

© Р.О. Дичковський¹, А.В. Павличенко¹, М.М. Кононенко¹, С.В. Дибрін¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОЦІНКА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ БУДІВЕЛЬНИХ СПОРУД НА ОСНОВІ МЕТОДУ СТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ

© R. Dychkovskiy¹, A. Pavlychenko¹, M. Kononenko¹, S. Dybrin¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

EVALUATION OF THERMAL CONDUCTIVITY AND STABILITY OF THERMAL INSULATION MATERIALS FOR BUILDINGS BASED ON THE STEADY-STATE HEAT FLOW METHOD

Мета. Визначення теплопровідності та стійкості теплоізоляційних матеріалів шляхом застосування підходу стаціонарного теплового потоку, що дозволяє оцінити ефективність матеріалів у збереженні тепла, їхню довговічність і стійкість до змін зовнішніх умов, що є ключовими факторами для підвищення енергоефективності будівель і споруд.

Методика досліджень. Для досягнення поставленої мети автори, на основі аналізу науково-дослідної літератури та математичних підходів до оцінки теплопровідності й стійкості теплоізоляційних матеріалів, застосували метод стаціонарного теплового потоку, що дозволило визначити їхній коефіцієнт теплопровідності за різних температур і умов експлуатації, а також оцінити механічну стабільність і зміни властивостей під впливом тривалого нагрівання та циклічного температурного навантаження.

Результати дослідження. Обґрунтовано доцільність і закономірність створення теплоізоляційних матеріалів, встановлено величини теплопровідності теплоізоляційних матеріалів, оцінено їхню механічну стабільність під впливом нагрівання і температурних циклів, оптимізовано склад для забезпечення низької теплопровідності й міцності, а також розроблено рекомендації щодо їх ефективного застосування в будівництві та промисловості.

Наукова новизна полягає в систематизації та науковому обґрунтуванні впровадження технологій створення теплоізоляційних матеріалів з урахуванням впливу температури й умов експлуатації, оцінки їх механічної стабільності під впливом тривалого нагрівання та циклічного температурного навантаження, встановлення залежності зміни максимальних значень еквівалентних напружень від висоти досліджуваних конструкцій, а також оптимізації складу матеріалів для досягнення найкращого балансу між низькою теплопровідністю та високою механічною міцністю.

Практичне значення. Розробка математичних підходів для оцінки ефективності теплоізоляційних матеріалів, що забезпечують підвищену енергоефективність будівель і споруд, знижують енергоспоживання та витрати на опалення, а також мають високу механічну стабільність і довговічність під впливом змінних температурних умов, що робить їх придатними для широкого застосування в будівництві та промисловості.

Ключові слова: теплоізоляційний матеріал, енергоефективність, теплопровідність, механічна стабільність, довговічність, температурні умови, будівництво.

Вступ. Оцінка теплопровідності та стійкості теплоізоляційних матеріалів методом стаціонарного теплового потоку є актуальною через необхідність

підвищення енергоефективності будівель та споруд [1, 2]. Зниження теплових втрат у будівлях сприяє зменшенню енергоспоживання та витрат на опалення, що особливо важливо в умовах глобальних змін клімату і зростання цін на енергоносії [3].

Недостатнє розуміння впливу температурних коливань на стійкість матеріалів та їхні теплоізоляційні характеристики в реальних умовах експлуатації залишається проблемою [2, 4–7]. Тому важливо оцінювати не лише теплопровідність матеріалів, але й їхню механічну стабільність під впливом тривалого нагрівання та циклічного температурного навантаження [5, 7–10]. Метод стаціонарного теплового потоку дозволяє більш точно визначити поведінку матеріалів за різних температурних умов.

Вдосконалення властивостей теплоізоляційних матеріалів є ключовим фактором для досягнення енергоефективності в будівництві [1, 11, 12]. Оскільки більшість теплопередачі відбувається через зовнішні стіни, дахи та підлоги, необхідно забезпечити мінімальні теплові втрати, що дозволить значно зменшити витрати на опалення та кондиціювання [1, 4, 13, 14]. Використання теплоізоляційних матеріалів, що зберігають свої властивості при змінних температурах, сприяє досягненню більш високого рівня енергозбереження та зменшенню негативного впливу на довкілля [3, 7, 15, 16].

Зміна клімату та підвищення температури повітря вимагають від нових матеріалів високої стійкості до циклічних температурних коливань. Розробка методів для точного вимірювання теплопровідності й оцінки механічної стабільності матеріалів є особливо важливою в цьому контексті [2, 17, 18]. Визначення цих характеристик на основі методу стаціонарного теплового потоку дозволяє створювати матеріали, які ефективно витримують високі навантаження і забезпечують довготривалу експлуатацію.

Метод стаціонарного теплового потоку дає можливість детально оцінити теплоізоляційні матеріали в умовах реальної експлуатації, де температура та механічне навантаження можуть змінюватися протягом часу [2, 19]. Це дозволяє отримати точні дані для оптимізації складу матеріалів з метою досягнення найкращого балансу між теплопровідністю та механічною міцністю, що є основою для розробки нових теплоізоляційних матеріалів, які відповідають сучасним вимогам [19–22].

Отже, дослідження оцінки теплопровідності та стійкості теплоізоляційних матеріалів є надзвичайно актуальним для забезпечення енергоефективності будівель і споруд, зниження витрат на енергозабезпечення, а також для створення матеріалів, які будуть стійкими до температурних коливань і збережуть свої властивості протягом тривалого часу [1, 3, 23]. Такий підхід є важливим для широкого застосування в будівництві та промисловості, забезпечуючи енергозбереження й економічні переваги в процесі експлуатації будівель.

Модель, методи та методика проведення досліджень. Модель підвищення енергоефективності будівель базується на створенні інноваційних теплоізоляційних матеріалів з використанням промислових відходів, зокрема золошлакових сумішей, золи-винесення та алюмосилікатів [1, 14, 24, 25]. Процес розробки включає: вивчення фізико-хімічних властивостей сировини, оптимізацію

складу для забезпечення низької теплопровідності та механічної міцності, лабораторні дослідження теплових характеристик і комплексні випробування стійкості матеріалів до впливу зовнішніх факторів [26]. Важливим аспектом є адаптація розроблених рішень до різних типів будівель і кліматичних умов, що дозволяє їх широке застосування.

Метод стаціонарного теплового потоку ґрунтується на вимірюванні теплового потоку через матеріал при постійних температурних умовах, що дозволяє точно визначати коефіцієнт теплопровідності (λ) й оцінювати його теплоізоляційні властивості [1–3, 14, 27]. Окрім лабораторних досліджень дедалі більшого значення набуває математичне моделювання, що дає змогу аналізувати склад і структуру матеріалів без фізичних зразків, скорочуючи витрати часу та ресурсів [1, 27, 28]. Поєднання цих підходів забезпечує високу точність результатів і сприяє розробці ефективних теплоізоляційних матеріалів, що відповідають сучасним нормативним вимогам.

Складовою методу стаціонарного теплового потоку є метод експериментального вимірювання теплопровідності, що реалізується через створення контрольованих умов передачі тепла за допомогою спеціалізованих пристроїв. Для дослідження ефективності використання відходів паливно-енергетичного сектору як теплоізоляційних матеріалів відібрані зразки різного складу, сформовані у стандартних розмірах і підготовлені з дотриманням усіх технологічних вимог. Вимірювання проводилися приладом IPT-MG4 «100» відповідно до галузевих стандартів, що забезпечило точні та надійні результати (рис. 1). Процес випробувань включав контроль параметрів, таких як щільність, товщина та склад матеріалу, а також оцінку його здатності до мінімізації теплопередачі.



Рис. 1. Прилад для вимірювання теплопровідності IPT-MG4 «100» (а) з фурнітурою для формування зразків теплоізоляційних матеріалів (б)

Стаціонарна установка функціонує за асиметричною схемою відповідно до ДСТУ Б В.2.7-105-2000 і включає блок керування нагрівачем та охолоджувачем, термомір, температурні датчики та джерело живлення. Принцип роботи базується на створенні стаціонарного теплового потоку через плоский зразок, що дозволяє точно визначити згаданий коефіцієнт теплопровідності (λ). Встановлені метрологічні характеристики приладу гарантують високу точність вимірювань,

що є критично важливим для оцінки ефективності теплоізоляційних матеріалів у різних будівельних умовах.

Для дослідження теплоізоляційних матеріалів застосовано принципи геометричної, кінетичної та динамічної подібностей. *Геометрична* подібність забезпечує коректне масштабування зразків (100 мм × 100 мм × 15 мм) щодо натурального матеріалу (1000 мм × 1000 мм × 150 мм). Це дозволяє екстраполювати результати. *Кінетична* подібність враховує теплопровідні характеристики матеріалу, моделюючи умови експлуатації. *Динамічна* подібність відображає вплив температурних градієнтів і навантажень на поведінку матеріалу, що дає змогу прогнозувати його довговічність та ефективність.

Отримані результати сприяють вдосконаленню технологій термомодернізації та створенню енергоефективних матеріалів для утеплення будівель. Оскільки в теплоізоляційних матеріалах переважають процеси теплопровідності, результати випробувань малих зразків можна застосовувати до повномасштабних конструкцій без суттєвих коригувань. Це дозволяє точно оцінити їхні теплотехнічні характеристики, оптимізувати теплоізоляцію та підвищити енергоефективність житлового фонду.

Експериментальний метод ґрунтується на створенні постійного температурного градієнта між двома поверхнями зразка: одна – нагрівається, інша – охолоджується. Тепловий потік фіксується термодатчиками, а для точності вимірювань мінімізуються теплові втрати. Коефіцієнт теплопровідності визначається за формулою [1, 14, 28, 29]

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta T}, \quad (1)$$

де Q – тепловий потік, Вт; d – товщина зразка, м; A – площа зразка, м²; ΔT – різниця температур на поверхнях зразка, К.

Стійкість теплоізоляційних матеріалів визначається їх здатністю зберігати теплофізичні властивості під впливом механічних, теплових і хімічних навантажень. Оцінка здійснюється шляхом розв’язання рівнянь механіки суцільного середовища, теплообміну та фізико-хімічних змін, зокрема аналізу напружено-деформованого стану за рівнянням рівноваги [2, 29, 30]

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0, \quad (2)$$

де σ_{ij} – компоненти тензора напружень, Па; f_i – об’ємні сили (наприклад, вага матеріалу), Н/м³; x_j – координати, м.

Закон Гука описує залежність між напруженнями та деформаціями в ізотропних матеріалах. Він визначає пропорційну зміну форми матеріалу під дією зовнішніх навантажень [30–33]

$$\sigma_{ij} = E \frac{\varepsilon_{ij}}{(1-\nu)} + \frac{E \cdot \nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} \varepsilon_{kk} \delta_{ji}, \quad (3)$$

де E – модуль пружності, Па; ν – коефіцієнт Пуассона; ε_{ij} – компоненти тензора деформацій; δ_{ji} – символ Кронекера.

Розв’язання цих рівнянь дозволяє визначити критичні напруження, за яких матеріал може зазнати руйнування [31, 33, 34]. Для оцінки теплової стійкості враховують термічні напруження, що виникають через нерівномірне нагрівання зразка, використовуючи рівняння теплопровідності

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (4)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³; c_p – теплоємність, Дж/(кг·К); T – температура, К; t – час, с.

Відповідно термічні напруження визначаються за допомогою формули [33–35]

$$\sigma_{th} = \alpha E \Delta T, \quad (5)$$

де α – коефіцієнт теплового розширення, 1/К; ΔT – різниця температур, К.

Термічні напруження обчислюються за відповідною формулою, що враховує температурний градієнт у матеріалі. Вони виникають через нерівномірне нагрівання, що може призвести до деформацій або руйнування, та описуються рівнянням Фіка [33–36]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C, \quad (6)$$

де C – концентрація агресивної речовини, кг/м³; D – коефіцієнт дифузії, м²/с.

Аналіз змін у структурі матеріалу після дифузії дає змогу оцінити його довговічність [33, 37]. Для комплексної оцінки стійкості застосовується багатокритеріальна оптимізація, де цільова функція враховує механічні, теплові та хімічні характеристики

$$F = w_1 S_{mech} + w_2 S_{therm} + w_3 S_{chem} \quad (7)$$

де S_{mech} ; $w_2 S_{therm}$; $w_3 S_{chem}$ – відповідні критерії стійкості; w_1 , w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти, що враховують вплив кожного фактору.

На основі запропонованого математичного апарату та принципів формування теплопровідності будівельних матеріалів, що ґрунтуються на підході стаціонарного теплового потоку, можна визначити їхню термічну ефективність. Це дозволяє встановити стійкість отриманих матеріалів до впливу зовнішніх факторів. Додатково оцінюються їхні деформаційні характеристики, що є важливими для довговічності та надійності конструкцій.

Результати розрахунку параметрів теплопровідності та стійкості теплоізоляційних матеріалів будівельних конструкцій. Моделювання стійкості теплоізоляційного матеріалу, виготовленого на основі алюмосилікату, проводиться в середовищі SolidWorks Simulation. Основна мета дослідження – встановлення механічної поведінки матеріалу під дією навантажень (оцінка міцності, деформаційних характеристик і можливих зон руйнування). Для побудови

моделі використовується параметрична геометрія, що відображає основні фізичні властивості матеріалу, а також граничні умови, які відповідають реальним експлуатаційним умовам. Вхідні параметри для моделювання прийняті на основі аналізу варіативності фізико-механічних характеристик, що дозволяє врахувати потенційні відхилення в структурі матеріалу. Визначення стійкості здійснюється через аналіз напружено-деформованого стану із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ), що дозволяє отримати точні результати стосовно розподілу напружень і деформацій у різних частинах зразка.

Геометрія моделі представляє собою теплоізоляційний матеріал у вигляді блоків розміром 1000 мм × 1000 мм × 150 мм, закріплених на стандартному панельному залізобетонному блоці. Область моделювання включає одиничну будівельну панель шириною 3185 мм і висотою 2760 мм, що містить технологічний отвір під віконний проріз шириною 1510 мм і висотою 1475 мм. Для створення адекватних моделей задається механічне навантаження відповідно до прийнятих параметрів міцності та пружності матеріалу. Алюмосилікат характеризується щільністю 450 кг/м³, модулем пружності 1000 МПа, коефіцієнтом Пуассона 0,2 і кутом внутрішнього тертя 15°. Межі міцності при стисканні ($R_c = 2,0$ МПа) та розтягуванні ($R_p = 1,18$ МПа) дозволяють оцінити граничні режими роботи матеріалу [33, 38, 39]. Загальні вихідні дані для формування моделі та проведення досліджень наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні дані для моделювання

Параметри							
m, м	R_c , МПа	R_p , МПа	μ	E	ρ , кг/м ³	φ , град	c , МПа
Варіативність значень для алюмосилікату							
0,15	0,5–2,5 (до 10)	0,05– 0,3 (до 1,5)	0,15–0,25 (0,20)	500– 1500 (до 3000)	300–600 (до 1200)	10–20 (до 25)	0,02–0,1 (до 0,3)
Усереднені значення (прийняті як вихідні дані моделювання)							
0,15	2,0	1,18	2,0	1000	450	15	0,06

Незважаючи на те, що наведені у таблиці значення є загальновідомими, автори вважають за необхідне дати їм пояснення: R_c (МПа) – міцність на стискання залежить від класу пінобетону (конструкційний або теплоізоляційний); R_p (МПа) – міцність на розтягування у 5–10 разів менша за міцність на стискання; μ – коефіцієнт Пуассона; E (МПа) – модуль пружності залежить від густини пінобетону; ρ (кг/м³) – густина пінобетону змінюється в широкому діапазоні залежно від складу; φ (град) – кут внутрішнього тертя залежить від структури матеріалу та вмісту води; c (МПа) – коефіцієнт зчеплення пінобетону змінюється залежно від складу і вологості [33, 40–43]. У дужках наведено дані, що переважали у дослідженнях, або виходили за межі досліджуваної області. Для більш наглядного

розподілу навантажень автори завищили вихідні дані при формуванні моделі, проте це дало змогу встановити найбільш небезпечні з точки зору руйнації зони і звернути на них особливу увагу при практичній реалізації запропонованих заходів з утеплення будівель.

Математичне моделювання дозволило оцінити стійкість теплоізоляційного матеріалу в різних умовах експлуатації, аналізуючи напружено-деформований стан конструкції. Завдяки методам комп'ютерної симуляції встановлено зони можливих деформацій і критичні точки навантаження, що забезпечує точне прогнозування поведінки матеріалу (рис. 2). Отримані результати сприятимуть оптимізації складу та структури теплоізоляційного шару, що дозволить підвищити його ефективність і довговічність. Це дасть можливість удосконалити конструкцію будівельних панелей, підвищити їхню енергоефективність і забезпечити відповідність сучасним вимогам будівельної теплоізоляції.

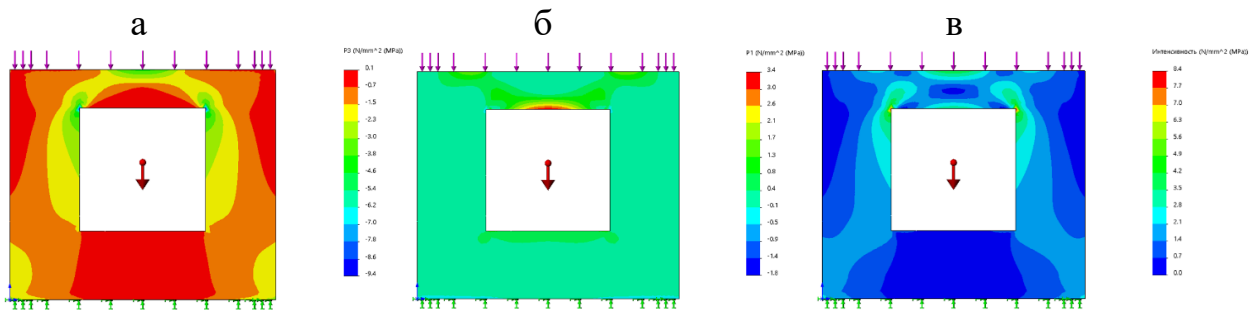


Рис. 2. Епюри розподілу напружень при моделюванні стійкості теплоізоляційного матеріалу: головні стискаючі (а); головні розтягуючі (б); еквівалентні (різниця напружень) (в)

При проведенні симуляції отримано розподіл головних напружень, деформацій і коефіцієнт запасу міцності. Їх аналіз дозволяє виявити критичні зони концентрації напружень і можливі місця руйнування матеріалу. В результаті дослідження можна зробити висновки про придатність даного складу алюмосилікату для використання як теплоізоляційного матеріалу у конкретних умовах експлуатації. Дані результати також слугують інструментом оптимізації складу матеріалу або зміни геометрії теплоізоляційного шару для підвищення його ефективності та довговічності.

Виходячи з проведеного моделювання, можна виділити характерні зони, що визначатимуть напруженість і деформаційні характеристики теплоізоляційного матеріалу:

- *центральна область* охоплює зону навколо технологічного отвору (знаходиться безпосередньо під приведеними навантаженнями);
- *верхня частина* являє собою простір безпосередньо над отвором;
- *нижня частина* розташована безпосередньо під віконним прорізом;
- *бічні зони* знаходяться ліворуч і праворуч від згаданого отвору;
- *кутові області* конструкції включають характерні зони біля верхніх і нижніх кутів.

Чисельні значення розподілу стискаючих, розтягуючих та еквівалентних напружень наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Розподіл значень напружень за характерними зонами

Область	σ_3 (МПа)	σ_1 (МПа)	σ_{eq} (МПа)
Центральна частина	-7,5 ... -5,0	0,5 ... 1,5	5,0 ... 7,0
Верхня частина	-3,0 ... 0,1	2,5 ... 3,4	6,0 ... 7,7
Нижня частина	-7,5 ... -5,0	0,0 ... 1,5	4,0 ... 6,0
Область навколо отвору	-1,5 ... 0,1	1,5 ... 2,5	7,0 ... 7,7
Кути конструкції	-5,0 ... -3,0	-1,8 ... 0,5	0,7 ... 3,0

Виходячи з аналізу візуалізації значень головних стискаючих напружень (див. рис. 2, а, параметр σ_3) можна зробити висновок, що найвищі значення напружень спостерігаються в зоні кутів квадратного отвору, де вони мають тенденцію до концентрації через геометричні особливості. Це свідчить про те, що саме ці області є потенційно небезпечними з точки зору виникнення тріщин або інших деформацій при дії стискаючих навантажень. Деформація матеріалу може початися саме з цих місць, якщо рівень напружень перевищить границю міцності матеріалу.

Червоні та жовті зони вказують на відносно низькі значення головних стискаючих напружень, що свідчить про відсутність значних навантажень у цих місцях. Синьо-зелені області, де напруження сягають високих значень, свідчать про критичні місця, де може виникати руйнування внаслідок перевищення межі міцності. Отже, при проектуванні конструкції варто передбачити заходи щодо зменшення напружень у кутах, наприклад шляхом округлення отвору або зміни товщини матеріалу в цих зонах.

Друге зображення (див. рис. 2, б, параметр σ_1) ілюструє розподіл головних розтягуючих напружень, які визначають максимальні стискуючі напруження в конструкції. Видно: найбільші значення розтягування спостерігаються безпосередньо над і під квадратним віконним отвором, що пояснюється природою навантаження і перерозподілом напружень через жорсткі краї отвору. Високі напруження в цих областях можуть спричинити втрату стійкості матеріалу або привести до пластичних деформацій у випадку, якщо вони перевищують допустимий рівень міцності.

У той же час сині та зелені області свідчать про мінімальні значення головних розтягуючих напружень, що означає відносно низьку дію розтягування на цих ділянках. Важливо враховувати цей розподіл при проектуванні, оскільки надмірні розтягуючі навантаження можуть призвести до локальних змін матеріалу. Це особливо критично для крихких матеріалів, до яких також відноситься наш теплоізоляційний матеріал і бетонні конструкції. Вони погано витримують надмірні розтягування. Один із варіантів покращення роботи конструкції – використання додаткового армування в зонах підвищеного навантаження.

Третє зображення (див. рис. 2, в, параметр σ_{eq}) демонструє карту еквівалентних напружень за критерієм інтенсивності (різниця напружень), що дозволяє оцінити загальний рівень напруженого стану матеріалу. Найбільші значення спостерігаються в кутах квадратного отвору, що є типовим для геометричних концентрацій напружень. Це означає: ці зони є найбільш уразливими до механічних руйнувань, особливо якщо матеріал працює в умовах змінних або ударних навантажень. У цих місцях може початися розвиток мікротріщин, які згодом призведуть до повного руйнування конструкції.

У результаті проведення апроксимації максимальних значень еквівалентних напружень за критерієм інтенсивності (різниця головних напружень), було отримано емпіричну залежність зміни цих напружень від висоти досліджуваної області. Оскільки розрахунки виконувалися у відносних величинах, запропонована формула дозволяє оцінити рівень напруженого стану в матеріалі залежно від висоти вибраного зразка. Така оцінка є особливо важливою при проектуванні та виборі теплоізоляційних рішень для енергоефективних будівель, адже нерівномірний розподіл напружень може впливати на довговічність і надійність конструкції. Дана емпірична формула описується кривою другого порядку і у загальній інтерпретації має вигляд:

$$\sigma_{eq} = x_1 \cdot H^2 + x_2 \cdot H + x_3,$$

де H – висота досліджуваної області, що підлягає утепленню теплоізоляційними матеріалами; x_1, x_2, x_3 – емпіричні коефіцієнти, що враховують фізико-механічні характеристики теплоізоляційного шару, тип конструкційної основи стін, а також технологічні особливості процесу нанесення теплоізоляції.

У реальних умовах величина H , (м) відповідає або повній висоті фасаду будівлі, або його частині, яка потрапляє під зону утеплення. Отримана модель може бути використана для подальшого аналізу надійності конструкції та оптимізації теплоізоляційних систем різного призначення.

Виходячи з отриманих чисельних значень, найвищі напруження (σ_{eq} – до 7,7 МПа) зосереджені у верхній частині над отвором та по його краях, тоді як максимальні значення (σ_1 – до 3,4 МПа) також спостерігаються над отвором у зоні найбільшої компресії. Найнижчі значення (σ_3 – до -7,5 МПа) локалізуються у нижній зоні під отвором і в центральній частині.

Важливо зазначити, що рівномірний розподіл напружень в інших частинах конструкції свідчить про її загальну стійкість. Проте наявність локальних концентрацій у кутах квадратного отвору вказує на необхідність їх оптимізації. Можливі методи зниження напружень включають згладжування гострих кутів отвору, використання перехідних радіусів або зміни товщини матеріалу. Крім того, застосування композитних матеріалів або армування можуть допомогти покращити несучу здатність конструкції та підвищити її довговічність.

У подальших дослідженнях автори планують адаптувати отриману залежність до реальних умов функціонування будівель різного типу та призначення – зокрема, житлових, громадських і промислових споруд. Це дозволить враховувати особливості експлуатації, кліматичних впливів, типу фасадів та

архітектурних рішень при застосуванні моделі в практиці енергомодернізації будівель. Такий підхід сприятиме підвищенню ефективності термомодернізаційних заходів, зменшенню ризиків пошкодження конструкцій та підвищенню загального рівня енергоефективності об'єктів.

Висновки. Проведені дослідження підтвердили, що створений алюмосилікатний теплоізоляційний матеріал володіє достатньою міцністю для використання при утепленні й ізоляції будівельних конструкцій різного технологічного призначення. Найбільші напруження спостерігаються в зонах кутів технологічних отворів, що свідчить про їхню підвищену вразливість до утворення тріщин. Це вказує також на необхідність додаткових заходів для підвищення надійності матеріалу в цих областях.

Аналіз напружено-деформованого стану виявив п'ять критичних зон концентрації напружень: центральну область – навколо технологічного отвору, верхню та нижню частини конструкції, а також її бічні та кутові зони. Ці області вимагають особливої уваги під час проєктування й експлуатації, оскільки саме вони є найбільш уразливими до механічних пошкоджень.

Метод скінченних елементів у SolidWorks Simulation дозволив змоделювати розподіл напружень і спрогнозувати поведінку матеріалу під навантаженням. Результати підтвердили відповідність алюмосилікату сучасним вимогам до будівельної теплоізоляції. Це відкриває можливості для його подальшого застосування за умови врахування критичних зон навантаження при розробці конструкцій.

Отримані дані можуть бути використані для оптимізації складу та геометричних параметрів матеріалу, що сприятиме підвищенню його довговічності й ефективності. Зокрема, рекомендується посилення конструкції у зонах концентрації напружень, а також оптимізація товщини та щільності матеріалу для зменшення деформацій. Подальші експериментальні дослідження допоможуть уточнити ці результати і сприятимуть розробці більш ефективних теплоізоляційних рішень.

Представлені результати отримано у рамках виконання науково-дослідної роботи ГП-516 «Науково-практичні засади технології газифікації низькосортного вугілля» (№ держреєстрації 0123U101757), що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Перелік посилань

1. Риндюк, С.В. (2018). *Метод визначення теплопровідності будівельних матеріалів та виробів. Дисертація*. Вінницький національний технічний університет.
2. ДСТУ Б В.2.7-105-2000. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі.
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. Cry, C. M. (1996). The potential use of waste (ash) materials for EIFS insulation and related components. *Fuel and Energy Abstracts*, 37(3), 187. [https://doi.org/10.1016/0140-6701\(96\)88612-7](https://doi.org/10.1016/0140-6701(96)88612-7)
6. Kicki, J., Jarosz, J., Dyczko, A., & Puszcza, H. (2005). The economic and technical aspects of mine closure in Poland. *Proceedings of the 14th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, MPES 2005 and the 5th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries, CAMI 2005*, 625-631.
7. Adekanye, O. G., Davis, A., & Azevedo, I. L. (2020). Federal policy, local policy, and green building certifications in the U.S. *Energy and Buildings*, 209, 109700. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109700>
8. Dychkovskiy, R.O. (2015). Determination of the rock subsidence spacing in the well underground coal gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 30–36.
9. Fedoreiko, V.S., Rutylo, M.I., Iskerskyi, I.S., & Zahorodnii, R.I. (2020). Optimization of heat production processes in the biofuel vortex combustion systems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 83–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/083>
10. Chmura, D., Jagodziński, A. M., Hutniczak, A., Dyczko, A., & Woźniak, G. (2022). Novel Ecosystems in the Urban-Industrial Landscape–Interesting Aspects of Environmental Knowledge Requiring Broadening: A Review. *Sustainability*, 14(17), 10829. <https://doi.org/10.3390/su141710829>
11. Smith, R. E., Alcott, J. M., & Mazor, M. H. (2014). Design Considerations for Sustainable Extruded Polystyrene (XPS) Thermal Insulation. *Next-Generation Thermal Insulation Challenges and Opportunities*, 1–12. <https://doi.org/10.1520/stp157420130089>
12. Yuan, J., Farnham, C., & Emura, K. (2017). Optimal combination of thermal resistance of insulation materials and primary fuel sources for six climate zones of Japan. *Energy and Buildings*, 153, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.039>
13. Abdrakhimov, V. Z. (2021). Environmental management, economic and practical aspects of the use of waste from the fuel and energy complex in the production of thermal insulation materials. *Economy, Governance and Law Basis*, 1, 11–16. https://doi.org/10.51608/23058641_2021_1_11
14. Restuccia, L., Reggio, A., Ferro, G. A., & Tulliani, J.-M. (2017). New self-healing techniques for cement-based materials. *Procedia Structural Integrity*, 3, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.016>
15. Sala, D., Pavlov, K., Pavlova, O., Dychkovskiy R., Ruskykh, V., & Pysanko, S. (2023). Determining the Level of Efficiency of Gas Distribution Enterprises in the Western Region of Ukraine. *Inżynieria Mineralna*, 2(2 (52)), 109–122. <https://doi.org/10.29227/im-2023-02-64>
16. Fedoreiko, V. (2024). Distributed energy generation based on jet-vortex bioheat generators. *E3S Web of Conferences*, 567, 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456701001>
17. Dychkovskiy, R.O. (2015). Forming the bilayer artificially created shell of georeactor in underground coal well gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 37–42.
18. 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>
19. Polyanska, A., Cichoń, D., Verbovska, L., Dudek, Sala, D., & Martynets, V. (2022). Waste management skills formation in modern conditions: the example of Ukraine. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*, 4(45), 322–334. <https://doi.org/10.55643/fcaptop.4.45.2022.3814>
20. Loftus, J. J. (1969). Noncombustibility of mineral wool and glass fiber insulation materials. *National Bureau of Standards*, 342. <https://doi.org/10.6028/nbs.rpt.9988>
21. Lewicka, B., & Lewicka, D. (2019). Environmental risk management in the context of environmental management systems for agriculture based on the ISO 14001:2015 standard. *Acta Innovations*, 33, 63–72. <https://doi.org/10.32933/actainnovations.33.6>
22. Dudek, M. (2014). The model for the calculation of the dispersed iron ore resource purchase cost in the world class manufacturing (WCM) logistics pillar context. *Metalurgija*, 53(4), 567–570.

23. Dychkovskiy, R., Saik, P., Sala, D., & Cabana, E. C. (2024). The current state of the non-ore mineral deposits mining in the concept of the Ukraine reconstruction in the post-war period. *Mineral Economics*, 37(3), 589–599. <https://doi.org/10.1007/s13563-024-00436-z>
24. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Ruskykh, V., Cabana, E., & Kosobokov, O. (2018). A modern vision of simulation modelling in mining and near mining activity. *E3S Web of Conferences*, 60, 00014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000014>
25. Миронова, І.Г., & Мілютіна, В.І. (2021). Оцінка екологічного стану житлового масиву міста Дніпра. *Збірник наукових праць НГУ*, 66, 254–266. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/66.254>
26. Kononenko, M., Khomenko, O., Kosenko, A., Myronova, I., Bash, V. & Pazynich, Yu. (2024). Raises advance using emulsion explosives. *E3S Web of Conferences*, 526, 01010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601010>
27. Карнаухов, А.В., & Рябоконь, В.І. (2022). Перспективи використання промислових відходів у виробництві будівельних матеріалів. *Вісник будівництва та архітектури*, 5, 17–31.
28. Кононенко, М.М., Хоменко, О.Є., & Косенко, А.В. (2022). Чисельне моделювання лінії найменшого опору при підриванні зарядів. *Збірник наукових праць НГУ*, 69, 43–57. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.043>
29. Яременко, Г. С. (2021). Теплоізоляційні властивості матеріалів з промислових відходів. *Технології будівництва*, 45, 32–41.
30. Довгаль, І. М., & Савчук, М. І. (2022). Математичне моделювання процесів теплопередачі у будівельних матеріалах. *Прогресивні матеріали та технології*, 4, 21–28.
31. Коваленко, О.В. (2021). Методи визначення коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів. *Будівництво та енергоефективність*, 3, 56–67.
32. Кононенко, М.М., Хоменко, О.Є., Садовенко, І.О., & Соколов, В.В. (2023). Математичне моделювання зон руйнування масиву порід вибухом. *Збірник наукових праць НГУ*, 72, 40–52. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.040>
33. Панкевич, О. Д., & Гуменчук, А. Є. (2022). Ефективні теплоізоляційні матеріали та їх використання в будівництві. *Вінницький національний технічний університет*, 6, 1–22.
34. Лемешев, М. С., Христич, О. В., & Лемішко, К. К. (2019). Екологічно ефективні будівельні матеріали для тепло модернізації будівель. *Вінницький національний технічний університет*, 5, 23–44.
35. Дудар, І.Н., & Риндюк, С.В. (2023). *Енергоефективні матеріали та конструкції для теплового захисту будівель і споруд*. Вінницький національний технічний університет.
36. Kononenko, M., Khomenko, O., Sadovenko, I., Sobolev, V., Pazynich, Yu., & Smolinski, A. (2023). Managing the rock mass destruction under the explosion. *Journal of sustainable mining*, 22(3), 240–247. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1391>
37. Worbs, H. (1987). Utilization of Energy Code Compliance Procedures for the Prediction of Commercial Building Annual Fuel Consumption. *Thermal Insulation: Materials and Systems*, 8–20. <https://doi.org/10.1520/stp18470s>
38. Khomenko, O., Kononenko, M., Myronova, I., & Sudakov, A. (2018). Increasing ecological safety during underground mining of iron-ore deposits. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 29–38. <http://doi.org/10.29202/nvngu/2018-2/3>
39. Величко, Н. О. (2023). Алюмосилікати у виробництві енергоефективних матеріалів. *Екологічні технології*, 3, 24–41.
40. Kononenko M., Khomenko O., Myronova I., & Kovalenko I. (2022). Economic and environmental aspects of using mining equipment and emulsion explosives for ore mining. *Mining Machines*, 40(2), 88–97. <https://doi.org/10.32056/KOMAG2022.2.4>
41. Polyanska, A., Pazynich, Y., Mykhailyshyn, K., Babets, D., & Toś, P. (2024). Aspects of energy efficiency management for rational energy resource utilization. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 39(3), 13–26. <https://doi.org/10.17794/rgn.2024.3.2>

42. Mizuno, M., Kokai T., & Koho. J. (2003). Method and apparatus for thermal decomposition of waste plastics for fuel manufacturing. *Fuel and Energy Abstracts*, 44(2), 121. [https://doi.org/10.1016/s0140-6701\(03\)90938-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6701(03)90938-6)
43. Sugimoto, Y. (1992). *Thermal decomposition of waste plastics and vacuum bottom*. Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Energy Research Laboratories Report, 92–100, 125. <https://doi.org/10.4095/304562>

ABSTRACT

Purpose. Determination of the thermal conductivity and stability of thermal insulation materials using the steady-state heat flow approach, which allows for assessing the materials' efficiency in heat retention, their durability, and resistance to external environmental changes – key factors for improving the energy efficiency of buildings and structures.

Methods. To achieve the stated objective, the authors, based on an analysis of scientific literature and mathematical approaches to assessing the thermal conductivity and stability of thermal insulation materials, applied the steady-state heat flow method, which made it possible to determine their thermal conductivity coefficient under various temperatures and operating conditions, as well as to evaluate their mechanical stability and changes in properties under prolonged heating and cyclic thermal loading.

Results. The feasibility and rationale for the development of thermal insulation materials have been substantiated, thermal conductivity values have been determined, mechanical stability under heating and thermal cycles has been assessed, the composition has been optimized to ensure low thermal conductivity and strength, and recommendations for their effective application in construction and industry have been developed.

Originality. Consists in the systematization and scientific substantiation of the implementation of technologies for the development of thermal insulation materials, taking into account the impact of temperature and operating conditions, the assessment of their mechanical stability under prolonged heating and cyclic thermal loading, the establishment of the relationship between the variation of maximum equivalent stress values and the height of the studied structures, as well as the optimization of material composition to achieve the best balance between low thermal conductivity and high mechanical strength.

Practical implication. The development of mathematical approaches for evaluating the effectiveness of thermal insulation materials, which ensure increased energy efficiency of buildings and structures, reduce energy consumption and heating costs, as well as possess high mechanical stability and durability under variable temperature conditions, making them suitable for widespread use in construction and industry.

Keywords: *thermal insulation material, energy efficiency, thermal conductivity, mechanical stability, durability, temperature conditions, construction.*