

УДК 621.894

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/34>**Шохін М.В.**

Дніпровський державний технічний університет

**Гуляєв В.М.**

Дніпровський державний технічний університет

**Коваленко А.Л.**

Дніпровський державний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛАСТОМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ ІЗ МІНЕРАЛЬНИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ

У роботі було досліджено теплопровідність систем на основі кремнійорганічного полімеру та мінеральних наповнювачів залежно від хімічного складу, кількості та дисперсності останніх. Представлено результати дослідження впливу порошкоподібних мінеральних наповнювачів на теплофізичні властивості вулканізованих композицій на основі низькомолекулярного диметилсилоксанового каучуку марки А в температурному інтервалі 50–300 °С. В якості наповнювачів використовували оксид цинку (ZnO), ферум(III) оксид ( $Fe_2O_3$ ), оксид титану ( $TiO_2$ ) і оксид кремнію ( $SiO_2$ ) різної дисперсності (кварц і «біла сажка»). Встановлено, що з підвищенням температури коефіцієнт теплопровідності ненаповненого еластомеру зменшується внаслідок переходу полімеру у високоеластичний стан, що супроводжується збільшенням вільного об'єму між молекулярними ланцюгами та зростанням внутрішнього теплового опору. Аналіз температурної залежності питомої теплоємності показав наявність екзотермічних процесів при температурах вище 220 °С, пов'язаних із виділенням низькомолекулярних фракцій полімеру. Виявлено суттєвий вплив адсорбованої вологи на теплові характеристики композицій: процеси десорбції та випаровування води за температур понад 100 °С спричиняють підвищення теплоємності матеріалу. Встановлено, що додавання мінеральних наповнювачів забезпечує зростання коефіцієнта теплопровідності еластомерів, причому для всіх систем спостерігається майже лінійна залежність теплопровідності від температури. Найвищі значення цього показника мають композиції, наповнені оксидом цинку, завдяки його значній теплопровідності. Зі збільшенням вмісту наповнювача до 15 об.% теплопровідність зростає практично лінійно, тоді як подальше підвищення концентрації призводить до зростання контактного опору на межі еластомер–наповнювач і уповільнення теплопередачі. Встановлено, що дисперсність частинок наповнювача є важливим чинником, який визначає ефективність перенесення теплоти: зі зменшенням розміру частинок та збільшенням кількості активних центрів на їх поверхні знижується контактний опір і формується більш розвинена система теплопровідних містків у полімерній матриці. Отримані результати свідчать про можливість цілеспрямованого керування теплофізичними характеристиками еластомерів шляхом вибору типу та дисперсності мінеральних наповнювачів, що має практичне значення для створення термостійких і теплопровідних полімерних матеріалів нового покоління.

**Ключові слова:** еластомер, мінеральний наповнювач, коефіцієнт температуропровідності, теплоємність, дисперсність.

**Постановка проблеми.** При виготовленні герметиків, гум та інших матеріалів на основі кремнійорганічних еластомерів застосовують високодисперсні мінеральні наповнювачі, в тому числі оксиди металів. Введення наповнювачів істотно змінює не тільки механічні та хімічні, але й теплофізичні властивості вулканізацій типу СКТН [1, с. 36]. На тепло-

фізичні властивості вулканізацій впливає характер взаємодії еластомеру з наповнювачем, що визначається хімічною природою, дисперсністю, формою і активністю поверхні частинок наповнювача. При наявності активних центрів на поверхні частинок і реакційноздатних груп в молекулі еластомеру між ними можуть виникати хімічні зв'язки [2, с. 123].

Дані про температурну залежність теплофізичних властивостей матеріалів на основі кремнійорганічних еластомерів обмежені, доступні, в основному, значення коефіцієнта теплопровідності деяких кремнійорганічних гум [3, с. 102]. Відомо, що теплопровідність гуми мало залежить від типу кремнійорганічного каучуку.

Вивчення та аналіз залежності теплофізичних властивостей наповнених еластичних кремнійорганічних матеріалів у температурному інтервалі їх працездатності, верхня межа якого досягає 300 °С, можуть виявитися корисними для пояснення структури композиційних матеріалів та оцінки характеру взаємодії наповнювачів з еластомером. Літературні дані про температурну залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалів на основі кремнійорганічних еластомерів вкрай обмежені. У роботі [4, с. 115] наводяться його значення для деяких кремнійорганічних гум; там же показано, що вид кремнійорганічного каучуку практично не впливає на теплопровідність гуми і остання повністю залежить від типу наповнювача.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Еластомери мають відносно низьку теплопровідність через аморфну структуру полімерної матриці; це обмежує їх застосування в компонентах, де важлива тепловіддача або термостабільність. Додавання мінеральних наповнювачів – традиційний підхід для модифікації механічних, електричних і теплофізичних властивостей композитів на основі каучуків і силіконів [5, с. 3555].

ZnO (оксид цинку) часто використовується в складах еластомерів не тільки як наповнювач, але й як активатор вулканізації; він впливає на кінетику сушки/зшивання та на кінцеву структуру сітки, що опосередковано змінює теплопровідність та термостійкість матеріалу. Додатково, при введенні ZnO у вигляді наночастинок спостерігають підвищення теплопровідності й стабільності властивостей після термічного старіння за рахунок кращої передачі тепла по наповнювачевих ланцюгах та збільшення щільності зшитої сітки [6, с. 5289; 7, с. 125].

TiO<sub>2</sub> (оксид титану) часто застосовуваний білий наповнювач, що збільшує жорсткість і може підвищувати теплопровідність полімерних матриць, особливо в нано- або субмікронному розмірі частинок. Крім того, TiO<sub>2</sub> впливає на термостійкість та оптичні властивості (наприклад, відбиття в ІЧ-діапазоні), що важливо для застосувань із тепловим менеджментом та сонячним випромінюванням. Однак агрегація частинок і фотокаталітична активність (анатазна фаза) можуть

вимагати модифікації поверхні (наприклад, SiO<sub>2</sub>-оболонкою) для уникнення деградації полімеру [8, с. 100449; 9, с. 20119].

SiO<sub>2</sub> (оксид кремнію) широко застосовується для поліпшення механічних і термофізичних властивостей еластомерів: тонкодисперсна силіка підвищує модуль пружності, зменшує газопроникність та сприяє формуванню теплопровідних шляхів при достатній концентрації і гарному змочуванні матрицею. Покриття поверхні еластомерів шаром SiO<sub>2</sub> також застосовують для покращення дисперсії та зниження небажаної хіміко-фотокаталітичної активності [10, с. 3362; 11, с. 3767].

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ферум(III) оксид) зустрічається в гумових сумішах рідше, ніж SiO<sub>2</sub> або ZnO, але використовується коли потрібні підвищена щільність, магнітні властивості або додаткове підвищення термостійкості. Вплив Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на теплопровідність залежить від розміру частинок та їх розподілу – при добрій дисперсії оксид заліза здатен підвищити локальні шляхи теплопровідності, але можливі й негативні ефекти через агрегацію [12, с. 277; 13, с. 29673].

Синергія наповнювачів і фактори, що впливають на теплові характеристики. Ключові параметри: об'ємна частка наповнювача, розмір і форма частинок, адгезія «напівматриця», поверхнева модифікація (силанізація, SiO<sub>2</sub>-коутинг), сумішеві системи (комбінації оксидів або додавання вуглецевих наповнювачів). Правильне поєднання (наприклад, SiO<sub>2</sub> для дисперсії + TiO<sub>2</sub> або ZnO для підвищення провідності) часто дає кращий результат, ніж одиночний наповнювач. Також важливі технологічні чинники – процес перемішування, температура вулканізації та можливість формування «кондуктивних ланцюгів» частинок усередині композиту [14, с. 106466].

**Постановка завдання.** Метою даної роботи було дослідження впливу мінеральних наповнювачів різного хімічного складу та їх вмісту на теплопровідність вулканізованих композицій на основі низькомолекулярного диметилполісилоксанового каучуку СКТН марки А в температурному інтервалі 20–300 °С. Вибір наповнювачів визначався головним чином їх застосовністю в гумах, герметиках і компаундах на основі цього каучуку (ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>), а також різницею дисперсності при практично однаковому хімічному складі (пилоподібний кварц і «біла сажа»). З огляду на те, що досліджувані наповнювачі мають різну щільність, визначення їх впливу на теплопровідність композицій проводилося при однакових об'ємних частках.

**Виклад основного матеріалу.** Основні фізико-хімічні характеристики наповнювачів, які були досліджені в даній роботі, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1  
**Фізико-хімічні характеристики деяких наповнювачів**

Наповнювач	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Площа питомої поверхні, м <sup>2</sup> /г
SiO <sub>2</sub> («біла сажа»)	2200	47
SiO <sub>2</sub> (кварц)	2200	5
ZnO	5600	16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5700	-
TiO <sub>2</sub>	4300	47

У роботі були використані наступні позначення:  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності композицій;  $\lambda_1, \lambda_2$  – коефіцієнти теплопровідності сполучного і включень відповідно;  $t$  – температура;  $n$  – об'ємна концентрація наповнювача;  $v = \lambda_2/\lambda_1$ .

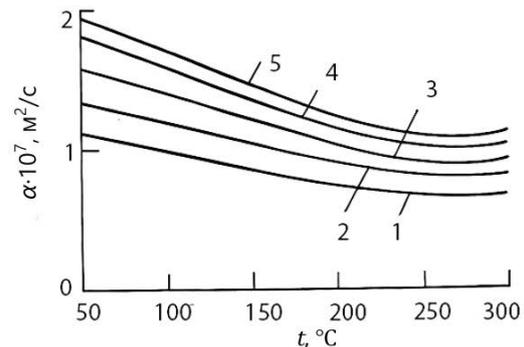
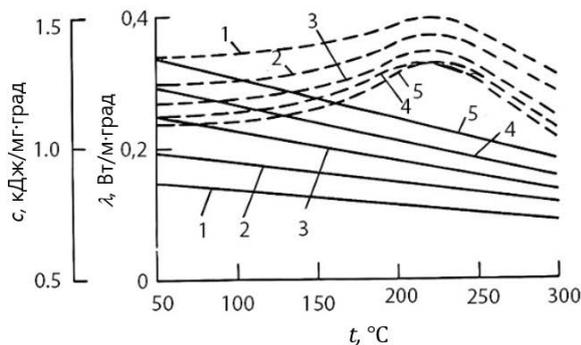
Коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , питому теплоємність  $c$  і коефіцієнт температуропровідності  $\alpha$  композицій визначали стандартною методикою [3, с. 122].

Досліди показали, що зміна коефіцієнта теплопровідності ненаповненого вулканітату СКТН і його композицій з різним об'ємним вмістом наповнювача зі збільшенням температури добре апроксимується лінійною залежністю (рис. 1–5), що узгоджується з літературними даними [2, с. 53].

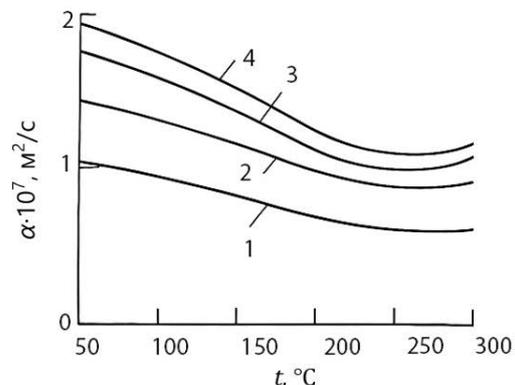
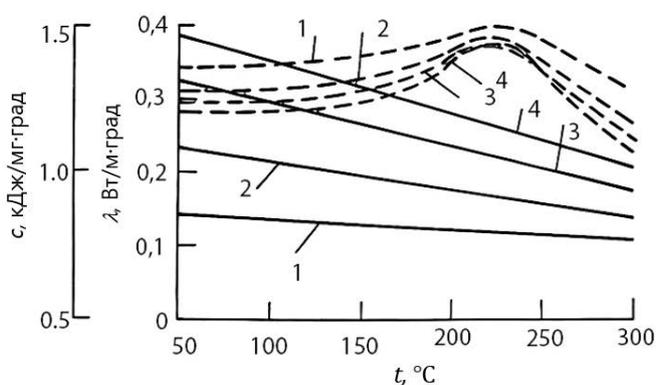
Зменшення коефіцієнта теплопровідності матеріалу, що перебуває у високоеластичному стані, зі зростанням температури можна пояснити збільшенням відстані між молекулярними ланцюгами еластомеру (вільного об'єму) і, відповідно, зростанням внутрішнього теплового опору.

Характер зміни питомої теплоємності ненаповненого вулканітату СКТН при температурах вище 220 °С свідчить про перебіг екзотермічних процесів, пов'язаних із виділенням низькомолекулярних фракцій полімеру. При введенні наповнювачів (окрім «білої сажі») максимальні значення питомої теплоємності спостерігаються за тих самих температур, що й для ненаповненого вулканітату.

На температурну залежність питомої теплоємності досліджуваних композицій істотно впливає адсорбована волога. Для визначення її кількості



**Рис. 1.** Вплив температури на коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  (суцільна лінія), теплоємність  $c$  (пунктирна лінія) та коефіцієнт температуропровідності  $\alpha$  композицій на основі СКТН з різним об'ємним вмістом TiO<sub>2</sub>: 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %



**Рис. 2.** Вплив температури на коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  (суцільна лінія), теплоємність  $c$  (пунктирна лінія) та коефіцієнт температуропровідності  $\alpha$  композицій на основі СКТН з різним об'ємним вмістом ZnO: 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %.

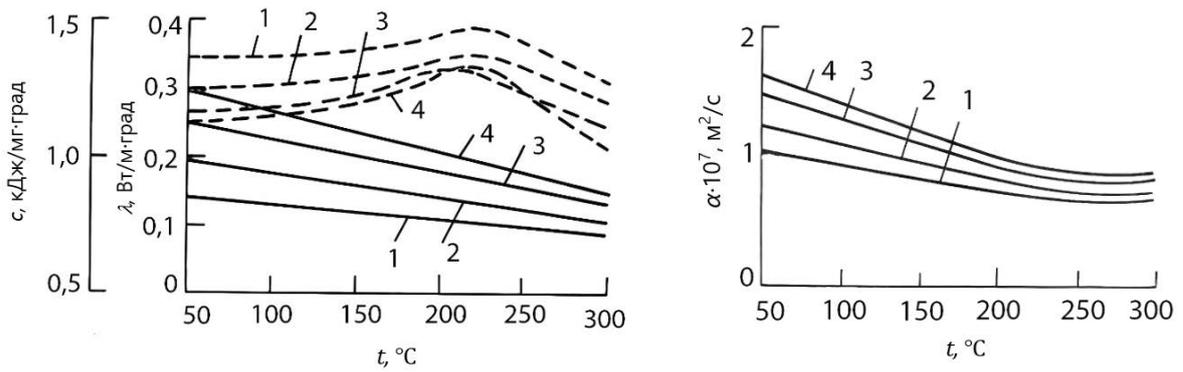


Рис. 3. Вплив температури на коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  (суцільна лінія), теплоємність  $c$  (пунктирна лінія) та коефіцієнт температуропровідності  $\alpha$  композицій на основі СКТН з різним об'ємним вмістом  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %

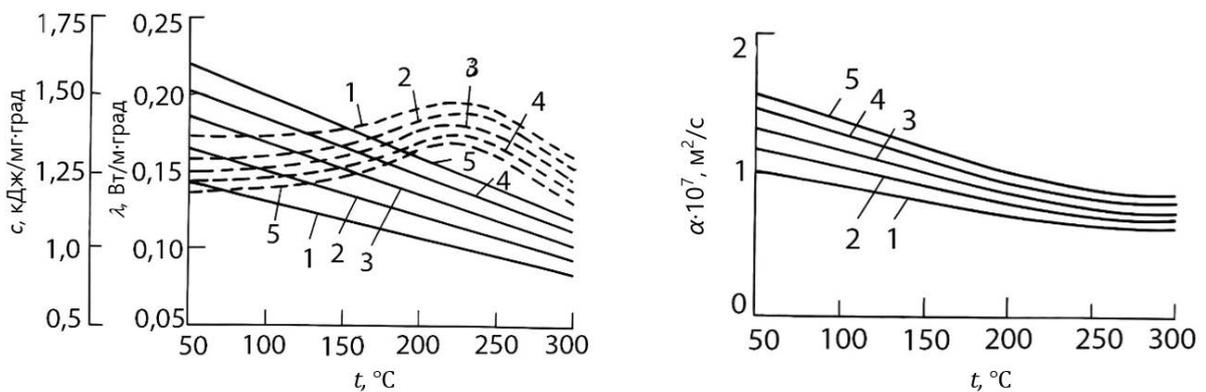


Рис. 4. Вплив температури на коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  (суцільна лінія), теплоємність  $c$  (пунктирна лінія) та коефіцієнт температуропровідності  $\alpha$  композицій на основі СКТН з різним об'ємним вмістом  $\text{SiO}_2$  (кварц): 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %

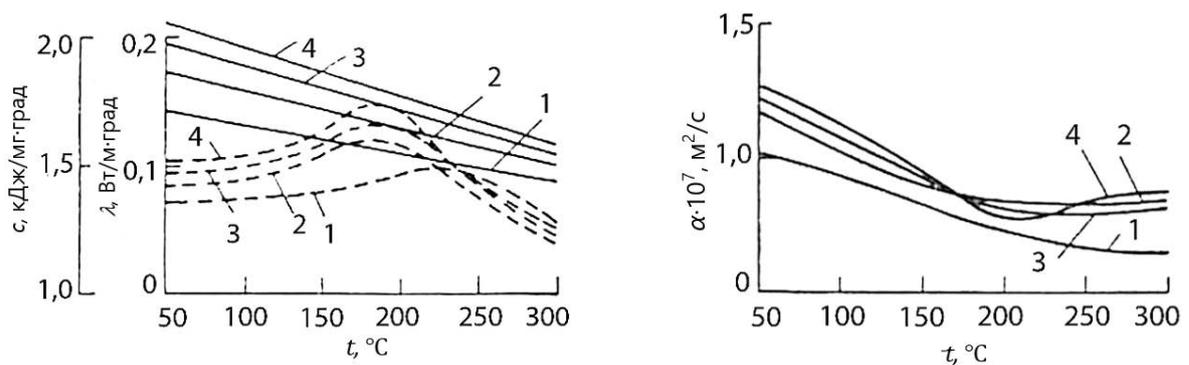


Рис. 5. Вплив температури на коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  (суцільна лінія), теплоємність  $c$  (пунктирна лінія) та коефіцієнт температуропровідності  $\alpha$  композицій на основі СКТН з різним об'ємним вмістом  $\text{SiO}_2$  («біла сажа»): 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %

зразки порошкоподібного наповнювача (~1 г) поміщали у бюкси та зважували на аналітичних терезах із точністю  $\pm 0,0001$  г. Бюкси прожарювали в печі при  $300^\circ\text{C}$  упродовж 30 хв, закривали притертою кришкою і знову зважували після

охолодження. Після цього бюкси відкривали та повторно зважували через 24 год. За ступенем відновлення початкової маси визначали кількість вологи, адсорбованої порошкоподібними наповнювачами (таблиця 2).

Таблиця 2

## Орієнтовний вміст води у досліджених наповнювачах

Наповнювач	Втрати маси при прожарюванні, %	Відновлення початкової маси, %
SiO <sub>2</sub> («біла сажа»)	6,56	99,9
SiO <sub>2</sub> (кварц)	0,25	99,8
ZnO	3,58	98,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,13	99,5
TiO <sub>2</sub>	1,21	99,7

Оскільки після прожарювання початкова маса зразка відновлюється майже повністю, можна зробити висновок, що під час термообробки випаровується волога, адсорбована на поверхні частинок наповнювача. Найбільш виражену здатність до адсорбції (до 6,5 %) має «біла сажа». Процеси випаровування та десорбції води, що відбуваються у композиціях за температур вище 100 °С, спричиняють підвищення їх теплоємності. Чим більше випарованої води, тим значніша зміна теплоємності композицій.

Температуропровідність досліджених систем (за винятком композицій, наповнених «білою сажею») у температурному діапазоні до 200 °С зменшується; при цьому її температурна залежність є близькою до лінійної, що апроксимується рівнянням типу:

$$\lambda = at + b, \quad (1)$$

де  $a$  і  $b$  – сталі коефіцієнти.

На рис. 6 показано вплив вмісту різних мінеральних наповнювачів на коефіцієнт теплопровідності систем на основі СКТН. Зі збільшенням кількості наповнювача до 15 об.% на 100 об.% СКТН теплопровідність композицій зростає практично лінійно. При подальшому підвищенні концентрації через збільшення в'язкості системи зростає контактний опір на межі еластомер–наповнювач, що уповільнює подальше зростання теплопровідності.

Дисперсність наповнювача також впливає на величину коефіцієнта теплопровідності композиції. Із підвищенням дисперсності зростає роль поверхневих явищ на межі поділу фаз. Збільшення кількості активних центрів на поверхні частинок наповнювача сприяє утворенню хімічних зв'язків у системі, внаслідок чого контактний опір на межі фаз зменшується, а коефіцієнт теплопровідності – зростає.

Визначення коефіцієнта теплопровідності проводили при монотонному підвищенні температури зразків. Експериментальна установка являла

собой плоский калориметр із двома ідентичними зразками, розташованими симетрично між двома плоскими нагрівачами та центральним калориметричним елементом [15, с. 255]. Відносна похибка вимірювання коефіцієнта теплопровідності становила 6–8 %.

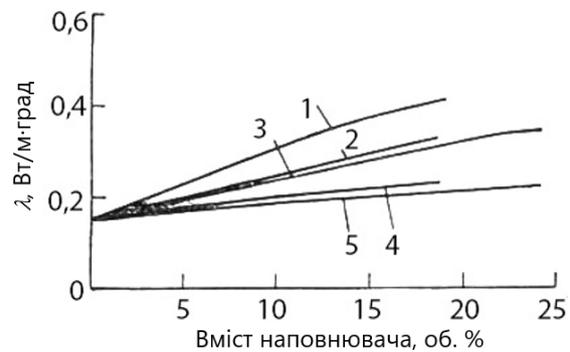


Рис. 6. Вплив вмісту мінерального наповнювача на коефіцієнт теплопровідності композицій СКТН: 1 – ZnO; 2 – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – TiO<sub>2</sub>; 4 – SiO<sub>2</sub> («біла сажа»); 5 – SiO<sub>2</sub> (кварц)

На рис. 7 наведено значення коефіцієнта теплопровідності ненаповненого вулканітату СКТН та композицій із різним вмістом оксиду титану. У досліджуваному температурному інтервалі зміна коефіцієнта теплопровідності добре апроксимується лінійною функцією від температури.

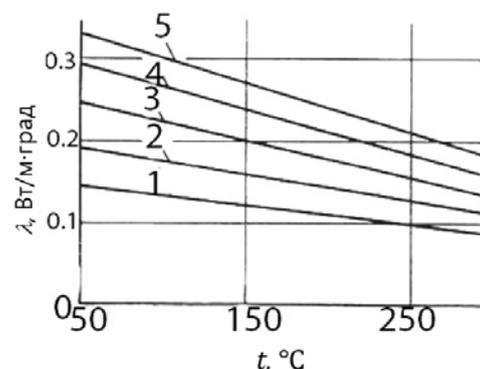


Рис. 7. Залежність коефіцієнта теплопровідності композицій, наповнених TiO<sub>2</sub>, від температури: 1 – без наповнювача; 2 – 6 об. %; 3 – 12 об. %; 4 – 18 об. %; 5 – 24 об. %

Температурна залежність теплопровідності композицій з іншими наповнювачами також є лінійною. Подібний характер температурної залежності теплопровідності силіконових каучуків відзначено в роботі [11, с. 3767].

Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури можна пояснити, використовуючи модель, запропоновану в [16, с. 133]. Встановлено, що при підвищенні температури для поліме-

рів у склоподібному стані теплопровідність дещо зростає, а після переходу у високоеластичний стан, унаслідок теплових флуктуацій макромолекул, що збільшують відстань між молекулярними ланцюгами (вільний об'єм), коефіцієнт теплопровідності зменшується. Це положення експериментально підтверджено в роботах [7, 9, 12], де досліджувалася температурна залежність теплопровідності лінійних слабкозшитих тривимірних полімерів. Досліджувані в цій роботі композиції належать до лінійних слабкозшитих полімерів, температура склоподібного переходу яких лежить у ділянці від'ємних температур.

При аналізі процесів теплоперенесення у багатокомпонентних системах для розрахунку коефіцієнтів теплопровідності зазвичай застосовують макроскопічний підхід, що передбачає розгляд матеріалу як суцільного середовища та ігнорування атомно-молекулярної будови речовини [8, с. 100449]. Такий підхід дозволяє встановити залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності системи від її структури, теплопровідності компонентів, їх концентрацій та оцінити вплив окремих факторів на теплопровідність матеріалу. При цьому приймається низка спрощень: відсутність термічного опору на межі поділу компонентів, незмінність коефіцієнтів теплопровідності чистих речовин у суміші тощо. Однак при змішуванні під дією наповнювача може змінюватися надмолекулярна структура полімеру, що позначається на теплопровідності композицій.

Розгляд аналітичних залежностей [1, с. 20] для структур із ізольованими замкненими включеннями показує, що однією з найзагальніших є формула:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = 1 - n \left( \frac{1}{1-v} - \frac{1-n}{3} \right)^{-1} \quad (2)$$

Враховуючи, що принцип узагальненої провідності базується на ідеалізованих модельних структурах, запропоновано емпіричну залежність для розрахунку ефективної теплопровідності двофазних систем [1, с. 25]:

$$\lambda = a\lambda_{cm} + b\lambda'_{cm} \quad (3)$$

де  $\lambda'_{cm}$  і  $\lambda_{cm}$  – значення, обчислені за формулою (2), якщо наповнювачем вважати речовину спочатку з більшою, а потім із меншою теплопровідністю. Для силіконових каучуків коефіцієнти  $a$  та  $b$  приймають рівними 0,2 і 0,8 відповідно.

На рис. 8 наведено результати експериментального визначення коефіцієнта теплопровідності композицій залежно від об'ємного вмісту  $TiO_2$ , а також значення цього коефіцієнта, розраховані за формулами (2) та (3).

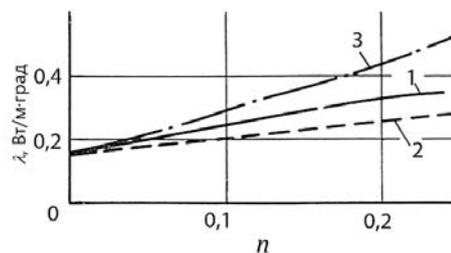


Рис. 8. Порівняння експериментальних та розрахункових даних коефіцієнта теплопровідності композицій, наповнених  $TiO_2$ : 1 – експериментальні дані; 2 – розрахунок за формулою (2); 3 – за формулою (3)

При об'ємній концентрації  $n < 0,1$  краща узгодженість із експериментом досягається для залежності (3), тоді як при  $n > 0,1$  – для формули (2). Із подальшим збільшенням  $n$  розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними зростає і при  $n \approx 0,25$  сягає 30 %. Це свідчить про неповну відповідність обраної моделі реальній структурі системи еластомер–наповнювач. Зокрема, порівняння результатів показує, що між молекулами диметилполісилоксану та наповнювачем, як і у випадку органічних каучуків [00], існує певна хімічна взаємодія; крім того, можливе формування контактів між окремими частинками наповнювача, що за  $\lambda_2 > \lambda_1$  призводить до зниження термічного опору композиції.

Розрахункові значення коефіцієнта теплопровідності, отримані з емпіричної залежності (3), можна наблизити до експериментальних шляхом корекції числових коефіцієнтів  $a$  та  $b$ . Так, при  $a = 0,15$  і  $b = 0,7$  відхилення розрахункових і експериментальних даних у всьому діапазоні концентрацій не перевищує 5 %.

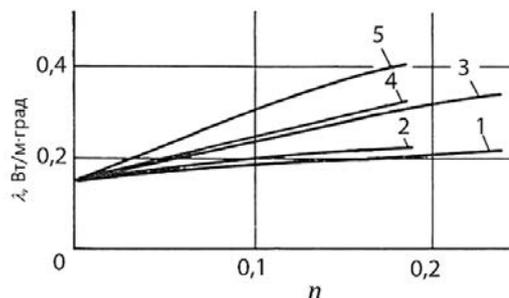


Рис. 9. Залежність коефіцієнта теплопровідності композицій від об'ємного вмісту наповнювача: 1 –  $SiO_2$  (кварц); 2 –  $SiO_2$  («біла сажа»); 3 –  $TiO_2$ ; 4 –  $Fe_2O_3$ ; 5 –  $ZnO$

На рис. 9 наведено залежності коефіцієнта теплопровідності систем із різними мінеральними наповнювачами від їх вмісту. Для  $n < 0,15$  ця залежність наближається до лінійної, а при

$n > 0,15$  зростання теплопровідності дещо сповільнюється, що можна пояснити виникненням локальних контактних опорів між частинками наповнювача та еластомером. Найвищу теплопровідність мають системи, що містять оксид цинку, оскільки цей наповнювач характеризується найбільшою власною теплопровідністю серед розглянутих мінеральних сполук.

Дисперсність наповнювача істотно впливає на теплопровідність композиції. Експериментально встановлене підвищення коефіцієнта теплопровідності зі зменшенням розміру частинок (за сталого об'ємного вмісту наповнювача), ймовірно, зумовлене інтенсифікацією поверхневих явищ на межі поділу фаз. Активні центри на поверхні частинок білої сажі утворюють хімічні зв'язки з молекулами еластомеру, підвищуючи ступінь зшивки; при достатній кількості таких центрів частинки наповнювача можуть бути включеними в тривимірну структуру вулканізатору, виконуючи роль теплопровідних «містків» між макромолекулами еластомеру.

#### Висновки.

1. Мінеральні оксиди (ZnO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – ефективні засоби для корекції теплофізичних і суміжних властивостей еластомерів. ZnO також виступає як активатор вулканізації; SiO<sub>2</sub> – ключ для механічної зміцненості та дисперсії; TiO<sub>2</sub> може підвищувати теплопровідність й надавати корисні оптичні властивості; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

застосовують для специфічних задач (щільність, магнетизм, термостійкість).

2. Температурна поведінка теплофізичних характеристик еластомерних композицій визначається структурним станом полімерної матриці та природою мінерального наповнювача. При переході еластомеру у високоеластичний стан зі зростанням температури коефіцієнт теплопровідності зменшується через збільшення вільного об'єму і внутрішнього теплового опору.

3. Введення мінеральних наповнювачів (ZnO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) сприяє підвищенню теплопровідності композицій. Найбільш ефективним наповнювачем виявився оксид цинку, що має найвищу власну теплопровідність. Зі збільшенням концентрації наповнювача до 15 об.% спостерігається майже лінійне зростання теплопровідності, яке уповільнюється при більшому наповненні через підвищення в'язкості системи та зростання контактного опору на межі еластомер–наповнювач.

4. Дисперсність і поверхнева активність частинок наповнювача істотно впливають на теплопровідність композицій. Зменшення розміру частинок і збільшення кількості активних центрів на їх поверхні знижують контактний тепловий опір, сприяють утворенню хімічних зв'язків між еластомером і наповнювачем та підвищують ступінь зшивки полімерної сітки, що призводить до зростання ефективної теплопровідності матеріалу.

#### Список літератури:

1. Салєєва А.Д., Солнцева І.Л., Бєлєвцова Л.О., Носова Т.В., Семенець В.В.. Виробничі технології та матеріали. Харків : ХНУРЕ, 2022. 92 с.
2. Миронюк О.В., Савченко Д.О., Мельник Л.І. Спеціальні розділи хімічної технології переробки полімерів. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : 2023. 294 с.
3. Дегула А. І., Харченко Н. А. Сучасні тенденції в матеріалознавстві : конспект лекцій. Суми : Сумський державний університет, 2024. 137 с.
4. Передові композитні матеріали та супергідрофобні поверхні : підруч. / О. В. Миронюк та ін: Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 229 с.
5. Mirizzi L. et al. Tailoring the thermal conductivity of rubber nanocomposites by inorganic systems: opportunities and challenges for their application in tires formulation. *Molecules*. 2021. V. 26. №. 12. P. 3555. <https://doi.org/10.3390/molecules26123555>
6. Alam M. N., Kumar V., Park S. S. Advances in rubber compounds using ZnO and MgO as co-cure activators. *Polymers*. 2022. V. 14. №. 23. P. 5289. <https://doi.org/10.3390/polym14235289>
7. Mu Q., Feng S., Diao G. Thermal conductivity of silicone rubber filled with ZnO. *Polymer Composites*. 2007. V. 28. №. 2. P. 125–130. <https://doi.org/10.1002/pc.20276>
8. Naphon P., Wiriyasart S., Naphon N. Thermal, mechanical, and electrical properties of rubber latex with TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Composites Communications*. 2020. V. 22. P. 100449. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100449>
9. Wang L. et al. Surface-modified TiO<sub>2</sub>@ SiO<sub>2</sub> nanocomposites for enhanced dispersibility and optical performance to apply in the printing process as a pigment. *ACS Omega*. 2023. V. 8. №. 22. P. 20116–20124. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02679>
10. Yangthong H. et al. Hybrid Alumina–Silica Filler for Thermally Conductive Epoxidized Natural Rubber. *Polymers*. 2024. V. 16. №. 23. P. 3362. <https://doi.org/10.3390/polym16233362>
11. Lee M. H. et al. The effect of SiO<sub>2</sub> shell on the suppression of photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2012. V. 33. №. 11. P. 3767–3771. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2012.33.11.3767>

12. Jeong Y. et al. Preparation of  $\text{TiO}_2/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3@ \text{SiO}_2$  Nanorod Heterostructures and Their Applications for Efficient Photodegradation of Methylene Blue. *Crystals*. 2025. V. 15. №. 3. P. 277. <https://doi.org/10.3390/cryst15030277>

13. Mokhtarifar M. et al. Heterostructured  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{rGO}$  coating with highly efficient visible-light-induced self-cleaning properties for metallic artifacts. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. V. 12. №. 26. P. 29671–29683. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c06792>

14. Anbupalani M. S. et al. Utilisation of  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  mechanical blends for enhancing the photovoltaic efficiency in polycrystalline silicon solar cells. *Surfaces and Interfaces*. 2025. V. 65. P. 106466. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106466>

15. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с.

16. Мельник Л.І. Технологія переробки еластомерів: навч. Посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 257 с.

### Shokhin M.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. STUDYING THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ELASTOMERIC COMPOSITIONS WITH MINERAL FILLERS

*This study investigated the thermal conductivity of systems based on organosilicon polymers and mineral fillers, depending on the chemical composition, quantity, and dispersibility of the latter. The results of the study on the influence of powdered mineral fillers on the thermophysical properties of vulcanized compositions based on low-molecular-weight dimethylsiloxane rubber grade A in the temperature range of 50–300 °C are presented. Zinc oxide (ZnO), iron(II) oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), titanium oxide ( $\text{TiO}_2$ ), and silicon oxide ( $\text{SiO}_2$ ) with various dispersibilities (quartz and “white soot”) were used as the fillers. It was found that with an increase in temperature, the thermal conductivity coefficient of the unfilled elastomer decreased owing to the transition of the polymer to a highly elastic state, accompanied by an increase in the free volume between molecular chains and an increase in the internal thermal resistance. Analysis of the temperature dependence of the specific heat capacity showed the presence of exothermic processes at temperatures above 220 °C, associated with the release of low-molecular-weight polymer fractions. The significant influence of adsorbed moisture on the thermal characteristics of the compositions was revealed: the processes of desorption and evaporation of water at temperatures above 100 °C caused an increase in the heat capacity of the material. It was established that the addition of mineral fillers increases the thermal conductivity coefficient of elastomers, with an almost linear dependence of the thermal conductivity on temperature observed for all systems. The highest values of this indicator were found in compositions filled with zinc oxide owing to its high thermal conductivity. When the filler content was increased to 15 vol. %, thermal conductivity increases almost linearly, while a further increase in concentration leads to an increase in contact resistance at the elastomer-filler interface and a slowdown in heat transfer. It has been established that the dispersibility of filler particles is an important factor determining the efficiency of heat transfer. As the particle size decreases and the number of active centers on the surface increases, the contact resistance decreases, and a more developed system of heat-conducting bridges is formed in the polymer matrix. The results obtained indicate the possibility of targeted control of the thermophysical characteristics of elastomers by selecting the type and dispersibility of mineral fillers, which is of practical importance for the development of a new generation of heat-resistant and heat-conducting polymer materials.*

**Key words:** elastomer, mineral filler, thermal conductivity, heat capacity, dispersibility.

Дата надходження статті: 21.10.2025

Дата прийняття статті: 10.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025