

Беднарська І.С.

<https://orcid.org/0000-0002-5558-4467>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ліщук С.Р.

<https://orcid.org/0000-0001-7874-5019>

доктор філософії

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОБЛОКУ ТЕЦ У ПІСЛЯРЕМОНТНИЙ ПЕРІОД

Статтю присвячено актуальній проблемі підвищення енергоефективності та експлуатаційної надійності об'єктів генерації електричної та теплової енергії України в умовах дефіциту енергоресурсів та значного зношення основного енергетичного обладнання електростанцій. Об'єктом дослідження є процеси теплопередачі через багатошарові ізоляційні конструкції обладнання енергоблоку теплоелектроцентралі потужністю 250 МВт. Авторами проведено комплексний інструментально-розрахунковий аналіз стану теплової ізоляції котлоагрегату ТГМП-344 «А», циліндрів парової турбіни та системи паропроводів безпосередньо після завершення капітального ремонту. У роботі застосовано методику інфрачервоної термографії (із використанням тепловізора FLIR T-335) та контактної термометрії для ідентифікації зон аномального перегріву. Наукова новизна дослідження полягає у верифікації фактичних питомих теплових втрат та їх приведенні до нормативних умов згідно з технічними документами. Встановлено, що при проведенні регламентних ремонтів, на практиці спостерігається значна невідповідність фактичних показників проектним значенням. Зокрема, виявлено локальні зони на корпусах турбін з температурою 50-62 °С та критичні дефекти на трубопроводах подачі пари до живильних турбонасосів, де температура поверхні сягає 120-450 °С через руйнування ізоляційного шару. Доведено, що теплові втрати на дефектних ділянках перевищують норму на 150-300%, що призводить до перевитрат палива та порушення санітарно-гігієнічних норм праці. Авторами систематизовано причини деградації ізоляції: механічні пошкодження кожухів, просідання мінераловатних матів та відсутність ізоляції на складних геометричних вузлах. За результатами дослідження розроблено практичні рекомендації щодо впровадження сучасних базальтових та муліто-кремнеземистих матеріалів, а також знімних термочохлів для запірної арматури.

Ключові слова: тепла ізоляція, енергоефективність, ТЕЦ, теплові втрати, термографія, енергоблок, питомі витрати палива, температура, трубопроводи, циліндри турбіни, паропроводи, деградація ізоляції, енергетична безпека.

Постановка проблеми. Сучасний стан енергетичного сектору України характеризується високим ступенем зношеності основного обладнання теплових електричних станцій (ТЕС) та теплоелектроцентралей (ТЕЦ), більшість з яких перебуває в експлуатації понад 40-50 років. В умовах дефіциту енергоресурсів, стрімкого зростання вартості органічного палива та посилення екологічних вимог щодо викидів парникових газів, питання підвищення енергоефективності діючого обладнання набуває стратегічного значення для енергетичної безпеки держави.

Одним із найбільш дієвих та економічно обґрунтованих методів зниження питомих витрат

палива на відпуск енергії є мінімізація теплових втрат у навколишнє середовище через зовнішні поверхні основного та допоміжного обладнання. Теплова ізоляція енергоблоків ТЕЦ та ТЕС (турбінних установок, котлоагрегатів, паропроводів високого тиску та систем регенерації) відіграє критичну роль у забезпеченні розрахункового теплового балансу циклу.

Невідповідність стану теплової ізоляції нормативним вимогам (зокрема ГКД 34.20.507-2003) [1] призводить до низки негативних наслідків: енергетичні втрати, технологічні ризики, порушення умов охорони праці.

Енергетичні втрати полягають в перевищенні температури на поверхні ізоляції понад нормативні +45 °С (при температурі повітря +25 °С), що спричиняє додаткові втрати теплоти, що еквівалентно спалюванню тисяч тон умовного палива на рік.

Технологічні ризики полягають в тому, що порушення температурного режиму роботи металу трубопроводів та корпусів турбін може призвести до нерівномірного термічного розширення, появи тріщин та зниження надійності обладнання.

Порушення умов охорони праці: висока температура поверхонь у робочій зоні створює небезпечні умови для персоналу та порушує санітарно-гігієнічні норми експлуатації.

Особливо актуальним є проведення дослідження в контексті капітальних ремонтів та модернізацій. Верифікація якості виконаних ізоляційних робіт шляхом інструментального обстеження та теплотехнічних розрахунків дозволить не лише оцінити фактичний стан енергоефективності, а й розробити рекомендації щодо впровадження нових теплоізоляційних матеріалів з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання структуризації та мінімізації теплових втрат на великих промислових об'єктах залишається пріоритетним напрямком сучасних енергетичних досліджень. Як свідчать результати аналізу енергоефективності потужних підприємств, зокрема ПАТ «Камет-Сталь» в 2024 р. [2, с.39], навіть за умови стабільного функціонування систем теплопостачання, рівень енерговтрат залишається значним і не опускається нижче 18,9%. Дослідження підтверджують, що найбільша частка неефективності припадає саме на трубопровідні мережі (7,3%) та теплообмінне обладнання (5,8%), що корелює з проблематикою експлуатації ТЕЦ та ТЕС, де стан магістральних паропроводів та допоміжних систем теплопередачі є визначальним фактором загального ККД енергоблоку.

Особлива увага в сучасній науковій літературі приділяється інерційності систем енергозабезпечення: встановлено, що питомі витрати тепла на одиницю продукції мають тенденцію до зростання при зниженні виробничого навантаження, що потребує впровадження систем цифрового моніторингу та адаптивного управління. Отримані дані щодо потенціалу зниження втрат на 6-8% шляхом реконструкції інфраструктури та модернізації ізоляційних елементів підкреслюють доцільність інструментального обстеження об'єктів генерації.

Такий підхід дозволяє сформувати техніко-аналітичну основу для впровадження систем рекуперації та оптимізації режимів теплообміну, що є важливим для стабілізації теплового балансу в умовах змінного графіку навантажень ТЕЦ.

Значний внесок у розв'язання проблем експлуатаційної надійності та теплової ефективності енергообладнання зроблено у колективній монографії за редакцією фахівців НАН України «Моделі та методи підвищення ефективності та безпеки експлуатації об'єктів теплоенергетики» [3]. Авторами обґрунтовано системний підхід до діагностики складних теплоенергетичних об'єктів, що базується на поєднанні традиційних методів теплового контролю з інноваційними алгоритмами машинного навчання (в тому числі архітектур LSTM) для прогнозування аномальних станів. Особливу увагу приділено вирішенню обернених завдань теплопровідності, що дозволяє з високою точністю ідентифікувати параметри теплообміну в зонах з обмеженим доступом. Розроблені математичні моделі температурних полів та методики числового розв'язання функціоналів теплопровідності створюють надійну теоретичну базу для верифікації результатів інструментального обстеження ізоляції енергоблоків, що дозволяє не тільки фіксувати поточні втрати тепла, а й моделювати динаміку деградації захисних конструкцій під впливом.

Окремим стратегічним вектором досліджень є оцінка впливу систем централізованого теплопостачання (СЦТ) на екологічну безпеку та кліматичні зміни [4, с.60]. Згідно з прогнозованими сценаріями розвитку енергетики України до 2050 року, енергетичний сектор генерує близько 65% загального обсягу парникових газів, значна частина яких припадає на спалювання викопного палива у СЦТ. Наукові прогнози вказують на можливість скорочення викидів CO₂ у 2,5-4,4 рази за умови глибокої структурної трансформації галузі. У цьому контексті мінімізація втрат теплової енергії на етапах генерації та транспортування, зокрема шляхом модернізації теплової ізоляції на потужних об'єктах, таких як ТЕЦ та ТЕС, розглядається як ключовий технологічний інструмент реалізації оптимістичного сценарію декарбонізації та підвищення енергоефективності паливного комплексу країни.

Дослідження досвіду впровадження енергоефективних заходів на виробничих підприємствах ЄС [5-8] підтверджує, що ключовими бар'єрами для модернізації є не лише фінансові фактори, а й брак точних знань про енергоефективні вигоди

та специфічні технологічні обмеження. Це актуалізує роль якісного енергетичного аудиту як інструменту виявлення прихованих зон неефективності, що є критично важливим для точної оцінки доцільності оновлення теплової ізоляції на великих енергетичних об'єктах.

Незважаючи на значну кількість теоретичних розробок, залишається недостатньо висвітленим питання фактичної ефективності теплової ізоляції на великих об'єктах генерації (таких як ТЕЦ, ТЕС) безпосередньо після проведення капітальних ремонтів, що й зумовлює необхідність цього дослідження.

Постановка завдання. Ефективність функціонування сучасних ТЕЦ та ТЕС значною мірою лімітується станом теплової ізоляції енерготехнологічного обладнання. Проблема полягає в необхідності підтвердження фактичної енергоефективності ізоляційних конструкцій після проведення капітальних ремонтів, оскільки теоретичні розрахунки не завжди враховують реальні умови експлуатації, якість монтажних робіт та деградацію матеріалів під впливом високих температур.

На прикладі енергоблоку однієї з українських ТЕЦ, забезпеченої потужним котлоагрегатом ТГМП-344 «А» та турбоустановкою відповідної потужності, постає завдання комплексної верифікації стану теплового захисту. Основним викликом є виявлення локальних зон наднормативних втрат теплоти, що виникають внаслідок порушення герметичності кожухів, просідання мінераловатних матів або наявності неізольованих ділянок на складних вузлах (фланцеві з'єднання, арматура, компенсатори).

Метою статті є проведення комплексного інструментально-розрахункового аналізу стану теплової ізоляції основного та допоміжного обладнання енергоблоку ТЕЦ після завершення капітального ремонту для встановлення ступеня його відповідності чинним нормативним вимогам енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-практичні завдання:

- проведення інструментального обстеження поверхонь циліндрів високого, середнього та низького тиску турбіни, а також газоповітряних трактів та паропроводів з використанням сучасних засобів тепловізійного контролю та контактної термометрії.

- визначення фактичних питомих теплових втрат через поверхні ізоляції та їх приведення до нормативних умов (температура навколишнього повітря +25 °С) згідно з методиками, закріпленими у ГКД 34.20.507-2003.

- порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних із проектними та нормативними показниками для ідентифікації критичних ділянок, де температура поверхні перевищує встановлений ліміт у +45 °С.

- виявлення та систематизація типових дефектів теплоізоляційних конструкцій (наприклад, на трубопроводах живильних турбонасосів та газоходах), що призводять до неконтрольованого розсіювання теплової енергії.

- розробка практичних рекомендацій щодо модернізації ізоляційних шарів із застосуванням сучасних базальтових та муліто-кременеземистих матеріалів для мінімізації втрат палива та підвищення ККД енергоблоку в цілому.

Об'єктом дослідження є процеси теплопередачі через багатошарові ізоляційні конструкції обладнання енергоблоку ТЕЦ.

Предметом дослідження є фактичні теплотехнічні показники (температура, тепловий потік) ізоляції турбін, котла та паропроводів у післяремонтний період.

Вирішення цих завдань дозволить не лише оцінити якість проведених ремонтних робіт, а й сформулювати науково обґрунтований підхід до управління енергоефективністю на об'єктах великої генерації в умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилось на базі енергоблоку ТЕЦ потужністю 250 МВт. Основними об'єктами тепловізійного обстеження та теплотехнічних розрахунків стали: котлоагрегат ТГМП-344 «А», циліндри парової турбіни (ЦВТ, ЦСТ-1, ЦСТ-2), а також система паропроводів високого тиску та допоміжні трубопроводи живильних турбонасосів (ЖТН).

На момент проведення випробувань енергоблок працював у сталому режимі з навантаженням, близьким до номінального (70-80%), що забезпечило стабільність температурних полів на поверхнях обладнання. Температура докільця в машинному залі під час замірів становила в середньому від +17 °С до +30 °С, залежно від відмітки та близькості до джерел тепловиділення.

Методика проведення випробувань наступна: для визначення фактичного стану теплової ізоляції використовувався метод інфрачервоної термографії (тепловізор FLIR T-335) та контактної термометрії. Тепловізійна зйомка дозволила ідентифікувати зони аномального перегріву, що свідчить про дефекти ізоляційного шару або порушення герметичності захисних кожухів.

Розрахунок фактичних питомих теплових втрат (q_f) здійснювався на основі вимірної температури зовнішньої поверхні ізоляції (t_b) та температури довкілля (t_o) за формулою (1):

$$q_f = \alpha \cdot (t_b - t_o) \quad (1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні ізоляції до навколишнього повітря, що враховує конвективну та променеву складові.

Для порівняння результатів із нормативними значеннями (згідно з ГКД 34.20.507-2003) проводилося приведення фактичних втрат до розрахункових умов (температура повітря +25 °С) за формулою (2):

$$q_{pv} = q_f \cdot \frac{t_m - 25}{t_m - t_o} \quad (2)$$

де t_m – температура теплоносія всередині обладнання.

Аналіз результатів обстеження турбінного відділення. Результати замірів на циліндрах турбіни показали, що після капітального ремонту більшість поверхонь відповідають нормам. Однак у зонах паровпуску ЦВТ та ЦСТ-1 зафіксовано локальні температури поверхні від 50 °С до 62 °С, що перевищує нормативні +45 °С. Це зумовлено складністю геометричної форми корпусів та наявністю чисельних фланцевих з'єднань, де щільне прилягання ізоляційних матів ускладнене.

Найбільш критична ситуація виявлена на трубопроводах подачі пари до ЖТН та на лініях відборів пари. На окремих ділянках, де металеве покриття (кожух) було деформоване або відсутнє, температура поверхні сягала 120-150 °С, а у місцях повного руйнування ізоляції – до 450 °С. Питомі теплові втрати на таких ділянках перевищують норму на 150-300%, що створює значний «енергетичний дефіцит» та підвищує температуру в робочій зоні персоналу.

Обстеження котельного відділення: аналіз стану ізоляції газоходів та повітроходів котла ТГМП-344 «А» показав типову проблему для обладнання з тривалим терміном експлуатації – руйнування ізоляції на компенсаторах та лючках-лазах. Через значні вібрації та температурні розширення традиційна мінераловатна ізоляція просідає, утворюючи незахищені ділянки, через які відбуваються значні втрати теплоти відпрацьованих газів, що безпосередньо знижує ККД котлоагрегату.

Основними причинами незадовільного стану окремих вузлів є: механічне пошкодження металевого кожуха під час експлуатації та ремонтних робіт; просідання мінераловатних матів під дією

вібрації та власної ваги на вертикальних ділянках; відсутність ізоляції на складних геометричних елементах (компенсатори, фланці), що потребують знімних ізоляційних конструкцій.

Для підвищення енергоефективності блоку, що розглядався, рекомендовано виконати відновлення захисного алюмінієвого/сталевого покриття на трубопроводах ЖТН. Також потрібно впровадити сучасні багат шарові ізоляційні конструкції на основі базальтового супертонкого волокна (БСТВ) або муліто-кремнеземистих матів для зон з температурою понад 300 °С. Застосувати знімні теплоізоляційні чохла на фланцевих з'єднаннях та запірній арматурі для полегшення доступу під час майбутніх оглядів без руйнування основного ізоляційного шару

Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка динамічної моделі теплових втрат енергоблоку, яка б дозволяла в режимі реальної години оцінювати економічні збитки від деградації теплової ізоляції та оптимізувати графіки ремонтних робіт.

Висновки. За результатами проведеного комплексно-інструментального обстеження та теплотехнічних розрахунків стану теплової ізоляції обладнання енергоблоку ТЕЦ потужністю 250 МВт після капітального ремонту, можна зробити наступні висновки:

- встановлено, що після проведення ремонтних робіт основні масиви теплової ізоляції корпусів турбіни (ЦВТ, ЦСТ-1, ЦСТ-2) та котлоагрегату ТГМП-344 «А» в цілому забезпечують підтримання технологічних параметрів. Проте інструментальний контроль виявив чисельні локальні зони, де фактичні теплові втрати суттєво перевищують нормативні значення, визначені ГКД 34.20.507-2003.

- виявлено, що на значній кількості ділянок температура зовнішньої поверхні ізоляції перевищує допустиму межу +45 °С. Зокрема, в зонах паровпуску циліндрів турбіни зафіксовано температури 50-62 °С. Найбільш критичні відхилення спостерігаються на допоміжних трубопроводах (пара на ЖТН, лінії відборів), де через руйнування покривного шару температура поверхні сягає 120-150 °С, а на неізольованих ділянках (арматура, лючки) – до 450 °С.

- розрахункове приведення фактичних втрат до нормативних умов показало, що питомі теплові втрати на дефектних ділянках перевищують норму на 150–300%. Це призводить до нераціонального використання палива та зниження загального ККД енергоблоку. Наявність зон з відсутньою ізоляцією на газоходах котла додатково збільшує втрати тепла з відхідними газами, що негативно впливає на екологічні та економічні показники ТЕЦ.

Список літератури:

1. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. ПТЕ, м. Харків 2019 р.
2. Horskyi, V. Efficiency of thermal energy consumption at industrial enterprises of Ukraine in conditions of environmental restrictions. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2025. № 23(1), p. 32-43. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2025-1-23-32-43>
3. Babak, V.P., Zaporozhets, A.O., Sverdlova, A.D., & Khaidurov, V.V. Models and methods of improving the efficiency and safety of the operation of thermal power equipment. *Kyiv: Naukova Dumka*. 2023. doi: 10.15407/978966-00-1931-7.
4. Derii, V., Nechaieva, T., & Leshchenko, I. Assessment of the effect of structural changes in Ukraine's district heating on the greenhouse gas emissions. *Science and Innovation*. 2023. № 19(4), p. 57–65. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.057>
5. Trianni, A.; Cagno, E.; Farné, S. Barriers, Drivers and Decision-Making Process for Industrial Energy Efficiency: A Broad Study among Manufacturing Small and Medium-Sized Enterprises. *Appl. Energy*. 2016. №162, p. 1537–1551. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.078>
6. Lunt, P., Ball, P., & Levers, A. Barriers to industrial energy efficiency. *International Journal of Energy Sector Management*. 2014. №8(3), p. 380-394. <https://doi.org/10.1108/IJESM-05-2013-0008>
7. Wagner, C., Obermeyer, M., & Lüchinger, R. A methodology for the assessment of multiple benefits of industrial energy efficiency measures. *SN Applied Sciences*. 2020. № 2(2), 270 p. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2071-2>
8. Naik, S., & Mallur, S. B. The benefits of energy efficiency in small and medium enterprises. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. 2018, June. Vol. 376, No. 1, p. 012116. IOP Publishing. DOI 10.1088/1757-899X/376/1/012116PTM 24.020.16-73.
9. 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>
10. 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) Частина № 2. С. 12-16.

Bednarska I.S. Lishchuk S.R. ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF THERMAL INSULATION OF CHP POWER UNIT EQUIPMENT IN THE POST-REPAIR PERIOD

The article is devoted to the urgent problem of increasing energy efficiency and operational reliability of electric and thermal energy generation facilities in Ukraine in conditions of energy shortage and significant wear of the main power equipment of power plants. The object of the study is the processes of heat transfer through multilayer insulating structures of the equipment of the power unit of the thermal power plant with a capacity of 250 MW. The authors conducted a comprehensive instrumental and computational analysis of the state of thermal insulation of the boiler unit, steam turbine cylinders and steam pipeline system immediately after the completion of the overhaul. The work used the method of infrared thermography (using the FLIR T-335 thermal imager) and contact thermometry to identify zones of abnormal overheating. The scientific novelty of the study lies in the verification of actual specific heat losses and their reduction to regulatory conditions in accordance with technical documents. It was found that during routine repairs, in practice, there is a significant discrepancy between actual indicators and design values. In particular, local zones on turbine housings with a temperature of 50-62 °C and critical defects on steam supply pipelines to feed turbopumps were detected, where the surface temperature reaches 120-450 °C due to the destruction of the insulation layer. It was proven that heat losses in defective areas exceed the norm by 150-300%, which leads to excessive fuel consumption and violation of sanitary and hygienic standards of work. The authors systematized the causes of insulation degradation: mechanical damage to casings, subsidence of mineral wool mats and lack of insulation on complex geometric nodes. Based on the results of the study, practical recommendations were developed for the introduction of modern basalt and mullite-silica materials, as well as removable thermal covers for shut-off valves.

Keywords: thermal insulation, energy efficiency, CHP, heat loss, thermography, power unit, specific fuel consumption, temperature, pipelines, turbine cylinders, steam pipelines, insulation degradation, energy security.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026