

УДК 67.06 : 666.9.022.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/28>**Мельник Л.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Свідерський В.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Доній О.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Стаття містить результати дослідження теплопровідності полімерних композитів та оптимізацію їх складів із використанням бінарних систем мінеральних наповнювачів (відсів андезиту, перліту і цеоліту) з метою підвищення теплоізоляційних властивостей.

У роботі проведено розрахунки розмірів кристалітів наповнювачів із застосуванням рівняння Шеррера. Встановлено, що мікро- та наноструктурні характеристики наповнювачів відіграють ключову роль у визначенні теплопровідності композитів. Досліджено залежність теплопровідності від концентрації наповнювачів у широкому діапазоні (65-90 мас.%) та від температури в межах від -100 до +100 °С. Аналіз показав, що підвищення концентрації мінеральних наповнювачів до 90 мас.% суттєво знижує теплопровідність композитів, а температурний фактор має мінімальний вплив на системи з високим вмістом наповнювачів.

Для моделювання теплопровідності використано кілька теоретичних моделей, включаючи послідовну, паралельну, Хашина-Штрікмана та Нільсена. Зокрема, модель Нільсена виявилася найбільш ефективною для систем із високими концентраціями наповнювачів, оскільки вона враховує міжфазні взаємодії, ефекти упаковки частинок та їх орієнтацію. Результати моделювання підтвердили, що система перліт (27 мас.%) + андезит (48 мас.%) має найнижчу теплопровідність серед досліджених бінарних систем – 0,182 Вт/м·К. Інші комбінації, такі як цеоліт (27 мас.%) + андезит (48 мас.%), також продемонстрували низьку теплопровідність (0,184 Вт/м·К), що підтверджує доцільність використання андезиту як основного компонента.

Комбінації цеоліт + перліт, незалежно від їх співвідношення, показали найвищі значення теплопровідності серед досліджених бінарних систем (0,212 Вт/м·К). Це обумовлено близькими значеннями теплопровідностей цих наповнювачів і відсутністю значного синергетичного ефекту.

Розрахунки, на відміну від експериментальних даних, показали, що тип полімерної матриці має обмежений вплив на теплопровідність композитів при високих концентраціях наповнювачів. Заміна зв'язуючого Latex 2012 на Policril 590 не призвела до значного зростання теплопровідності, що робить обидва зв'язуючі прийнятними для використання в теплоізоляційних матеріалах.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили ефективність використання вторинних мінеральних ресурсів для створення полімерних композитів із високими теплоізоляційними властивостями. Оптимізація складів бінарних наповнювачів дозволила визначити співвідношення компонентів, які забезпечують мінімальну теплопровідність.

Ключові слова: композит, наповнювач, андезит, латекс, цеоліт, перліт, теплопровідність, модель Нільсена.

Постановка проблеми. Ефективне управління експлуатаційними характеристиками матеріалів є одним із актуальних завдань сучасного матеріалознавства. У зв'язку з глобальними викликами, такими як підвищення енергоефективності, екологічна безпека та раціональне

використання природних ресурсів, розробка полімерних композитів із покращеними теплофізичними властивостями набуває особливого значення. Використання відсівів андезиту, перліту та цеоліту, які є відходами гірничого видобутку, як наповнювачів для полімерних композитів, відкри-

ває нові можливості для створення матеріалів із заданими характеристиками. Такий підхід сприяє не лише зменшенню обсягів накопичення промислових відходів, але й дозволяє підвищити екологічну ефективність виробництва. Водночас недостатність узагальнених даних щодо впливу типу, концентрації та температури на теплопровідність полімерних композитів із такими наповнювачами, а також їх взаємодії з полімерною матрицею, створює труднощі у виборі оптимальних компонентів і параметрів для створення матеріалів із покращеними характеристиками. Отже, дослідження впливу відходів видобутку вулканічних порід на теплопровідність полімерних композитів є актуальним завданням для вирішення питань, пов'язаних із підвищенням ефективності теплоізоляційних систем, розвитком екологічно чистих технологій і раціональним використанням вторинних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження демонструють значний інтерес до використання мінеральних наповнювачів у полімерних композитах завдяки їхній здатності покращувати фізико-хімічні властивості матеріалів. У роботі [1] досліджено ефективність часткової заміни цементу на андезитовий пил у цементних композитах. Було встановлено, що при заміні до 15 % цементу спостерігається покращення міцності композитів та зниження водопоглинання за рахунок ущільнення порової структури. Більший відсоток заміщення цементу забезпечує підвищену еластичність матеріалів завдяки утворенню гнучкіших структурних зв'язків.

У роботі [2] відзначили потенціал андезитових відсівів як заміни традиційного шамоту у виробництві пористої кераміки. Використання андезиту забезпечує зниження енерговитрат під час випалу, підвищує термостійкість і міцність готових виробів, а також дозволяє створювати пористі матеріали для застосування у фільтраційних системах.

Дослідження [3] показало, що геополімерні розчини, виготовлені з відходів андезитового пилу, можуть бути використані як екологічно чиста альтернатива портландцементу. Встановлено, що активація цього пилу із використанням силікату натрію дозволяє створювати матеріали з високою міцністю при стисненні, хоча водяне охолодження негативно впливає на їхню мікроструктуру, сприяючи утворенню мікротріщин.

Розробки, присвячені використанню перліту та цеоліту в полімерних композитах, свідчать про їх перспективність. Перліт, завдяки своїй низькій

густині та високим теплоізоляційним властивостям, часто використовується як наповнювач у будівельних матеріалах. Його застосування дозволяє знижувати вагу та покращувати термостійкість матеріалів, що підтверджено у дослідженнях [4].

Цеоліт, завдяки своїй каркасній структурі та розвинутій пористості, використовується для створення композитів із покращеними механічними та сорбційними властивостями. В роботі [5] відмічено, що цеоліт забезпечує підвищення міцності композитів і може слугувати платформою для розробки функціональних матеріалів із додатковими властивостями.

Таким чином, аналіз останніх публікацій підтверджує перспективність використання мінеральних наповнювачів, зокрема перліту, цеоліту та андезиту, у композитах для підвищення їх функціональних характеристик. Однак залишається відкритим питання щодо взаємодії цих наповнювачів із різними полімерними матрицями, та їх вплив на теплофізичні властивості отриманих композитів, що потребує подальших досліджень. Крім того питання оптимізації концентрацій наповнювачів для покращення теплопровідності залишаються актуальними.

Постановка завдання. Видобуток вулканічних порід супроводжується утворенням значної кількості відсівів, які становлять 10-30 % від обсягу видобутої породи. Це призводить до накопичення відходів на місцях видобутку, що займають великі площі та створюють екологічні ризики, зокрема негативний вплив на навколишнє середовище. Розробка ефективних методів утилізації таких відходів є актуальним завданням у контексті збереження екосистем.

Водночас наповнювачі вулканічного походження мають значні фізико-механічні та теплофізичні властивості, які роблять їх перспективними для використання в полімерних композитах. Зокрема, андезит забезпечує підвищення міцності, жорсткості, термічної та хімічної стійкості, а також характеризується низькою теплопровідністю, що може використовуватися для створення теплоізоляційних матеріалів. Цеоліт, завдяки своїм унікальним адсорбційним властивостям, сприяє покращенню функціональних характеристик композитів.

Тому метою даної роботи є аналіз теплопровідності полімерних композитів із наповнювачами у вигляді відсівів андезиту, перліту та цеоліту, а також моделювання процесів теплопередачі в цих матеріалах. Дослідження спрямоване на вивчення впливу концентрації наповню-

вачів та температури, їх хімічних і структурних характеристик на теплопровідність композитів та розробку моделі, яка дозволить прогнозувати теплопровідність залежно від складу і умов експлуатації.

Матеріали та методи дослідження. У дослідженні для створення композитів застосовували полімерну матрицю на основі водних дисперсій марки Latex 2012, яка є сополімером стиролу та бутадієну та характеризується вмістом сухого залишку 51,0 мас.%, середнім розміром частинок 140 нм та в'язкістю 200 мПа·с. Також використовували водну дисперсію марки Policril 590, яка є акриловим полімером із вмістом сухого залишку 53,5-55,0 мас.% та середнім розміром частинок 200 нм та в'язкістю <1000 мПа·с.

Як мінеральні наповнювачі використовували андезит Хустського, перліт Берегівського та цеоліт Сокиринського родовища, розташованих у Закарпатській області, Україна. Ці матеріали є відходами гірничодобувної промисловості та мають значний потенціал для застосування у складі полімерних композитів завдяки своїм фізико-хімічним властивостям.

Виходячи з попередніх наших досліджень [6] дані вулканічні породи мають суттєві відмінності у хіміко-мінералогічному складі. Хімічний аналіз проб виявив, що за співвідношенням основних структуроутворюючих оксидів вони утворюють такий ряд перліт > цеоліт > андезит (табл. 1), що по певним співвідношенням у числовому еквіваленті відповідно відповідає :

за вмістом $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 5,58 > 5,22 > 3,52$;

за вмістом $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3 - 48,05 > 45,43 > 7,09$;

за вмістом $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) - 5,0 > 4,55 > 2,35$.

Мінералогічний склад досліджуваних порід має свої особливості [6]: так перліт характеризується домінуванням склофази з незначними включеннями кристалічних фаз, зокрема кварцу та польових шпатів. У цеоліті, порівняно з перлітом, спостерігається менша кількість склофази, тоді як кристалічні фази представлені кліноптилолітом, кварцом і польовими шпатами. Андезит вирізняється значним розвитком кристалічних фаз, таких

як андезин, авгіт, біотит, рогова обманка та магнетит.

Зразки для досліджень являли собою таблетки з діаметром 15 мм і висотою 3-4 мм. Технологія їх виготовлення описана в нашій попередній роботі [7].

Вимірювання теплопровідності здійснювали за допомогою аналізатора теплопровідності ІТ-λ-400, що працює за методом динамічної калориметрії та охоплює температурний діапазон від 148 К до 373 К. Для забезпечення належного теплового контакту поверхні зразків були відполіровані до шорсткості $R_z < 0,63$ мкм. На контактні площини наносили теплопровідне мастило, яке мінімізувало тепловий опір.

Під час експерименту зразки піддавали впливу стаціонарного теплового потоку, а температурний градієнт реєстрували за допомогою хромель-алюмінієвих термопар. Теплопровідність (λ) розраховували за формулою:

$$\lambda = h/P$$

де λ – теплопровідність (Вт/м·К), h – висота зразка (м), P – тепловий опір зразка ($\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$).

Середню температуру визначали як середнє арифметичне значення температури на верхній і нижній поверхнях зразка. Метод забезпечує точність із похибкою не більше $\pm 10\%$, що дозволяє отримувати достовірні дані для оцінки теплопровідності композитів у широкому температурному діапазоні.

На основі даних дифрактограм, отриманих у попередніх дослідженнях [6], було розраховано розмір кристалітів наповнювачів за допомогою рівняння Шеррера [8], що дозволило оцінити їхні нанорозмірні характеристики:

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta}$$

де: D – розмір кристаліту (нм), $K=0,9$ – фактор форми, $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$ – довжина хвилі рентгєнівського випромінювання, β – FWHM (повна ширина на половині максимуму) у радіанах, θ – кут Бреґґа.

Застосування цієї методології дозволило створити основу для аналізу впливу нанорозмірних

Таблиця 1

Хімічний склад наповнювачів

Назва проби	Вміст оксидів, мас. %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	в.п.п.
перліт	72,08	12,92	1,50	0,90	0,88	0,63	3,76	4,33	3,00
цеоліт	68,02	13,04	1,92	0,30	2,71	1,63	1,57	2,64	16,94
андезит	59,70	16,97	8,42	0,72	5,76	1,21	2,68	1,82	1,11

властивостей дослідних вулканічних наповнювачів на теплопровідність полімерних композитів. Це забезпечує можливість дослідити їхній синергетичний вплив на теплофізичні властивості матеріалів і оптимізувати їхній склад для підвищення ефективності.

Виклад основного матеріалу. Структурні характеристики наповнювачів відіграють вирішальну роль у формуванні теплопровідності полімерних композитів. Одним із ключових параметрів, що впливають на теплові властивості матеріалів, є розмір кристалітів, який визначає середній розмір когерентно дифрагуючих областей у структурі матеріалу. Особливо це важливо для мікро- та наноструктурованих матеріалів, де розмір кристалітів значно впливає на міжфазні взаємодії та механізми розсіювання фонів, що визначають теплову поведінку композитів.

Для визначення розміру кристалітів за рівняння Шеррера проводили розрахунки для двох дифракційних піків кожного наповнювача, а результати наведені у таблиці 2. Для забезпечення більшої репрезентативності було визначено середній розмір кристалітів, який дозволяє об'єктивно порівнювати структурні властивості наповнювачів та їхній вплив на теплопровідність полімерних композитів.

Мінералогічний склад досліджуваних порід суттєво впливає на їхні теплофізичні властивості (табл. 2). Перліт характеризується найбільшим середнім розміром кристалітів, який становить 232,9 нм. Це узгоджується з його мінералогічним складом, де домінує склофаза. Це домінування сприяє впливає на теплопровідність перліту, яка становить 0,267 Вт/м·К і є середнім значенням серед досліджуваних матеріалів.

Цеоліт має менший середній розмір кристалітів, що дорівнює 128,3 нм, в його мінералогічному складі переважають кристалічні фази з незначним вмістом склофаз. Високий вміст кристалічних фаз забезпечує цеоліту найвищу теплопровідність серед досліджуваних матеріалів, яка складає 0,272 Вт/м·К.

Андезит вирізняється найменшим середнім розміром кристалітів – 110,0 нм. Це зумовлено складним мінералогічним складом, у якому домінують численні кристалічні фази. Велика кількість меж між кристалічними фазами сприяє додатковому тепловому опору, що обумовлює найнижчу теплопровідність андезиту серед досліджуваних матеріалів – 0,212 Вт/м·К.

Аналіз теплопровідності композитів із використанням цих наповнювачів демонструє, що зі збільшенням концентрації наповнювачів із 65 до 90 мас.% теплопровідність суттєво зростає для всіх матеріалів (рис. 1). Найбільший приріст теплопровідності спостерігається для композитів з андезитом, що пояснюється високою щільністю цього матеріалу. Перліт і цеоліт також демонструють зростання теплопровідності з підвищенням концентрації, однак їхні абсолютні значення залишаються нижчими, ймовірно, через більшу частку склофази у їхньому складі.

Температура також відіграє ключову роль у формуванні теплопровідності композитів. Зі збільшенням температури до 373 К теплопровідність композитів з андезитом і перлітом стабільно зростає, що свідчить про посилення механізмів теплопередачі через теплопровідні наповнювачі. У випадку цеоліту вплив температури менш виражений, що може бути пов'язано із присутністю адсорбованої вологи, яка частково обмежує ефективність теплопередачі.

Полімерна матриця також суттєво впливає на теплопровідність композитів. У випадку аморфних полімерів, таких як стирол-бутадієновий Latex 2012 і акриловий Policril 590, теплопровідність залежить від механізмів теплопередачі, що включають передачу тепла між молекулами через коливальні рухи. При підвищенні температури теплопровідність аморфних полімерів зростає через збільшення інтенсивності молекулярних флуктуацій.

Тому важливим залишається експериментальне визначення теплопровідності дослідних

Таблиця 2

Розрахунок розміру кристалітів на основі даних дифрактограм

Матеріал	$2\theta, ^\circ$	FWHM, β , рад	Розмір кристаліту, D, нм	Середній розмір кристаліту (нм)	Теплопровідність, Вт/м·К
Перліт	27,2	0,8	240,8	232,9	0,267
	29,5	0,9	224,9		
Цеоліт	24,8	0,7	137,2	128,3	0,272
	29,3	0,8	119,4		
Андезит	26,5	0,7	116,6	110,0	0,212
	32,0	0,8	103,3		

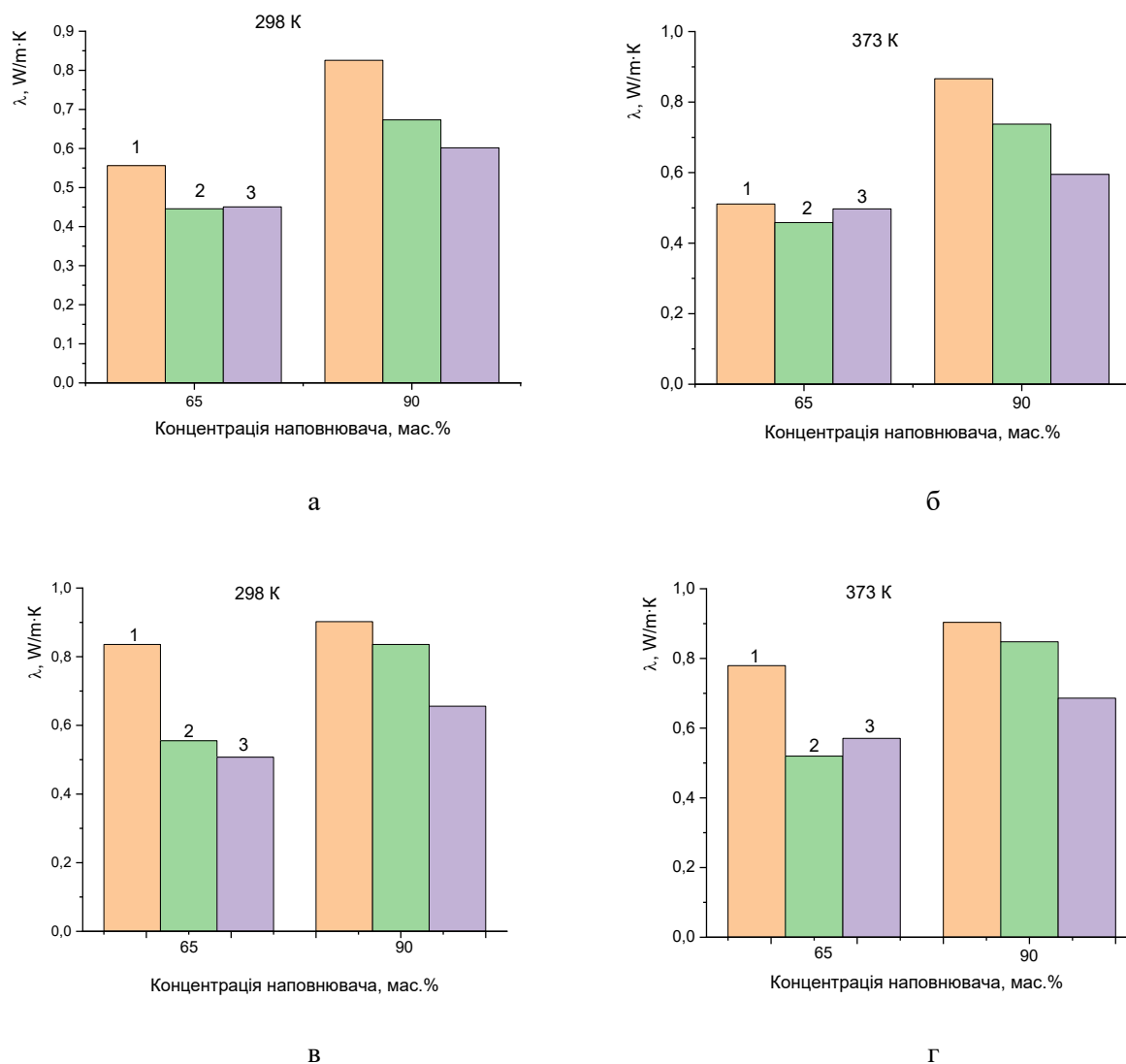


Рис. 1. Залежність теплопровідності від концентрації (за різних температур) для систем на основі Latex 2012 (а, б) та Policril 590 (в, г) з різними наповнювачами: 1 – відсів андезиту, 2 – відсів перліту, 3 – відсів цеоліту

систем. Це дозволяє оцінити, наскільки ефективно високі концентрації диспергованих наповнювачів впливають на теплофізичні властивості композитів.

Дослідження показали (рис. 1), що системи на основі Policril 590 демонструють вищі значення теплопровідності порівняно з Latex 2012. Це пов'язано з кращою змочуваністю та адгезією акрилової дисперсії до частинок наповнювача, що сприяє утворенню більш ефективних теплопровідних шляхів у структурі композиту.

Таким чином, мінералогічний склад, розмір кристалітів і взаємодія з полімерною матрицею є ключовими факторами, які визначають теплофізичні властивості композитів.

Для досягнення високих теплоізоляційних характеристик композитів важливо провести

оптимізацію складу бінарного наповнювача. Правильний вибір комбінацій і пропорцій наповнювачів дозволяє не лише знизити теплопровідність, але й забезпечити збереження механічної цілісності матеріалу та його здатності до технологічної обробки. У цьому дослідженні для оптимізації використано різні підходи до моделювання, які враховують особливості взаємодії наповнювачів у полімерній матриці.

Для систем із високими концентраціями наповнювачів було використано модель перколяції, що враховує утворення теплопровідних шляхів у структурі композиту, які виникають завдяки агломерації частинок і зростанню їх взаємодії.

Окрім цього, модель Хашина-Штрікмана [10] була використана для оцінки верхніх і нижніх меж теплопровідності композитів.

Для систем із високим вмістом наповнювачів найбільш прийнятною виявилася модель Нільсена, яка враховує максимальну частку упаковки частинок, їх орієнтацію та взаємодію. Ця модель дозволяє оптимізувати бінарні комбінації наповнювачів для досягнення мінімальної теплопровідності.

Таким чином, модель Нільсена [11] була обрана як основний інструмент для прогнозування і оптимізації теплоізоляційних характеристик композитів.

$$\frac{\lambda_{KM}}{\lambda_H} = \frac{1 + A \cdot B \cdot \varphi_H}{1 - A \cdot \psi \cdot \varphi_H}, \quad B = \frac{\frac{\lambda_H}{\lambda_H} - 1}{\frac{\lambda_H}{\lambda_H} + A}, \quad \psi = 1 + \left(\frac{1 - \varphi_m}{\varphi_m^2} \right) \cdot \varphi_H$$

де: A – функція геометрії часток, φ_m – максимальна об’ємна частка наповнювача.

Результати моделювання, виконаного на основі цієї моделі, дозволили визначити оптимальні концентрації наповнювачів та їх комбінації, спрямовані на зниження теплопровідності та покращення теплоізоляційних властивостей матеріалів. Детальні результати представлені в таблиці 3.

Проаналізувавши отримані дані (табл. 3) для оптимізації складів полімерних композитів за їх теплопровідністю найбільш придатною є модель Нільсена, що враховує взаємодію між наповнювачами та полімерною матрицею, що робить її придатною для систем із різними типами матриць, зокрема Latex 2012 і Policril 590.

Результати розрахунків у відповідності до моделі Нільсена представлені в таблиці 4.

Розрахунки (табл. 4) базуються на аналізі теплопровідності бінарних систем наповнювачів,

де їх сумарна концентрація становить 75 мас.%. Співвідношення компонентів було обрано з урахуванням індивідуальних теплопровідностей наповнювачів і їх взаємодії, яка моделювалася за допомогою моделі Нільсена.

Зокрема, при комбінуванні наповнювачів, таких як андезит і перліт та андезит і цеоліт значна увага приділялася досягненню мінімальної ефективної теплопровідності композиту. Співвідношення 48 мас.% андезиту та 27 мас.% перліту чи цеоліту показало найкращі результати відповідно 0,182 та 0,184 Вт/м·К. Це пояснюється тим, що андезит має найнижчу власну теплопровідність серед наповнювачів (0,212 Вт/м·К).

В той же час композити з цеолітом і перлітом не зважаючи на їх співвідношення (табл. 4), показали максимальну теплопровідність серед розглянутих бінарних систем на рівні 0,212 Вт/м·К.

Отже, результати аналізу підтверджують, що використання андезиту як основного компонента в бінарних системах дозволяє досягти найкращих теплоізоляційних властивостей композитів. Також слід додати, що тип зв’язуючого, при високих концентраціях наповнювача не вносить суттєвого впливу, при розрахунках за моделлю Нільсена, на значення теплопровідності композитів. При заміні зв’язуючого з Latex 2012 на Policril 590, розраховані значення ефективної теплопровідності для розглянутих систем з бінарними наповнювачами залишались однаковими.

Висновки.

1. Розрахунки розмірів кристалітів наповнювачів показали, що їх мікро- та наноструктурні характеристики суттєво впливають на ефективну

Таблиця 3

Вихідні дані та результати моделювання

Наповнювач	Матриця ПКМ	Об’ємна частка наповнювача	Теплопровідність при 298 К, Вт/м·К			
			Експериментальна	Перколяції	Хашина-Штрікмана (нижня межа)	Нільсена
Цеоліт	Latex 2012	0,458	0,451	0,161	0,161	0,138
		0,804	0,602	0,296	0,192	0,243
	Policril 590	0,464	0,507	0,184	0,176	0,140
		0,808	0,656	0,317	0,204	0,244
Перліт	Latex 2012	0,449	0,446	0,157	0,159	0,133
		0,798	0,673	0,290	0,189	0,237
	Policril 590	0,455	0,555	0,179	0,174	0,135
		0,802	0,836	0,311	0,202	0,238
Андезит	Latex 2012	0,453	0,556	0,146	0,141	0,107
		0,800	0,826	0,252	0,163	0,189
	Policril 590	0,459	0,836	0,168	0,155	0,108
		0,804	0,902	0,272	0,175	0,189

**Оптимізація складів композиту з бінарними наповнювачами
для досягнення ефективної теплопровідності**

Наповнювач 1	Наповнювач 2	Вміст наповнювача 1, мас. %	Вміст наповнювача 2, мас. %	Ефективна теплопровідність (Вт/м·К)
Перліт	Цеоліт	36	39	0,212
Цеоліт	Андезит	48	27	0,198
Андезит	Перліт	27	48	0,193
Перліт	Цеоліт	39	36	0,212
Цеоліт	Андезит	27	48	0,184
Андезит	Перліт	48	27	0,182

теплопровідність полімерних композитів. Визначення розмірів кристалітів із застосуванням рівня Шеррера дозволило встановити, що зменшення розмірів кристалів сприяє покращенню теплоізоляційних властивостей композитів.

2. Вивчено залежність теплопровідності композитів від концентрації наповнювачів і температури. Результати досліджень показали, що підвищення концентрації мінеральних наповнювачів (андезиту, перліту, цеоліту) до 90 мас. % дозволяє підвищити теплопровідність матеріалів.

3. Моделювання теплопровідності композитів за різними моделями підтвердило адекватність застосування моделі Нільсена для системи

із високими концентраціями наповнювачів. Ця модель враховує міжфазні взаємодії, ефекти упаковки частинок і орієнтацію компонентів, що забезпечує високий рівень точності прогнозів.

4. Оптимізація складів композитів проведена для трьох систем бінарних наповнювачів: перліт + цеоліт, перліт + андезит, цеоліт + андезит. Найнижчу теплопровідність продемонстрували комбінації з домінуванням андезиту, наприклад, андезит (48 мас. %) + перліт (27 мас. %), яка склала 0,182 Вт/м·К. Системи цеоліт + перліт, відповідно до збалансованих, мають найвищі значення теплопровідності серед бінарних систем (0,212 Вт/м·К).

Список літератури:

1. Özkan Ş., Ceylan H. The effects on mechanical properties of sustainable use of waste andesite dust as a partial substitution of cement in cementitious composites. *Journal of Building Engineering*. 2022. P. 104959. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104959>
2. Білоусов О.Ю., Черняк Л.П., Шнирук О.М. Пориста кераміка на основі відсівів андезиту. *Modern scientific researches*. 2020. 12(1). P. 12-17. <https://doi.org/10.30889/2523-4692.2020-12-01-001>
3. Çelikten S., Saridemir M., Sologlu M. Effects of elevated temperatures and cooling regimes on the waste andesite dust-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 422. P. 135857. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135857>
4. Structural and physical characteristics of fine perlite expanded with a novel method in a vertical electric furnace / P. M. Angelopoulos et al. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2016. Vol. 125, no. 2. P. 71-80. URL: <https://doi.org/10.1080/03719553.2016.1156244>
5. Applications of zeolites in biotechnology and medicine – a review / L. Bacakova et al. *Biomaterials Science*. 2018. Vol. 6, no. 5. P. 974-989. URL: <https://doi.org/10.1039/c8bm00028j>
6. Мельник Л.І., Свідерський В., Черняк Л. Особливості вулканічних порід як матеріалів для полімерних композитів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. Т.305, № 1. С. 14-19. URL: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-305-1-14-19>
7. Liubov Melnyk. Influence of mineral filler on the thermal conductivity of polymer composites. *Technology audit and production reserves*. 2024. Vol. 6. № 80. P. 6-11. URL: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.317659>
8. Alexander J. Blake, William Clegg. (2009). Crystal Structure Analysis. Principles and Practice. Second Edition. *International Union Of Crystallography*. Oxford University Press. P. 251-263.
9. Сіренко Г.О., Свідерський В.П., Складанюк М.Б. Фізичні методи дослідження речовин: Ч.П. Теплофізичні методи та властивості полімерних композитів: монографічний підручник / за ред. Г.О. Сіренка – Івано-Франківськ: Вид. Супрун В.П., 2020, 292 с. URL: <https://elar.khmnmu.edu.ua/handle/123456789/9824>. ISBN 978-966-8969-867.

10. Weidenfeller, B., Höfer, M., & Schilling, F. R. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle-filled polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004. Vol. 35. № 4, 423-429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.11.005>
11. Nielsen L. The Thermal and Electrical Conductivity of Two-Phase Systems. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1974. Vol. 13. № 1. P. 17-20.

Melnyk L.I., Svidersky V.A., Donii O.M. THE INFLUENCE OF MINERAL FILLERS ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF POLYMER COMPOSITES

The article is focused on the investigation and optimization of the thermal insulation properties of polymer composites with binary mineral fillers, such as andesite, perlite, and zeolite. The use of secondary mineral resources in the composition of composites not only reduces environmental impact but also enables the development of materials with enhanced operational properties. The research is aimed at calculating the optimal ratios of fillers and polymer matrix to achieve the lowest thermal conductivity, which is a critical criterion for thermal insulation materials.

The study includes the calculation of filler crystallite sizes using the Scherrer equation. It was established that the micro- and nanostructural characteristics of fillers play a key role in determining the thermal conductivity of composites. The dependence of thermal conductivity on filler concentration in a wide range (65-90 wt.%) and on temperature from -100 °C to +100 °C was investigated. The analysis showed that increasing the concentration of mineral fillers up to 90 wt.% significantly reduces the thermal conductivity of composites, while the temperature factor has a minimal effect on systems with high filler content.

Several theoretical models were used for thermal conductivity modeling, including the series, parallel, Hashin-Shtrikman, and Nielsen models. In particular, the Nielsen model proved to be the most effective for systems with high filler concentrations, as it considers interfacial interactions, particle packing effects, and orientation. The modeling results confirmed that the system with perlite (27 wt.%) and andesite (48 wt.%) exhibited the lowest thermal conductivity among the studied binary systems – 0.182 W/m·K. Other combinations, such as zeolite (27 wt.%) + andesite (48 wt.%), also demonstrated low thermal conductivity (0.184 W/m·K), confirming the feasibility of using andesite as a primary component.

Combinations of zeolite + perlite, regardless of their ratio, showed the highest thermal conductivity among the studied binary systems (0.212 W/m·K). This is due to the close thermal conductivities of these fillers and the absence of a significant synergistic effect.

Calculations, in contrast to experimental data, showed that the type of polymer matrix has a limited impact on the thermal conductivity of composites with high filler concentrations. The replacement of Latex 2012 with Policril 590 did not result in a significant increase in thermal conductivity, making both binders suitable for thermal insulation materials.

Thus, the conducted research confirmed the effectiveness of using secondary mineral resources to create polymer composites with high thermal insulation properties. The optimization of binary filler compositions allowed for determining the ratios of components that ensure minimal thermal conductivity. The presented results are of great importance for industrial applications in thermal insulation and contribute to reducing environmental impact through the utilization of secondary resources.

Key words: composite, filler, andesite, latex, zeolite, perlite, thermal conductivity, Nielsen model.