

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-06>

УДК 691.175:620.1

¹**КАНЮК Г. І.**, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1399-9039>

¹**ЄПІК О. М.**,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: oleksandrepik0@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4909-6431>

¹*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.*

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ЇХ ПІДВИЩЕННЯ

Статтю присвячено дослідженню питання оцінки якості теплоізоляційних матеріалів, які знайшли широке застосування в огорожувальних конструкціях промислових та житлових будівлях і спорудах. Показано, що в сучасних умовах зростання вимог до енергоефективності, довговічності, пожежної безпеки та екологічності, показники якості теплоізоляційних матеріалів повинні оцінюватися не лише за коефіцієнтом теплопровідності, а й за комплексом взаємопов'язаних показників. Встановлено, що основними показниками якості теплоізоляційних матеріалів є теплопровідність, термічний опір, густина, водопоглинання, паропроникність, міцність на стиск, стабільність властивостей у часі, вогнестійкість, екологічність і технологічність. Показано доцільність використання комплексного показника якості, що дає змогу одночасно враховувати декілька критеріїв якості та забезпечити коректне порівняння традиційних та інноваційних рішень удосконалення характеристик теплоізоляційних матеріалів.

Проаналізовано сучасні наукові праці, присвячені традиційним утеплювачам, біобазованим волокнистим матеріалам, аерогелям, вакуумним теплоізоляційним панелям, композитам із відходів, а також матеріалам із фазовим перетворенням. Встановлено, що підвищення якості теплоізоляційних матеріалів досягається трьома основними групами методів: модифікацією структури матеріалу, введенням функціональних добавок і вдосконаленням конструктивно-технологічних рішень. До найбільш результативних методів належать керування пористістю та розміром пор, гідрофобізація, антипіренова модифікація, армування волокнами, застосування аерогелевих та вакуумних компонентів, формування багатопорових і гібридних систем.

Показано, що кожен метод має не лише переваги, а й обмеження: наприклад, зменшення теплопровідності нерідко супроводжується зниженням механічної міцності, а підвищення вологостійкості може ускладнювати парообмін. Запропоновано систему формалізованого опису окремих і комплексного показників якості, яку можна застосовувати для порівняльного аналізу теплоізоляційних матеріалів на етапах проектування, вибору та експлуатації. Результати роботи можуть бути використані під час розроблення нових теплоізоляційних композитів, вибору ефективних утеплювачів для енергоефективних будівель і вдосконалення методик багатокритеріального оцінювання їх експлуатаційної придатності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: теплоізоляційні матеріали, показники якості, теплопровідність, водопоглинання, міцність, комплексний показник якості, аерогелі, вакуумні теплоізоляційні панелі, методи підвищення якості.

Як цитувати: Канюк Г. І., Єпик О. М. Аналіз показників якості теплоізоляційних матеріалів та методів їх підвищення. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 77-86. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-06>



Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Підвищення енергоефективності будівель є одним із ключових напрямів сучасного будівельного матеріалознавства та інженерії огорожувальних конструкцій. Значна частка тепловтрат припадає саме на зовнішні стіни, покриття та інші елементи оболонки будівлі, тому якість теплоізоляційних матеріалів безпосередньо визначає рівень енергоспоживання, комфорт внутрішнього середовища, довговічність конструкцій і вартість експлуатації об'єкта.

Традиційно ефективність теплоізоляційних матеріалів оцінювали переважно за коефіцієнтом теплопровідності. Проте сучасні умови експлуатації висувають значно ширші вимоги. Матеріал повинен зберігати теплоізоляційні властивості впродовж тривалого часу, бути стійким до

дії вологи та температурних коливань, мати достатню механічну міцність, відповідати вимогам пожежної безпеки, не створювати додаткових екологічних ризиків та бути технологічним у монтажі. Отже, наукова проблема полягає у формуванні системного підходу до оцінювання якості теплоізоляційних матеріалів і вибору методів її підвищення за множиною критеріїв.

Практична значущість цієї проблеми пов'язана з необхідністю обґрунтованого вибору матеріалів для нових та модернізованих енергоефективних будівель, термомодернізації житлового фонду, зниження витрат на опалення й кондиціонування, а також підвищення надійності та безпечності експлуатації теплоізоляційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні наукові публікації свідчать про перехід від аналізу теплопровідності до багатокритеріальної оцінки показників якості теплоізоляційних матеріалів. Аналіз досліджень показав, що перспективними напрямками удосконалення є використання натуральних волокон, перероблених матеріалів, аерогелів, вакуумних ізоляційних панелей та гібридних систем [1-5]. Крім мінімізації теплопровідності, увага приділяється поєднанню низької теплопровідності з вологостійкістю, довговічністю, пожежобезпекою та низьким вуглецевим слідом.

У працях, присвячених зовнішнім стіновим утеплювачам, показано, що фактичні теплофізичні параметри матеріалів можуть відрізнятися від декларованих, а процес старіння істотно впливає на довготривалий термічний опір [6, 10]. Біобазовані матеріали перспективні з точки зору промислового будівництва, однак мають підвищену гігроскопічність і значну чутливість до режимів вологісного навантаження [7-9]. Для утеплювачів, які мають волокнисту структуру на основі вовни, конопель, трав'яної сировини або деревного волокна, важливими показником є не тільки теплопровідність, а й водопоглинання (особливо короткочасне), коефіцієнт опору дифузії водяної пари та зміна

характеристик під дією полум'я (хімічна та механічна деградація) [7, 8].

Окремий напрямом досліджень є використання інноваційних матеріалів та покриття. Дослідження аерогелевих систем підтверджують їхню наднизьку теплопровідність, малу густину та високу теплоізоляційну ефективність, однак має місце проблема крихкості, вартості та складності масштабного виробництва [5, 11, 13]. Вакуумні теплоізоляційні панелі характеризуються високим термічним опором за малої товщини, але потребують контролю деградації вакууму та теплових містків у вузлах кріплення [3, 14]. Роботи щодо композитів із вторинної сировини та гібридних гіпсових сумішей показують можливість поєднання прийнятних теплофізичних характеристик із циркулярністю виробництва, хоча питання стабільності властивостей і вологостійкості залишаються актуальними [2, 12, 15].

Аналіз публікацій засвідчує, що подальший розвиток теплоізоляційних матеріалів пов'язаний із багато критеріальною оптимізацією їх структури та властивостей, а також із розробкою комплексних показників якості, які дають змогу враховувати суперечливий вплив окремих методів модифікації на експлуатаційні характеристики.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою статті є аналіз показників якості теплоізоляційних матеріалів, формалізація їх оцінювання на основі окремих показників та комплексного показника якості, а також систематизація методів підвищення показників якості з визначенням їх переваг і недоліків.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- визначити основні показники якості

теплоізоляційних матеріалів;

- подати математичні залежності для оцінювання окремих показників;

- сформулювати рівняння комплексного показника якості;

- проаналізувати сучасні методи підвищення показників якості;

- узагальнити переваги та недоліки методів підвищення якості теплоізоляційних матеріалів.

Виклад основного матеріалу

1. Основні показники якості теплоізоляційних матеріалів

Якість теплоізоляційного матеріалу (рис. 1) доцільно оцінювати за сукупністю таких показників: коефіцієнт теплопровідності λ , термічний опір R , густина ρ ,

водопоглинання W , жаропроникність P , міцність на стиск σ_c , теплофізична стабільність $k_{ст}$, показник пожежної безпеки $k_{пб}$, довговічність τ , екологічність $k_{ек}$.

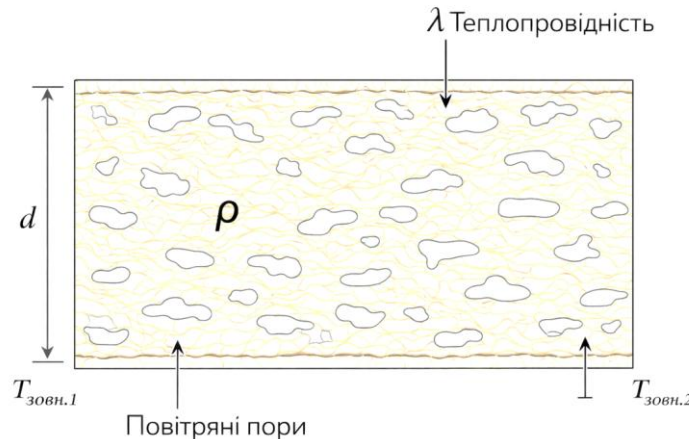


Рис. 1 – Переріз пористого теплоізоляційного матеріалу
Fig. 1 – Cross section of porous thermal insulation material

Запишемо показники якості більш детально:

1. Коефіцієнт теплопровідності визначається як:

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{\Delta T}, \quad (1)$$

де q – густина теплового потоку, Вт/м²; δ – товщина шару матеріалу, м; ΔT – різниця температур на поверхнях матеріалу, К.

2. Термічний опір шару визначається як:

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

де R – термічний опір, м²·К/Вт.

3. Об'ємна густина визначається як:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3)$$

де m – маса зразка, кг; V – об'єм зразка, м³.

4. Масове водопоглинання визначається як:

$$W = \frac{m_b - m_c}{m_c} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де m_b – маса зразка після зволоження, кг; m_c – маса сухого зразка, кг.

5. Міцність на стиск визначається як:

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A}, \quad (5)$$

де F_{max} – максимальне стискальне навантаження, Н; A – площа навантаження, м².

6. *Коефіцієнт термічної стабільності* можна записати у вигляді:

$$k_{ст} = \frac{\lambda_0}{\lambda_t}, \quad (6)$$

де λ_0 – початковий коефіцієнт теплопровідності; λ_t – коефіцієнт теплопровідності після старіння або експлуатації протягом часу t . Якщо значення $k_{ст}$ близьке до одиниці, матеріал мало деградує в часі.

7. *Показник вологостійкості* у нормованому вигляді можна подати як:

$$k_{вл} = \frac{W_{баз}}{W}, \quad (7)$$

де $W_{баз}$ – базове або допустиме значення водопоглинання; W – фактичне водопоглинання.

8. *Показник міцності* визначається як:

$$k_{м} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{баз}}, \quad (8)$$

де $\sigma_{баз}$ – базове або нормативне значення міцності.

9. *Показник теплозахисної ефективності* задається виразом:

$$k_{т} = \frac{\lambda_{баз}}{\lambda}, \quad (9)$$

де $\lambda_{баз}$ – базове значення теплопровідності для матеріалу порівняння.

10. *Показник паропроникності* можна подати як:

$$k_{п} = \frac{P}{P_{баз}}, \quad (10)$$

де P – фактичне значення паропроникності; $P_{баз}$ – базове або нормативне значення паропроникності.

11. *Показник екологічності* доцільно визначати як:

$$k_{ек} = \frac{E_{баз}}{E}, \quad (11)$$

де E – інтегральний показник екологічного впливу матеріалу; $E_{баз}$ – базове значення екологічного показника.

2. Комплексний показник якості

Для багатокритеріального оцінювання доцільно використовувати адитивний комплексний показник якості:

$$K_{ком} = w_1 k_{т} + w_2 k_{м} + w_3 k_{вл} + w_4 k_{п} + w_5 k_{ст} + w_6 k_{пб} + w_7 k_{ек}, \quad (12)$$

де $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7$ – вагові коефіцієнти значущості відповідних показників; $k_{т}$ – нормований показник теплозахисної ефективності; $k_{м}$ – нормований показник міцності; $k_{вл}$ – нормований показник вологостійкості; $k_{п}$ – нормований показник паропроникності; $k_{ст}$ – нормований показник стабільності властивостей; $k_{пб}$ – нормований показник пожежної

безпеки; $k_{ек}$ – нормований показник екологічності.

За умови нормування ваг виконується співвідношення:

$$\sum_{i=1}^7 w_i = 1. \quad (13)$$

Для задач, у яких низьке значення хоча б одного показника різко знижує загальну якість, доцільно застосовувати мультиплікативну форму:

$$K_{ком}^* = \prod_{i=1}^7 k_i^{w_i}. \quad (14)$$

Така форма жорсткіше враховує слабкі місця матеріалу, наприклад високе водопоглинання або низьку пожежну стійкість.

3. Аналіз методів підвищення показників якості теплоізоляційних матеріалів

Аналіз літературних джерел за напрямом якості теплоізоляційних матеріалів, дозволив зробити структуру

методів підвищення якості, яка показана на рис.2. Розглянемо детально деякі найбільш використовувані методи (табл.1-8):

Таблиця 1
Керування пористістю та мікроструктурою
Table 1
Porosity and microstructure control

Керування пористістю та мікроструктурою		
Сутність	Переваги	Недоліки
Формування оптимальної порової структури, за якої зменшуються твердофазна та конвективна складові теплопереносу	Зменшення λ ; можливість одержання легких матеріалів; підвищення питомого термічного опору	Надмірна пористість знижує σ_c ; відкриті пори підвищують водопоглинання; ускладнюється забезпечення стабільності структури

Таблиця 2
Гідрофобізація
Table 2
Hydrophobization

Гідрофобізація		
Сутність	Переваги	Недоліки
Застосування кремнійорганічних, силоксанових, фторвмісних або воскових модифікаторів знижує капілярне всмоктування та сорбцію вологи	Зменшення W ; підвищення довговічності; стабілізація λ в умовах вологого середовища	Можливе зниження паропроникності; додаткові витрати; окремі гідрофобізатори можуть погіршувати пожежні характеристики.

Таблиця 3
Антипіренова модифікація
Table 3
Flame retardant modification

Антипіренова модифікація		
Сутність	Переваги	Недоліки
Введення антипіренів, мінеральних наповнювачів, спучувальних систем та негорючих оболонок підвищує пожежну безпеку матеріалу	Зменшення горючості; розширення сфер застосування; підвищення безпеки експлуатації	Можливе зростання густини; іноді погіршується екологічність; частина добавок знижує механічну цілісність композиту

Таблиця 4
Армування волокнами та використання зв'язувальних систем
Table 4
Fiber reinforcement and use of bonding systems

Армування волокнами та використання зв'язувальних систем		
Сутність	Переваги	Недоліки
Армування природними, мінеральними або синтетичними волокнами, а також добір полімерних і мінеральних зв'язувальних підвищує міцність матеріалу	Зростання σ_c та тріщиностійкості; поліпшення формостійкості; зниження усадки	Можливе зростання λ через ущільнення структури; технологічна складність; потреба в підборі сумісних компонентів

Таблиця 5
Застосування аерогелів
Table 5
Applications of Aerogels

Застосування аерогелів		
Сутність	Переваги	Недоліки
Використовуються аерогелі, які мають надзвичайно високу пористість і дуже низьку теплопровідність	Дуже низьке λ ; мала товщина теплоізоляційного шару; можливість створення високоефективних композитів	Висока вартість; крихкість; чутливість до технології виготовлення та монтажу

Таблиця 6
Вакуумнi теплоiзоляцiйнi панелi
Table 6
Vacuum insulation panels

Вакуумнi теплоiзоляцiйнi панелi		
Сутнiсть	Переваги	Недолiки
Використання панелей, якi забезпечують дуже високий термiчний опiр за мiнiмальної товщини	Максимальна теплозахисна ефективнiсть; зменшення товщини огороження; доцiльнiсть для реконструкцiї обмежених за простором зон	Чутливiсть до проколiв i пошкоджень; наявнiсть теплових мiсткiв у крайових зонах; поступова деградацiя вакууму

Таблиця 7
Використання вторинної та бiобазованої сировини
Table 7
Use of secondary and bio-based raw materials

Використання вторинної та бiобазованої сировини		
Сутнiсть	Переваги	Недолiки
До матерiалу вводять рослиннi волокна, вiдходи текстилю, паперу, гiпсу, полiмерiв тощо	Екологiчнiсть; зниження вуглецевого слiду; розвиток циркулярної економiки	Вища варiабельнiсть властивостей; чутливiсть до вологи та бiодеградацiї; потреба в додатковому захистi

Таблиця 8
Багатошаровi та гiбриднi системи
Table 8
Multilayer and hybrid systems

Багатошаровi та гiбриднi системи		
Сутнiсть	Переваги	Недолiки
Поєднання декiлькох матерiалiв, зокрема вiдбивних шарiв, пористих утеплювачiв, РСМ-компонентiв i захисних оболонок	Синергетичний ефект; можливiсть збалансувати суперечливи властивостi; адаптацiя до конкретних умов експлуатацiї	Складнiсть розрахунку i виробництва; проблеми сумiсностi шарiв; вища собiвартiсть

Аналіз показує, що універсального теплоізоляційного матеріалу, який одночасно мав би мінімальну теплопровідність, високу міцність, низьке водопоглинання, абсолютну пожежну безпеку, довговічність і низьку вартість, наразі не існує. Саме тому доцільно переходити від оцінювання одного домінуючого параметра до багатокритеріальної моделі якості.

Для житлового та громадського будівництва важливим є компроміс між теплозахистом, вологісним режимом та довговічністю. Для тонкошарових або реконструкційних рішень пріоритет може надаватися аерогелям і вакуумним панелям. Для екологічно орієнтованих об'єктів перспективни-

ми є біобазовані та вторинні композити, але за умови їх гідрофобного, біозахисного й вогнезахисного доопрацювання. Отже, вибір методу підвищення якості має визначатися функціональним призначенням конструкції, режимом експлуатації, економічними обмеженнями та вимогами нормативної безпеки.

Запропонований комплексний показник якості придатний для інженерного порівняння матеріалів, а також для постановки задач оптимізації складу й структури теплоізоляційних композитів. Його перевага полягає в тому, що він дає змогу врахувати суперечливий вплив модифікаційних заходів і вибрати рішення не за одним, а за сукупністю показників.

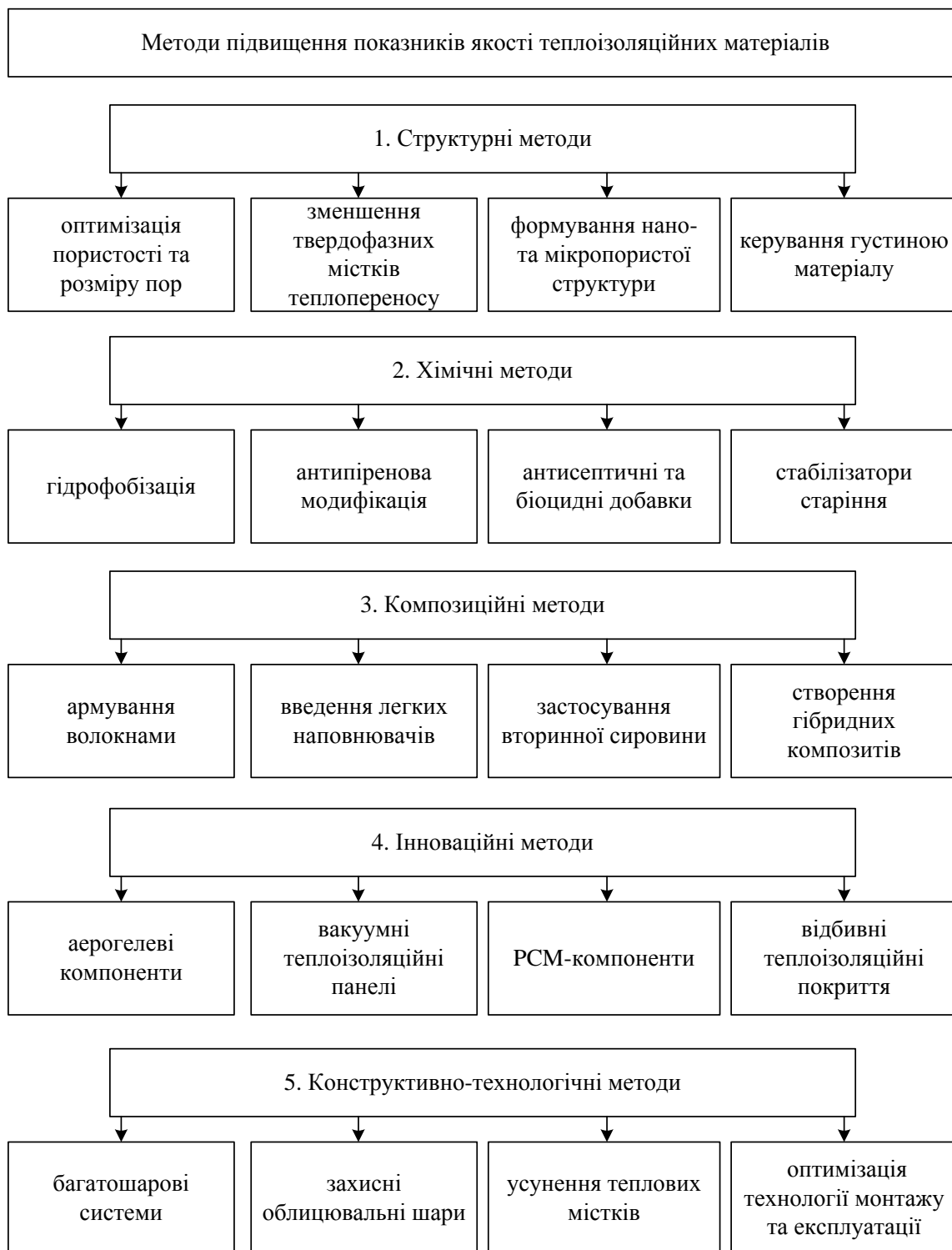


Рис. 2 – Структура методів підвищення показників якості теплоізоляційних матеріалів
Fig. 2 – Structure of methods for improving the quality of thermal insulation materials

Висновки

Якість теплоізоляційних матеріалів повинна оцінюватися за системою взаємопов'язаних показників, серед яких визначальними є теплопровідність, термічний опір, водопоглинання, паропроникність,

міцність, стабільність властивостей, пожежна безпека та екологічність.

Для кількісного аналізу доцільно використовувати як окремі показники якості, так і комплексний показник,

сформований на основі нормованих критеріїв і вагових коефіцієнтів значущості. Основними методами підвищення показників якості є керування пористою структурою, гідрофобізація, антипіренова модифікація, армування, використання аерогелевих і вакуумних компонентів, а також формування багатошарових і гібридних систем.

Кожен метод має як переваги, так і обмеження: зниження теплопровідності

часто супроводжується зменшенням міцності або зростанням вартості, тоді як підвищення вологостійкості та вогнестійкості може впливати на парообмін, масу чи екологічні характеристики.

Перспективним напрямом є створення гібридних теплоізоляційних матеріалів із багатофункціональними властивостями та застосування багатокритеріальної оптимізації їх складу й структури.

Конфлікт інтересів

Автори засвідчують, що, незважаючи на те, що один із авторів статті є членом редакційної колегії цього журналу, процес рецензування, прийняття рішення щодо публікації та редагування проводилися незалежно, без його участі чи впливу. Будь-які потенційні конфлікти інтересів були повністю усунені шляхом зовнішнього контролю процесу.

Список використаних джерел:

1. A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Sustainable Buildings / Ali A., Almutairi K., Alharthi M. et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. No. 20. Art. 8782. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16208782>.
2. A Comprehensive Review of Sustainable Thermal and Acoustic Insulation Materials from Various Waste Sources / Ouda M. et al. *Buildings*. 2025. Vol. 15. No. 16. Art. 2876. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15162876>.
3. Cuce P. M. Sustainable Insulation Technologies for Low-Carbon Buildings: From Past to Present. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No. 11. Art. 5176. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17115176>.
4. Cosentino L., Fernandes J., Mateus R. A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 12. Art. 4676. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124676>.
5. Lakatos Á. Novel Thermal Insulation Materials for Buildings. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 18. Art. 6713. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15186713>.
6. Analysis of Thermal Properties of Materials Used to Insulate External Walls / Pomada M., Kieruzel K., Ujma A., Palutkiewicz P., Walasek T., Adamus J. *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 19. Art. 4718. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194718>.
7. Performance Evaluation of Thermal Insulation Materials from Sheep's Wool and Hemp Fibres / Vėjelis S., Vaitkus S., Kremensas A., Kairyte A., Sinkevičius V. *Materials*. 2024. Vol. 17, No. 13. Art. 3339. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17133339>.
8. Ranefjård O., Strandberg-de Bruijn P. B., Wadsö L. Hygrothermal Properties and Performance of Bio-Based Insulation Materials Locally Sourced in Sweden. *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 9. Art. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17092021>.
9. Assessment of the Usability of Some Bio-Based Insulation Materials in Double-Skin Steel Envelopes / Hoxha D., Ismail B., Rotaru A., Izabel D., Renaux T. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 17. Art. 10797. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141710797>.
10. Kim J.-H., Kim S.-M., Kim J.-T. Comparison of Thermal Conductivity and Long-Term Change of Building Insulation Materials According to Accelerated Laboratory Test Methods of ISO 11561 and EN 13166 Standard. *Energies*. 2024. Vol. 17. No. 23. Art. 6105. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17236105>.
11. Research on Thermal and Heat Insulation Properties of Aerogel Heat-Insulating Reflective Coatings / Liu Y. L. et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 17. Art. 9700. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13179700>.
12. Advancing the Circular Economy: Reusing Hybrid Bio-Waste-Based Gypsum for Sustainable Building Insulation / Liu Y. L. et al. *Buildings*. 2023. Vol. 13. No. 12. Art. 2939. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13122939>.
13. High-Strength, Thermal-Insulating, Fire-Safe Bio-Based Organic Lightweight Aerogel Based on 3D Network Construction of Natural Tubular Fibers / Xu Y., Yan C., Du C., Xu K., Li Y.,

Xu M., Bourbigot S., Fontaine G., Li B., Liu L. *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 261. Art. 110809. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110809> .

14. Real-Time Service Life Estimation of Vacuum Insulated Panels via Embedded Sensing and Machine Learning Models / Ibadov N. et al. *Buildings*. 2025. Vol. 15. No. 16. Art. 2879. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15162879> .

15. Determining Moisture Condition of External Thermal Insulation Composite Systems / Krause P. et al. *Materials*. 2025. Vol. 18. No. 3. Art. 614. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030614> .

Отримано: 28.03.2026 / Переглянуто: 30.04.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**G. KANJUK**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation, Metrology, and Energy-Efficient Technologies

e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1399-9039>

¹**O. ЕPIK**,

Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies

e-mail: oleksandrepik0@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4909-6431>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine.*

ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS OF THERMAL INSULATION MATERIALS AND METHODS FOR THEIR IMPROVEMENT

The article examines modern approaches to assessing the quality of thermal insulation materials used in the enclosing structures of buildings and civil engineering works. It is shown that, under increasing requirements for energy efficiency, durability, fire safety, and environmental performance, thermal insulation should be assessed not only by its thermal conductivity coefficient, but also by a set of interrelated indicators. The key quality indicators include thermal conductivity, thermal resistance, density, water absorption, vapor permeability, compressive strength, stability of properties over time, fire resistance, environmental friendliness, and manufacturability. The expediency of using a comprehensive quality indicator is substantiated, since it makes it possible to simultaneously take several criteria into account and ensures a more accurate comparison of traditional and innovative thermal insulation materials.

Modern scientific publications devoted to conventional insulation materials, bio-based fibrous materials, aerogels, vacuum insulation panels, waste-based composites, as well as phase-change materials, are analyzed. It has been established that improving the quality of thermal insulation materials is achieved through three main groups of methods: modification of the material structure, introduction of functional additives, and improvement of design and technological solutions. The most effective methods include controlling porosity and pore size, hydrophobization, flame-retardant modification, fiber reinforcement, the use of aerogel and vacuum components, and the formation of multilayer and hybrid systems.

It is shown that each method has not only advantages but also limitations. For example, reducing thermal conductivity is often accompanied by a decrease in mechanical strength, while improving moisture resistance may complicate vapor exchange. A system for the formalized description of individual and comprehensive quality indicators is proposed, which can be applied to the comparative analysis of thermal insulation materials at the stages of design, selection, and operation. The results of the study can be used in the development of new thermal insulation composites, in the selection of effective insulation materials for energy-efficient buildings, and in improving methods for the multicriteria assessment of their operational suitability.

Keywords: thermal insulation materials, quality indicators, thermal conductivity, water absorption, strength, comprehensive quality indicator, aerogels, vacuum insulation panels, methods for quality improvement.

In cites: Kanjuk G., Epik O. (2026). Analysis of quality indicators of thermal insulation materials and methods for their improvement. *Engineering*, (37), 77-86. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-06> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors certify that, although one of the authors of the article is a member of the editorial board of this journal, the peer review, publication decision, and editorial processes were conducted independently, without their participation or influence. Any potential conflicts of interest were fully mitigated through external oversight of the process.

Reference:

1. Ali, A, Almutairi, K, Alharthi, M et al 2024, 'A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Sustainable Buildings', *Sustainability*, Vol. 16, No. 20, Art. 8782. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16208782> .
2. Ouda, M. et al 2025, 'A Comprehensive Review of Sustainable Thermal and Acoustic Insulation Materials from Various Waste Sources', *Buildings*, Vol. 15, No. 16, Art. 2876. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15162876> .
3. Cuce, PM 2-25, 'Sustainable Insulation Technologies for Low-Carbon Buildings: From Past to Present', *Sustainability*, Vol. 17, No. 11, Art. 5176. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17115176> .
4. Cosentino, L, Fernandes, J & Mateus, R 2023, 'A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials', *Energies*, Vol. 16, No. 12, Art. 4676. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124676> .
5. Lakatos, Á 2022, 'Novel Thermal Insulation Materials for Buildings', *Energies*, Vol. 15, No. 18, Art. 6713. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15186713> .
6. Pomada, M, Kieruzel, K, Ujma, A, Palutkiewicz, P, Walasek, T & Adamus, J 2024, 'Analysis of Thermal Properties of Materials Used to Insulate External Walls', *Materials*, Vol. 17, No. 19, Art. 4718. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194718> .
7. Vėjelis, S, Vaitkus, S, Kremensas, A, Kairyte, A & Sinkevičius, V 2024, 'Performance Evaluation of Thermal Insulation Materials from Sheep's Wool and Hemp Fibres', *Materials*, Vol. 17, No. 13, Art. 3339. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17133339> .
8. Ranefjård, O, Strandberg-de Bruijn, PB & Wadsö, L 2024, 'Hygrothermal Properties and Performance of Bio-Based Insulation Materials Locally Sourced in Sweden', *Materials*, Vol. 17, No. 9, Art. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17092021> .
9. Hoxha, D, Ismail, B, Rotaru, A, Izabel, D & Renaux, T 2022, 'Assessment of the Usability of Some Bio-Based Insulation Materials in Double-Skin Steel Envelopes', *Sustainability*, Vol. 14, No. 17, Art. 10797. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141710797> .
10. Kim, J-H, Kim, S-M & Kim, J-T 2024, 'Comparison of Thermal Conductivity and Long-Term Change of Building Insulation Materials According to Accelerated Laboratory Test Methods of ISO 11561 and EN 13166 Standard', *Energies*, Vol. 17, No. 23, Art. 6105. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17236105> .
11. Liu, YL et al 2023, 'Research on Thermal and Heat Insulation Properties of Aerogel Heat-Insulating Reflective Coatings', *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 17, Art. 9700. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13179700> .
12. Balti, S, Boudenne, A, Belayachi, N, Dammak, L & Hamdi, N 2023, 'Advancing the Circular Economy: Reusing Hybrid Bio-Waste-Based Gypsum for Sustainable Building Insulation', *Buildings*, Vol. 13, No. 12, Art. 2939. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13122939> .
13. Xu, Y, Yan, C, Du, C, Xu, K, Li, Y, Xu, M, Bourbigot, S, Fontaine, G, Li, B & Liu, L 2023, 'High-Strength, Thermal-Insulating, Fire-Safe Bio-Based Organic Lightweight Aerogel Based on 3D Network Construction of Natural Tubular Fibers', *Composites Part B: Engineering*, Vol. 261, Art. 110809. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110809> .
14. Ibadov, N et al 2025, 'Real-Time Service Life Estimation of Vacuum Insulated Panels via Embedded Sensing and Machine Learning Models', *Buildings*, Vol. 15, No. 16, Art. 2879. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15162879> .
15. Krause, P et al 2025, 'Determining Moisture Condition of External Thermal Insulation Composite Systems', *Materials*, Vol. 18, No. 3, Art. 614. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030614> .

Submission received: 03.28.2026/Revised: 04.30.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026