

Мельник Л.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Береговий Т.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СТРУКТУРНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ КОМПОЗИТІВ ІЗ ЗОЛОЮ ВІНОСУ ТЕС

У статті представлено результати експериментального та теоретичного дослідження теплофізичних властивостей полімерних композитів, модифікованих золою виносу теплоелектростанцій (ТЕС), зокрема Буришинської та Курахівської. Метою роботи було встановлення впливу типу золи, її концентрації, полімерної матриці, густини, пористості та температури на ефективну теплопровідність композитів. Як полімерну основу застосовано водні дисперсії акрилового типу (Policril 590) та стирол-бутадієнового типу (Latex 2012). Дослідження проводилися для зразків із вмістом золи 65 та 90 мас.%, у температурному діапазоні 150–375 К.

Встановлено, що композити з золою Курахівської ТЕС демонструють вищу теплопровідність порівняно з аналогами на основі золи Буришинської ТЕС. Це зумовлено вищою густиною, більшим розміром кристалітів та меншою питомою поверхнею Курахівської золи, що сприяє формуванню більш ефективної теплопровідної структури. Показано, що збільшення густини композиту супроводжується підвищенням теплопровідності, а зростання пористості – її зниженням. Композити на основі Policril 590 виявились ефективнішими за показниками теплопровідності, що пояснюється кращою міжфазною взаємодією та змочуваністю поверхні золи акриловою матрицею.

Для оцінки результатів було застосовано перколяційну модель і модель Хашина–Штрикмана (нижня межа). Експериментальні значення суттєво перевищують розраховані, що свідчить про утворення структурних теплопровідних каналів завдяки щільному пакуванню частинок золи та їх агрегації. Установлено, що модель Хашина–Штрикмана забезпечує найбільш обґрунтовану нижню межу прогнозу теплопровідності для систем із середнім рівнем наповнення, і може бути використана як інструмент для первинного проектування складу теплоізоляційних матеріалів.

Проведений аналіз підтверджує перспективність використання зол виносу ТЕС як ефективного мінерального наповнювача для створення полімерних композиційних матеріалів з регульованими теплофізичними властивостями. Отримані дані можуть бути основою для подальшої оптимізації складів, зокрема через хімічну або фізико-механічну модифікацію золи, регулювання пористості, вибір дисперсної фази та застосування гібридних наповнювачів з метою створення енергоефективних екологічно орієнтованих матеріалів нового покоління.

Ключові слова: композит, наповнювач, зола виносу, теплопровідність, модель Хашина–Штрикмана.

Постановка проблеми. Золи виносу, що утворюються в значних обсягах на теплоелектростанціях, становлять одну з наймасовіших груп техногенних відходів, які вимагають екологічно безпечної утилізації. Попри хімічну інертність і мінеральну природу, більшість зол накопичується у золовідвалах, створюючи додаткове навантаження на навколишнє середовище та забруднюючи повітря, ґрунт і водні ресурси. У зв'язку з цим особливого значення набуває розроблення ефективних напрямів переробки зол виносу як вторинної сировини, зокрема у складі будівельних та теплоізоляційних полімерних матеріалів.

Одним з перспективних шляхів є використання зол як наповнювачів у полімерних композиційних матеріалах на основі водних дисперсій. Такі системи поєднують низьку собівартість, екологічну безпечність і технологічну гнучкість, що відкриває можливості для створення нових теплоізоляційних покриттів. Однак теплофізичні характеристики композитів істотно залежать як від типу використаної золи (її хімічного складу, питомої поверхні, густини), так і від природи полімерної матриці. Недостатня вивченість цих взаємозв'язків, зокрема для зол виносу Буришинської та Курахівської ТЕС у поєднанні

з акриловими та стирол-бутадієновими латексами, ускладнює науково обґрунтований підхід до розробки ефективних композицій.

Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є встановлення закономірностей впливу типу золи виносу та полімерної матриці на теплофізичні властивості композиційних матеріалів з метою оптимізації їх складу для використання в системах теплоізоляції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання золи виносу теплоелектростанцій (ТЕС) як функціонального наповнювача у складі полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) привертає зростаючу увагу наукової спільноти, що зумовлено як масштабами її утворення, так і перспективами утилізації цього техногенного відходу в галузі будівництва, енергозбереження та екологічно орієнтованих технологій. Основна увага приділяється підвищенню ефективності теплоізоляційних властивостей таких композитів за рахунок заміщення частини полімерної матриці техногенними наповнювачами, зокрема золою виносу.

Останні дослідження показують, що вплив золи на теплопровідність композитів є складним і суперечливим, оскільки залежить від кількох взаємопов'язаних факторів: природи полімерної матриці, концентрації наповнювача, дисперсності частинок, пористості структури та ступеня взаємодії на міжфазній межі.

Згідно з дослідженням [1], додавання 10–20 мас.% золи ТЕС до полістирольного бетону призводить до зростання теплопровідності на 8–12% за рахунок утворення теплопровідних каналів. Методом стаціонарного теплового потоку доведено доцільність застосування таких композитів у будівництві. Подібні висновки зробили автори у роботі [2], які досліджували поліетиленові композити: при вмісті золи 5–15 мас.% спостерігалось підвищення теплопровідності на 10%, тоді як за перевищення цього рівня показник знижувався внаслідок агломерації частинок. У роботі [3] додатково показано, що включення армувальних волокон у гібридні композити із золою підвищує теплопровідність на 5–7% та покращує мікроструктурну стабільність матеріалу. Для композитів на основі поліпропілену аналогічні результати наведено в дослідженні [4]: теплопровідність зростала до концентрації 15 мас.% золи, однак при 30 мас.% відбувалося її зниження внаслідок зростання пористості.

Окрему групу становлять дослідження, засновані на чисельному моделюванні. У роботі [5]

використано молекулярно-динамічне моделювання з застосуванням програмного середовища LAMMPS та силових полів COMPASS. Показано, що наночастинки золи (менше 1 мкм) можуть підвищувати теплопровідність композиту до 15%, проте обмеженням таких моделей залишається ідеалізація структури без урахування дефектів. Інше дослідження [6] підтверджує зниження теплопровідності термопластичних композитів із золою на 15–20% при підвищенні концентрації до 30 мас.% через переважання аморфної фази золи.

З позиції прикладного матеріалознавства важливими є публікації, що висвітлюють екологічні аспекти. Наприклад, у дослідженні [7] зазначено, що використання золи ТЕС у полімерних композитах сприяє зниженню тепловтрат у будівлях на 10–15% і забезпечує зменшення витрат на опалення. Проте слід враховувати, що довговічність властивостей таких матеріалів залежить від умов експлуатації. Так, в дослідженні [8] показано, що після впливу УФ-випромінювання та вологи теплопровідність HDPE-композитів із золою знижується на 5–9% внаслідок деградації інтерфейсу між наповнювачем та матрицею. Актуальним є також напрям гібридних систем, як зазначено в матеріалах роботи [9] поєднання золи ТЕС з графеном дає змогу підвищити теплопровідність на 20% порівняно з традиційними зольними композитами.

Таким чином, більшість публікацій підтверджують, що зола ТЕС може відігравати подвійну роль: з одного боку, знижувати теплопровідність для теплоізоляції, а з іншого – підвищувати її при відповідному підборі матриці та режимів обробки. Ключовими факторами залишаються концентрація золи, її морфологія, дисперсність, а також поверхнева взаємодія з полімерною фазою. У контексті виявлених наукових суперечностей та практичних обмежень актуальним є не лише подальше дослідження впливу довготривалого старіння, а й експериментальна перевірка закономірностей зміни теплопровідності полімерних композитів із золою ТЕС залежно від типу золи, її концентрації, температури та полімерної матриці, що і було покладено в основу наших досліджень.

Постановка завдання. Аналіз літературних джерел засвідчив наявність суперечливих даних щодо впливу золи теплоелектростанцій на теплопровідність полімерних композитів, що зумовлено відмінностями у хімічному та фазовому складі золи, розмірі частинок, ступені

диспергування, типі полімерної матриці, концентрації наповнювача, а також структурними факторами, зокрема густиною та пористістю матеріалу. Крім того, актуальним є питання впливу температури на теплопровідність таких композитів, зокрема в умовах реальної експлуатації, а також вибору полімерного зв'язуючого, яке забезпечує найкращу взаємодію з частинками золи.

Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу типу золи ТЕС, її концентрації, типу полімерної дисперсії, густини, пористості та температури на теплопровідність полімерних композитів, а також аналіз ролі міжфазної взаємодії у формуванні теплоізоляційних властивостей матеріалу. Дослідження спрямоване на створення наукових засад для керування структурою та теплопровідністю композитів у заданому температурному діапазоні.

Досягнення цієї мети передбачає експериментальне дослідження теплофізичних властивостей композитів із використанням золи різного походження при варіації їх вмісту та температурного навантаження, аналіз взаємодії між компонентами матеріалу та оцінку ролі структурних характеристик у процесах теплопередачі.

Матеріали та методи дослідження. Для дослідження теплофізичних властивостей полімерних композитів із мінеральним наповнювачем було використано золошлакові матеріали з двох українських теплоелектростанцій – Бурштинської (зола Б) та Курахівської (зола К). Вибір цих зол зумовлений відмінністю умов спалювання вугілля та систем уловлювання пилу, що, своєю чергою, визначає хімічний склад (табл. 1), ступінь дисперсності, пористість та теплофізичні характеристики зол.

У якості полімерної матриці застосовували дві водні дисперсії, що різняться хімічною природою та реологічними властивостями: Latex 2012, що є водною дисперсією стирол-бутадієнового сополімеру, з вмістом сухого залишку 51,0 мас.%, середнім діаметром частинок близько 140 нм та

кінематичною в'язкістю на рівні 200 мПа·с, що забезпечує добру плівкоутворювальну здатність і еластичність композиту та Policril 590 – акриловий полімер у водній фазі з вмістом сухого залишку 53,5–55,0 мас.%, середнім розміром частинок приблизно 200 нм і в'язкістю нижче 1000 мПа·с, що дозволяє забезпечити стабільну структуру з кращою адгезією до неорганічних частинок наповнювача.

Зразки для досліджень являли собою таблетки з діаметром 15 мм і висотою 3–4 мм. Технологія їх виготовлення описана в нашій попередній роботі [10].

Коефіцієнт теплопровідності λ визначали за допомогою приладу ІТ- λ -400, що працює на принципі динамічної калориметрії. Вимірювання проводили в температурному діапазоні 148–373 К, що дозволило оцінити поведінку матеріалів в умовах, наближених до реальної експлуатації. Для побудови термограм залежності $\lambda = f(T)$ було обрано контрольні температури 298 К і 373 К як репрезентативні точки оцінки ефективності.

Питому поверхню золи оцінювали за методом БЕТ з використанням адсорбції азоту. Розмір кристалітів визначали за допомогою дифрактограм з подальшим застосуванням рівняння Шерера [11], 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 рентгенівського випромінювання, β – FWHM (повна ширина на половині максимуму) у радіанах, θ – кут Бреґга.

Для аналізу міжфазної взаємодії золи з полімерною матрицею визначали кут змочування за методом краплі на поверхні. На основі отриманих значень розраховували поверхневу енергію частинок золи за методом Оуенса–Вендта. Ці параметри дозволили кількісно оцінити ступінь взаємодії між наповнювачем та дисперсією.

Таблиця 1

Хімічний склад золи виносу ТЕС

Проба золи виносу	Вміст оксидів, мас.%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	в.п.п.
Бурштинська	46.12	18.00	22.17	1.78	4.03	1.46	0.21	2.10	1.49
Курахівська	51.53	15.98	14.23	1.67	8.15	1.53	0.76	3.81	0.01

Всі результати було оброблено методами варіаційного та кореляційного аналізу. Побудовано залежності теплопровідності від температури, густини та пористості. Для виявлення ключових чинників, що впливають на теплопровідність, використовували метод багатофакторного порівняння.

Виклад основного матеріалу. У продовження попередніх досліджень, присвячених аналізу впливу типу золи та полімерної дисперсії на теплопровідність полімерних композитів [12], у цій роботі основну увагу приділено виявленню структурних факторів, що визначають теплову поведінку матеріалів. Розгляд здійснювався у контексті міжфазної взаємодії, пористості, густини та температурної стабільності, що дозволило поглибити розуміння механізмів теплопереносу в мінералонаповнених полімерних системах. Структурні характеристики зол виносу як наповнювачів мають вагомий вплив на теплопровідну здатність полімерних композитів. Одним із важливих параметрів, що впливають на механізми теплопереносу, є середній розмір кристалітів, який відображає масштаби когерентно дифрагуючих областей у кристалічній фазі золи. Цей показник є особливо чутливим для матеріалів із мікро- та наноструктурованою текстурою, де дрібнодисперсність сприяє зміні умов міжфазної взаємодії та інтенсивнішому фонному розсіюванню, що безпосередньо впливає на зниження теплопровідності композитів.

Для оцінки розміру кристалітів золи Бурштинської та Курахівської ТЕС використовували рівняння Шеррера, застосовуючи дані рентгенофазового аналізу. Розрахунки проводили за двома характерними дифракційними рефlekсами для кожного зразка золи. З метою підвищення точності порівняння отримано усереднені значення розмірів кристалітів, які наведено у таблиці 2. Ці дані дають змогу коректно зіставити структурні особливості зол різного походження та визначити їхній потенційний вплив на

формування теплопровідних шляхів у структурі полімерних композитів.

Аналіз даних таблиці 2 показує, що зола Курахівської ТЕС характеризується більшими середніми розмірами кристалітів (113,0 нм) порівняно із золою Бурштинської ТЕС (100,4 нм). Така різниця в структурних параметрах може свідчити про нижчий ступінь дефектності кристалічної фази золи К, що сприяє ефективнішому переносу тепла. Це підтверджується вищим значенням теплопровідності для золи Курахівської ТЕС – 0,224 Вт/м·К проти 0,207 Вт/м·К для золи Бурштинської. Таким чином, встановлено кореляцію між більшим розміром кристалітів та покращеними теплопровідними властивостями, що є важливим критерієм для підбору типу золи як функціонального наповнювача в теплоізоляційних композитах.

Полімерна матриця, а також концентрація та природа мінерального наповнювача справляють істотний вплив на теплопровідність полімерних композитів. Відомо, що теплопровідність аморфних полімерів, таких як стирол-бутадієновий Latex 2012 і акриловий Policril 590, зростає з підвищенням температури внаслідок інтенсифікації молекулярних коливань і флуктуацій, які передають теплову енергію між сегментами полімерного ланцюга.

Однак внесок полімерної матриці в загальну теплопровідність системи є обмеженим, особливо при високому вмісті мінеральних наповнювачів. Тому ключовим залишається експериментальне вивчення композитів, модифікованих золами теплоелектростанцій, з метою оцінки ефективності теплопереносу в умовах варіативної мікроструктури та міжфазної взаємодії.

Як показано в попередніх дослідженнях [12], композити на основі Policril 590 характеризуються вищими значеннями теплопровідності порівняно з аналогами на основі Latex 2012. Це пояснюється кращим змочуванням частинок золи та сильнішою адгезією в акрилових системах, що сприяє формуванню більш щільної

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
Зола Б	26,0	0,8	111,3	100,4	0,207
	30,0	1,0	89,5		
Зола К	25,0	0,7	127,0	113,0	0,224
	28,5	0,9	98,6		

контактної сітки між наповнювачами й, відповідно, ефективніших теплопровідних каналів.

Крім типу матриці, ключовими факторами, що визначають теплову поведінку композитів, виступають мінералогічний склад золи, середній розмір кристалітів та об'ємна частка наповнювача. За умов високого наповнення особливо важливо враховувати не лише фізико-хімічні властивості фаз, але й структурні особливості – пористість, густину, а також просторову орієнтацію частинок.

Для аналітичного узагальнення експериментальних результатів було використано декілька підходів до моделювання теплопровідності композитів. Зокрема, перколяційна модель дозволила врахувати утворення зв'язаних теплопровідних шляхів при високих об'ємних частках наповнювача за рахунок контакту й агрегації частинок. Такий підхід відображає ситуацію, коли матеріал переходить у режим домінування теплопереносу через наповнювач.

Серед підходів до моделювання теплопровідності двофазних композитів широкого застосування набула модель Хашина–Штрикмана [13], яка дозволяє оцінити верхню та нижню межі ефективної теплопровідності залежно від теплопровідності кожної фази та об'ємної частки наповнювача. У цьому дослідженні використано нижню межу моделі, яка є релевантною для систем з ізолюваними включеннями наповнювача, диспергованими в неперервній полімерній матриці.

Рівняння нижньої межі моделі Хашина–Штрикмана має вигляд:

$$\lambda_{HS,lower} = \lambda_m + \frac{\varphi}{\left(\frac{1}{\lambda_f - \lambda_m} + \frac{1 - \varphi}{3\lambda_m}\right)}$$

де $\lambda_{HS,lower}$ – нижня межа теплопровідності композиту, λ_m – теплопровідність матриці, λ_f – теплопровідність наповнювача, φ – об'ємна частка наповнювача.

Ця модель дозволяє визначити теоретично мінімальне значення теплопровідності, яке може бути досягнуто за умов відсутності ефективної взаємодії між частинками наповнювача та матрицею. Порівняння експериментальних результатів із розрахунковими значеннями за цією моделлю дозволяє оцінити ступінь впорядкування наповнювача в структурі, ефективність контактів між фазами, а також виявити можливу наявність перколяційних зв'язків або кластеризації частинок.

Розраховані значення нижньої межі теплопровідності композитів на основі зол Бурштинської та Курахівської ТЕС, а також відповідні експериментальні значення, наведено в таблиці 3.

Результати, наведені в таблиці 3, демонструють узгодженість між експериментально визначеними значеннями теплопровідності композитів при 298 К і теоретичними оцінками, отриманими за допомогою моделей перколяції та Хашина–Штрикмана. Як видно, експериментальні значення λ значно перевищують теоретичні, особливо за перколяційною моделлю, яка суттєво недооцінює ефективність теплопереносу в більшості систем. Це вказує на формування в структурі композиту контактних теплопровідних шляхів та ефективну міжфазну взаємодію,

Таблиця 3

Вихідні дані та результати моделювання

Наповнювач	Матриця ПКМ	Об'ємна частка наповнювача	Теплопровідність при 298 К, Вт/м·К		
			Експериментальна	Перколяції	Хашина-Штрикмана (нижня межа)
Зола Б	Latex 2012	0,509	0,520	0,082	0,158
		0,851	1,042	0,153	0,191
	Policril 590	0,515	0,545	0,086	0,169
		0,854	0,759	0,154	0,195
Зола К	Latex 2012	0,448	0,874	0,098	0,195
		0,797	0,508	0,149	0,213
	Policril 590	0,454	0,508	0,101	0,202
		0,802	0,567	0,151	0,216

що не враховується у спрощеній геометричній моделі.

Модель Хашина–Штрикмана, яка враховує співвідношення фаз та їх теплопровідність, дає значення ближчі до експериментальних. Проте навіть вона не відображає повною мірою реальний приріст теплопровідності, зокрема для композитів із високим об'ємним наповненням ($>0,8$). Це свідчить про ймовірну наявність перехідної мікроструктури між диспергованим і кластеризованим станом наповнювача, що сприяє ефективнішому переносу тепла.

Порівняльний аналіз показує, що композити на основі золи Курахівської ТЕС мають вищу теплопровідність у всіх випадках, що корелює з їх вищою густиною та нижчою пористістю. Крім того Policril 590 як матриця забезпечує більший приріст λ , ніж Latex 2012, особливо при високих концентраціях наповнювача, що пов'язано з кращим змочуванням і адгезією до золи.

Найбільше відхилення між експериментальним та теоретичним значенням спостерігається у зразках з $\phi > 0,8$, де виникають умови для перколяції, але традиційна модель її ще не описує адекватно.

Таким чином, таблиця 3 демонструє, що жодна з обраних моделей повністю не описує теплопровідну поведінку композитів із висококонцентрованими зольними наповнювачами, але модель Хашина–Штрикмана надає надійнішу базову оцінку нижньої межі. Експериментальні перевищення цієї межі підтверджують наявність ефективних структурних шляхів теплопереносу, що є ключовим для створення матеріалів із заданими теплоізоляційними властивостями.

Висновки. У ході дослідження було встановлено, що теплофізичні властивості полімерних композитів із використанням золи виносу

теплоелектростанцій суттєво залежать від типу золи, її концентрації, природи полімерної матриці, а також структурних параметрів матеріалу – пористості та густини.

Зола Курахівської ТЕС, порівняно з золою Бурштинської ТЕС, забезпечує вищу теплопровідність композитів, що зумовлено її меншою питомою поверхнею, більшою густиною та більшим розміром кристалітів, які сприяють формуванню теплопровідних шляхів.

Застосування акрилової матриці Policril 590 виявилось ефективнішим у контексті теплопровідності, ніж Latex 2012, що пов'язано з кращою змочуваністю поверхні золи та зменшенням міжфазного теплового опору.

Порівняння експериментальних даних із розрахунками за моделями показало, що:

- перколяційна модель недооцінює теплопровідність у системах із високим вмістом наповнювача;
- модель Хашина–Штрикмана забезпечує реалістичніші оцінки, особливо для систем із середнім рівнем наповнення, і може бути використана як базовий підхід для проектування теплоізоляційних матеріалів.

Було доведено, що при $\phi > 0,8$ виникають умови для утворення перколяційної структури, яка не враховується класичними аналітичними моделями, що створює передумови для подальшого розвитку гібридних моделей прогнозування.

Отримані результати є основою для створення нових теплоізоляційних полімерних матеріалів, адаптованих до вимог сучасного будівництва й енергоефективності, а також підкреслюють доцільність використання зол виносу як вторинної сировини у сфері екологічно орієнтованих матеріалів.

Список літератури:

1. The Effect of Fly Ash Additive on the Thermal Conductivity of Polystyrene Concrete / R. B. Tlegenov et al. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 9. P. 2850. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14092850>.
2. Caban R., Gnatowski A. Analysis of the Impact of Waste Fly Ash on Changes in the Structure and Thermal Properties of the Produced Recycled Materials Based on Polyethylene. *Materials*. 2024. Vol. 17, № 14. P. 3453. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17143453>.
3. Hybrid Geopolymer Composites Based on Fly Ash Reinforced with Glass and Flax Fibers / H. Šimonová et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 21. P. 9787. URL: <https://doi.org/10.3390/app14219787>.
4. Mechanical and thermal properties of bottom ash-based porous geopolymer as thermal insulation material for construction / P. S. Soe et al. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2023. Vol. 25. P. 2964–2975. URL: <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01732-6>.
5. Patsidis A. C., Souliotis M. End-Of-Use Fly Ash as an Effective Reinforcing Filler in Green Polymer Composites. *Polymers*. 2023. Vol. 15, № 16. P. 3418. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15163418>.
6. Development of fly ash boards with thermal, acoustic and fire insulation properties / C. Leiva et al. *Waste Management*. 2015. Vol. 46. P. 298–303. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.027>.

7. Cengizler H., Koç M., Şan O. Production of ceramic glass foam of low thermal conductivity by a simple method entirely from fly ash. *Ceramics International*. 2021. Vol. 47, № 20. P. 28460–28470. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.265>.
8. Alghamdi M. N. Performance for Fly Ash Reinforced HDPE Composites over the Ageing of Material Components. *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 14. P. 2913. URL: <https://doi.org/10.3390/polym14142913>.
9. Melnyk L. Influence of mineral filler on the thermal conductivity of polymer composites. *Technology audit and production reserves*. 2024. Vol. 6, № 3(80). P. 6–11. URL: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.317659>.
10. Melnyk L. I., Cherniak L. P., Yevpak V. V. COMPOSITES BASED ON FLY ASH WITH DIFFERENT POLYMER MATRIXES. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 2, № 1. P. 106–112. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/18>.
11. Blake A. J., Clegg W. *Crystal structure analysis. Principles and practice*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2009. P. 251–263.
12. Thermal Insulation Properties of Red Mud as a Functional Filler for Polymer Composites / L. Melnyk et al. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2025. Vol. 17, № 1. P. 01027–1–01027–6. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.17\(1\).01027](https://doi.org/10.21272/jnep.17(1).01027).
13. 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. P. 423–429. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.11.005>.

Melnyk L.I., Berehovyj T.O. STRUCTURAL FACTORS INFLUENCING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF COMPOSITES FILLED WITH FLY ASH FROM THERMAL POWER PLANTS

The article presents the results of experimental and theoretical research on the thermophysical properties of polymer composites modified with fly ash from thermal power plants (TPPs), in particular from Burshtyn and Kurakhove. The study aimed to determine the influence of ash type, concentration, polymer matrix, density, porosity, and temperature on the effective thermal conductivity of the composites. The polymer matrix was represented by water-based dispersions of the acrylic type (Policril 590) and styrene–butadiene type (Latex 2012). The composites were investigated at ash contents of 65 and 90 wt.% within the temperature range of 150–375 K.

It was found that composites filled with Kurakhove TPP ash exhibit higher thermal conductivity compared to those with Burshtyn TPP ash. This is attributed to the higher density, larger crystallite size, and lower specific surface area of the Kurakhove ash, which contribute to the formation of a more efficient heat-conducting structure. An increase in the composite density leads to improved thermal conductivity, while increased porosity causes a decrease. Composites based on Policril 590 showed better thermal conductivity due to improved interfacial interaction and better wetting of ash particles by the acrylic matrix.

To evaluate the results, a percolation model and the Hashin–Shtrikman model (lower bound) were applied. The experimental values significantly exceeded the calculated ones, indicating the formation of structural heat-conducting channels due to dense particle packing and their aggregation. The Hashin–Shtrikman model provided the most justified lower bound prediction of thermal conductivity for medium-filled systems and can serve as a tool for the preliminary design of insulation material formulations.

The analysis confirms the potential of fly ash from TPPs as an effective mineral filler for the development of polymer composite materials with controlled thermophysical properties. The results can serve as a basis for further optimization of formulations through chemical or physicochemical modification of the ash, regulation of porosity, selection of the dispersion medium, and use of hybrid fillers for the creation of energy-efficient, environmentally oriented next-generation materials.

Key words: composite, filler, fly ash, thermal conductivity, Hashin–Shtrikman model.