

© Р.О. Дичковський¹, А.В. Павличенко¹, С.В. Дибрін¹,
А.Ю. Перерва², І.О. Мірошников¹, А.В. Кліско³

¹Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

²ПрАТ "Львівська вугільна компанія", Львівська обл., Сокальський р-н, село Сілець, Україна

³Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО РОЗМОКАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

R. Dychkovskiy¹, <https://orcid.org/0000-0002-3143-8940>

A. Pavlychenko¹, <https://orcid.org/0000-0003-4652-9180>

S. Dybrin¹, <https://orcid.org/0000-0001-7771-590X>

A. Pererva², <https://orcid.org/0009-0009-0542-595X>

I. Miroshnikov¹, <https://orcid.org/0009-0005-6451-3969>

A. Klisko³, <https://orcid.org/0000-0002-3655-7674>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²PJSC "Lviv Coal Company", Lviv region, Sokal district, Silets village, Ukraine

³National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

RESEARCH ON THE RESISTANCE TO WETTING AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF THERMAL INSULATION MATERIALS

Мета. Дослідження впливу зволоження на структурну цілісність і експлуатаційні властивості теплоізоляційних матеріалів, визначення їх стійкості до розмокання шляхом оцінки екологічної безпеки на основі аналізу показників можливого негативного впливу на довкілля при використанні їх у сучасному будівництві.

Методика дослідження. Проведення експериментальної оцінки стійкості теплоізоляційних матеріалів до розмокання виконувалося шляхом витримування у водному середовищі протягом визначеного проміжку часу з подальшим визначенням змін маси, геометричних параметрів і структурного стану зразків, аналіз екологічної безпеки матеріалів здійснювався шляхом оцінки їх складу та потенційної здатності до виділення шкідливих речовин під впливом вологи.

Результати дослідження. У результаті проведених досліджень встановлено відмінності у стійкості досліджуваних теплоізоляційних матеріалів до розмокання залежно від їх структури та компонентного складу. Визначено зміни маси та фізичного стану зразків після впливу водного середовища, що дозволило оцінити рівень збереження їх експлуатаційних властивостей. Аналіз екологічної безпеки показав, що досліджувані матеріали характеризуються різним рівнем потенційного впливу на навколишнє середовище при тривалому контакті з вологою. На основі отриманих результатів виконано порівняльну оцінку теплоізоляційних матеріалів та визначено найбільш перспективні зразки, які поєднують вологостійкість і екологічні характеристики.

Наукова новизна. Полягає в систематизації та науковому обґрунтуванні підходів до комплексної оцінки стійкості теплоізоляційних матеріалів до розмокання та їх екологічної безпеки. Встановлено особливості зміни фізичного стану матеріалів під впливом вологи та визначено взаємозв'язок між показниками вологостійкості й екологічними характеристиками. Удосконалено підхід до порівняльної оцінки теплоізоляційних матеріалів за сукупністю експлуатаційних та екологічних критеріїв.

Практичне значення. Розробка способів ефективного оцінювання стійкості теплоізоляційних матеріалів до розмокання та їх екологічної безпеки дозволяє обґрунтовано підходити до вибору матеріалів для будівельних і промислових потреб. Запропоновані підходи сприяють підвищенню довговічності будівельних конструкцій, зниженню експлуатаційних витрат та мінімізації негативного впливу на довкілля.

Ключові слова: теплоізоляційні матеріали, стійкість до розмокання, вологісна деградація, експлуатаційні властивості, структурна стійкість, екологічна безпека.

Вступ. Дане дослідження зумовлене зростанням вимог до енергоефективності будівель та підвищенням ролі теплоізоляційних матеріалів у забезпеченні зниження енергоспоживання. Водночас експлуатація таких матеріалів у реальних умовах часто супроводжується впливом вологи, що може призводити до втрати їхніх теплофізичних та механічних властивостей [1]. Тому проблема оцінки стійкості до розмокання набуває особливої значущості в контексті довговічності будівельних конструкцій.

Варто зазначити, що у межах обґрунтування та розробки геореакторних систем для комплексної переробки відходів вуглезбагачення з орієнтацією на отримання критичної сировини встановлено, що такі технологічні процеси супроводжуються утворенням значних обсягів побічних мінеральних продуктів [2]. Ці матеріали, залежно від їх складу та властивостей, можуть бути ефективно використані як вторинна сировина для виробництва підсипочних і будівельних матеріалів, що відповідає принципам циркулярної економіки та зменшує техногенне навантаження на довкілля [1–3]. Значна частина таких відходів представлена алюмосилікатними компонентами, які мають потенціал для застосування у композиційних системах [4].

Використання алюмосилікатвмісних відходів у виробництві теплоізоляційних матеріалів дозволяє формувати легкі композити з покращеними теплофізичними властивостями та зниженою матеріаломісткістю [2, 5]. Завдяки цьому зменшується споживання первинної сировини та підвищується екологічна ефективність будівельних матеріалів [6]. Таким чином, інтеграція відходів вуглезбагачення у технології теплоізоляційних композитів створює передумови для комплексної утилізації техногенних ресурсів і розширення сфер їх практичного використання [1, 2, 7].

Аналіз сучасного стану досліджень свідчить, що більшість наукових робіт у сфері теплоізоляційних матеріалів традиційно зосереджені на визначенні їх теплопровідності, міцності, щільності та інших експлуатаційних характеристик, які безпосередньо впливають на енергоефективність будівельних конструкцій [8]. Такий підхід дозволяє отримати важливі дані щодо базових функціональних властивостей матеріалів, однак не враховує повною мірою їх поведінку в умовах тривалого впливу вологи [2, 5, 9].

Водночас умови експлуатації сучасних будівель часто характеризуються періодичним або постійним зволоженням теплоізоляційних шарів, що призводить до поступової деградації їх структури, зміни пористості та зниження теплоізоляційної здатності [2, 10]. Це особливо актуально для конструкцій, які експлуатуються в кліматичних умовах із значними коливаннями вологості та температури. У таких умовах матеріали можуть втрачати не лише свої теплотехнічні, але й механічні властивості, що негативно впливає на довговічність будівельних систем [5, 11]. Незважаючи на це, у науковій літературі питання довготривалого впливу вологи розглядаються переважно фрагментарно, без системного аналізу процесів розмокання та пов'язаних із ними змін матеріальної структури [11, 12]. Відсутність комплексного підходу ускладнює прогнозування поведінки теплоізоляційних матеріалів в реальних умовах експлуатації.

Окремі дослідження дійсно приділяють увагу водопоглинанню як одному з ключових параметрів, проте він зазвичай розглядається ізольовано від інших процесів деградації, таких як розпушення структури, втрата механічної цілісності та можливі зміни хімічного складу [11, 13]. У результаті комплексна оцінка довговічності та стабільності теплоізоляційних матеріалів в умовах вологості залишається недостатньо розвиненою, що обмежує можливість їх обґрунтованого вибору для реальних експлуатаційних умов.

Передумовами проведення дослідження є широке застосування пористих та волокнистих теплоізоляційних матеріалів, які є особливо чутливими до впливу вологи [11, 14]. Це зумовлено їхньою структурною будовою, що сприяє інтенсивному водопоглинанню та подальшим змінам фізико-механічних характеристик [11, 15]. Крім того, сучасні будівельні технології часто передбачають використання матеріалів у складних кліматичних умовах, що підсилює ризики їх структурного руйнування та втрати функціональних властивостей. У таких умовах навіть незначне зволоження може призводити до накопичувальних деградаційних процесів, які суттєво знижують довговічність теплоізоляційних систем [14–16]. Окремо виступає необхідність врахування екологічної безпеки будівельних матеріалів, оскільки при зволоженні можливе вимивання або міграція потенційно шкідливих компонентів у навколишнє середовище [1, 17]. Це вимагає одночасного аналізу як експлуатаційних, так і екологічних характеристик матеріалів.

Наукова новизна дослідження полягає у поєднанні оцінки стійкості до розмокання з аналізом екологічної безпеки теплоізоляційних матеріалів, що дозволяє сформулювати комплексний підхід до їх порівняльної характеристики. Такий підхід дає змогу встановити взаємозв'язок між структурними змінами матеріалу та його екологічною поведінкою.

Необхідність дослідження визначається потребою у створенні науково обґрунтованих критеріїв вибору теплоізоляційних матеріалів для умов підвищеної вологості. Це дозволить підвищити надійність будівельних конструкцій, зменшити витрати на їх ремонт та обслуговування, а також мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Таким чином, проведення комплексного дослідження стійкості до розмокання та екологічної безпеки теплоізоляційних матеріалів є важливим як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки сприяє розвитку сучасних підходів до вибору ефективних і безпечних будівельних рішень.

2. Матеріали, методи та методика дослідження стійкості до розмокання та екологічної безпеки теплоізоляційних матеріалів. Методика визначення стійкості до розмокання базувалася на експериментальному моделюванні дії водного середовища на зразки матеріалів із подальшим аналізом змін їхніх фізико-механічних характеристик [11, 18]. Зокрема, оцінювалися зміни маси, структури та міцності зразків після витримування у воді протягом заданого інтервалу часу [11, 19]. Додатково застосовувалися візуально-аналітичні методи для фіксації структурних порушень, розшарування та втрати цілісності матеріалу, що дозволило комплексно оцінити його водостійкість.

Вологопоглинання, яке характеризує зміну маси зразка, є основним показником його стійкості до розмокання. Для його визначення застосуємо визнані міжнародні та національні нормативні документи [2, 3, 17, 19, 20]. Воно відображає відносне збільшення маси матеріалу після контакту з водним середовищем протягом певного часу t . Кількісно цей показник визначається за формулою:

$$W(t) = \frac{m(t) - m_0}{m_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де: m_0 – початкова маса зразка, г.; $m(t)$ – маса після витримання у воді протягом часу t , г.; $W(t)$ – відсоток водопоглинання.

Індекс втрати міцності використовується для кількісної оцінки деградації механічних властивостей матеріалу після впливу водного середовища. Він характеризує ступінь зниження міцності зразка порівняно з його початковим станом [2, 17, 20]. Даний показник дозволяє об'єктивно оцінити зміну експлуатаційних властивостей матеріалу в процесі розмокання:

$$K_s(t) = \frac{\sigma_0 - \sigma(t)}{\sigma_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

або у відносній формі:

$$R_s(t) = \frac{\sigma(t)}{\sigma_0}, \quad (3)$$

де: σ_0 – початкова міцність на стиск або розтяг, МПа; $\sigma(t)$ – міцність після витримання у воді, МПа.

Індекс структурної деградації є узагальненим показником, який використовується для комплексного врахування візуальних та фізичних змін у матеріалі [2, 17, 20]. Він дозволяє оцінити ступінь порушення цілісності структури зразка під впливом водного середовища. Застосування цього індексу забезпечує більш повну характеристику процесів розмокання та руйнування матеріалу, і визначається за формулою:

$$D(t) = \alpha W(t) + \beta K_s(t) + \gamma I_v(t) \quad (4)$$

де: $I_v(t)$ – бальна оцінка візуальних пошкоджень (0–1 або 0–5); α, β, γ – вагові коефіцієнти (визначаються експертно або методом нормування); $D(t)$ – інтегральний індекс розмокання.

Інтегральний показник водостійкості є узагальненою характеристикою, яка відображає здатність матеріалу протидіяти деградації під впливом водного середовища. Він розглядається як зворотна величина до сукупного рівня структурних і фізико-механічних пошкоджень, що дозволяє комплексно оцінити загальну стійкість теплоізоляційних матеріалів до розмокання:

$$R_w(t) = \frac{1}{1 + D(t)} \quad (5)$$

або спрощено:

$$R_w(t) = a \cdot R_s(t) + b \cdot (1 - W(t)) \quad (6)$$

Значення інтегрального показника водостійкості $R_w(t)$, що наближається до одиниці, свідчить про високу стійкість матеріалу до впливу водного середовища та збереження його структурної цілісності. Навпаки, зменшення $R_w(t)$ до нуля характеризує критичний рівень деградації, за якого матеріал практично повністю втрачає свої структурні та експлуатаційні властивості. При цьому зростання показників вологопоглинання $W(t)$ та втрати міцності $K_s(t)$ супроводжується зниженням водостійкості матеріалу, що вказує на посилення процесів його руйнування під дією вологи.

Відповідно, визначення основних характеристик використаних теплоізоляційних матеріалів ґрунтувалося на аналізі їхньої структури, фізико-механічних властивостей та експлуатаційних особливостей. Це дало можливість сформулювати підходи до оцінювання їхньої стійкості до розмокання та екологічної безпеки. Як об'єкти дослідження розглядалися пористі та волокнисті теплоізоляційні матеріали, які є широко поширеними у будівельній практиці та відзначаються підвищеною вразливістю до впливу вологи. Відбір зразків здійснювався з урахуванням їх структурних особливостей, щільності та умов потенційної експлуатації, що забезпечило репрезентативність експериментальної вибірки та коректність подальших досліджень.

Оцінювання екологічної безпеки теплоізоляційних матеріалів здійснювалося на основі аналізу їхнього потенційного впливу на навколишнє середовище на всіх етапах життєвого циклу. Використовувався підхід, що враховує можливість виділення шкідливих речовин у водне середовище після зволоження та деградації матеріалу. Отримані результати інтерпретувалися з урахуванням відповідних нормативних вимог і дозволили встановити рівень екологічної прийнятності досліджуваних зразків.

3. Результати дослідження та їх обговорення (дискусія). Як було зазначено, одним із ключових показників, що характеризують стійкість теплоізоляційних матеріалів до дії водного середовища, є розмокаємність кінцевого продукту. Цей показник відображає здатність матеріалу зберігати свою структуру та фізико-механічні властивості при контакті з вологою, що безпосередньо впливає на його довговічність та ефективність в умовах експлуатації.

Важливим елементом забезпечення формування теплоізоляційних матеріалів є встановлення параметрів теплопередачі отриманих композицій з урахуванням способу їх виготовлення. У зв'язку з цим було виконано комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на визначення коефіцієнта теплопровідності розроблених теплоізоляторів залежно від їх основних структурних характеристик та деструктивної дії вологи на них.

3.1. Експериментальне визначення розмокаємості теплоізоляційних матеріалів. Визначення розмокаємості досліджуваних композицій здійснювалося експериментально. Зразки матеріалів витримували у воді протягом заданого періоду часу, після чого їх масу порівнювали з початковою масою до насичення. Приріст маси, виражений у відсотках, приймався як кількісна характеристика розмокаємості, що дозволяє оцінити ступінь впливу вологи на матеріал.

Експериментальні випробування проводилися за уніфікованою методикою, розробленою на основі критеріїв стійкості [7, 12]. Для забезпечення коректності та порівнянності результатів усі зразки насичувалися в однакових умовах: при постійній температурі водного середовища, однаковому співвідношенні зразка до об'єму води та фіксованій тривалості експозиції. Це дозволило виключити вплив сторонніх факторів і зосередити увагу виключно на впливі рецептурних параметрів.

Результати визначення розмокаємості для десяти експериментальних складів з використанням математичного апарату наведеного у другому розділі цієї статті, сформованих із систематичним варіюванням основних рецептурних компонентів, наведено в таблиці 1. Такий підхід забезпечує можливість аналізу впливу складу на водостійкість матеріалу та є основою для проведення подальшої інтерпретації отриманих даних у контексті математичної моделі деградації теплоізоляторів.

Таблиця 1

Результати визначення розмокаємості теплоізоляційних композицій при варіюванні основних рецептурних параметрів

№ досліду	Вміст цементу, г	Вміст мікросфер, г	В/Ц*	Алюмінієва пудра, г	Полімерні добавки**	Розмокаємість, $W(t)$, %	W_n	$K_s = 0,2W$	$D = W_n + K_s$
1	180	60	0.55	0.14	+	2.1	0.31	0.42	0.73
2	170	60	0.57	0.20	+	2.4	0.35	0.48	0.83
3	160	60	0.58	0.30	+	2.8	0.41	0.56	0.97
4	150	60	0.60	0.45	+	3.2	0.47	0.64	1.11
5	140	60	0.61	0.60	+	3.7	0.54	0.74	1.28
6	130	60	0.62	0.75	±	4.3	0.63	0.86	1.49
7	120	60	0.63	0.90	±	4.9	0.72	0.98	1.70
8	100	60	0.64	1.00	—	5.5	0.81	1.10	1.91
9	80	60	0.65	1.05	—	6.2	0.91	1.24	2.15
10	60	60	0.65	1.07	—	6.8	1.00	1.36	2.36

* В/Ц – водоцементне відношення, відношення маси води до маси цементу в суміші;

** «+» – наявні полімерні модифікатори (акриловий клей, суперпластифікатор, прискорювач твердіння); «±» – знижений вміст або часткове використання добавок; «—» – відсутність полімерних модифікуючих компонентів.

Для візуалізації процесу впливу на теплоізоляційний матеріал на рис. представлено тривимірну залежність розмокаємості теплоізоляційного матеріалу $W(t)$ від двох технологічних параметрів: водоцементного відношення (В/Ц) та вмісту алюмінієвої пудри. Поверхня побудована на основі результатів десяти експериментальних досліджень і відображає зміну розмокаємості в діапазоні від 2,1 до 6,8 %. Кольорова шкала характеризує інтенсивність процесу розмокання: сині та блакитні ділянки відповідають мінімальним значенням $W(t)$, тоді як жовті та червоні області вказують на суттєве збільшення розмокаємості матеріалу.

Аналіз поверхні свідчить про наявність стійкої тенденції до зростання розмокаємості зі збільшенням як водоцементного відношення, так і кількості алюмінієвої пудри. Найменші значення показника спостерігаються при В/Ц = 0,55

та вмісті алюмінієвої пудри 0,14 г, де розмокаємість становить 2,1 %. Максимальні значення досягаються при В/Ц = 0,65 та вмісті алюмінієвої пудри понад 1,0 г, де розмокаємість зростає до 6,8 %.

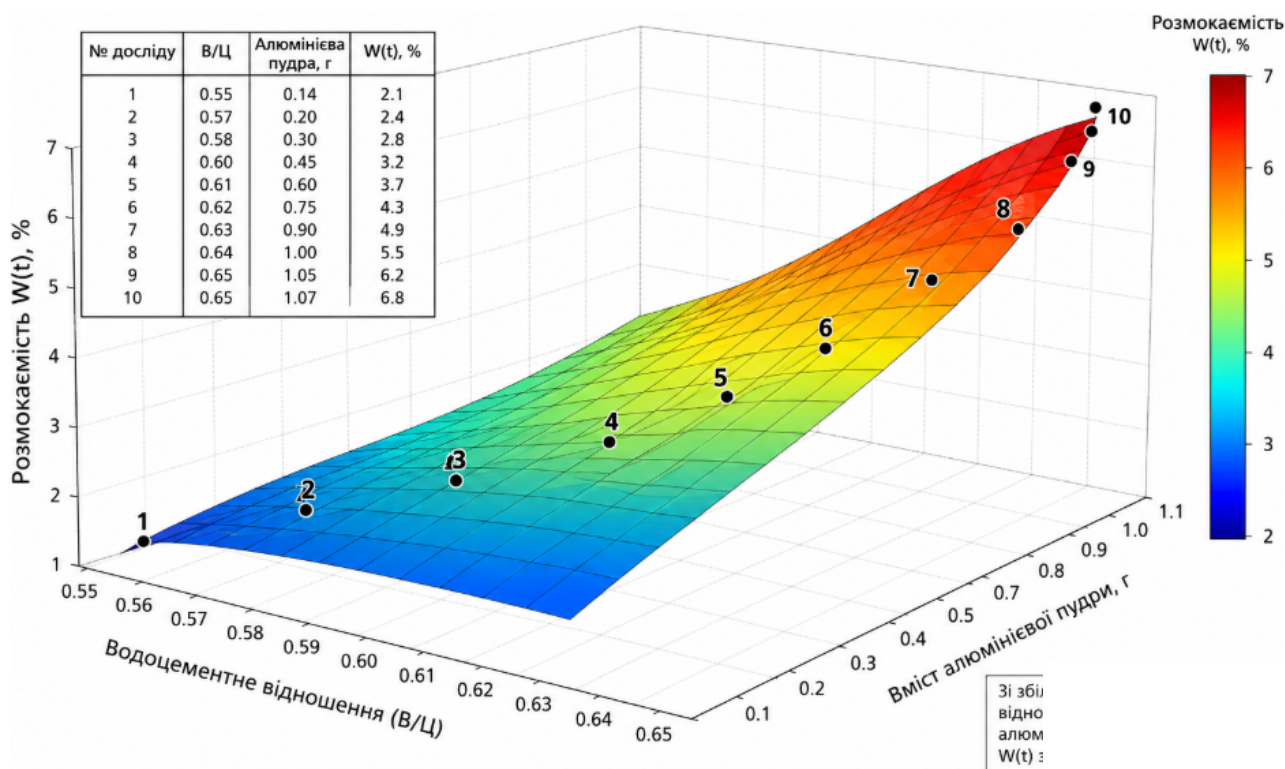


Рис. Об'ємна візуалізація залежності розмокаємість теплоізоляційного матеріалу від складу алюмосилікатної суміші.

Отримана залежність пояснюється тим, що збільшення водоцементного відношення сприяє формуванню більш розвиненої порової структури після тверднення матеріалу. Одночасно підвищення вмісту алюмінієвої пудри інтенсифікує процес газоутворення, що призводить до збільшення загальної пористості та відкритих капілярів. У результаті матеріал здатний поглинати більшу кількість води, що безпосередньо впливає на зростання показника розмокаємість.

Відповідно було встановлено, що розмокаємість зразків змінюється у межах від 2,1 до 6,8 % за масою залежно від рецептурного складу, зокрема вмісту алюмосилікатних мікросфер, водоцементного відношення та наявності полімерних модифікуючих добавок. Отримані значення свідчать про формування переважно замкненої пористості, яка обмежує інтенсивне водопоглинання та забезпечує стабільність матеріалу в умовах періодичного зволоження.

Аналіз експериментальних даних показав, що зменшення розмокаємість до нижньої межі (2,1–3,0 %) досягається при оптимальному співвідношенні в'язучого та наповнювача, а також при використанні полімерних добавок, які сприяють ущільненню міжпорового простору та зниженню капілярної проникності. Водночас збільшення показника до 5,5–6,8 % характерне для складів із підвище-

ним вмістом газоутворюючого агента та більш розвиненою відкритою пористістю. Встановлені закономірності дозволили кількісно оцінити вплив структурних параметрів матеріалу на його водостійкість і підтвердили, що контроль розмокаємості є важливим критерієм забезпечення довговічності теплоізоляційних композитів при експлуатації в умовах змінної вологості.

З представлених досліджень можна зробити наступний науковий висновок. Встановлено нові закономірності зв'язку параметрів композитних матеріалів для утеплення будівель з відповідними теплоізоляційними властивостями, що відрізняються від відомих урахуванням їх взаємовпливу із складом, стійкістю на різних стадіях динамічних навантажень та розмокаємості у межах від 2,1 до 6,8 % за масою. Це дозволяє встановити взаємозв'язок між рецептурними параметрами, вологостійкістю та довговічністю матеріалу і сформулювати модель прогнозування його експлуатаційних характеристик. Практичне значення дослідження полягає у підвищенні екологічної безпеки теплоізоляційних матеріалів завдяки зменшенню ризиків деградації структури та ефективному використанню відходів паливно-енергетичного комплексу в умовах циркулярної економіки.

Отримані результати свідчать, що визначальним фактором формування теплоізоляційних властивостей є не лише окремий вміст компонентів, а їх комплексна взаємодія, яка проявляється через зміну порової структури, ступеня гідратації в'язучого та характеру міжфазної взаємодії. Встановлено, що збільшення частки алюмосилікатних мікросфер сприяє зниженню коефіцієнта теплопровідності, однак супроводжується зменшенням міцності, що обумовлює необхідність оптимізації їх вмісту в межах раціональних інтервалів.

Доведено, що введення полімерних і хімічних модифікаторів забезпечує підвищення однорідності структури матеріалу, зменшення капілярної водопоглинальної здатності та стабілізацію експлуатаційних характеристик за умов циклічних динамічних навантажень. При цьому встановлено, що критичним є співвідношення водоцементного відношення та газоутворюючого агента, яке визначає кінцеву пористість і, відповідно, баланс між теплоізоляційними та міцнісними властивостями.

Узагальнення експериментальних даних дозволило сформулювати науково обґрунтовані залежності типу «склад – структура – властивості», які враховують вплив рецептурних параметрів, умов твердіння та зовнішніх навантажень. Це дало можливість визначити оптимальні області варіювання компонентів, за яких досягається поєднання низької густини (до 550 кг/м³), зниженого коефіцієнта теплопровідності (менше 0,12 Вт/м·К) та достатньої механічної міцності для практичного використання в огорожувальних конструкціях будівель.

Таким чином, отриманий науковий результат не лише уточнює існуючі уявлення про формування властивостей пористих композиційних матеріалів, але й створює підґрунтя для цілеспрямованого проєктування теплоізоляційних композитів із заданими експлуатаційними характеристиками.

3.2. Комплекс заходів забезпечення екологічної безпеки теплоізоляційних матеріалів. На основі отриманих експериментальних результатів, які засвідчили варіативність розмокаємості теплоізоляційних матеріалів у межах 2,1–6,8 %,

доцільним є впровадження комплексу конструктивно-технологічних заходів екологічної безпеки вже на етапі проектування. Першочерговим напрямом є оптимізація рецептури з метою формування максимально замкненої порової структури, що зменшує проникнення води та потенційне вимивання компонентів у довкілля. Особливу увагу слід приділяти зниженню водоцементного відношення та регулюванню вмісту газоутворюючих агентів, оскільки саме ці параметри визначають інтенсивність капілярного водопоглинання і, відповідно, ризик деградації матеріалу в умовах тривалого зволоження.

Другим важливим заходом є застосування функціональних модифікаторів і захисних добавок, які стабілізують мікроструктуру композиту та зменшують його взаємодію з водним середовищем. Використання полімерних компонентів у раціональних концентраціях дозволяє знизити відкриту пористість, підвищити гідрофобність та зменшити ймовірність міграції дрібнодисперсних частинок у навколишнє середовище. Додатково доцільним є впровадження поверхневих гідрофобізуючих обробок, що створюють бар'єрний шар і суттєво уповільнюють процеси водонасичення та подальшої структурної деградації.

Третім напрямом забезпечення екологічної безпеки є управління життєвим циклом матеріалів, зокрема контроль умов їх експлуатації в конструкціях із підвищеною вологістю. З огляду на встановлену залежність між складом і розмокаемістю, доцільно обмежувати використання складів із підвищеним вмістом алюмінієвої пудри та високим водоцементним відношенням у зонах прямого або періодичного зволоження. Також важливим є впровадження регламентів технічного обслуговування огорожувальних конструкцій із періодичною оцінкою стану теплоізоляційного шару для запобігання його руйнуванню та можливому вторинному забрудненню ґрунтів і водних середовищ продуктами деструкції.

Четвертим комплексним заходом є екологічний моніторинг та нормування показників водостійкості як критерію безпечності матеріалів. Встановлені залежності «склад–структура–властивості» дозволяють обґрунтувати граничні значення розмокаємості, перевищення яких має розглядатися як потенційний ризик екологічної нестабільності. Доцільним є включення цього показника до системи стандартизації теплоізоляційних композитів поряд із міцністю та теплопровідністю, що забезпечить більш комплексну оцінку їх впливу на довкілля протягом усього періоду експлуатації та після утилізації.

Висновки. Отримані результати свідчать, що розроблені теплоізоляційні композиції характеризуються суттєвою залежністю експлуатаційних властивостей від їх рецептурного складу та структурної організації. Встановлено, що варіація водоцементного відношення, вмісту газоутворюючого агента та полімерних модифікаторів визначає не лише рівень розмокаємості, але й загальну стабільність матеріалу в умовах тривалого контакту з водним середовищем. Отриманий діапазон розмокаємості (2,1–6,8 %) підтверджує наявність контрольованого переходу від щільної до більш відкритої порової структури, що безпосередньо впливає на довговічність теплоізоляційних систем.

Встановлено, що оптимізація складу композицій дозволяє цілеспрямовано керувати процесами формування мікроструктури та зменшувати ризики водної

деградації матеріалу. Зокрема, застосування полімерних модифікаторів та гідрофобізуючих компонентів забезпечує підвищення замкненості порового простору, зниження капілярної проникності та стабілізацію фізико-механічних характеристик. Водночас перевищення критичних значень водоцементного відношення та надмірне використання газоутворюючих компонентів призводить до інтенсифікації водопоглинання та зниження екологічної стабільності матеріалів у довготривалому циклі експлуатації.

Узагальнення результатів дослідження дозволяє зробити висновок про ефективність запропонованого підходу до оцінювання та керування екологічною безпекою теплоізоляційних композитів на основі показника розмокаємості. Запропоновані закономірності «склад–структура–властивості» можуть бути використані як основа для прогнозування довговічності матеріалів та оптимізації їх рецептур у контексті циркулярної економіки. Це створює передумови для впровадження більш екологічно безпечних теплоізоляційних систем із контрольованими характеристиками деградації та зниженим впливом на навколишнє середовище.

Важливим етапом подальших досліджень величини теплопровідності матеріалу, є його пористість і середня густина, які формують структуру порового простору та характер розподілу пор. Саме ці параметри обумовлюють ефективність зниження теплопередачі в отриманих композиційних матеріалах.

Вдячність. Представлені результати отримано в рамках виконання науково-дослідної роботи ДТ-530 «Наукове обґрунтування та розробка геореакторних систем для комплексної переробки відходів вуглезбагачення з орієнтацією на отримання критичної сировини» за підтримки Міністерства освіти і науки України (Державний реєстраційний номер: 0126U000998).

Перелік посилань

1. Investigation of deportment of chalcophilic heavy metals in the waste rock of Central Coal Enrichment Plant “Chervonohradska” for the purposes of environmental safety of Lviv-Volyn coal basin. *Environmental Problems*, 7(4), 169–176. <https://doi.org/10.23939/ep2022.04.169>
2. Дворкін, Л.Й., & Лаповська, С.Д. (2017). *Будівельне матеріалознавство*. Кондор. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2018/Dvorkin_Bud_mater_2017_448.pdf
3. Ратушняк, Г., Бікс, Ю., & Лялюк, А. (2022). Експериментальні дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів із мінеральної вати. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 19(1), 12–42.
4. Polyanska, A., Savchuk, S., Dudek, M., Sala, D., Pazynich, Y., & Cicho, D. (2022). Impact of digital maturity on sustainable development effects in energy sector in the condition of Industry 4.0. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/097>
5. Lapshyn, Ye, Shevchenko, O., Dybrin, S., & Dychkovskyi, R. (2025). Feasibility of Fine Classification in Processing Watered Coal Sludge from Storage: A Case Study of the Dnipro Coke Chemical Plant. *Acta Montanistica Slovaca*, 100. <https://doi.org/10.46544/ams.v30i1.07>
6. Voloshchyshyn, A. I., Bosak, P. V., Popovych, V. V., Menshykova, O. V., & Kopystynskyi, Y. O. (2024). Natural phytomelioration of coal mine waste heaps in the context of increased radiation background (on the case of Nadiya mine, Lviv-Volyn coal basin, Ukraine). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1415(1), 012130. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012130>
7. Dychkovskyi, R., Pavlychenko, A., Kononenko, M., & Dybrin, S. (2025). Evaluation of thermal conductivity and stability of thermal insulation materials for buildings based on the steady-state

- heat flow method. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, (80), 275–287. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.275>
8. Pavlychenko, A., Lewicka, D., Miroshnykov, I., Dybrin, S., Pererva, A. & Dychkovskiy, R. (2025). Hybrid Approach of Neural Networks and Analog-Based Methods for Industrial Assessment of Technogenic Deposits. *Proceedings of the DIM-ESEE Conference* (reviewed papers), (2025), MR13-MR20
 9. Miroshnykov, I., Cichoń, D., Shyrin, L., Dybrin, S., & Dychkovskiy, R. (2025). Ensuring the environmental sustainability of molybdenum ore mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1457(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1457/1/012014>
 10. Knysh, I., & Karabyn, V. (2014). Heavy metals distribution in the waste pile rocks of Chervonogradska mine of the Lviv-Volyn coal basin (Ukraine). *Pollution Research*, 33, 663–670.
 11. Latif, E., Bevan, R., & Woolley, T. (2019). Retrofit, renovation and fuel poverty initiatives: insulation materials. *Thermal Insulation Materials for Building Applications*, 155–180. <https://doi.org/10.1680/timfba.63518.155>
 12. 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*, 18(9), 2339. <https://doi.org/10.3390/en18092339>
 13. Vladyko, O., Maltsev, D., Gliwiński, Ł., Dychkovskiy, R., Stecula, K., & Dyczko, A. (2025). Enhancing Mining Enterprise Energy Resource Extraction Efficiency Through Technology Synthesis and Performance Indicator Development. *Energies*, 18(7), 1641. <https://doi.org/10.3390/en18071641>
 14. Lewicka, D., Zarębska, J., Batko, R., Tarczydło, B., Woźniak, M., Cichoń, D., & Pec, M. (2023). Circular Economy in the European Union. *Circular Economy in the European Union: Organisational Practice and Future Directions in Germany, Poland and Spain*, 21–267 <https://doi.org/10.4324/9781003411239>
 15. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Saik, P., Lozynskiy, V., Sala, D., Hankus, Ł., Magdziarczyk, M., & Smoliński, A. (2025). Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93611-3>
 16. Kosenko, A., Khomenko, O., Kononenko, M., Polyanska, A., Buketov, V., Dychkovskiy, R., Polański, J., Howaniec, N., & Smolinski, A. (2025). Sustainable management of iron ore extraction processes using methods of borehole hydro technology. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 16(1), 92–112. <https://doi.org/10.1504/ijmme.2025.145592>
 17. Zhou, Z., Jin, H., Liang, Q., Wang, Q., Hao, J., & Zhuang, S. (2025). Multi-scale analysis of degradation mechanisms in magnesium phosphate cement paste under wet-dry cycling. *Cement and Concrete Composites*, 157, 105939. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.105939>
 18. Zhou, Y., Jin, H., Jia, N., Liang, Q., Wu, J., & Zhou, Z. (2026). Phase-scale fracture mechanisms of magnesium phosphate cement under wet-dry cycling: Insight from the real- structure-based DEM simulation. *Journal of Materials Research and Technology*, 41, 7135–7153. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2026.02.231>
 19. European Committee for Standardization. (2013). *Thermal insulating products for building applications – Determination of long term water absorption by immersion* (EN 12087:2013). Brussels: CEN.
 20. ДСТУ EN 1609:2018 (2018). Будівельні матеріали. Теплоізоляційні вироби, що застосовуються в будівництві. Визначення водопоглинання за умови часткового занурення. Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості.

ABSTRACT

Purpose. Study of the influence of moisture on the structural integrity and operational properties of thermal insulation materials, determination of their resistance to wetting by assessing environmental safety based on the analysis of indicators of possible negative impact on the environment when using them in modern construction.

Methods. Experimental assessment of the resistance of thermal insulation materials to wetting was carried out by keeping them in an aqueous environment for a certain period of time with subsequent determination of changes in the mass, geometric parameters and structural state of the samples, analysis of the environmental safety of the materials was carried out by assessing their composition and potential ability to release harmful substances under the influence of moisture.

Results. As a result of the conducted studies, differences in the resistance of the studied thermal insulation materials to wetting were established depending on their structure and component composition. Changes in the mass and physical state of the samples after exposure to an aqueous environment were determined, which allowed assessing the level of preservation of their operational properties. The analysis of environmental safety showed that the studied materials are characterized by different levels of potential impact on the environment during prolonged contact with moisture. Based on the results obtained, a comparative assessment of thermal insulation materials was performed, and the most promising samples were identified that combine moisture resistance and environmental characteristics.

Originality. Consists in the systematization and scientific substantiation of approaches to a comprehensive assessment of the resistance of thermal insulation materials to wetting and their environmental safety. The features of changes in the physical state of materials under the influence of moisture were established and the relationship between moisture resistance indicators and environmental characteristics was determined. The approach to the comparative assessment of thermal insulation materials according to a set of operational and environmental criteria was improved.

Practical implication. The development of methods for effective assessment of the resistance of thermal insulation materials to wetting and their environmental safety allows a reasonable approach to the selection of materials for construction and industrial needs. The proposed approaches contribute to increasing the durability of building structures, reducing operating costs and minimizing the negative impact on the environment.

Keywords: *thermal insulation materials, resistance to wetting, moisture degradation, operational properties, structural stability, environmental safety.*

дата першого надходження статті до видання	15.04.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	20.05.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.06.2026