

Г. І. КАНЮК, А. Ю. МЕЗЕРЯ, В. М. КНЯЗЄВА, О. М. БЛИЗНИЧЕНКО, Т. М. ФУРСОВА

**ОСОБЛИВОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ,  
ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ НА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ**

У статті розглянуто особливості теплоізоляційних матеріалів, що застосовуються на електростанціях, де ізоляція працює не в умовах порівняно стабільного мікроклімату огорожувальних конструкцій, а на поверхнях паропроводів, газоходів, теплообмінного обладнання, арматури, резервуарів і допоміжних систем, для яких визначальними стають не лише теплопровідність за довідкових умов, а здатність зберігати структуру, міцність, геометричну стабільність і низький тепловий потік за тривалого впливу підвищених температур, циклічного нагрівання та охолодження, вібрацій, зволоження, локальних механічних навантажень і атмосферних чинників. Показано, що для енергетичного обладнання придатність теплоізоляційного матеріалу визначається сукупністю взаємопов'язаних показників, до яких належать теплопровідність, щільність, пористість, водопоглинання, міцність при стиску та вигині, тепла дифузивність, термостійкість, негорючість, стабільність при температурних циклах і сумісність із захисними оболонками та монтажними рішеннями. Узагальнено відмінності між вимогами до ізоляції для електростанцій і вимогами до будівельної теплоізоляції: у будівництві домінують нормативний опір теплопередачі огорожень, маса, вартість, зручність монтажу та санітарно-екологічні характеристики, тоді як в енергетиці на перший план виходять працездатність при високій температурі, низька деградація властивостей у часі, зниження тепловтрат на криволінійних і фасонних поверхнях, пожежна безпека та ремонтпридатність в умовах регламентного обслуговування. Наведено основні співвідношення для оцінювання характеристик теплоізоляційних матеріалів і теплоізолюваних елементів, виконано порівняльний аналіз методів підвищення показників якості, зокрема шляхом гідрофобізації, оптимізації порової структури, багатшарової побудови, використання аерогельвмісних шарів, підвищення якості зовнішніх захисних покриттів і вдосконалення технології монтажу. Обґрунтовано, що найбільш перспективним напрямом для електростанцій є не окремий матеріал у чистому вигляді, а багатшарова функціонально диференційована система, у якій внутрішній шар забезпечує мінімальний тепловий потік за високої температури, а зовнішній шар відповідає за механічну стійкість, гідрофобність і довговічність. Запропоновані узагальнення можуть бути використані під час вибору, проектування та модернізації теплоізоляції енергетичного обладнання та трубопровідних систем.

**Ключові слова:** теплоізоляційні матеріали, показники якості, теплопровідність, водопоглинання, довговічність, вологостійкість, електростанції, енергетика.

**G. KANJUK, A. MEZERYA, V. KNIAZIEVA, O. BLIZNICHENKO, T. FURSOVA  
FEATURES OF THE CHARACTERISTICS OF THERMAL INSULATION MATERIALS  
USED AT POWER PLANTS**

The article examines the specific features of thermal insulation materials used at power plants, where insulation operates not under the relatively stable microclimatic conditions typical of building envelopes, but on the surfaces of steam pipelines, gas ducts, heat-exchange equipment, valves, tanks, and auxiliary systems, for which the determining factors are not only thermal conductivity under reference conditions, but also the ability to maintain structure, strength, geometric stability, and low heat flux under prolonged exposure to elevated temperatures, cyclic heating and cooling, vibration, moisture, local mechanical loads, and atmospheric factors. It is shown that, for power engineering equipment, the suitability of a thermal insulation material is determined by a set of interrelated indicators, including thermal conductivity, density, porosity, water absorption, compressive and flexural strength, thermal diffusivity, heat resistance, non-combustibility, stability under thermal cycling, and compatibility with protective claddings and installation solutions. The differences between the requirements for insulation used at power plants and those for building thermal insulation are generalized: in construction, the dominant considerations are the normative resistance of building envelopes to heat transfer, weight, cost, ease of installation, and sanitary and environmental characteristics, whereas in the power industry priority is given to operability at high temperature, low degradation of properties over time, reduction of heat losses from curved and shaped surfaces, fire safety, and maintainability under scheduled servicing conditions. The main relationships for evaluating the characteristics of thermal insulation materials and insulated elements are presented, and a comparative analysis of methods for improving quality indicators is carried out, in particular through hydrophobization, optimization of the pore structure, multilayer design, the use of aerogel-containing layers, improvement of the quality of external protective coatings, and refinement of installation technology. It is substantiated that the most promising direction for power plants is not a separate material in its pure form, but a multilayer functionally differentiated system in which the inner layer ensures minimum heat flux at high temperature, while the outer layer provides mechanical stability, hydrophobicity, and durability. The proposed generalizations may be used in the selection, design, and modernization of thermal insulation for power engineering equipment and pipeline systems.

**Key words:** thermal insulation materials, quality indicators, thermal conductivity, water absorption, durability, moisture resistance, power plants, power engineering.

**Вступ**

Для електростанцій теплоізоляція є не допоміжним оздобувальним елементом, а частиною технічного стану обладнання, від якої залежать теплові втрати, температура зовнішніх поверхонь, безпечність обслуговування, стабільність режимів, строк служби захисних оболонок і частота ремонтних втручань, причому в енергетичних системах

одна й та сама ізоляція змушена одночасно працювати як теплозахисний, конструкційно-стабілізувальний і бар'єрний шар.

Проблема полягає в тому, що нормативно прийнятний або економічно привабливий матеріал для будівельних огорожень не можна автоматично переносити на умови електростанцій, оскільки температурний діапазон, теплові градієнти, циклічність навантаження, конфігурація ізолюваних



© Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, В. М. Князева, О. М. Близниченко, Т. М. Фурсова, 2026  
Дослідницька стаття. Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією Creative Commons Attribution (CC BY 4.0)

поверхонь і вимоги до пожежної та експлуатаційної безпеки тут істотно жорсткіші, а це змінює сам критерій якості: замість мінімізації теплопровідності за стандартних лабораторних умов необхідно оцінювати збереження властивостей у реальному температурно-вологісному та силовому полі.

З наукового погляду це вимагає уточнення системи показників якості теплоізоляційних матеріалів саме для електростанцій, а з практичного – потребує обґрунтування таких методів підвищення їхніх властивостей, які знижують тепловтрати без збільшення експлуатаційних ризиків, ускладнення ремонту чи прискорення деградації матеріалу.

Наукові дослідження останніх років зосереджені переважно на вимірюванні базових теплофізичних і механічних характеристик теплоізоляційних матеріалів, зокрема теплопровідності, щільності, міцності на стиск і вигин, а також на питаннях їх декларування й експертної оцінки [1] – [5]. Роботи [1] – [4] демонструють, що навіть для матеріалів із близькою сировинною природою зміна щільності, структури пор і типу зв'язувального помітно впливає і на теплопровідність, і на механічну придатність, тому вибір матеріалу лише за одним показником є методично слабким. В роботі [5] акцентовано увагу на тому, що система оцінювання має включати комплекс властивостей, а не формальне підтвердження окремого параметра.

У публікаціях будівельного спрямування [6] – [8] детально розглянуто переваги мінераловатних і базальтових утеплювачів, питання довговічності, екологічної оцінки та життєвого циклу, однак для енергетичних об'єктів ці результати потребують корекції, оскільки будівельна ізоляція зазвичай працює за нижчих температур і менших механічних навантажень. Разом із тим саме ці праці корисні для порівняльного аналізу, бо вони показують, які показники в будівництві є домінуючими, а які в енергетиці мають бути доповнені або переосмислені.

Для технічних і енергетичних застосувань істотними є дослідження температурного стану покриттів і поведінки циліндричних багатошарових елементів під експлуатаційними навантаженнями [9], [10], оскільки вони підводять до головної для електростанцій тези: ізоляція повинна оцінюватися не лише як матеріал, а як елемент системи «обладнання – ізоляція – захисна оболонка – середовище». Проводяться актуальні дослідження в напрямі високотемпературних матеріалів, аерогелів, багатошарових конструкцій і техніко-економічної оптимізації ізоляції трубопроводів [11] – [15]. Праці [11], [12] акцентують увагу на те, що перспективність високотемпературних теплоізоляторів дедалі більше пов'язується з керуванням мікроструктурою та променистою складовою теплоперенесення, а в праці [13] обґрунтовано доцільність комбінування аерогельного та волокнистого шарів

для паропроводів. У [14] розглянуто межі застосування техногенної сировини в технічних будівлях, а в [15] наголошено, що технологічна досконалість матеріалу не скасовує потреби оцінювати його життєвий цикл і ресурсні витрати. Отже, сучасні дослідження дають достатню основу для висновку, що для електростанцій перспективними є не універсальні, а спеціалізовані теплоізоляційні системи, сформовані під конкретний температурний режим і тип обладнання [9] – [15].

### Мета роботи

Метою статті є узагальнення особливостей теплоізоляційних матеріалів, які використовуються на електростанціях, із виділенням специфічних вимог до їх показників якості, порівнянням цих вимог із вимогами до будівельної теплоізоляції та визначенням найбільш перспективного напрямку підвищення їх експлуатаційної придатності.

### Виклад основного матеріалу

Теплоізоляційний матеріал для електростанції (загальний вид деяких з них показано на рис. 1) доцільно розглядати як матеріал із нормованими теплофізичними, механічними й експлуатаційними властивостями, які мають зберігатися як в момент приймання, так і протягом усього міжремонтного періоду. Тому базовий набір характеристик має включати теплопровідність, щільність, пористість, вологопоглинання, міцність, термостійкість, стабільність геометрії та стійкість до робочих впливів [1] – [5], [9] – [15].

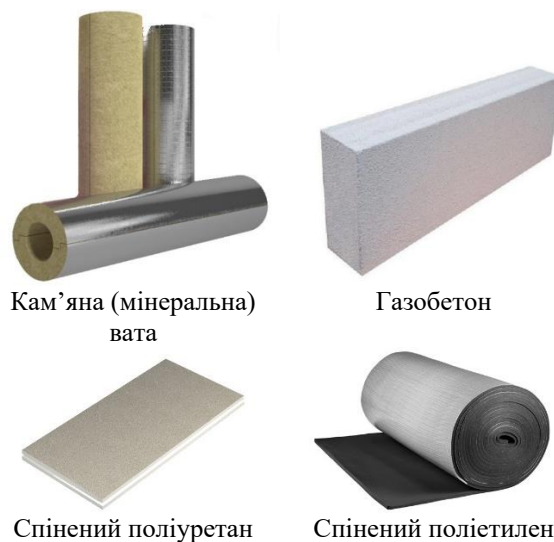


Рис. 1 – Деякі теплоізоляційні матеріали, які використовуються на електростанціях

Ключовою характеристикою є коефіцієнт теплопровідності, який для одновимірного стаціонарного перенесення тепла описується співвідношенням:

$$q = -\frac{\lambda dT}{dx}, \quad (1)$$

де  $q$  – щільність теплового потоку;  
 $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  
 $T$  – температура;  
 $x$  – координата по товщині шару.

Для плоского шару теплоізоляції термічний опір дорівнює:

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (2)$$

де  $\delta$  – товщина ізоляції.

Для електростанцій цього недостатньо, оскільки значна частина ізованих елементів має циліндричну форму, а тому для оцінки лінійного теплового потоку через одношарову ізоляцію трубопроводу доцільно використовувати вираз:

$$q_l = \frac{2\pi\lambda(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (3)$$

де  $q_l$  – тепловий потік на одиницю довжини труби;

$T_1$  і  $T_2$  – температури на внутрішній і зовнішній межах теплоізоляційного шару;

$r_1$  і  $r_2$  – відповідні радіуси.

Для багатшарової системи цей запис переходить у форму [9], [10], [14]:

$$q_l = \frac{2\pi(T_{\text{вн}} - T_{\text{зов}})}{\sum_{k=1}^n \left[ \ln\left(\frac{r_{k+1}}{r_k}\right) / \lambda_k \right]}, \quad (4)$$

де  $\lambda_k$  – теплопровідність  $k$ -го шару, а сума в знаменнику відображає теплові опори окремих шарів;

$T_{\text{вн}}$  – температура на внутрішній межі теплоізоляції;

$T_{\text{зов}}$  – температура на зовнішній межі теплоізоляції.

Контактний опір не вводиться в (4) як окремий доданок, оскільки основна мета полягає в порівняльному аналізі теплоізоляційних матеріалів і багатшарових систем, а не в розрахунку конкретної ділянки трубопроводу з відомими параметрами стиків, притискання та монтажних зазорів. Для проектного розрахунку конкретного об'єкта цей опір має визначатися окремо або задаватися через поправковий коефіцієнт до загального термічного опору системи.

Механічна придатність матеріалу оцінюється, зокрема, через щільність:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (5)$$

де  $m$  – маса;

$V$  – об'єм.

Пористість:

$$P = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \cdot 100\%, \quad (6)$$

де  $\rho_s$  – істинна щільність твердої речовини, або через напруження стиску:

$$\sigma_c = \frac{F}{A}, \quad (7)$$

де  $F$  – прикладена сила;  
 $A$  – площа навантаження.

Саме поєднання  $\rho$ ,  $P$  і  $\sigma_c$  визначає, чи не буде матеріал надмірно крихким при монтажі, чи не втратить форму під кожухом і чи не змінить свою структуру на опорах, у місцях підвісок та на фасонних деталях [2] – [5], [10].

Для умов, де можливе зволоження, критичним стає водопоглинання:

$$W_m = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100\%, \quad (8)$$

де  $m_w$  – маса зразку після зволоження;

$m_d$  – маса сухого зразку.

Зростання  $W_m$  небажане не тільки саме по собі, а й тому, що вологість змінює ефективний тепловий режим, підвищує масу системи та прискорює деградацію покриття [5], [6], [9]. Додатково до цього доцільно враховувати температуропровідність:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}, \quad (9)$$

де  $c_p$  – питома теплоємність, оскільки саме вона характеризує швидкість проникнення температурних змін у товщу матеріалу, що для циклічно навантажених енергетичних поверхонь має практичне значення [11], [12].

На електростанціях до показників якості висуваються вимоги, що відрізняються від будівельної практики щонайменше у шести аспектах:

1) визначальною є працездатність за робочої, а не лабораторної температури, причому зі збереженням властивостей у часі [11] – [13];

2) матеріал має переносити багаторазові температурні цикли без помітного усідання, розтріскування чи відшарування [9], [10], [12];

3) велике значення мають негорючість і стабільність при контакті з гарячими поверхнями та гарячими газами [7], [11], [12];

4) для трубопроводів, арматури й апаратів важлива не лише власна міцність матеріалу, а й здатність працювати в системі з кожухами, бандажми, дротяним кріпленням і стиками сегментів [9], [10], [13];

5) для зовнішніх трас і неопалюваних машинних приміщень суттєвими є гідрофобність і стійкість до зволоження [5], [7], [9];

б) матеріал має бути ремонтпридатним, оскільки енергетичне обладнання обслуговується регламентно, а повна заміна ізоляції на всій ділянці нерідко економічно та технологічно невиправдана [10], [13].

Для зіставлення вимог до теплоізоляційних матеріалів на електростанціях і в будівництві доцільно використати узагальнену табл. 1.

Порівняння показує, що будівельна ізоляція допускає ширший спектр матеріалів, включно з такими, що добре працюють у стінових системах, але мають обмеження за температурою чи поведінкою на криволінійних поверхнях, тоді як на електростанціях коло придатних рішень звужується до матеріалів і систем, здатних працювати в температурно-напруженому та сервісно-складному середовищі [6], [7], [8] – [13].

Таблиця 1 – Вимоги до теплоізоляційних матеріалів, які використовуються на електростанціях та у будівництві

| Показник або вимога            | Звичайне будівництво                      | Електростанції   |
|--------------------------------|---|--|
| Робочий температурний діапазон | Переважно низький або помірний            | Високий, часто змінний, з локальними перегрівками        |
| Визначальний критерій          | Нормативний опір теплопередачі огороження | Зниження тепловтрат і збереження властивостей у режимі   |
| Механічні впливи               | Переважно статичні                        | Вібрація, монтажні навантаження, опори, фасонні поверхні |
| Пожежні вимоги                 | Високі, але частіше в межах класу системи | Жорсткі, особливо біля гарячих агрегатів і комунікацій   |
| Водостійкість                  | Важлива, але частіше в межах огороження   | Критична через втрату властивостей і деградацію системи  |
| Ремонтпридатність              | Менш критична                             | Обов'язкова через доступ до обладнання                   |
| Оптимізаційний критерій        | Енергозбереження, товщина, маса, вартість | Техніко-економічний і ресурсний для системи в цілому     |

Методи підвищення показників якості теплоізоляційних матеріалів для електростанцій доцільно групувати не за окремими матеріалами, а за механізмом впливу на властивості, як це показано на рис. 2.

До матеріалознавчих методів належать керування щільністю та пористістю [1] – [4], застосування базальтових і мінераловатних волокон із покращеною структурною стабільністю [6], [7], а також використання аерогельовмісних і високотемпературних матеріалів із меншою промислою складовою теплоперенесення [11], [12]. Структурно-конструктивні методи полягають у переході від однорідного шару до багатошарової системи, де окремі шари виконують різні функції: внутрішній мінімізує тепловий потік, проміжний стабілізує температурне поле, зовнішній забезпечує механічний захист і вологостійкість [9], [10], [13]. Технологічні методи орієнтовані на відтворюваність властивостей, бо навіть якісний матеріал втрачає переваги через перевищення монтажних зазорів, порушення стиків або зволоження під зовнішнім покриттям [5], [9]. Експлуатаційні методи мають сенс не як заміна властивостей матеріалу, а як умова збереження цих властивостей у реальних режимах [10], [13].

Найбільш перспективним методом підвищення показників якості теплоізоляційних матеріалів для електростанцій слід вважати багатошаровий функціонально диференційований підхід, у якому

внутрішній шар формується з матеріалу з мінімальним тепловим потоком за високих температур, зокрема аерогельового або іншого високотемпературного композиту, а зовнішній – із гідрофобізованого мінераловатного чи базальтового матеріалу під захисною оболонкою [7], [11] – [13], [15]. Перевага цього підходу полягає в тому, що він усуває головний недолік однорідної ізоляції, коли один і той самий шар змушений одночасно забезпечувати теплозахист, механічну стійкість і довговічність. Обмеження теж очевидні: вища вартість, складніша технологія монтажу та вимога до акуратнішого проектного розрахунку товщин і стиків [12], [13], [15].

Для наочного порівняння жорсткості вимог до показників якості, подамо нормовану аналітичну діаграму (рис. 3), де оцінка 1 означає низьку, а 5 – дуже високу відносну вимогливість до показника. Результати отримано за методом експертних оцінок за результатами аналізу джерел [6] – [15].

Із наведеної діаграми випливає, що в будівництві максимум вимог концентрується біля теплопровідності, нормативного теплового захисту огорожень та екологічних аспектів життєвого циклу, тоді як для електростанцій сильніше зростає вага термостійкості, циклічної довговічності, конструкційної стійкості й ремонтпридатності, тобто саме тих властивостей, які визначають поведінку ізоляції як елемента промислової системи, а не лише як легкого теплозахисного шару.

Тобто для паропроводів, гарячих поверхонь і вузлів зі складною геометрією (котлотурбінне обладнання) найбільший ефект очікується від комбінованої ізоляції, тоді як для допоміжних приміщень, огорожувальних елементів і технічних будівель можуть бути виправдані менш дорогі, але достатньо стабільні рішення, включно з системами на базі традиційних волокнистих матеріалів [6], [7], [13], [14].

Для практичного використання наведених положень доцільно розрізняти вибір теплоізоляційних матеріалів залежно від температурного діапазону роботи елемента обладнання (табл. 2). Умовний поділ за температурою не замінює повного теплотехнічного розрахунку, але дозволяє попередньо визначити групу матеріалів, які найбільш узгоджуються з експлуатаційними вимогами конкретного вузла електростанції.



Рис. 2 – Методи підвищення показників якості теплоізоляційних матеріалів для електростанцій

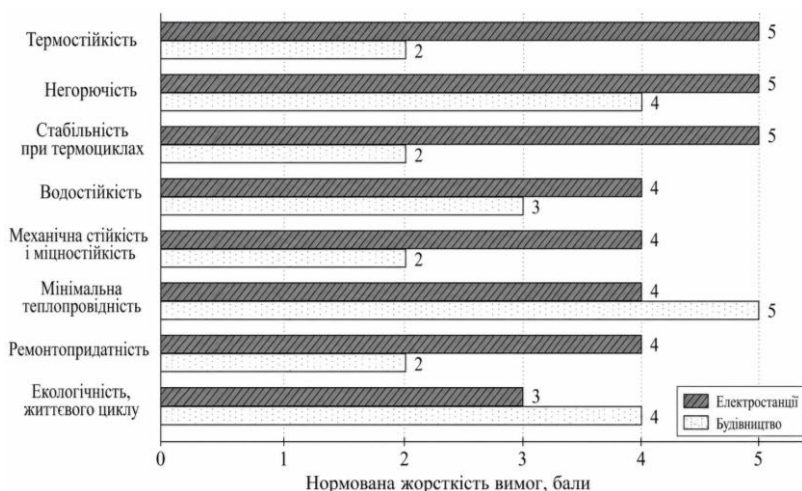


Рис. 3 – Порівняльна діаграма жорсткості вимог до показників якості теплоізоляційних матеріалів

Таблиця 2 — Приклади вибору теплоізоляційних матеріалів для елементів обладнання електростанцій

| Елемент обладнання або ділянка   | Орієнтовний температурний режим | Доцільні матеріали або система ізоляції  |
|--|---------------------------------|--|
| Трубопроводи холодної або помірно нагрітої води, допоміжні комунікації | до 80 °С – 100 °С               | Спінений поліетилен, еластомерна ізоляція, мінераловатні циліндри із захисним покриттям                |
| Трубопроводи мережної води, теплообмінники, резервуари гарячої води    | 100 °С – 180 °С                 | Мінеральна або кам'яна вата, базальтові мати, циліндри з металевою або полімерною оболонкою            |
| Паропроводи насиченої пари та гарячі ділянки арматури                  | 180 °С – 300 °С                 | Базальтова або мінераловатна ізоляція під металевим кожухом, багатошарова система                      |
| Паропроводи перегрітої пари, поверхні котлотурбінного обладнання       | 300 °С – 500 °С і вище          | Високотемпературна мінеральна або базальтова ізоляція, керамоволокнисті матеріали, комбіновані системи |
| Ділянки з підвищеними вимогами до мінімізації товщини ізоляції         | залежно від обладнання          | Аерогельвмісні мати або тонкі комбіновані теплоізоляційні системи                                      |
| Газоходи, фасонні поверхні, вузли зі складною геометрією               | змінний, часто підвищений       | Гнучкі мінераловатні або базальтові мати, багатошарова ізоляція із зовнішнім захисним покриттям        |

### Обговорення результатів

Отримані узагальнення дають підстави для трьох уточнень. По-перше, універсального теплоізоляційного матеріалу для всіх зон електростанцій не існує, тому для кожного коректного випадку варто визначити найкращу комбінацію матеріалу, товщини, конструкції оболонки та способу монтажу. По-друге, механічні та вологісні впливи для енергетичної теплоізоляції не є другорядними, оскільки навіть невелика деградація геометрії, ущільнення або зволоження поступово перетворює розрахункову теплотехнічну перевагу на фактичні тепловтрати, які вже не компенсуються низьким паспортним значенням теплопровідності. По-третє, аерогельні рішення, які демонструють дуже гарні теплоізоляційні властивості, не слід оцінювати поза контекстом вартості, монтажу та життєвого циклу, тому вони є найперспективнішими саме як частина багатошарової системи, а не як безумовна заміна мінераловатної чи базальтової ізоляції на всіх ділянках.

Вибір ізоляційного матеріалу не може виконуватися лише за мінімальним значенням коефіцієнта теплопровідності. Для низько- і середньотемпературних ділянок часто достатньо традиційних волокнистих або спінених матеріалів, якщо вони забезпечують вологостійкість і стабільність геометрії. Для паропроводів, арматури та котлотурбінного обладнання визначальними стають термостійкість, негорючість, поведінка при циклічному нагріванні та ремонтпридатність. Тому для найбільш навантажених ділянок доцільною є багатошарова система, у якій внутрішній шар працює як високотемпературний теплозахист, а зовнішній

забезпечує механічну стійкість, гідрофобність і захист від експлуатаційних впливів.

### Висновки

Теплоізоляційні матеріали, які використовуються на електростанціях, слід оцінювати за сукупністю теплофізичних, механічних і експлуатаційних показників, оскільки придатність у цих умовах визначається не стільки мінімальним паспортним значенням теплопровідності, скільки збереженням властивостей у реальному робочому режимі. Порівняно з будівельною теплоізоляцією, для електростанцій істотно жорсткішими є вимоги до термостійкості, негорючості, поведінки при термоциклах, роботи на криволінійних поверхнях, водостійкості та ремонтпридатності. Перспективними методами підвищення якості є оптимізація порової структури, гідрофобізація, багатошарова побудова, підвищення якості захисних оболонок і вдосконалення монтажу, причому найбільш перспективним напрямом є багатошарова функціонально диференційована система з високотемпературним внутрішнім шаром і механічно та вологостійким зовнішнім шаром. Такий підхід краще узгоджується з умовами експлуатації електростанцій, ніж використання однорідної ізоляції, оскільки дозволяє одночасно керувати тепловими втратами, довговічністю та експлуатаційною надійністю системи

### Інформація щодо наборів даних

Набори даних, використані у цьому дослідженні є загальнодоступними.

Нові набори даних у рамках цього дослідження не створювалися.

**Заява про внесок авторів**

Канюк Г. І.: наукове керівництво, концептуалізація.  
 Мезеря А. Ю.: формальний аналіз, методологія.  
 Князева В. М.: перевірка результатів.  
 Близниченко О. М.: написання – початковий варіант.  
 Фурсова Т. М.: написання – рецензування та редагування.

Усі автори ознайомилися з остаточною версією рукопису та погодилися з її публікацією.

**Заява щодо фінансування та подяки**

Це дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

**Заява щодо конфлікту інтересів**

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

**Заява щодо використання інструментів штучного інтелекту**

У процесі підготовки цієї роботи автори використовували ChatGPT 5.2 з метою мовного редагування тексту та пошуку літератури. Весь згенерований контент було перевірено та відредаговано авторами. Авторі несуть повну відповідальність за зміст публікації.

**Список літератури**

1. Голодюк Г. І. Дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів на основі рослинної сировини / Г. І. Голодюк, Н. М. Гургула // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія «Технічні науки». – 2021. – № 1. – С. 54–59. – DOI: <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2021-1-9>.
2. Дудла І. О. Дослідження теплоізоляційних матеріалів на основі рослинної сировини на міцність / І. О. Дудла, Г. І. Голодюк, Н. М. Гургула // Товарознавчий вісник. – 2022. – Вип. 15(1). – С. 176–183. – DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2022-15-16>.
3. Голодюк Г. І. Визначення міцності на вигин теплоізоляційних матеріалів на основі рослинної сировини / Г. І. Голодюк, Н. М. Гургула // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія «Технічні науки». – 2023. – № 1. – С. 25–29. – DOI: <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2023-1-4>.
4. Голодюк Г. І. Визначення щільності органічної сировини для виготовлення біотеплоізоляційного матеріалу / Г. І. Голодюк, Н. М. Гургула // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія «Технічні науки». – 2024. – № 1. – С. 31–36. – DOI: <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2024-1-6>.
5. Доманцевич Н. І. Експертні дослідження теплоізоляційних матеріалів при проведенні процедури декларування / Н. І. Доманцевич, Г. С. Шестопап // Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки. – 2022. – № 32. – С. 14–19. – DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-32-02>.
6. Сердюк В. Р. Використання традиційних та інноваційних теплоізоляційних матеріалів для утеплення стін житлових та громадських будівель / В. Р. Сердюк, С. В. Рудик, С. В. Гоголь // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – 2024. – Т. 36, № 1. – С. 41–51. – DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-41-51>.
7. Бакулін Є. А. Базальтовий утеплювач – природний «зелений матеріал» для сучасних конструкцій / Є. А. Бакулін, М. В. Русецька // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – Луцьк : ЛНТУ, 2024. – Вип. 22. – С. 5–15. – DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-01).
8. Коваленко Ю. Л. Врахування життєвого циклу теплоізоляційних матеріалів в оцінці впливу на довкілля технологій

- утеплення будівель / Ю. Л. Коваленко, Т. В. Дмитренко // Екологічні науки. – 2025. – № 4(61). – С. 110–116. – DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.4-61.18>.
9. Левченко Л. О. Моделювання зміни температури на поверхнях теплоізоляційних покриттів / Л. О. Левченко, Н. М. Аушева, Т. М. Ткаченко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2025. – Т. 2, № 80. – С. 226–229. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.226>.
  10. Луговой П. З. Колювання теплоізоляційних тришарових циліндричних труб при експлуатаційних навантаженнях / П. З. Луговой, О. П. Шугайло, С. П. Орленко, В. М. Деменков // Ядерна та радіаційна безпека. – 2020. – № 3(87). – С. 55–61. – DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.3\(87\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.3(87).07).
  11. Zhang Q. Review of Lightweight, High-Temperature Thermal Insulation Materials for Aerospace / Q. Zhang, H. Huang, C. Lei, Y. Liu, W. Li // Materials. – 2025. – Vol. 18, Is. 10. – Paper No. 2383. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18102383>.
  12. Zhu Z. A Review of High-Temperature Resistant Silica Aerogels: Structural Evolution and Thermal Stability Optimization / Z. Zhu, W. Zhang, H. Huang, W. Li, H. Ling, H. Zhang // Gels. – 2025. – Vol. 11, Is. 5. – Paper No. 357. – DOI: <https://doi.org/10.3390/gels11050357>.
  13. Lou C. Thermal insulation design for superheated steam pipeline transport: Balancing technical and economic factors for optimal performance / C. Lou, C. Zhai, L. Li, Y. Shang, X. Li, D. Li // Applied Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 269, Part B. – Paper No. 126134. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126134>.
  14. Pavlychenko A. Utilizing Fuel and Energy Sector Waste as Thermal Insulation Materials for Technical Buildings / A. Pavlychenko, D. Sala, M. Pyzalski, S. Dybrin, O. Antoniuk, R. Dychkovskiy // Energies. – 2025. – Vol. 18, Is. 9. – Paper No. 2339. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092339>.
  15. Kara I. T. Life cycle assessment of aerogels: a critical review / I. T. Kara, B. Kiyak, N. Colak Gunes, S. Yucel // Journal of Sol-Gel Science and Technology. – 2024. – Vol. 111. – PP. 618–649. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10971-024-06455-0>.

**References (transliterated)**

1. Golodyuk G., Gurgula N. (2021), “Doslidzhennja teploizoljacijnyh vlastyivostej materialiv na osnovi roslynnoi' syrovyny [Research of thermal insulation properties of materials based on vegetable raw materials]”, *Science Bulletin of Poltava University of Economics and Trade. Series “Technical Sciences”*, no. 1, pp. 54–59, <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2021-1-9>.
2. Dudla I., Golodyuk G., Gurgula N. (2022), “Doslidzhennja teploizoljacijnyh materialiv na osnovi roslynnoi' syrovyny na micnist' [Research of Thermal Insulation Material on the Basis of Vegetable Raw Materials for Strength]”, *Commodity Bulletin*, vol. 15, is. 1, pp. 176–183, <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2022-15-16>.
3. Golodyuk G., Gurgula N. (2023), “Vyznachennja micnosti na vygin teploizoljacijnyh materialiv na osnovi roslynnoi' syrovyny [Study of the bending strength of thermal insulation materials based on vegetable raw materials]”, *Science Bulletin of Poltava University of Economics and Trade. Series “Technical Sciences”*, no. 1, pp. 25–29, <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2023-1-4>.
4. Golodyuk G., Gurgula N. (2024), “Vyznachennja shhil'nosti organichnoi' syrovyny dlja vygotovlennja bioteploizoljacijnogo materialu [Determination of the density of organic raw material for the manufacture of bio thermal insulation material]”, *Science Bulletin of Poltava University of Economics and Trade. Series “Technical Sciences”*, no. 1, pp. 31–36, <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2024-1-6>.
5. Domantsevych N. I., Shestopal H. S. (2022), “Ekspertni doslidzhennja teploizoljacijnyh materialiv pry provedenni procedury deklaruvannja [Expert Research of Heat-Insulation Materials when Carrying Out the Declaration Procedure]”, *Herald of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*,

- no. 32, pp. 14–19, <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-32-02>.
6. Serdyuk V., Rudyk S., Hohol S. (2024), “Vykorystannja tradytsijnyh ta innovacijnyh teploizoljacijnyh materialiv dlja utep-lennja stin zhytlovyh ta gromads'kyh budivel' [Use of Traditional and Innovative Thermal Insulation Materials for Wall Insulation of Residential and Public Buildings]”, *Modern Technology, Materials and Design in Construction*, vol. 36, is. 1, pp. 41–51, <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-41-51>.
  7. Bakulin Ye. A., Rusetska M. V. (2024), “Bazal'tovyj utepljuvach – pryrodnyj «zelenyj material» dlja suchasnyh konstrukcij [Basalt insulation is a natural “green material” for modern constructions]”, *Modern technologies and methods of calculations in construction*, no. 22, pp. 5–15, [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-01).
  8. Kovalenko Yu., Dmytrenko T. (2025), “Vrahuvannja zhyt-tjevogo cyklu teploizoljacijnyh materialiv v ocinci vplyvu na dovkillja tehnologij utepennja budivel' [Consideration of the life cycle of thermal insulation materials in the environmental impact assessment of building insulation technologies]”, *Environmental Sciences*, vol. 4(61), pp. 110–116, <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.4-61.18>.
  9. Levchenko L., Ausheva N., Tkachenko T. (2025), “Modeljuvannja zminy temperatury na poverhnjah teploizoljacijnyh pokryttiv [Modeling temperature changes on the surfaces of thermal insulation coatings]”, *Control, Navigation and Communication Systems*, no. 2, is. 80, pp. 226–229, <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.226>.
  10. Lugovoi P., Shugailo O., Orlenko V., Diemienkov V. (2020), “Kolyvannja teploizoljacijnyh trysharovykh cylindrychnykh trub pry ekspluatacijnyh navantazhennjah [Oscillation of Thermal Insulation Three-Layer Cylindrical Pipes under Operating Loads]”, *Nuclear & Radiation Safety*, no. 3(87), pp. 55–61, [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.3\(87\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.3(87).07).
  11. Zhang Q., Huang H., Lei C., Liu Y., Li W. (2025), “Review of Lightweight, High-Temperature Thermal Insulation Materials for Aerospace”, *Materials*, vol. 18, is. 10, paper no. 2383, <https://doi.org/10.3390/ma18102383>.
  12. Zhu Z., Zhang W., Huang H., Li W., Ling H., Zhang H. (2025), “A Review of High-Temperature Resistant Silica Aerogels: Structural Evolution and Thermal Stability Optimization”, *Gels*, vol. 11, is. 5, paper no. 357, <https://doi.org/10.3390/gels11050357>.
  13. 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”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 269, part B, paper no. 126134, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126134>.
  14. Pavlychenko A., Sala D., Pyzalski M., Dybrin S., Antoniuk O., Dychkovskiy R. (2025), “Utilizing Fuel and Energy Sector Waste as Thermal Insulation Materials for Technical Buildings”, *Energies*, vol. 18, is. 9, paper no. 2339, <https://doi.org/10.3390/en18092339>.
  15. Kara I. T., Kiyak B., Colak Gunes N., Yucel S. (2024), “Life cycle assessment of aerogels: a critical review”, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 111, pp. 618–649, <https://doi.org/10.1007/s10971-024-06455-0>.

Надійшла (received) 17.04.2026

Прийнята (accepted) 16.05.2026

Публікація (published) 29.05.2026

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Канюк Геннадій Іванович (Kanjuk Gennadii)** – доктор технічних наук, професор; Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (V. N. Karazin Kharkiv National University), завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; м. Харків; тел.: (099)-685-76-82; e-mail: kanjuk77@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1399-9039>.

**Мезеря Андрій Юрійович (Mezerya Andrii)** – кандидат технічних наук; Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (V. N. Karazin Kharkiv National University), доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; м. Харків; тел.: (050)-716-27-66; e-mail: mezzer@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2946-9593>.

**Князєва Вікторія Миколаївна (Kniazieva Viktoria)** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (V. N. Karazin Kharkiv National University), доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; м. Харків; тел.: (096)-764-40-15; e-mail: vitok911@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3106-4897>.

**Близниченко Олена Миколаївна (Bliznichenko Olena)** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (V. N. Karazin Kharkiv National University), доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; м. Харків; тел.: (063)-214-79-77; e-mail: art-studio\_diana\_@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1654-1598>.

**Фурсова Тетяна Миколаївна (Fursova Tetiana)** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (V. N. Karazin Kharkiv National University), доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; м. Харків; тел.: (063)-688-20-14; e-mail: tatiana2507@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1900-7432>.