

УДК 536.24:621.18
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.2\(505\).14](https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).14)

ANALYSIS OF THE CAUSES OF THERMAL INSULATION DEGRADATION OF CHP POWER EQUIPMENT

АНАЛІЗ ПРИЧИН ДЕГРАДАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕЦ

Inna S. Bednarska
bednarska.inna@lil.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., асистент

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. The purpose of the study is to establish the patterns of thermal insulation degradation of CHP power equipment with a capacity of 500 MW based on the analysis of the actual technical condition and identification of the main operational factors affecting the degradation intensity.

Method. A set of instrumental and analytical methods was used, including infrared thermography, contact temperature measurements, system analysis, defect classification, and comparative analysis. Data processing was based on the evaluation of surface temperature fields and the correlation between thermal anomalies and insulation defects.

Results. It was established that thermal insulation degradation has a complex nature and is caused by thermal loads, vibrations, mechanical damage, and moisture. The main degradation mechanisms include subsidence and compaction of fibrous materials, damage to protective casings, and the formation of local uninsulated zones. The most vulnerable elements are nodes with complex geometry (flanges, valves, compensators). Damage to protective coatings was identified as a key initiating factor.

Scientific novelty. The novelty lies in identifying the systemic nature of insulation degradation under real operational conditions and establishing patterns of spatial distribution of defects depending on structural features and operational factors. A generalized self-accelerating degradation model is proposed.

Practical importance. The results can be used to improve the design, installation, and maintenance of insulation systems, as well as for predicting high-risk degradation zones to enhance reliability and energy efficiency.

Key words: insulation; temperature; degradation processes; vibration; CHP; operation; design features of units; power equipment; pipelines; steam pipelines.

Анотація. Мета. Метою роботи є встановлення закономірностей деградації теплової ізоляції енергетичного обладнання теплоелектроцентралі потужністю 500 МВт на основі аналізу фактичного технічного стану ізоляційних конструкцій та визначення основних експлуатаційних факторів, що впливають на інтенсивність їх руйнування.

Методика. Для досягнення поставленої мети використано комплекс інструментальних та аналітичних методів дослідження, зокрема інфрачервону термографію, контактну термометрію, методи системного аналізу, класифікації дефектів та порівняльного аналізу. Обробка експериментальних даних базувалася на оцінці температурних полів поверхні обладнання та встановленні зв'язків між температурними змінами і типами дефектів ізоляції.

Результати. Встановлено, що деградація теплової ізоляції має комплексний характер і формується під впливом температурних навантажень, вібрацій, механічних пошкоджень та дії вологи. Визначено основні механіз-

ми руйнування ізоляції, серед яких домінують просідання та ущільнення волокнистих матеріалів, порушення цілісності захисних кожухів і формування локальних неізольованих зон. Виявлено, що найбільш вразливими є вузли зі складною геометрією (фланцеві з'єднання, арматура, компенсатори), де спостерігається максимальна інтенсивність деградаційних процесів. Показано, що порушення захисного покриття є ключовим фактором, що ініціює деградацію ізоляції.

Наукова новизна. Полягає у встановленні системного характеру деградації теплової ізоляції в умовах реальної експлуатації енергетичного обладнання ТЕЦ, а також у виявленні закономірностей просторового розподілу дефектів та їх зв'язку з конструктивними особливостями вузлів і експлуатаційними факторами. Запропоновано узагальнену схему самоприскорювального процесу деградації ізоляції.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення підходів до проектування, монтажу та технічного обслуговування теплоізоляційних систем, а також для прогнозування зон підвищеного ризику деградації з метою підвищення надійності та енергоефективності роботи теплоенергетичного обладнання.

Ключові слова: ізоляція; температура; деградаційні процеси; вібрація; ТЕЦ; експлуатація; конструктивні особливості вузлів; енергетичне обладнання; трубопроводи; паропроводи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасний стан теплоенергетичного сектору характеризується високим ступенем фізичного та морального зносу основного обладнання теплоелектроцентралей, значна частина яких експлуатується понад нормативні терміни. Для енергоблоків ТЕЦ, що працюють в умовах змінних навантажень, підвищених температур і вібраційних впливів, особливого значення набуває забезпечення надійності та довговічності допоміжних елементів, зокрема систем теплової ізоляції.

Теплова ізоляція виконує не лише функцію зниження теплових втрат, але й забезпечує стабільність температурного режиму роботи металу обладнання, захист персоналу від дії високих температур та підтримання нормативних санітарно-гігієнічних умов у виробничих приміщеннях. Водночас, в реальних умовах експлуатації ізоляційні конструкції піддаються комплексному впливу негативних факторів, серед яких: циклічні температурні навантаження, вібрації, механічні пошкодження, вплив вологи та агресивних середовищ.

Практика експлуатації енергоблоків показує, що навіть після проведення капітальних ремонтів стан теплової ізоляції часто не відповідає проектним та нормативним вимогам. Це зумовлено як недосконалістю конструктивних рішень для складних геометричних вузлів (фланцеві з'єднання, компенсатори, арматура), так і деградацією властивостей ізоляційних матеріалів у процесі експлуатації. Зокрема, характерними є такі явища, як просідання волокнистих матеріалів, порушення цілісності захисних кожухів, утворення неізольованих ділянок та локальних зон перегріву.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених оцінці теплових втрат та підвищенню енергоефективності, питання комплексного аналізу причин деградації теплової ізоляції обладнання ТЕЦ залишається недостатньо вивченим. Більшість робіт зосереджені на фіксації наслідків (зростання

теплових втрат), тоді як механізми формування дефектів, їх класифікація та взаємозв'язок з експлуатаційними умовами розглядаються фрагментарно.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження процесів деградації теплової ізоляції енергетичного обладнання ТЕЦ потужністю 500 МВт з метою виявлення основних факторів, що визначають її технічний стан, а також встановлення закономірностей виникнення та розвитку дефектів у післяремонтний період експлуатації.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема довговічності та деградації теплоізоляційних матеріалів є одним із ключових напрямів сучасних досліджень у галузі енергетики, будівництва та промислової теплоенергетики. За останні 5–10 років спостерігається зростання кількості наукових робіт, присвячених як фундаментальним механізмам деградації ізоляційних матеріалів, так і прикладним аспектам їх експлуатації в умовах підвищених температур, механічних навантажень та агресивних середовищ.

Одним із базових напрямів досліджень є вивчення процесів старіння теплоізоляційних матеріалів та зміни їх теплотехнічних характеристик у часі. Зокрема, у роботі Choi H. J., Kang J. S., Huh J. H. [1] встановлено, що для полімерних теплоізоляційних матеріалів (пінополістирол, поліуретан) відбувається суттєве зниження термічного опору протягом експлуатації внаслідок зміни газового складу пор та дифузійних процесів. Показано, що за тривалий період (до 5000 діб) зниження теплоізоляційних властивостей може досягати 25–40 %, що свідчить про істотний вплив часу експлуатації на ефективність ізоляції.

Схожі результати отримано у дослідженні D'Agostino D. et al. [2], де експериментально підтверджено, що навіть за відносно стабільних умов експлуатації відбувається поступове зростання коефіцієнта теплопровідності ізоляційних матеріалів.

Автори зазначають, що деградація, хоча і має помірний характер (2–10 %), може призводити до невідповідності нормативним вимогам енергоефективності в довгостроковій перспективі.

Окремий напрям досліджень присвячений впливу циклічних температурних і кліматичних факторів на стан теплоізоляції. У роботі Jiang H. et al. [3] встановлено, що повторювані цикли охолодження-нагрівання призводять до руйнування внутрішньої структури матеріалів, зниження міцності та збільшення теплопровідності. Виявлено прямий зв'язок між кількістю циклів та ступенем деградації, що дозволяє кількісно оцінювати термін служби ізоляції.

Важливим фактором деградації є також вплив вологості, який детально розглянуто у дослідженнях у дослідженнях Ahmed A., Qayoum A. [4] та Chetehouna K. et al. [5]. Показано, що підвищена вологість призводить до зміни мікроструктури матеріалу, збільшення теплопровідності та створення умов для біологічного руйнування. Навіть незначне зростання вологості може спричинити зниження теплоізоляційних властивостей до 20 %.

Значна кількість сучасних досліджень зосереджена на термічній деградації матеріалів при високих температурах, характерних для енергетичного обладнання. Зокрема, у роботі Zheng C., Li D., Ek M. [6] показано, що при температурах понад 200–400 °C у волокнистих та целюлозних матеріалах відбуваються стадійні процеси термічного розкладу, які супроводжуються втратою маси, зміною структури та погіршенням теплоізоляційних характеристик.

Паралельно розвиваються дослідження Hurley D. H. et al. [7], спрямовані на аналіз впливу дефектів структури на теплоперенесення, що є критично важливим для розуміння деградації ізоляції в енергетичних установках. Встановлено, що наявність дефектів (тріщин, порушень цілісності, неоднорідностей) істотно змінює механізми переносу тепла, зокрема за рахунок посилення теплопровідності та локального перегріву елементів.

Окремий напрям досліджень стосується моделювання процесів старіння та деградації ізоляції. Сучасні підходи включають використання математичних моделей та методів машинного навчання для прогнозування зміни властивостей матеріалів у часі. Наприклад, у роботах Bragone F. et al. [8], присвячених деградації полімерної ізоляції, показано можливість опису процесів старіння через кінетичні моделі (зокрема рівняння Арреніуса) та їх адаптацію з використанням сучасних алгоритмів.

Разом із тим, значна частина публікацій присвячена розробці нових ізоляційних матеріалів з підвищеною стійкістю до деградації. Зокрема, Saraswat A. et al. [9] досліджуються композиційні матеріали, модифіковані волокнистою структурою, а також високотемпературні покриття, здатні зберігати свої властивості

при тривалому впливі агресивних середовищ та високих температур.

Варто зазначити, що більшість сучасних досліджень виконуються або в умовах лабораторного моделювання (прискорене старіння, кліматичні камери), або на прикладі будівельних конструкцій. У той же час, питання деградації теплоізоляції промислового енергетичного обладнання, зокрема турбін, паропроводів та газоходів ТЕЦ, розглядаються значно рідше, що зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямку.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значний обсяг сучасних досліджень, залишається недостатньо вивченим питання комплексного аналізу деградації теплової ізоляції безпосередньо в умовах експлуатації енергетичного обладнання ТЕЦ. Більшість робіт зосереджена на лабораторних дослідженнях матеріалів або оцінці теплових втрат, тоді як взаємозв'язок між експлуатаційними факторами (вібрація, температурні цикли, конструктивні особливості вузлів) та формуванням дефектів ізоляції в реальних умовах функціонування енергоблоків залишається недостатньо дослідженим.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є встановлення закономірностей деградації теплової ізоляції енергетичного обладнання української теплоелектроцентралі потужністю 500 МВт на основі комплексного аналізу експлуатаційних факторів, що впливають на її технічний стан, а також ідентифікація найбільш вразливих конструктивних елементів ізоляційних систем.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі взаємопов'язані науково-практичні завдання:

- дослідження впливу основних експлуатаційних факторів (температурні навантаження, вібрації, механічні пошкодження, вологість) на зміну фізико-механічних та теплотехнічних характеристик теплоізоляційних матеріалів;
- встановлення типових механізмів деградації ізоляції в умовах роботи енергетичного обладнання з високими температурами та змінними режимами навантаження;
- класифікація дефектів теплоізоляційних конструкцій залежно від їх природи та умов виникнення;
- виявлення найбільш критичних вузлів енергетичного обладнання (паропроводи, арматура, компенсатори, газоходи), що характеризуються підвищеною інтенсивністю деградаційних процесів;
- оцінка впливу конструктивних особливостей та якості монтажу ізоляції на її довговічність у післяремонтний період;

– формування узагальненої моделі деградації теплової ізоляції з урахуванням комплексного впливу експлуатаційних факторів.

Особливу увагу в дослідженні приділено аналізу деградації ізоляції не як ізольованого явища, а як результату одночасної дії термічних, механічних та конструктивних факторів, що дозволяє перейти від описового підходу до системного розуміння процесів її руйнування.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процеси деградації теплової ізоляції енергетичного обладнання теплоелектроцентралі потужністю 500 МВт у післяремонтний період експлуатації.

До складу досліджуваного обладнання входять:

- циліндри парової турбіни (високого, середнього та низького тиску);
- паропроводи високого та середнього тиску;
- допоміжні трубопроводи (зокрема системи живильних турбонасосів);
- газоповітряні тракти котлоагрегату;
- елементи запірно-регулюючої арматури та компенсаторні вузли.

Зазначене обладнання характеризується складними умовами експлуатації, зокрема високими температурами (до 400-500 °C), значними температурними градієнтами, вібраційними навантаженнями та періодичними змінами режимів роботи.

Предметом дослідження є закономірності зміни технічного стану теплоізоляційних конструкцій, зокрема:

- фізико-механічні зміни матеріалів (ущільнення, просідання, руйнування структури);
- порушення цілісності захисних кожухів;
- формування локальних дефектів (щілини, неізольовані ділянки, розриви);
- зміна теплотехнічних характеристик (зростання теплопровідності, локальні перегріву);
- взаємозв'язок між експлуатаційними умовами та характером деградації.

Для досягнення поставленої мети використано комплекс експериментальних, аналітичних та узагальнюючих методів дослідження.

1. Інструментальні методи контролю. Основним методом дослідження стану теплової ізоляції є інфрачервона термографія, яка дозволяє виявляти локальні зони перегріву, що відповідають дефектам ізоляційного шару Pontinha A.D.R. et al. [10].

Використання тепловізійного контролю ґрунтується на фіксації температурного поля поверхні обладнання, що є інтегральним показником ефективності теплоізоляції. Як показують сучасні дослідження, зміна температури поверхні є прямим індикатором деградації матеріалу або порушення його структури.

Додатково застосовано контактну термометрію для уточнення температурних значень у характерних точках та верифікації результатів тепловізійного дослідження.

2. Аналітичні методи. Аналітична обробка результатів включає оцінку температурних відхилень від нормативних значень, порівняльний аналіз різних ділянок обладнання та встановлення залежностей між температурою поверхні та характером дефектів.

Відомо, що деградація теплоізоляції супроводжується зростанням теплопровідності матеріалу внаслідок зміни його структури, зокрема під впливом температури, вологи та часу експлуатації, як зазначено в роботі Ali A. et al. [11]. Це дозволяє використовувати температурні вимірювання як базу для якісної оцінки ступеня деградації.

3. Метод класифікації дефектів. На основі отриманих експериментальних даних проведено систематизацію дефектів теплоізоляції за такими ознаками:

- за природою виникнення (механічні, термічні, експлуатаційні);
- за локалізацією (прямі ділянки, фланці, арматура, компенсатори);
- за ступенем впливу на тепловий режим.

Такий підхід відповідає сучасним уявленням про деградацію ізоляційних матеріалів як багатофакторний процес, що формується під дією сукупності термічних, механічних та середовищних впливів, як вказано в праці Firat A., Arkan O. [12].

4. Метод узагальнення та системного аналізу. З метою встановлення закономірностей деградації використано метод системного аналізу, який дозволяє інтегрувати результати вимірювань для різних типів обладнання, визначити повторювані сценарії руйнування ізоляції та встановити причинно-наслідкові зв'язки між експлуатаційними факторами та характером дефектів.

Згідно з сучасними дослідженнями Leem Y. et al. [13], деградація ізоляції має комплексний характер і є результатом одночасної дії температури, вологості, механічних навантажень та часу експлуатації.

5. Порівняльний метод. Застосовано порівняння різних типів обладнання, різних конструктивних вузлів та ділянок з різним технічним станом.

Це дозволяє виявити найбільш вразливі елементи системи теплової ізоляції та сформулювати узагальнені висновки щодо механізмів її деградації.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Дослідження процесів деградації теплової ізоляції виконувалося на енергоблоці теплоелектроцентралі потужністю 500 МВт у післяремонтний період експлуатації при роботі обладнання у навантаженому режимі (70–80 % від номінального). Такий режим дозволив забезпечити стабільність температурних полів та отримати репрезентативні дані щодо фактичного стану ізоляційних конструкцій.

Результати інструментального обстеження показали, що загалом основні масиви теплової ізоляції (корпуси турбіни, поверхні котлоагрегату, магістральні паропроводи) після проведення ремонтних робіт зберігають свою функціональність та забезпечують допустимий рівень температури поверхні.

Водночас встановлено наявність значної кількості локальних зон деградації, які мають системний характер і повторюються для різних типів обладнання. Такі зони характеризуються порушенням суцільності ізоляційного шару, підвищенням температури поверхні та формуванням інтенсивних теплових потоків у навколишнє середовище.

Аналіз отриманих даних дозволив виділити три основні групи деградаційних процесів:

- структурна деградація матеріалу;
- конструктивні дефекти ізоляційних вузлів;
- експлуатаційні пошкодження захисних елементів.

1. Структурна деградація теплоізоляційних матеріалів. Одним із найбільш поширених механізмів деградації є просідання та ущільнення волокнистих теплоізоляційних матеріалів, що спостерігалось переважно на вертикальних ділянках трубопроводів та у зонах з підвищеними вібраційними навантаженнями.

Встановлено, що внаслідок тривалої дії власної ваги матеріалу, а також циклічних температурних деформацій, відбувається зменшення товщини ізоляційного шару, утворення повітряних порожнин та зростання ефективної теплопровідності. Особливо інтенсивно ці процеси проявляються при температурах понад 200–300 °C, де спостерігається часткова втрата пружних властивостей матеріалу та його структурна дестабілізація.

Крім того, у ряді випадків зафіксовано локальне руйнування волокнистої структури, що супроводжується утворенням зон з підвищеною теплопередачею. Це призводить до формування так званих «теплових містків», через які відбувається інтенсивне розсіювання теплової енергії.

2. Конструктивні дефекти ізоляційних вузлів. Аналіз результатів обстеження показав, що найбільш вразливими до деградації є вузли зі складною геометрією, де забезпечення суцільності ізоляційного шару є технологічно ускладненим. До таких вузлів відносяться фланцеві з'єднання, компенсатори, запірно-регулююча арматура, зони паровпуску турбін, лючки-лази та ревізійні отвори.

У зазначених ділянках зафіксовано наявність неізольованих або частково ізольованих зон, нерівномірну товщину ізоляційного шару та порушення щільності прилягання матеріалу до поверхні.

Причиною цього є як складність монтажу, так і необхідність періодичного демонтажу ізоляції під час проведення ремонтних робіт. У результаті після

повторного монтажу часто не забезпечується відновлення первинної геометрії та щільності укладання матеріалу. Встановлено, що саме ці вузли формують найбільш інтенсивні локальні теплові втрати та виступають як осередки прискореної деградації всієї ізоляційної системи.

3. Експлуатаційні пошкодження захисних кожухів.

Суттєвий вплив на стан теплоізоляції має цілісність захисного металевих покриття (кожуха), який виконує функції механічного захисту та запобігання впливу зовнішнього середовища.

У процесі обстеження виявлено типові дефекти:

- деформація або часткове руйнування кожуха;
- корозійні пошкодження;
- розгерметизація стиків;
- повна відсутність покривного шару на окремих ділянках.

Порушення цілісності кожуха призводить до проникнення вологи в ізоляційний матеріал, прискорення процесів його деградації, виносу волокон потоком повітря та формування відкритих теплових поверхонь.

Особливо критичні випадки зафіксовані на допоміжних трубопроводах та ділянках з високою температурою теплоносія, де відсутність захисного покриття супроводжується різким зростанням температури поверхні та інтенсивним тепловиділенням.

4. Вплив експлуатаційних факторів на деградацію. Комплексний аналіз показав, що деградація теплоізоляції є результатом одночасної дії кількох факторів.

Високі температури призводять до термічного старіння матеріалів, втрати їх механічної міцності та зростання теплопровідності.

Вібраційні навантаження спричиняють поступове руйнування структури матеріалу, зміщення та просідання ізоляційних шарів та порушення герметичності стиків.

Механічні впливи, які виникають під час експлуатації та ремонтів:

- пошкодження кожухів;
- деформації конструкцій;
- часткове руйнування ізоляції.

Під впливом вологи виникають порушення герметичності, які призводять до зволоження матеріалу, збільшення його теплопровідності та прискорення деградаційних процесів.

5. Просторовий розподіл зон деградації. Встановлено, що деградація має нерівномірний характер та концентрується у визначених типових зонах:

- ділянки з максимальною температурою теплоносія;
- вузли зі складною геометрією;
- місця підвищених вібрацій;
- ділянки з порушеним захисним покриттям.

Це дозволяє зробити висновок про наявність закономірного характеру розподілу дефектів, що

відкриває можливість прогнозування зон підвищеного ризику деградації на етапі проектування та експлуатації.

6. Узагальнена схема процесу деградації. На основі отриманих результатів встановлено, що деградація теплоізоляції відбувається за наступною узагальною схемою:

- 1) порушення цілісності захисного кожуха або початкові дефекти монтажу;
- 2) вплив температури, вібрацій та волог;
- 3) зміна структури теплоізоляційного матеріалу (просідання, руйнування);
- 4) формування локальних зон підвищеної теплопередачі;
- 5) подальше прискорення деградації та розширення дефектної зони.

Такий механізм має самоприскорювальний характер, оскільки зростання теплових втрат призводить до підвищення температурного навантаження на матеріал, що, у свою чергу, посилює процеси його руйнування.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати дослідження підтверджують, що деградація теплової ізоляції енергетичного обладнання має комплексний характер і формується під впливом сукупності експлуатаційних факторів. При цьому встановлені закономірності загалом узгоджуються з сучасними науковими уявленнями щодо процесів старіння теплоізоляційних матеріалів, однак мають ряд специфічних особливостей, характерних саме для умов експлуатації теплоелектроцентралей.

Зокрема, встановлений у роботі механізм структурної деградації волокнистих матеріалів (просідання, ущільнення, втрата пружних властивостей) узгоджується з результатами досліджень Choi H. J. et al. [1], D'Agostino D. et al. [2], де показано зростання теплопровідності ізоляції внаслідок зміни її внутрішньої структури в процесі експлуатації. Водночас, на відміну від лабораторних умов, у реальних енергетичних установках ці процеси суттєво інтенсифікуються за рахунок дії вібраційних навантажень та нерівномірного температурного поля, що призводить до більш швидкого розвитку деградаційних явищ.

Особливу увагу слід звернути на встановлений у дослідженні факт концентрації дефектів у вузлах зі складною геометрією (фланцеві з'єднання, арматура, компенсатори). Подібні результати частково відображені у наукових роботах, присвячених впливу конструктивних особливостей на ефективність теплоізоляції, однак у більшості випадків такі вузли розглядаються як локальні відхилення. Отримані результати свідчать про те, що саме ці елементи можуть виступати визначальними у формуванні загального рівня деградації ізоляційної системи, що потребує перегляду підходів до їх проектування та ізолювання.

Важливим результатом є також встановлення визначальної ролі порушення цілісності захисного кожуха як ініціюючого фактору деградації. Це узгоджується з дослідженнями, в яких підкреслюється критичний вплив волог на теплоізоляційні матеріали. Проте у даній роботі показано, що в умовах ТЕЦ цей фактор поєднується з механічними та температурними впливами, що призводить до значно більш інтенсивного розвитку деградаційних процесів порівняно з умовами, що розглядаються у більшості публікацій.

Отримані результати також дозволили встановити, що деградація теплоізоляції має локалізований, але системно повторюваний характер. Це означає, що дефекти виникають не випадково, а концентруються у типових зонах, що підтверджує наявність закономірностей їх формування. Такий висновок корелює з сучасними підходами до моделювання процесів деградації, де підкреслюється роль граничних умов та локальних факторів у розвитку дефектів.

Разом з тим, на відміну від більшості сучасних досліджень, які зосереджені на матеріалознавчих аспектах або лабораторному моделюванні, у даній роботі отримано результати, що безпосередньо відображають реальні умови експлуатації енергетичного обладнання. Це дозволяє уточнити існуючі уявлення про механізми деградації та доповнити їх даними щодо впливу експлуатаційних факторів, таких як:

- змінні режими навантаження;
- вібраційні впливи від роботи турбінного обладнання;
- повторювані ремонтні втручання.

Суттєвим є також встановлений у роботі самоприскорювальний характер деградаційних процесів, коли початкові дефекти ізоляції призводять до зростання температури поверхні, що, у свою чергу, інтенсифікує подальше руйнування матеріалу. Подібні ефекти описуються у роботах, присвячених термічному старінню матеріалів, однак у даному випадку показано їх прояв на рівні цілісних ізоляційних систем.

Таким чином, результати дослідження не лише підтверджують відомі теоретичні положення, але й розширюють їх, демонструючи специфіку деградації теплової ізоляції в умовах промислової енергетики. Отримані залежності та узагальнення можуть бути використані для вдосконалення підходів до проектування, монтажу та експлуатації ізоляційних систем, а також для розробки заходів з підвищення їх надійності та довговічності.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що деградація теплової ізоляції енергетичного обладнання ТЕЦ потужністю 500 МВт має комплексний характер і обумовлена одночасною дією температурних, механічних та вібраційних факторів, а також впливом волог.

Визначено, що найбільш інтенсивні процеси деградації відбуваються у вузлах зі складною геометрією (фланцеві з'єднання, арматура, компенсатори), які виступають основними зонами формування локальних дефектів.

Показано, що ключовим фактором ініціювання деградації є порушення цілісності захисного кошу, що призводить до зволоження матеріалу, руйнування його структури та зростання теплопровідності.

Встановлено, що деградація має локалізований, але закономірний характер, що дозволяє

ідентифікувати типові зони підвищеного ризику та використовувати це для прогнозування технічного стану ізоляції.

Обґрунтовано, що процес деградації має самоприскорювальний характер, при якому початкові дефекти призводять до підвищення температурного навантаження та подальшого інтенсивного руйнування ізоляції.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення підходів до проектування, монтажу та експлуатації теплоізоляційних систем з метою підвищення їх надійності та довговічності.

REFERENCES

- [1] Choi, HJ., Kang, JS. & Huh, JH. (2018). A Study on Variation of Thermal Characteristics of Insulation Materials for Buildings According to Actual Long-Term Annual Aging Variation. *Int J Thermophys* 39, 2. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2318-3>
- [2] D'Agostino, D., Landolfi, R., Nicoletta, M., & Minichiello, F. (2022). Experimental Study on the Performance Decay of Thermal Insulation and Related Influence on Heating Energy Consumption in Buildings. *Sustainability*, 14(5), 2947. <https://doi.org/10.3390/su14052947>
- [3] Haiqiang Jiang, Enliang Wang, Fujun Niu, Hongwei Han, Xingchao Liu, Zhifeng Ren. (2022). Experimental investigation on performance degradation of insulation materials induced by freeze–thaw cycles and its applications, *Construction and Building Materials*, Volume 350, 3 October 2022, 128844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128844>
- [4] Ahmed, A., Qayoum, A. (2021). Investigation on the thermal degradation, moisture absorption characteristics and antibacterial behavior of natural insulation materials. *Mater Renew Sustain Energy* 10, 4. <https://doi.org/10.1007/s40243-021-00188-8>
- [5] Chetehouna, K., Belayachi, N., Rengel, B., Hoxha, D., Gillard, P. (2015). Investigation on the thermal degradation and kinetic parameters of innovative insulation materials using TGA-MS. *Appl. Therm. Eng.* 81, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.037>
- [6] Zheng, C., Li, D. & Ek, M. (2019). Mechanism and kinetics of thermal degradation of insulating materials developed from cellulose fiber and fire retardants. *J Therm Anal Calorim* 135, 3015–3027. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7564-5>
- [7] Hurley, DH, El-Azab, A., Bryan, MS, Cooper, MWD, Dennett, CA, Gofryk, K., He, L., Khafizov, M., Lander, GH, Manley, ME, Mann, JM, Marianetti, CA, Rickert, K., Selim, FA, Tok. (2022). Thermal energy transport in oxide nuclear fuel. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.13236>
- [8] Bragone, F., Morozovska, K., Laneryd, T., Shukla, K., & Markidis, S. (2025). Discovering Partially Known Ordinary Differential Equations: a Case Study on the Chemical Kinetics of Cellulose Degradation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.03484>
- [9] Saraswat, A., Sasmal, C., Prajapati, A., Bhattacharyay, R., Chaudhuri, P., & Gedupudi, S. (2022). Experimental investigations on electrical-insulation performance of Al₂O₃ coatings for high temperature PbLi liquid metal applications. *Annals of Nuclear Energy*, 167, 108856. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108856>
- [10] Pontinha ADR, Mäntyneva J, Santos P, Durães L. Thermomechanical Performance Assessment of Sustainable Buildings' Insulating Materials under Accelerated Ageing Conditions. *Gels*. 2023 Mar 18;9(3):241. doi: 10.3390/gels9030241. PMID: 36975690; PMCID: PMC10048358.
- [11] Ali, A., Issa, A., & Elshaer, A. (2024). A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Energy Conservation in Buildings. *Sustainability*, 16(20), 8782. <https://doi.org/10.3390/su16208782>
- [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., Rindiyuk 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. Seriya: tekhnichni nauky*. 2021; 5(32): 159–167. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/25>
- [17] Bednarska I. S., Rindiyuk D. V. Analiz pidkhodiv do otsinky teplovoho ta napruzhenno-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. Seriya: tekhnichni nauky*. 2019; 30(69), Part 2: 12–16.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Choi, HJ., Kang, JS. & Huh, JH. (2018). A Study on Variation of Thermal Characteristics of Insulation Materials for Buildings According to Actual Long-Term Annual Aging Variation. *Int J Thermophys* 39, 2. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2318-3>
- [2] D'Agostino, D., Landolfi, R., Nicoletta, M., & Minichiello, F. (2022). Experimental Study on the Performance Decay of Thermal Insulation and Related Influence on Heating Energy Consumption in Buildings. *Sustainability*, 14(5), 2947. <https://doi.org/10.3390/su14052947>
- [3] Haiqiang Jiang, Enliang Wang, Fujun Niu, Hongwei Han, Xingchao Liu, Zhifeng Ren. (2022). Experimental investigation on performance degradation of insulation materials induced by freeze-thaw cycles and its applications. *Construction and Building Materials*, Volume 350, 3 October 2022, 128844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128844>
- [4] Ahmed, A., Qayoum, A. (2021). Investigation on the thermal degradation, moisture absorption characteristics and antibacterial behavior of natural insulation materials. *Mater Renew Sustain Energy* 10, 4. <https://doi.org/10.1007/s40243-021-00188-8>
- [5] Chetehouna, K., Belayachi, N., Rengel, B., Hoxha, D., Gillard, P. (2015). Investigation on the thermal degradation and kinetic parameters of innovative insulation materials using TGA-MS. *Appl. Therm. Eng.* 81, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.037>
- [6] Zheng, C., Li, D. & Ek, M. (2019). Mechanism and kinetics of thermal degradation of insulating materials developed from cellulose fiber and fire retardants. *J Therm Anal Calorim* 135, 3015–3027. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7564-5>
- [7] Hurley, DH, El-Azab, A., Bryan, MS, Cooper, MWD, Dennett, CA, Gofryk, K., He, L., Khafizov, M., Lander, GH, Manley, ME, Mann, JM, Marianetti, CA, Rickert, K., Selim, FA, Tok. (2022). Thermal energy transport in oxide nuclear fuel. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.13236>
- [8] Bragone, F., Morozovska, K., Laneryd, T., Shukla, K., & Markidis, S. (2025). Discovering Partially Known Ordinary Differential Equations: a Case Study on the Chemical Kinetics of Cellulose Degradation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.03484>
- [9] Saraswat, A., Sasmal, C., Prajapati, A., Bhattacharyay, R., Chaudhuri, P., & Gedupudi, S. (2022). Experimental investigations on electrical-insulation performance of Al₂O₃ coatings for high temperature PbLi liquid metal applications. *Annals of Nuclear Energy*, 167, 108856. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108856>
- [10] Pontinha ADR, Mäntyneva J, Santos P, Durães L. Thermomechanical Performance Assessment of Sustainable Buildings' Insulating Materials under Accelerated Ageing Conditions. *Gels*. 2023 Mar 18;9(3):241. doi: 10.3390/gels9030241. PMID: 36975690; PMCID: PMC10048358.
- [11] Ali, A., Issa, A., & Elshaer, A. (2024). A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Energy Conservation in Buildings. *Sustainability*, 16(20), 8782. <https://doi.org/10.3390/su16208782>
- [12] Firat Akin, Oktay Arıkan. 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., & Luchinger, 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) Частина № 2. С. 12–16.

© Беднарська І. С., Шелешей Т. В., Риндюк Д. В., С. Р. Лішук

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



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