

## Нанотехнології для енергетики

УДК 538.9:536.6  
DOI: 10.33070/etars.1.2025.11

**Фіалко Н.М.<sup>1</sup>**, чл.-кор. НАН України, докт. техн. наук, проф.,  
ORCID: 0000-0003-0116-7673, **Меранова Н.О.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук,  
ORCID: 0000-0001-7223-8753, **Коржик В.М.<sup>2</sup>**, чл.-кор. НАН України,  
докт. техн. наук, проф., ORCID: 0000-0001-9106-8593, **Бабак В.П.<sup>3</sup>**,  
акад. НАН України, докт. техн. наук, проф., ORCID: 0000-0002-9066-4307,  
**Шеренковський Ю.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0003-1765-7319,  
**Лазаренко М.М.<sup>4</sup>**, докт. фіз.-мат. наук, ORCID: 0000-0003-0719-3522,  
**Косєва Н.С.<sup>5</sup>**, канд. хім. наук, проф., ORCID: 0000-0002-8445-8953,  
**Навродська Р.О.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0001-7476-2962,  
**Полозенко Н.П.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-0272-5385,  
**Дінжос Р.В.<sup>5, 6</sup>**, докт. техн. наук, проф., ORCID: 0000-0003-1105-2642

<sup>1</sup> Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України  
вул. Марії Капніст, 2а, 03057 Київ, Україна, e-mail: nmfialko@ukr.net

<sup>2</sup> Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук  
України

вул. Казимира Малевича, 11, 03150 Київ, Україна, e-mail: vnkorzhyk@gmail.com

<sup>3</sup> Інститут загальної енергетики Національної академії наук України  
вул. Антоновича, 172, 03150 Київ, Україна, e-mail: vdoe@ukr.net

<sup>4</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
вул. Володимирська, 64/13, 01601 Київ, Україна, e-mail: maxs@univ.kiev.ua

<sup>5</sup> Інститут полімерів Болгарської академії наук  
вул. Академіка Георгія Бончева, блок 103, 1113 Софія, Болгарія, e-mail: nellykoseva@gmail.com

<sup>6</sup> Чорноморський національний університет імені Петра Могили  
вул. 68 Десантників, 10, 54003 Миколаїв, Україна, e-mail: dinzhosrv@gmail.com

## Закономірності впливу на теплофізичні властивості полімерних мікро- та нанокомпозитів методів їх одержання

**Анотація.** Наведено результати циклу експериментальних досліджень теплофізичних властивостей полімерних мікро- та нанокомпозитів при застосуванні для їх одержання методів, що базуються на змішуванні компонентів у сухому вигляді або в розплаві полімеру. До-

слідження виконано для композитів на основі поліаміду 6 при його наповненні вуглецевими нанотрубками, мікрочастинками міді або алюмінію. У ході виконання досліджень масова частка наповнювача змінювалася від 0,3 до 10 %, температура композитів — від 320 до 525 К. Наведено дані щодо ефектів впливу методів одержання полімерних композиційних матеріалів на їх теплопровідність, питому теплоємність та густину. Показано, що із застосуванням методу, що заснований на змішуванні компонентів у розплаві полімеру, можуть бути одержані полімерні мікро- та нанокомпозити із суттєво більш високою теплопровідністю. При цьому для обох методів реалізується однакове ранжування теплопровідності композитів, що розглядаються, у залежності від їх наповнювача, а саме: найбільші значення коефіцієнтів теплопровідності мають місце для поліаміду 6, наповненого вуглецевими нанотрубками, нижчі — мікрочастинками міді, найнижчі — мікрочастинками алюмінію. Встановлено, що вплив методів одержання досліджуваних композитів більш суттєво позначається на величині їх коефіцієнта теплопровідності, ніж на значеннях питомої теплоємності та густини. Показано, що розбіжності величини питомої теплоємності композитів, одержаних на основі різних методів, є помітними лише при температурах, близьких до температури плавлення полімеру. При цьому відповідні розбіжності значень густини досліджуваних полімерних мікро- та нанокомпозитів несуттєво змінюються з температурою. Наведено інформацію про межі раціонального використання розглянутих методів одержання полімерних мікро- та нанокомпозитів, що пов'язані з обсягом відповідних виробництв, величиною вмісту наповнювача та його вартістю. *Бібл. 24, рис. 4, табл. 1.*

**Ключові слова:** полімерні мікро- та нанокомпозити, теплофізичні властивості, теплопровідність, теплоємність, вуглецеві нанотрубки.

### Вступ

До сучасних тенденцій розвитку техніки, що мають глобальний характер, належить широке використання нанотехнологій та наноматеріалів [1–6]. Одна з перспективних галузей застосування таких технологій та матеріалів пов'язана з полімерними нанокомпозитами. Ці матеріали характеризуються унікальним спектром фізико-механічних та технологічних властивостей [7–9]. Межі застосування полімерних матеріалів розширюються також завдяки використанню різних мікрокомпозитів.

Перспективи застосування полімерних мікро- та нанокомпозитів тісно пов'язані, зокрема, з виготовленням деталей енергетичного устаткування. При цьому важливими напрямками використання даних матеріалів є застосування їх високо- та низькотеплопровідних модифікацій. Щодо першого із вказаних напрямів, то він пов'язаний, насамперед, з виготовленням теплообмінних поверхонь різного призначення, другий стосується створення трубопроводів енергетичних систем (паливо-, масло-, повітря-, водопроводів), теплозахисних шарів різного устаткування тощо.

Результати низки досліджень свідчать про те, що у залежності від методу одержання полімерних композитів останні можуть набувати властивостей однієї з зазначених модифікацій. Це визна-

чає актуальність дослідження впливу різних методів синтезу полімерних мікро- та нанокомпозитів на їхні теплофізичні характеристики.

### Аналіз літературних джерел

Експериментальним та теоретичним дослідженням теплофізичних властивостей полімерних мікро- та нанокомпозитів присвячено велику кількість робіт [10–16]. При цьому особлива увага приділяється теплопровідним властивостям полімерних композиційних матеріалів [6, 10, 12, 13, 17–21]. Так, у ряді публікацій розглядаються закономірності впливу на теплопровідність полімерних мікро- та нанокомпозитів різних визначальних параметрів, таких як тип наповнювача, його вміст та геометричні характеристики, тип матриці, технологічні режими одержання композитів тощо. До прикладу, робота [18] присвячена дослідженню зі встановлення взаємозв'язку між теплопровідністю полімерних нанокомпозитів та розмірами наповнювача — графенових нанопластинок. У [19] на основі схеми Мора-Танака здійснено прогнозування теплопровідності композитів на основі поліетилену, наповненого вуглецевими нанотрубками (ВНТ), та встановлено наявність лінійної залежності теплопровідності від вмісту наповнювача.

Окремі дослідження присвячені порівняльно-

му аналізу впливу на теплопровідність полімерних нанокompозитів методів їх одержання. Так, у [22] наведено результати експериментальних досліджень щодо визначення коефіцієнтів теплопровідності композитів на основі полікарбонату, наповнених ВНТ, мікрочастинками алюмінію для двох методів їх синтезу.

Стосовно досліджень питомої теплоємності полімерних мікро- і нанокompозитів, то вони суттєво менш численні, ніж відповідні дослідження теплопровідності. До того ж вони є більш обмеженими щодо повноти досліджень та часто мають допоміжний характер [5, 14–16, 19, 23]. Наприклад, у [5] експериментальні дослідження питомої теплоємності  $c_p$  нанокompозитів на основі бінарного розплаву солі ( $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ ), наповненого наночастинками гексагонального нітриду бора (hBN), обмежені вивченням середніх значень  $c_p$  у твердій та рідкій фазах. У [14] дослідження теплоємності нанокompозитів є супутніми при розробці нового методу розподілу компонентів різних фракцій. Роботи [15–16] стосуються вивчення поряд з питомою теплоємністю полімерних композитів низки їх термомеханічних властивостей. Прикладом досліджень, присвячених комплексному вивченню температурної, концентраційної та технологічної залежностей теплоємності полімерних нанокompозитів, може слугувати дослідження [23].

Виконаний аналіз свідчить про те, що наявні дослідження не вичерпують потреби всебічних досліджень теплофізичних властивостей полімерних мікро- та нанокompозитів. Зокрема, до важливих належать подальші дослідження цих властивостей щодо їх порівняльного аналізу при застосуванні різних методів одержання композиційних матеріалів. Значний інтерес становить також аналіз теплофізичних характеристик композитів у контексті розширення номенклатури наповнювачів та матриць.

### Мета статті

Метою роботи є встановлення за даними експериментальних досліджень ефектів впливу методів одержання полімерних мікро- та нанокompозитів з матрицею з поліаміду 6 на їх теплофізичні властивості.

### Методика виконаних досліджень

Розглядаються два методи синтезу полімер-

них композитів. Перший з них базується на змішуванні компонентів у сухому вигляді з використанням магнітної мішалки та ультразвукового диспергатора при подальшому гарячому пресуванні одержаної композиції. У другому методі змішування компонентів відбувається в розплаві полімеру із застосуванням дискового екструдера при подальшому наданні композиту необхідної форми методом гарячого пресування.

Вказані методи застосовуються для одержання композитів на основі поліаміду 6, наповнених ВНТ або мікрочастинками алюмінію чи міді. Вуглецеві нанотрубки, що використовувалися у дослідженнях, виготовлялися методом хімічного парофазного осадження. Вміст мінеральних домішок в них становив приблизно 0,1 %. Питома площа поверхні ВНТ, що визначалася абсорбцією  $\text{N}_2$ , дорівнювала  $190 \text{ м}^2/\text{г}$ . Зовнішній діаметр ВНТ, що визначався за методом малокутового розсіювання рентгенівських променів, становив 20 нм, довжина — 1–5 мкм, товщина стінок — приблизно 5 нм [24]. Мікрочастинки міді та алюмінію, що використовувалися як наповнювач, одержувалися відповідно з мідних та алюмінієвих ошурків шляхом їх розтирання у кульовому млині до утворення частинок розміром 0,5–1,0 мкм.

Коефіцієнт теплопровідності композитів визначався із застосуванням модифікованого приладу IT- $\lambda$ -400, а їх питома теплоємність — на основі методу диференціальної скануючої калориметрії з використанням приладу Перкіна-Елмера з модифікованим програмним забезпеченням від IFA Gmb Ulm. Для визначення густини досліджуваних матеріалів застосовувався метод гідростатичного зважування.

Експериментальні дослідження теплофізичних властивостей полімерних мікро- та нанокompозитів виконано при зміні масової частки наповнювачів від 0,3 до 10 % та температури в діапазоні 320–525 К.

### Результати виконаних досліджень

Рис. 1 ілюструє концентраційну залежність теплопровідності композитів на основі поліаміду 6, наповнених вуглецевими нанотрубками, мікрочастинками міді та алюмінію, для двох методів їх одержання. Як випливає з наведених даних, теплопровідність полімерних композитів, одержаних з використанням другого методу, є значно вищою. Так, при  $\omega = 10 \%$  коефіцієнти тепло-

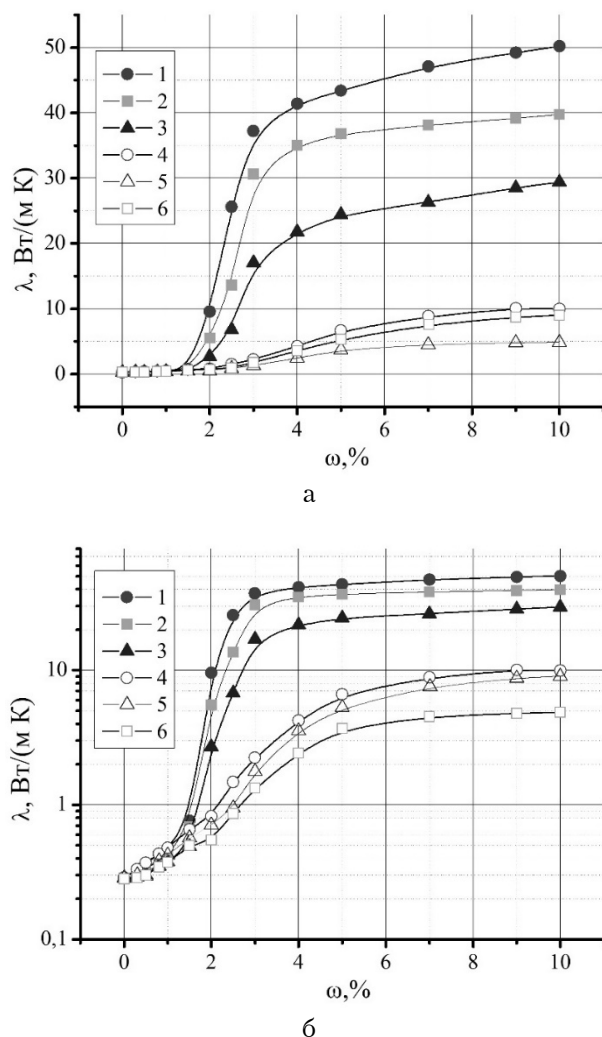


Рис. 1. Концентраційна залежність коефіцієнта теплопровідності полімерних мікро- та нанокомпозитів на основі поліаміду 6, наповнених вуглецевими нанотрубками (1, 4), мікрочастинками алюмінію (3, 6) та міді (2, 5) при різних методах їх одержання: 4, 5, 6 — метод 1; 1, 2, 3 — метод 2; а та б — лінійна та логарифмічна шкала відповідно.

Figure 1. Concentration dependence of the thermal conductivity coefficient of polymer micro- and nanocomposites based on polyamide 6 filled with carbon nanotubes (1, 4), aluminum microparticles (3, 6), and copper (2, 5) for different methods of their preparation: 4, 5, 6 — method 1; 1, 2, 3 — method 2; a and b — linear and logarithmic scale, respectively.

провідності композитів  $\lambda$ , що відповідають другому методу, досягають 29,4–50,2 Вт/(м·К), у разі застосування першого методу — лише 4,86–9,95 Вт/(м·К). Отже, для другого із застосову-

ваних методів можливе одержання порівняно високотеплопровідних полімерних композитів, використання яких є доцільним при виготовленні різного теплообмінного обладнання, орієнтованого на передачу низькопотенційної теплоти. Застосування першого з цих методів забезпечує одержання відносно низькотеплопровідних композиційних матеріалів, орієнтованих на використання для виготовлення трубопроводів різних енергетичних систем, захисних шарів з високим термічним опором для елементів енергетичного обладнання тощо.

У разі використання як першого, так і другого методів теплопровідність композитів ранжується однаковим чином, а саме: найбільшим є значення теплопровідності при наповненні поліаміду 6 вуглецевими нанотрубками, меншим — мікрочастинками міді, найменшим — мікрочастинками алюмінію. При цьому згідно з отриманими даними вплив методу одержання нанокомпозитів, що розглядаються, є суттєво різним при використанні різних наповнювачів (рис. 2). Найбільш чутливою до методу отримання є теплопровідність композитів, наповнених ВНТ, дещо менш чутливою — при їх наповненні мікрочастинками міді, найменш чутливою — при використанні як наповнювача виконаних досліджень, при  $\omega = 10\%$  коефіцієнт теплопровідності композитів, одержаних на основі другого методу, вище порівняно з його значенням для першого методу на 40,25 Вт/(м·К) при наповненні поліаміду 6 вуглецевими нанотрубками, на 30,68 Вт/(м·К) при його наповненні мікрочастинками міді та на 24,54 Вт/(м·К) при його наповненні мікрочастинками алюмінію.

Привертає увагу також факт наявності суттєвої залежності розходження коефіцієнта теплопровідності  $\delta\lambda$  композитів, одержаних різними методами, від масової частки наповнювача. Як видно з рис. 2, поведінка цих розбіжностей для усіх аналізованих композитів має загальні особливості в діапазоні зміни вмісту наповнювача від 0 до 3 %. Вони є незначними при  $\omega \leq 1,5\%$  та далі суттєво зростають зі збільшенням  $\omega$ . У межах  $3\% \leq \omega \leq 10\%$  значення  $\delta\lambda$  змінюються менш інтенсивно. При цьому в разі використання як наповнювача ВНТ та мікрочастинок алюмінію спостерігається тенденція до підвищення  $\delta\lambda$  з ростом  $\omega$ . У разі наповнення поліаміду 6 мікрочастинками міді залежність  $\omega = f(\omega)$  має локальний максимум.

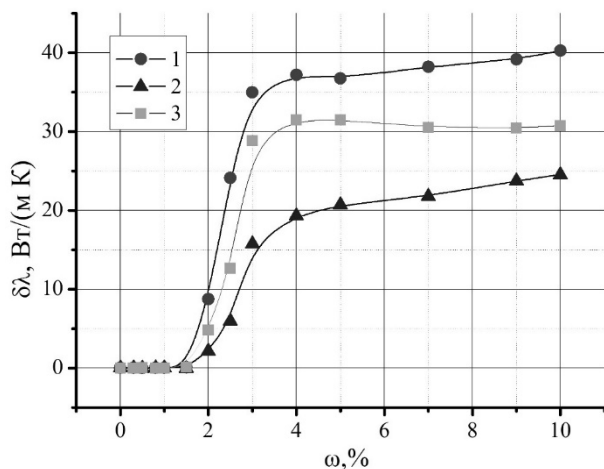


Рис. 2. Розходження коефіцієнта теплопровідності  $\delta\lambda$  композитів, одержаних на основі різних методів, від масової частки наповнювача: 1 — ВНТ; 2 — мікрочастинки алюмінію; 3 — мікрочастинки міді.

Figure 2. Difference in the coefficient of thermal conductivity  $\delta\lambda$  of composites obtained using different methods from the mass fraction of the filler: 1 — CNT; 2 — aluminum microparticles; 3 — copper microparticles.

Щодо питомої теплоємності  $c_p$  досліджуваних полімерних композитів, то згідно з даними, наведеними у табл. 1, її значення помітно відрізняються для різних методів одержання композитних матеріалів лише поблизу зони максимальних значень теплоємності, що відповідають температурі плавлення полімеру  $T_{пл} = 492$  К. Ці відмінності є найбільшими у разі використання як наповнювача ВНТ, дещо меншими — мікрочастинки

нок міді, найменшими — мікрочастинок алюмінію (рис. 3).

Порівняння ефектів впливу методів одержання досліджуваних композитів на їхню теплопровідність та питому теплоємність свідчить про те, що цей вплив більш суттєво позначається на величині коефіцієнта теплопровідності. Так, наприклад, при  $\omega = 10$  % теплопровідність композиту, наповненого ВНТ, у разі використання другого методу його одержання перевищує відповідне значення для першого методу у 5 разів, а питома теплоємність при температурі плавлення більша для першого методу лише в 1,2 рази.

На рис. 4 наведена залежність від температури густини досліджуваних композитів, одержаних двома методами. Як видно, характер цієї залежності для усіх ситуацій має загальні особливості. Густина композитів знижується з температурою, зазнаючи різкої зміни в межах температури плавлення полімеру. При цьому в усьому аналізованому температурному діапазоні густина трьох розглянутих композитів є дещо вищою у разі другого методу їх одержання. Найбільші розбіжності значень густини досліджуваних матеріалів при використанні різних методів їх одержання спостерігаються для композитів, наповнених ВНТ, а найменші — мікрочастинами алюмінію. Ці розбіжності несуттєво змінюються з температурою.

Стосовно характеру співвідношення густини композитів при використанні різних наповнювачів, то в цілому для обох методів їх одержання найбільшу густину мають композити, наповнені

Таблиця 1. Температурна залежність теплоємності поліаміду 6 (матриця) та полімерних композитів на його основі, наповнених мікрочастинами алюмінію чи міді та вуглецевими нанотрубками, при їх одержанні методами сухого змішування (метод 1) та у розплаві полімеру (метод 2) для  $\omega = 10$  %

Table 1. Temperature dependence of the heat capacity of polyamide 6 (matrix) and polymer composites based on it, filled with aluminum or copper microparticles and carbon nanotubes, when obtained by dry mixing methods (method 1) and in the polymer melt (method 2) for  $\omega = 10\%$

| Поліамід 6           | Метод | 350 К | 400 К | 450 К | 460 К | 470 К | 480 К | 485 К | 490 К | 495 К | 497 К |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Матриця              | —     | 1,16  | 1,64  | 2,20  | 2,48  | 3,07  | 4,44  | 5,41  | 6,34  | 5,77  | 3,99  |
| Наповнювач:          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| алюміній             | 1     | 1,19  | 1,62  | 2,18  | 2,45  | 3,03  | 4,38  | 5,37  | 6,25  | 5,69  | 3,94  |
|                      | 2     | 1,11  | 1,59  | 2,09  | 2,30  | 2,72  | 3,67  | 4,49  | 5,44  | 6,21  | 6,16  |
| мідь                 | 1     | 1,18  | 1,61  | 2,14  | 2,40  | 2,95  | 4,24  | 5,15  | 6,03  | 5,49  | 3,82  |
|                      | 2     | 1,12  | 1,49  | 1,88  | 2,05  | 2,37  | 3,11  | 3,76  | 4,50  | 5,10  | 5,06  |
| вуглецеві нанотрубки | 1     | 1,18  | 1,59  | 2,10  | 2,35  | 2,89  | 4,13  | 5,01  | 5,85  | 5,34  | 2,39  |
|                      | 2     | 1,11  | 1,47  | 1,83  | 1,99  | 2,30  | 3,00  | 3,61  | 4,30  | 4,87  | 4,83  |

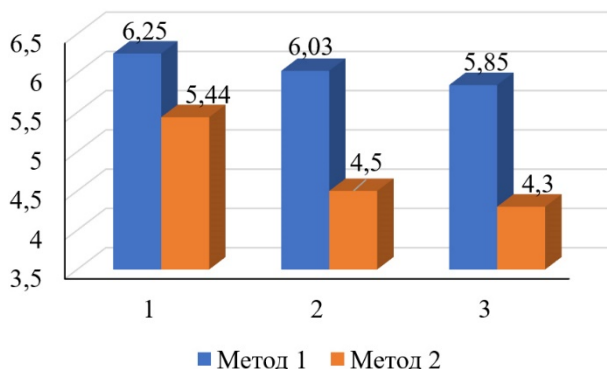


Рис. 3. Питома теплоємність полімерних мікро- та нанокompозитів на основі поліаміду 6 для різних методів їх одержання при наповненні полімеру мікрочастинками міді (1), мікрочастинками алюмінію (2) та ВНТ (3) для  $\omega = 10\%$  та температури 490 К.

Figure 3. Specific heat capacity of polymer micro- and nanocomposites based on polyamide 6 for different methods of their preparation when filling the polymer with copper microparticles (1), aluminum microparticles (2) and CNTs (3) for  $\omega = 10\%$  and a temperature of 490 K.

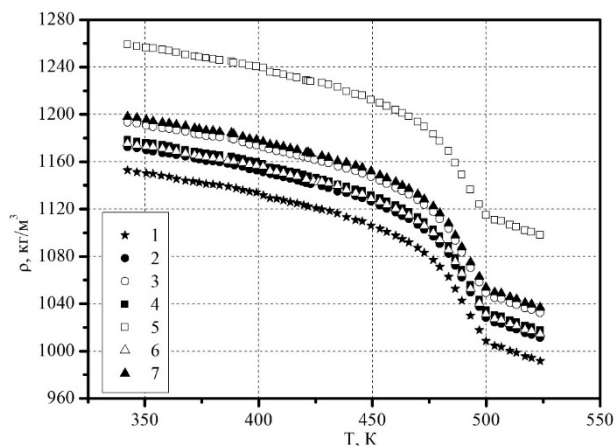


Рис. 4. Залежність від температури густини поліаміду 6 (1) та полімерних мікро- та нанокompозитів на його основі, наповнених ВНТ (4, 5), мікрочастинками алюмінію (2, 3) та мікрочастинками міді (6, 7), при  $\omega = 10\%$  для різних методів їх одержання: метод 1 (2, 4, 6); метод 2 (3, 5, 7).

Figure 4. Temperature dependence of the density of polyamide 6 (1) and polymer micro- and nanocomposites based on it, filled with CNTs (4, 5), aluminum microparticles (2, 3) and copper microparticles (6, 7), at  $\omega = 10\%$  for different methods of their preparation: method 1 (2, 4, 6); method 2 (3, 5, 7).

ВНТ, меншу — частинками міді, найменшу — частинками алюмінію. Хоча густина власне наповнювачів ранжується в іншому порядку, а саме:

густина міді становить  $8900 \text{ кг/м}^3$ ; алюмінію —  $2700 \text{ кг/м}^3$ , ВНТ —  $2200 \text{ кг/м}^3$ . Зазначений характер співвідношення густини композитів пояснюється тим, що механізми їх формування більш суттєво впливають на густину композитів, ніж власне густина наповнювачів.

Згідно з отриманими даними, вплив методу одержання композитів на їх густину в кількісному відношенні невеликий. Так, для композитів, наповнених ВНТ, застосування другого з розглянутих методів призводить до підвищення їх густини не більше ніж на  $7,8\%$ .

Отже, виконані дослідження свідчать про те, що метод одержання композитів спричиняє суттєвий вплив лише на їхній коефіцієнт теплопровідності. При цьому застосування методу, заснованому на змішуванні компонентів у сухому вигляді, значно обмежується з огляду на максимально досяжні величини даних коефіцієнтів.

Порівняльний аналіз різних аспектів розглянутих методів одержання полімерних мікро- та нанокompозитів дає можливість визначити область їх ефективного застосування. Для першого методу вона відповідає умовам невеликих за обсягом виробництва та відносно малому вмісту недороговартісних наповнювачів. Область ефективного застосування другого методу пов'язана із широкомасштабним виробництвом композитів при порівняно високих вмісті та вартості наповнювачів.

## Висновки

За результатами комплексу експериментальних досліджень встановлено ефекти впливу на теплофізичні властивості полімерних мікро- та нанокompозитів на основі поліаміду 6 двох методів їх одержання, які базуються на змішуванні компонентів у сухому вигляді (метод 1) та у розплаві полімеру (метод 2). Вказані ефекти досліджено для різних наповнювачів (ВНТ, мікрочастинки міді та алюмінію) у відносно широкому діапазоні зміни їх масової частки  $0,3\text{--}10\%$  та температури  $320\text{--}520 \text{ К}$ .

Дані виконаних досліджень показали, що:

— при застосуванні методу 2 можуть бути одержані композити з порівняно високою теплопровідністю  $\lambda \leq 50,2 \text{ Вт/(м·К)}$  при наповненні поліаміду 6 вуглецевими нанотрубками; при використанні методу 1 досяжні значення теплопровідності не перевищують  $9,95 \text{ Вт/(м·К)}$ ; при застосуванні обох методів теплопровідність композитів ранжується однаковим чином: найвищі  $\lambda$

відповідають наповненню поліаміду 6 вуглецевими нанотрубками, менші — мікрочастинками міді, найменші — мікрочастинками алюмінію;

— вплив методу одержання досліджуваних полімерних композитів на питому теплоємність суттєво поступається впливу на їхні теплопровідні властивості; значення теплоємності  $c_p$  композитів, одержаних за методом 1, може перевищувати відповідну величину для другого методу в 1,2 рази; значення  $c_p$  композитів помітно відрізняються для різних методів їх одержання лише в області їхніх максимальних величин;

— густина композитів, що розглядаються, виявляється дещо вищою при застосуванні другого методу їх одержання в усьому досліджуваному температурному діапазоні; співвідношення густини різних композитів відрізняються від співвідношення густини їхніх наповнювачів, що пояснюється більш суттєвим впливом на густину композиційних матеріалів механізмів їх формування у порівнянні з густиною наповнювачів.

Межі раціонального використання розглянутих методів одержання полімерних мікро- та нанокомпозитів визначаються обсягом їх виробництва, вартістю наповнювача, його масовою часткою тощо. Другий з досліджуваних методів має більшу перспективність при широкомасштабному виробництві композитів з дороговартісними наповнювачами, а перший — при відносно невеликих обсягах виробництва та відносно невисоких вмісті та вартості наповнювачів.

### Список літератури

1. Hurov D.I., Kravets V.Yu., Moraru V.N. The Influence of Inclination Angle on the Heat Transfer Characteristics of Miniature Two-Phase Thermosyphons with Nanofluids. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. № 4. С. 195–207. DOI: 10.33070/etars.4.2024.12.
2. Brychka S.Ya. Heat Accumulation with Montmorillonite/Carnauba Wax Nanomaterials. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 3. С. 58–69. DOI: 10.33070/etars.3.2022.04.
3. Святенко А.М., Котов В.Г., Ховавко А.И., Бондаренко Б.И., Филоненко Д.С., Небесный А.А., Вишневицкий А.А. Исследование получения углеродных нанотрубок в газовых смесях, содержащих монооксид углерода. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2016. № 4. С. 24–28. — <https://etars-journal.org/index.php/journal/article/view/205>
4. Морару В.Н. Механизм повышения и количественная оценка удельного теплового потока при кипении наножидкостей в условиях свободной конвекции. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2017. № 3. С. 25–34. DOI: 10.33070/etars.3.2017.03.
5. Aslfattahi N., Saidur R., Che Sidik N.A., Mohd Sabri M.F., Zahir M.H. Experimental Assessment of a Novel Eutectic Binary Molten Salt-based Hexagonal Boron Nitride Nanocomposite as a Promising PCM with Enhanced Specific Heat Capacity. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020. Vol. 68, № 1. P. 73–85. DOI: 10.37934/arfmts.68.1.7385.
6. Rui Wang, Congzhen Xie, Shoukang Luo, Huasong Xu, Bin Gou, Leilei Zeng. Preparation and Properties of Mwcnts-Bnnss/Epoxy Composites with High Thermal Conductivity and Low Dielectric Loss. *Journal Materials Today Communications*. 2020. Vol. 24. P. 4974–4982. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.100985. — <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492820303317>
7. Sathyanarayana S., Hübner C. Thermoplastic Nanocomposites with Carbon Nanotubes. *Structural Nanocomposites*. 2013. Chapter 2. P. 19–60. DOI: 10.1007/978-3-642-40322-4\_2.
8. Huang Y.Y., Terentjev E.M. Dispersion of Carbon Nanotubes: Mixing, Sonication, Stabilization, and Composite Properties. *Polymers*. 2012. Vol. 4. P. 275–295. DOI: 10.3390/polym4010275.
9. Müller R., Bugnicourt E., Lattore M., Marcos Latorre M., Jorda M., Sanz Y. E., Lagaron J. M., Miesbauer O., Bianchin A., Hankin S., Bölz U., Pérez G., Jesdinszki M., Lindner M., Scheuerer Z., Castelly S., Schmid M. Review on the Processing and Properties of Polymer Nanocomposites and Nanocoatings and Their Applications in the Packaging, Automotive and Solar Energy Fields. *Nanomaterials*. 2017. Vol. 7, № 4. P. 74.1–74.47. DOI: 10.3390/nano7040074.
10. Datsyuk V., Trotsenko S., Trakakis G., Boden A., Vyzas-Asimakopoulos K., Parthenios J., Galiotis C., Reich S., Papagelis K. Thermal properties enhancement of epoxy resins by incorporating polybenzimidazole nanofibers filled with graphene and carbon nanotubes as reinforcing material. *Polymer Testing*. 2019. Vol. 82. 29 p. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106317.
11. Mohammadi M., Davoodi J. The Effect of Alumina Nanoparticles on the Thermal Properties of PMMA: A Molecular Dynamics Simulation. *Molecular Simulation*. 2018. Vol. 44, Iss. 16. P. 1–8. DOI: 10.1016/10.1080/08927022.2018.1498975. — <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08927022.2018.1498975?scroll=top&needAccess=true>
12. Namsheer K., Chandra Sekhar Rout. Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *RSC Advances*, 2021. Vol. 11. P. 5659–5697. DOI: 10.1039/d0ra07800j
13. Anis, Badawi, Fllah, Hesham El, Ismail, Tawfik, Fathallah, Wael M., Khalil, A.S.G., Hemeda O.M., Badr, Yehia A. Preparation, characterization, and thermal conductivity of polyvinyl-formaldehyde/

- MWCNTs foam: A low cost heat sink substrate. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 3. P. 2934–2945. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.044.
14. Soudmand B.H., Shelesh-Nezhad K., Salimi Y.A. Combined Differential Scanning Calorimetry-Dynamic Mechanical Thermal Analysis Approach for the Estimation of Constrained Phases in Thermoplastic Polymer Nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Vol. 137, № 41. Article 49260. DOI: 10.1002/app.49260. — <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.49260>
15. Sharifzadeh E., Cheraghi K. Temperature-affected mechanical properties of polymer nanocomposites from glassy-state to glass transition temperature. *Mechanics of Materials*. 2021. Vol. 160. Article 103990. DOI: 10.1016/j.mechmat.2021.103990. — <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167663621002234>
16. Reguieg F., Ricci L., Bouyacoub N., Belbachir M., Bertoldo M. Thermal characterization by DSC and TGA analyses of PVA hydrogels with organic and sodium MMT. *Polymer Bulletin*. 2020. Vol. 77. P. 929–948. DOI: 10.1007/s00289-019-02782-3. — <https://www.springerprofessional.de/en/thermal-characterization-by-dsc-and-tga-analyses-of-pva-hydrogel/16666750>
17. Yinhang Zhang, Jang Rak Choi, Soo-Jin Park. Thermal conductivity and thermo-physical properties of nanodiamond-attached exfoliated hexagonal boron nitride/epoxy nanocomposites for microelectronics. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 101. P. 227–236. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.06.019.
18. Hyun Su Kim, Hyun Sung Bae, Jaesang Yu, Seong Yun Kim. Thermal Conductivity of Polymer Composites with the Geometrical Characteristics of Graphene Nanoplatelets. *Scientific Reports*, 2016. Vol. 6. Article 26825. DOI: 10.1038/srep26825.
19. Arora G., Pathak H. Numerical study on the thermal behavior of polymer nanocomposites. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1240. Article 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1240/1/012050. — [file:///D:/Downloads/Numerical\\_study\\_on\\_the\\_thermal\\_behavior\\_of\\_polymer.pdf](file:///D:/Downloads/Numerical_study_on_the_thermal_behavior_of_polymer.pdf)
20. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Navrodska R., Izvorska D., Korzhyk V., Lazarenko M., Koseva N. Study of the temperature regime effect of obtaining nanocomposites on their heat-conducting properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4, № 5. P. 21–26. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.236915.
21. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii J., Meranova N., Prokopov V., Babak V., Korzhyk V., Izvorska D., Lazarenko M., Makhrovskiy V. Influence on the thermophysical properties of nanocomposites of the duration of mixing of components in the polymer melt. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 2, № 5. P. 25–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.255830.
22. Фіалко Н.М., Динжос Р.В., Мєранова Н.О., Шєренковський Ю.В., Навродська Р.А. Теплопровідність полімерних мікро- і нанокомпозитів на основє полікарбоната при різних методах їх отримання. *Технологічніє системи*. 2018. № 1. С. 64–69. — <http://dx.doi.org/10.29010/082.8>
23. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Aleshko S., Izvorska D., Korzhyk V., Lazarenko M., Mankus I., Nedbaievska L. Establishment of regularities of influence on the specific heat capacity and temperature conductivity of polymer nanocomposites of a complex of defining parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6, № 12. P. 34–39. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245274.
24. Лємєш Н.В., Лысенков Э.А., Гомза Ю.П., Клепко В.В., Хаврусь В.А., Трипольский А.И., Стрижак П.Е. Структура многослойных углеродных нанотрубок, полученных каталитическим разложением этилена на наночастицах никеля. *Український хімічний журнал*. 2010. Т. 76, № 5. С. 29–36. — <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/185969/07-Lemesh.pdf?sequence=1>

Надійшла до редакції 29.01.2025

**Fialko N.M.<sup>1</sup>**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0003-0116-7673, **Meranova N.O.<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0001-7223-8753, **Korzhik V.M.<sup>2</sup>**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0001-9106-8593, **Babak V.P.<sup>3</sup>**, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0002-9066-4307, **Sherenkovskiy Ju.V.<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0003-1765-7319, **Lazarenko M.M.<sup>4</sup>**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, ORCID: 0000-0003-0719-3522, **Koseva N.C.<sup>5</sup>**, Candidate of Chemical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0002-8445-8953, **Navrodska R.A.<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0001-7476-2962, **Polozenko N.P.<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0002-0272-5385, **Dinzhos R.V.<sup>5, 6</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0003-1105-2642

<sup>1</sup> **Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine**  
2a, Marii Kapnist Str., 03057 Kyiv, Ukraine, e-mail: nmfialko@ukr.net

<sup>2</sup> **E. O. Paton Institute of Electric Welding of the National Academy of Sciences of Ukraine**

11, Kazimyra Malevicha Str., 03150 Kyiv, Ukraine, e-mail: vnkorzhik@gmail.com

<sup>3</sup> **General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine**  
172, Antnovycha Str., 03150 Kyiv, Ukraine, e-mail: vdoe@ukr.net

<sup>4</sup> **Taras Shevchenko National University of Kyiv**  
64/13, Volodymyrska Str., 01601 Kyiv, Ukraine, e-mail: maxs@univ.kiev.ua

<sup>5</sup> **Polymer Institute of the Bulgarian Academy of Sciences**  
Block 103, Academician Georgiy Bonchev Str., 1113 Sofia, Bulgaria, e-mail: dinzhosrv@gmail.com

<sup>6</sup> **Petro Mohyla Black Sea National University**  
10, 68 Desantnykiv Str., 54003 Mykolaiv, Ukraine, e-mail: dinzhosrv@gmail.com

## Regularities of influence on thermophysical properties of polymer micro- and nanocomposites of their production methods

**Abstract.** The article presents the results of a series of experimental studies of the thermophysical properties of polymer micro- and nanocomposites when using methods for obtaining them based on mixing components in dry form or in a polymer melt. The study was performed for composites based on polyamide 6 when filling it with carbon nanotubes, copper and aluminum microparticles. During the studies, the mass fraction of the filler varied from 0.3 to 10 %, the temperature of the composites — from 320 to 525 K. The article presents data on the effects of the methods for obtaining polymer composite materials on their heat conductivity, specific heat capacity and density. It is shown that using the method based on mixing components in a polymer melt, polymer micro- and nanocomposites with higher heat conductivity can be obtained. At the same time, for both methods, the same ranking of the heat conductivity of the composites under consideration is realized depending on their filler. Namely, the highest values of heat conductivity coefficients are found for polyamide 6 filled with carbon nanotubes, the lowest ones with copper microparticles, and the lowest ones with aluminum microparticles. It has been established that the influence of the methods for obtaining the studied composites has

a more significant effect on the value of their heat conductivity coefficient than the values of specific heat capacity and density. It has been shown that the discrepancies in the value of specific heat capacity of composites obtained using different methods are noticeable only at temperatures close to the melting point of the polymer. At the same time, the corresponding discrepancies in the values of the density of the studied polymer micro- and nanocomposites change insignificantly with temperature. Information is provided on the limits of rational use of the considered methods for obtaining polymer micro- and nanocomposites associated with the volume of corresponding production, the content of the filler and its cost. *Bibl. 70, Fig. 4, Tab. 1.*

**Keywords:** polymer micro- and nanocomposites, thermophysical properties, heat conductivity, heat capacity, carbon nanotubes.

## References

1. Hurov, D.I., Kravets, V.Yu., Moraru, V.N. The Influence of Inclination Angle on the Heat Transfer Characteristics of Miniature Two-Phase Thermosyphons with Nanofluids. *[Energy Technologies and Resource Saving]*. 2024. No. 4. pp. 195–207. DOI: 10.33070/etars.4.2024.12.
2. Brychka, S.Ya. Heat Accumulation with Montmorillonite/Carnauba Wax Nanomaterials. *[Energy Technologies and Resource Saving]*. 2022. No. 3. pp. 58–69. DOI: 10.33070/etars.3.2022.04.
3. Sviatenko, O.M., Kotov, V.G., Khovavko, A.I., Bondarenko, B.I., Filonenko, D.S., Nebesnyi, A.A., Vishnevsky, A.A. [Research of the Technology of Carbon Nanotubes Production in Gas Mixtures Contained Carbon Monoxide]. *[Energy Technologies and Resource Saving]*. 2016. No. 4. pp. 24–28. — <https://etars-journal.org/index.php/journal/article/view/205> (Rus.)
4. Moraru, V.N. [The Mechanism of Raising and Quantification of Specific Heat Flux at Boiling of Nanofluids in Free Convection Conditions]. *[Energy Technologies and Resource Saving]*. 2017. No. 3. pp. 25–34. DOI: 10.33070/etars.3.2017.03. (Rus.)
5. Aslfattahi, N., Saidur, R., Che Sidik, N.A., Mohd Sabri, M.F., Zahir, M.H. Experimental Assessment of a Novel Eutectic Binary Molten Salt-based Hexagonal Boron Nitride Nanocomposite as a Promising PCM with Enhanced Specific Heat Capacity. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020. 68 (1). pp. 73–85. DOI: 10.37934/arfmts.68.1.7385.
6. Rui Wang, Congzhen Xie, Shoukang Luo, Huasong Xu, Bin Gou, Leilei Zeng. Preparation and Properties of Mwcnts-Bnnss/Epoxy Composites with High Thermal Conductivity and Low Dielectric Loss. *Journal Materials Today Communications*. 2020. Vol. 24. pp. 4974–4982. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.100985. — <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492820303317>
7. Sathyanarayana, S., Hübner, C. Thermoplastic Nanocomposites with Carbon Nanotubes. *Structural Nanocomposites*. 2013. Chapter 2. pp. 19–60. DOI: 10.1007/978-3-642-40322-4\_2.
8. Huang, Y.Y., Terentjev, E.M. Dispersion of Carbon Nanotubes: Mixing, Sonication, Stabilization, and Composite Properties. *Polymers*. 2012. Vol. 4. pp. 275–295. DOI: 10.3390/polym4010275.
9. Müller, R., Bugnicourt, E., Lattore, M., Marcos Latorre M., Jorda, M., Sanz, Y. E., Lagaron, J. M., Miesbauer, O., Bianchin, A., Hankin, S., Bözl, U., Pérez, G., Jesdinszki, M., Lindner, M., Scheuerer, Z., Castelly, S., Schmid, M. Review on the Processing and Properties of Polymer Nanocomposites and Nanocoatings and Their Applications in the Packaging, Automotive and Solar Energy Fields. *Nanomaterials*. 2017. 7 (4). pp. 74.1–74.47. DOI: 10.3390/nano7040074.
10. Datsyuk, V., Trotsenko, S., Trakakis, G., Boden, A., Vyzas-Asimakopoulos, K., Parthenios, J., Galiotis, C., Reich, S., Papagelis, K. Thermal properties enhancement of epoxy resins by incorporating polybenzimidazole nanofibers filled with graphene and carbon nanotubes as reinforcing material. *Polymer Testing*. 2019. Vol. 82. 29 p. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106317.
11. Mohammadi, M., Davoodi, J. The Effect of Alumina Nanoparticles on the Thermal Properties of PMMA: A Molecular Dynamics Simulation. *Molecular Simulation*. 2018. Vol. 44, Iss. 16. pp. 1–8. DOI: 10.1016/10.1080/08927022.2018.1498975. — <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08927022.2018.1498975?scroll=top&needAccess=true>
12. Namsheer, K., Chandra Sekhar Rout. Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *RSC Advances*. 2021. Vol. 11. pp. 5659–5697. DOI: 10.1039/d0ra07800j.rsc.li/rsc-advances.
13. Anis, Badawi, Fllah, Hesham El, Ismail, Tawfik, Fathallah, Wael M., Khalil, A.S.G., Hemeda, O.M., Badr, Yehia A. Preparation, characterization, and thermal conductivity of polyvinyl-formaldehyde/MWCNTs foam: A low cost heat sink substrate. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 3. pp. 2934–2945. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.044.
14. Soudmand, B.H., Shelesh-Nezhad, K., Salimi, Y.A. Combined Differential Scanning Calorimetry-Dynamic Mechanical Thermal Analysis Approach for the Estimation of Constrained Phases in Thermoplastic Polymer Nanocomposites. *Journal of Applied Polymer*

- Science*. 2020. 137 (41). Article 49260. DOI: 10.1002/app.49260. — <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.49260>
15. Sharifzadeh, E., Cheraghi, K. Temperature-affected mechanical properties of polymer nanocomposites from glassy-state to glass transition temperature. *Mechanics of Materials*. 2021. Vol. 160. Article 103990. DOI: 10.1016/j.mechmat.2021.103990. — <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167663621002234>
16. Reguieg, F., Ricci, L., Bouyacoub, N., Belbachir, M., Bertoldo, M. Thermal characterization by DSC and TGA analyses of PVA hydrogels with organic and sodium MMT. *Polymer Bulletin*. 2020. Vol. 77. pp. 929–948. DOI: 10.1007/s00289-019-02782-3. — <https://www.springerprofessional.de/en/thermal-characterization-by-dsc-and-tga-analyses-of-pva-hydrogel/16666750>
17. Yinhang Zhang, Jang Rak Choi, Soo-Jin Park. Thermal conductivity and thermo-physical properties of nanodiamond-attached exfoliated hexagonal boron nitride/epoxy nanocomposites for microelectronics. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 101. pp. 227–236. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.06.019.
18. Hyun Su Kim, Hyun Sung Bae, Jaesang Yu, Seong Yun Kim. Thermal Conductivity of Polymer Composites with the Geometrical Characteristics of Graphene Nanoplatelets. *Scientific Reports*, 2016. Vol. 6. Article 26825. DOI: 10.1038/srep26825.
19. Arora, G., Pathak, H. Numerical study on the thermal behavior of polymer nanocomposites. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1240. Article 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1240/1/012050. — [file:///D:/Downloads/Numerical\\_study\\_on\\_the\\_thermal\\_behavior\\_of\\_polymer.pdf](file:///D:/Downloads/Numerical_study_on_the_thermal_behavior_of_polymer.pdf)
20. Fialko, N., Dinzhos, R., Sherenkovskii, Ju., Meranova, N., Navrodska, R., Izvorska, D., Korzhyk, V., Lazarenko, M., Koseva, N. Study of the temperature regime effect of obtaining nanocomposites on their heat-conducting properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4 (5). pp. 21–26. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.236915.
21. Fialko, N., Dinzhos, R., Sherenkovskii, J., Meranova, N., Prokopov, V., Babak, V., Korzhyk, V., Izvorska, D., Lazarenko, M., Makhrovskiy, V. Influence on the thermophysical properties of nanocomposites of the duration of mixing of components in the polymer melt. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 2 (5). pp. 25–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.255830.
22. Fialko, N.M., Dinzhos, R.V., Meranova, N.O., Sherenkovskiy, Yu.V., Navrodska, R.A. [Thermal conductivity of polymer micro- and nanocomposites based on polycarbonate using various methods of their production]. *[Technological systems]*. 2018. No. 1. pp. 64–69. — <http://dx.doi.org/10.29010/082.8> (Rus.)
23. Fialko, N., Dinzhos, R., Sherenkovskii, Ju., Meranova, N., Alosko, S., Izvorska, D., Korzhyk, V., Lazarenko, M., Mankus, I., Nedbaievska, L. Establishment of regularities of influence on the specific heat capacity and temperature conductivity of polymer nanocomposites of a complex of defining parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 6 (12). pp. 34–39. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245274.
24. Lemesh, N.V., Lysenkov, E.A., Gomza, Yu.P., Klepko, V.V., Khavrus', V.A., Tripol'skii, A.I., Strizhak, P.E. [Structure of multilayer carbon nanotubes obtained by catalytic decomposition of ethylene on nickel nanoparticles]. *[Ukrainian Chemical Journal]*. 2010. 76 (5). pp. 29–36. — <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/185969/07-Lemesh.pdf?sequence=1> (Rus.)

Received January 29, 2025