм) проходив процедуру фільтрації для виключення аномальних викидів (за критерієм Романовського). Довірчу ймовірність у статистичному аналізі прийнято на рівні $P = 0{,}95$, що повністю відповідає нормативним вимогам у промисловій теплоенергетиці.

Описана методологія вимірювань, алгоритм калібрування тепловізійної техніки за контактними датчиками та математичний апарат критеріальних рівнянь детально формалізовані в роботі, що забезпечує повну відтворюваність досліджень на будь-якому іншому об'єкті теплоенергетики.

Основний матеріал. У результаті проведених інструментальних обстежень та математичного моделювання було отримано масив експериментальних даних, на основі якого розроблено та практично реалізовано метод розрахунку інтегрального індексу технічного стану теплоізоляції (ІТС) для основного обладнання та паропроводів ТЕЦ.

На першому етапі досліджень було проведено серію тепловізійних вимірювань на експериментальних ділянках ТЕЦ. Для систематизації отриманих даних і оцінювання масштабів деградації теплоізоляційного шару було виділено три характерні типи обладнання з різними температурними режимами, як-от:

– група А (високотемпературне обладнання): паропроводи гострої пари (температура теплоносія $T = 540$ °С);

– група Б (середньотемпературне обладнання): циліндри середнього тиску (далі – ЦСТ) парових турбін ($T = 320…360$ °С);

– група В (низькотемпературне обладнання): мережеві підігрівачі та трубопроводи гарячої води (= 110...130 °С).

Узагальнені результати вимірювань температурних полів на захисних кожухах і розраховані значення питомих теплових втрат наведено в таблиці 1.

Розрахунок фактичних питомих теплових втрат $q_{факт}$ (Вт/м^2) для циліндричних і плоских поверхонь виконувався за формулою:

$$q_{факт} = \alpha \cdot (T_{ст} - T_{зв}),$$

де α – інтегральний коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні кожуха до довкілля, що враховує конвективну ($\alpha_к$) та радіаційну ($\alpha_р$) складові частини:

$$\alpha = \alpha_к + \alpha_р.$$

Компоненти коефіцієнта тепловіддачі визначалися за критеріальними рівняннями:

$$\alpha_к = \frac{Nu \cdot \lambda_{пов}}{L}$$

$$\alpha_р = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot \frac{(T_{ст} + 273{,}15)^4 - (T_{зв} + 273{,}15)^4}{T_{ст} - T_{зв}},$$

Таблиця 1. Теплофізичні параметри експериментальних ділянок обладнання ТЕЦ

Код ділянки	Тип обладнання та номінальний режим	Середня температура поверхні кожуха $T_{ср}$, °С	Максимальна температура в зоні дефекту T_{max}, °С	Питомі теплові втрати фактичні $q_{факт}$, Вт/м^2	Нормативні теплові втрати $q_{норм}$, Вт/м^2	Коефіцієнт перевищення нормативу $K_{перев}$
ПП-1.1	Паропровід гострої пари (пряма ділянка)	52,4	114,8	495	290	1,71
ПП-1.2	Паропровід гострої пари (арматурний вузол)	78,1	234,5	1840	320	5,75
ЦСТ-1	Бічна поверхня циліндра турбіни	48,2	142,0	810	210	3,86
ЦСТ-2	Фланцеве з'єднання циліндра	64,5	185,1	1320	250	5,28
МП-1	Корпус мережного підігрівача	38,0	62,3	245	150	1,63
МП-2	Трубопровід мережної води (D_N, 400)	42,3	78,5	390		

де Nu – число Нуссельта;

$\lambda_{пов}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря за визначальної температури;

L – визначальний геометричний розмір;

ε – експериментально визначений ступінь чорноти захисного покриття (ε = 0,22 для оцинкованої сталі та ε = 0,85 для відкритих ділянок мастикових або азбестових поверхонь);

σ_0 – стала Стефана – Больцмана ($5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2 · К^4)).

Для переходу до кількісного аналізу пріоритетності ремонтних робіт на основі розробленої структури критерію було виконано процедуру математичного нормування змінних. Параметри, що входять до рівняння ІТС, розраховувалися так. Відносна температура поверхні захисного кожуха:

$$\overline{T} = \frac{T_{факт} - T_{норм}}{T_{гранична} - T_{норм}},$$

де $T_{гранична}$ прийнята рівною 60 °С (відповідно до вимог техніки безпеки для запобігання опікам персоналу в разі випадкового контакту з поверхнею).

Відносні питомі теплові втрати:

$$\overline{Q} = \frac{q_{факт} - q_{норм}}{q_{макс} - q_{норм}},$$

де $q_{макс}$ – максимальне зафіксоване значення втрат у межах досліджуваного типу обладнання.

Ступінь механічного пошкодження або пошкодження від вологи конструкції (D) оцінювався за шкалою від 0 (відсутність видимих пошкоджень та слідів зволоження) до 1 (повне руйнування ізоляційного шару, наявність наскрізних тріщин і провисання мінераловатних матів, оголення гарячого металу).

На основі розрахунків чутливості та багатокритеріального аналізу експертних оцінок було сформовано матрицю вагових коефіцієнтів для трьох основних груп обладнання ТЕЦ (таблиця 2). Вибір вагових коефіцієнтів здійснювався з урахуванням фізичного змісту кожного із критеріїв і особливостей температурного режиму відповідної групи обладнання. Відносна температура поверхні характеризує рівень потенційної небезпеки для персоналу та ступінь порушення теплозахисних властивостей ізоляції, питомі теплові втрати характеризують безпосередній енергетичний ефект від усунення дефекту, а ступінь механічного пошкодження відображає фізичний стан теплоізоляційної конструкції та ризик подальшого розвитку дефекту. Тому ваги критеріїв визначалися не як рівнозначні, а з урахуванням їхнього очікуваного внеску у формування пріоритету ремонтних робіт.

Для високотемпературного обладнання (група А) найбільшу вагу $w_2 = 0{,}55$ надано питомим тепловим втратам, оскільки навіть локальний дефект на ділянці з високою температурою теплоносія може спричиняти значні абсолютні енергетичні втрати та відповідні економічні наслідки. Для середньотемпературного обладнання (група Б) вагові коефіцієнти розподілено більш рівномірно, оскільки температурний, енергетичний і фізичний критерії мають порівнянний вплив на технічний стан. Для низькотемпературного обладнання (група В) відносна вага фізичного пошкодження збільшена до $w_3 = 0{,}30$, що пов'язано з більшою роллю механічної деградації та зволоження теплоізоляції у формуванні її фактичного стану. Для всіх груп забезпечено умову нормування $\sum w_i = 1$.

Отже, розподіл вагових коефіцієнтів відображає різну фізичну значущість критеріїв для обладнання з різними температурними режимами. Збільшення ваги одного критерію супроводжується відповідним зменшенням ваг інших критеріїв, що забезпечує збереження єдиної нормованої шкали інтегрального індексу та можливість коректного порівняння об'єктів у межах відповідної температурної групи.

Для оцінювання стійкості запропонованого інтегрального критерію передбачено аналіз чутливості до зміни вагових коефіцієнтів у межах ±10 % від базових значень зі збереженням умови $\sum w_i = 1$. Такий аналіз дає змогу оцінити вплив зміни відносної значущості окремих критеріїв на результати пріоритизації ремонтів.

Результати розрахунку інтегрального індексу ІТС та категорування технічного стану для досліджених ділянок наведено на рисунку 1.

Таблиця 2. Вагові коефіцієнти для розрахунку ІТС за групами обладнання

Група обладнання	Ваговий коефіцієнт відносної температури, w_1	Ваговий коефіцієнт відносних теплових втрат, w_2	Ваговий коефіцієнт ступеня пошкодження конструкції, w_3	Сума вагових коефіцієнтів $\sum w_i$
Група А (високотемпературне)	0,25	0,55	0,20	1,00
Група Б (середньотемпературне)	0,30	0,45	0,25	1,00
Група В (низькотемпературне)	0,20	0,50	0,30	1,00

Аналіз графічних даних показує, що ділянка паропроводу ПП-1.2 (арматурний вузол) належить до категорії критичного стану (ІТС ≥ 0,75), що зумовлює необхідність її негайного включення до першочергової ремонтної відомості. Ділянки ЦСТ-1 та ЦСТ-2 перебувають у діапазоні 0,50 ≤ ІТС < 0,75 (потребують планового ремонту в найближчу зупинку блока), тоді як ПП-1.1 та МП-2 мають задовільний стан і потребують лише моніторингу. Об'єкт МП-1 класифікується як повністю працездатний.

Обговорення результатів. Отримані результати та запропонований інтегральний підхід до оцінювання стану теплоізоляційних конструкцій дозволяють глибше зрозуміти закономірності деградації захисних покриттів і оптимізувати процес управління ремонтами на теплоелектроцентралях.

Результати кількісної інфрачервоної термографії та розраховані питомі теплові втрати (табл. 1) добре погоджуються з експериментальними даними, отриманими в роботі [1], які також відзначали суттєве (до 5–6 разів) зростання локальних втрат теплоти в зонах складної геометрії. Фіксація значних температурних аномалій на фланцевих з'єднаннях (T_{max} = 185,1 °C для ділянки ЦСТ-2) і арматури паропроводів підтверджує висновки авторів [15] щодо критичного впливу щілин і нещільностей у стиках теплоізоляційних матів. Даний ефект зумовлений виникненням інтенсивних конвективних потоків, що підсилюють тепловіддачу в довкілля [11].

Подібно до досліджень авторів [5; 6], які за допомогою численного CFD-моделювання довели катастрофічний вплив зволоження волокнистої структури на її еквівалентну теплопровідність, наші результати розрахунку індексу ІТС для низькотемпературного обладнання (наприклад, ділянки МП-2 з показником ІТС = 0,41) демонструють високу чутливість критерію до ступеня фізичного пошкодження та вологовмісту (w_3 = 0,30). Це підтверджує необхідність зміщення фокуса із суто температурного моніторингу на комплексне оцінювання фізичного стану ізоляції, як це пропонували Х. Багге та Д. Йоханссон [12]. Водночас запропоновано методику інтегрального індексу ІТС, що усуває низку обмежень наявних моделей. На відміну від багатокритеріального методу ухвалення рішень [7], який дуже залежить від суб'єктивних експертних оцінок безпосередньо під час експлуатації, наш підхід базується на чітко формалізовано-

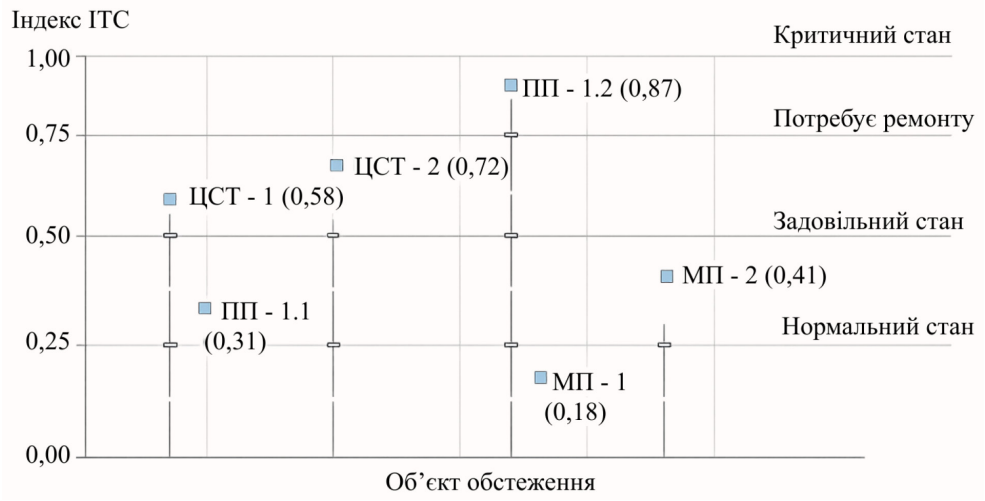


Рис. 1. Результати розрахунку індексу ІТС та розподіл об'єктів за категоріями технічного стану

му поєднанні інструментальних вимірювань (температура, тепловий потік) і нормованих коефіцієнтів деградації. Це значно підвищує об'єктивність результатів оцінювання у промислових умовах. Окрім того, використання диференційованих вагових коефіцієнтів для різних температурних груп обладнання (табл. 2) узгоджується із принципами ексергоекономічного аналізу [9; 11], оскільки віддає найбільший пріоритет (w_2 = 0,55) енергетичним втратам саме у високотемпературних контурах (паропроводи гострої пари), де потенціал деструкції ексергії є максимальним.

Для додаткового оцінювання практичної відмінності запропонованої методики проведено її порівняння з основними підходами, що застосовуються для оцінювання стану теплоізоляції та визначення пріоритетності ремонтних заходів. Традиційний термографічний підхід переважно орієнтований на виявлення температурних аномалій і локалізацію дефектів, але сам собою не формує кількісного рейтингу ремонтних робіт. Експертні та багатокритеріальні методи дають змогу враховувати декілька факторів одночасно, проте результат значною мірою залежить від прийнятої системи експертних оцінок. Економічні підходи, зокрема методи оцінювання вартості життєвого циклу, забезпечують можливість порівняння інвестиційних рішень, однак потребують додаткових даних щодо вартості ремонту, експлуатаційних витрат і прогнозованого строку служби.

На відміну від зазначених підходів, запропонований інтегральний індекс ІТС безпосередньо поєднує результати інструментального контролю температури, оцінку питомих теплових втрат і фізичного стану теплоізоляційної конструкції в єдиній нормованій шкалі. Це дає змогу не лише виявити дефект, а й кількісно визначити його відносний пріоритет для проведення ремонтних робіт. Отже, основною перевагою методики є формалізований перехід від результатів технічної діагностики до ранжування об'єктів за терміновістю ремонту без необхідності проведення окремої експертної процедури для кожної виявленої дефектної ділянки.

Наведене порівняння (табл. 3) запропонованої методики з основними підходами до пріоритизації ремонтів показує, що запропонований підхід поєднує переваги інструментальної діагностики та багатокритеріального оцінювання, доповнює їх автоматизованим визначенням пріоритету ремонтних робіт. Водночас методика не замінює економічного обґрунтування інвестиційних рішень, а може використовуватися як первинний інструмент технічного ранжування дефектів перед детальним аналізом вартості ремонту та його окупності.

Гіпотеза про невідповідність фактичного стану ізоляції проєктним параметрам повністю підтвердилася: інструментальне обстеження виявило перевищення нормативних теплових втрат на пошкоджених ділянках в 1,63–5,75 раза ($K_{перев}$ у таблиці 1). Це свідчить про глибоку деградацію теплофізичних властивостей матеріалів під впливом тривалої експлуатації та температурних деформацій.

Гіпотеза про необхідність переходу до інтегральної оцінки виявилася спроможною. Порівняння лише за одним показником (наприклад, за температурою поверхні) часто дає хибне уявлення про пріоритетність ремонту. Так, ділянка ПП-1.1 має меншу температуру поверхні (52,4 °С), ніж ЦСТ-2 (64,5 °С), проте через значну протяжність та високий потенціал енергозбереження її інтегральний внесок у загальні втрати ТЕЦ є суттєвим. Завдяки впровадженню індексу ІТС вдалося збалансувати температурні, енергетичні та фізичні параметри дефектів у єдиній шкалі.

Таблиця 3. Порівняння запропонованої методики з основними підходами до пріоритизації ремонтів

Підхід	Температурна діагностика	Теплові втрати	Фізичний стан ізоляції	Формування рейтингу ремонтів
Термографічний контроль	+	частково	–	–
Експертний/багатокритеріальний підхід	залежно від моделі	залежно від моделі	+	частково
Економічний підхід на основі вартості життєвого циклу	–	+	частково	+
Запропонований ІТС	+	+	+	+

Гіпотеза про можливість оптимізації ремонтного бюджету за умов фінансового дефіциту отримала практичне підтвердження. Застосування розробленої класифікації ІТС (рис. 1) дозволило чітко розділити обстежені об'єкти на категорії за терміновістю втручання.

Висновки. Розроблено та математично формалізовано інтегральний індекс технічного стану теплоізоляції (ІТС), який забезпечує можливість переходу від суб'єктивного планування ремонтів на ТЕЦ до кількісного й об'єктивного оцінювання на основі нормованих показників температурного поля, питомих енергетичних втрат та фізичної деградації конструкції.

Обґрунтовано розподіл вагових коефіцієнтів для розрахунку ІТС за трьома основними температурними групами обладнання з урахуванням фізичного змісту критеріїв і особливостей температурного режиму. Встановлено, що для високотемпературного сегмента ключовим фактором пріоритетності є питомі втрати енергії ($w_2 = 0{,}55$), тоді як для низькотемпературних систем суттєво зростає вплив ступеня фізичного руйнування та вологовмісту захисного шару ($w_3 = 0{,}30$).

Інструментальне виявлення локальних перевищень нормативних теплових втрат в 1,63–5,75 раза підтвердило гіпотезу про суттєву деградацію теплофізичних властивостей діючих ізоляційних конструкцій. Це спростовує традиційне припущення про достатність орієнтації на проєктні паспортні характеристики в розрахунках теплового балансу підприємств і доводить необхідність регулярного інструментального коригування розрахункових моделей. Запропонована методологія усуває критичну ваду попередніх теорій і моделей, яка полягала в надмірній залежності від суб'єктивних експертних оцінок або неможливості швидкої трансформації результатів термографічного сканування в чіткий пріоритетний рейтинг робіт. Інтеграція індексу ІТС з категоруванням стану дозволяє автоматизувати процес ухвалення рішень щодо першочергового ремонту критичних дефектів.

Упровадження розробленого підходу у практику теплоенергетики забезпечує відчутний прогрес у переході до цифрових систем управління активами ТЕЦ за фактичним станом, що дозволяє досягти максимального екологічного й енергетичного ефекту на кожну інвестовану одиницю капіталу. Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні комп'ютеризованої системи автоматичного розпізнавання дефектів ізоляції на термограмах за допомогою алгоритмів машинного зору з миттєвим розрахунком локального індексу ІТС та інтеграцією цих даних у загальній геоінформаційній моделі теплових мереж і обладнання ТЕЦ.

Окремим напрямом подальших досліджень є розширення аналізу чутливості інтегрального індексу до варіації вхідних параметрів і вагових коефіцієнтів, а також проведення кількісного порівняння запропонованої методики з альтернативними методами пріоритизації ремонтів з урахуванням економічних показників, зокрема вартості ремонтних заходів, терміну їх окупності й ефекту від зниження теплових втрат.

Список літератури

[1] Nardi I., Lucchi E., de Rubeis T., Ambrosini D. Quantification of Heat Energy Losses through the Building Envelope: A State-of-the-Art Analysis with Critical and Comprehensive Review on Infrared Thermography. *Building and Environment*. 2018. Vol. 146. P. 190–205. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.050

[2] Lucchi E. Applications of Infrared Thermography in the Energy Audit of Buildings : A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 3077–3090. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031

[3] Kirimtat A., Krejcar O., Ekici B., Tasgetiren M. A Review of Infrared Thermography for the Investigation of Building Envelopes: Advances and Prospects. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 176. P. 390–406. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.052

[4] Yang Y., Chen Z., Wu T., Semprey A., Batsale J.-C. In Situ Methodology for Thermal Performance Evaluation of Building Walls : A Review. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022. P. 107687. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107687

[5] Lu F., Kaviany M., Williams J., Addison-Smith T. Heat, mass and momentum transport in wet mineral-wool insulation: Experiment and simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. № 228. P. 125644. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125644

[6] Jervell V. G., Gjennestad M. A., Trinh T., Wilhelmsen Ø. The influence of thermal diffusion on water migration through a porous insulation material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. № 227. P. 125576. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125576

[7] Cai S., Xia L., Xu H., Li X., Liu Z., Cremaschi L. Effect of internal structure on dynamically coupled heat and moisture transfer in closed-cell thermal insulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. № 187. P. 122391. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122391

[8] Fang R. et al. Modeling and calculation of thermal insulation performance of aramid aerogel fibers based on fabric structural parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 235. P. 126200. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126200

[9] Lou C., Zhai C., Li L., Shang Y., Li X., Li D. Thermal Insulation Design for Superheated Steam Pipeline Transport: Balancing Technical and Economic Factors for Optimal Performance. *Appl. Therm. Eng*. 2025. № 269. P. 126134. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126134

[10] Fan Lu, Massoud Kaviany, Williams J., Addison-Smith Th. Heat, mass and momentum transport in wet mineral-wool insulation: Experiment and simulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 228. P. 125644. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125644

[11] Lou C., Li Y., Zhang X. et al. Life cycle cost approach involving steam transport model for insulation thickness optimization of steam pipes. *Energy*. 2024. № 299. P.133658. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133658

[12] Bagge H., Johansson D. Moisture redistribution and thermal performance of mineral wool insulation under long-term conditions. *Energy and Buildings*. 2017. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.024

[13] Zhang T. et al. Economic thickness and life cycle cost analysis of insulating layer for the urban district steam heating pipe. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. № 34. P. 102058. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102058

[14] Terhan M., Abak S. S. Energy, exergy analysis and optimization of insulation thickness on buildings in a low-temperature district heating system. *Journal of Thermal Engineering*. 2023. № 9 (1). P. 161–178. https://doi.org/10.18186/thermal.1243502

[15] Kirimtat A., Krejcar O., Ekici B., Tasgetiren M. Future Trends and Current State of Infrared Thermography for Building Diagnostics. *Energy and Buildings*. 2018. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.052

[16] Gao J., Wang X., Sun T., Guo Z., Yang L., Ali A., Han Y. A New Sensor for Harmonic Magnetic Field Detection in Pipelines Without Removing Insulation Layer. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2026. № 62. P. 1–11. DOI 10.1109/TMAG.2025.3644349

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

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

© Беднарська І. С., Шелешей Т. В., Риндюк Д. В., Ліщук С. Р., Яценко С. С.
Дата надходження статті до редакції: 17.07.2026
Дата затвердження статті до друку: 08.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 20.10.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0