

УДК 621.3

**С.С.Кокошин**, канд.фіз.-мат.наук (Ін-т електродинаміки НАН України, Київ),  
**Д.П.Коломієць** (Національний ун-т харчових технологій, Київ),  
**В.П.Кучинський, О.М.Суржик** (Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

**Методика визначення коефіцієнта ефективної теплопровідності композитного матеріалу тепловідвідної панелі**

*У статті запропонована експериментально-розрахункова методика визначення коефіцієнта ефективної теплопровідності тепловідвідної панелі з композиту, що дозволяє визначити зазначений параметр не тільки для металевих включень сферичної форми, але й різних неоднорідних форм і розмірів у широкому діапазоні їхньої відносної концентрації.*

*В статті предложена экспериментально-расчетная методика определения коэффициента эффективной теплопроводности теплопроводящей панели из композита, позволяющая определить указанный параметр не только для металлических включений сферической формы, но и различных неоднородных форм и размеров в широком диапазоне их относительной концентрации.*

При проектуванні та створенні фотобатарей (ФБ) і сонячних колекторів (СК) з тепловідведенням із композитних матеріалів одним із визначальних параметрів ефективності їх роботи є величина коефіцієнта усередненої (ефективної) теплопровідності композитного матеріалу  $\lambda_K$ .

У роботах [1, 2] для визначення  $\lambda_K$  запропоновано розрахунковий метод, що базується на моделі середовища у вигляді діелектричної матриці (сполучний матеріал) і наповнювача з металу у вигляді витягнутих циліндрів або сферичних гранул. Однак отримані вирази для  $\lambda_K$  мають обмеження, обумовлені величиною співвідношення коефіцієнтів теплопровідності наповнювача  $\lambda_2$  і сполучного матеріалу  $\lambda_1$ , тобто  $\lambda_2/\lambda_1$ . Варто також урахувати, що величина  $\lambda_2$  істотно залежить від об'ємної концентрації наповнювача  $v_2$ .

Метою даної роботи було експериментальне підтвердження та уточнення розрахункового методу визначення  $\lambda_K$  композитів з металевим наповнювачем сферичної форми. Одночасно також відпрацьовувалася методика експерименту з визначення  $\lambda_K$  композитів із різними сполучниками на основі здатних до самозатвердіння полімерних і асфальтобетонних сумішей при використанні металевих наповнювачів неоднорідної форми та розмірів, наприклад, подрібненої металевої стружки тощо.

В основу дослідження покладено експериментально-розрахунковий метод визначення  $\lambda_K$  на

ції композитної тепловідвідної панелі ФБ і СК. Дослідні зразки (рис. 1) із композиту 1 мали форму паралелепіпеда (квадратні плитки) габаритами  $L \times L \times h$  відповідно  $197 \times 197 \times 10$  мм, у яких для протікання теплоносія були встановлені дві мідні трубки 2. Вони розташовувалися паралельно та симетрично щодо центральної осі плитки на відстані  $l = 67$  мм одна від одної. Розміри кожної з трубок: зовнішній діаметр –  $d = 6$  мм; товщина стінки – 1 мм; довжина – 450 мм.

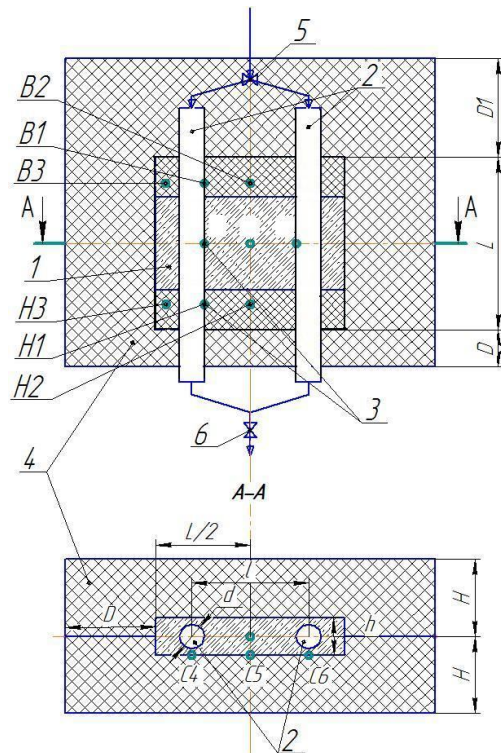


Рис. 1.

Дослідження проводилися для трьох ідентичних зразків, що відрізнялися між собою компонентним складом композиту: перший – тільки цементно-піщана суміш у співвідношенні 1:3; другий і третій – з об'ємною часткою наповнювача відповідно 20% і 40%. Як наповнювач використовували однорідний сталевий дріб середнім діаметром  $d_{cp} = 1,8$  мм.

Над дослідним зразком була встановлена теплоізолювана ємність (на рис. 1 не показано) з теплоносієм, у якості якого використовували гарячу воду, нагріту до температури кипіння за нормальних умов, тобто приблизно  $100^{\circ}\text{C}$ . По трійнику 5 вода подавалася одночасно в обидві трубки 2. Аналогічний трійник із затискачем 6 (для регулювання витрат теплоносія) був розміщений у нижній частині зразка.

Для контролю симетрії температурного поля зразка, яка досягалася за рахунок стабілізації подачі теплоносія в трубках, у кожному зразку на трьох його рівнях було змонтовано від 12 до 14 мідь-константанових термопар 3 (на рис. 1 позначені буквами В, С, Н та індексами 1, 2, 3, ...), виготовлених із дроту діаметром 0,2 мм і покритих ізоляцією емаль-шовк. Три термопари (індекс 1) були зафіксовані (підпаяні) на бічній поверхні однієї з трубок (на рис. 1 розташована ліворуч). Ще три термопари (індекс 2) встановлювалися по осі симетрії в середині зразка (композитної плитки). По середньому (С) рівні зразка на зовнішній поверхні плиток були встановлені термопари С4, С5 і С6, а термопара С3 була підпаяна до трубки, що на рис. 1 розташована праворуч від осі симетрії. Крім того, була встановлена термопара безпосередньо в теплоізолюваній ємності з теплоносієм (для контролю температури теплоносія на вході у трубки) та ряд дублюючих термопар. Верхній (В) і нижній (Н) рівні монтажу термопар розташовувалися на глибині 10 мм від відповідних границь зразка.

Оснащення термопарами та формування зразків до затвердіння сполучного матеріалу проводилося на спеціальному обладнанні (на рис. 1 не показано). Далі підготовлені зразки розміщували

в теплоізолюючий корпус, утворений із двох плит пінополістиролу 4, товщиною  $H = 50$  мм і розмірами  $320 \times 550$  мм кожна. При цьому товщина  $D$  теплоізоляції з трьох торців експериментального зразка становила 60 мм, а зверху ( $D_1$ ) – 290 мм.

Вимірювальне коло складалося із термопар, які через загальний клемник і пакетний перемикач (ПТМ) по черзі підключалися до реєструючого приладу – високоточного мультиметра MASTECH MS8050 із чутливістю при вимірюванні напруги 1 мкВ. У процесі вимірювання була передбачена можливість послідовного збереження в пам'яті мультиметра всіх повідомлень, що виводилися на екран (кількість комірок пам'яті – 30).

Дослідження проводилися у два етапи. На першому – фіксувалася температура довкілля  $t_d$  і визначалася початкова температура зразка (трубок і композиту). Витрата теплоносія виставлялася таким чином, щоб час проведення експерименту при безперервному протіканні гарячої води в трубках зі швидкістю біля 0,25 м/с становив 600-720 с. На другому етапі за тих самих умов за зазначений період часу з інтервалом часу від 30 (початок експерименту) до 120-180 с проводили 4-5 вимірів термоЕРС, які фіксувалися в комірках пам'яті мультиметра. При цьому в кожному такому вимірюванні, що тривало не більше 5 с, були задіяні 5-6 термопар, які показували зміну температури як по довжині трубок, так і в середині поперечного перерізу композитного зразка. У проміжках між зазначеними вимірами показання інших термопар контролювалися візуально та фіксувалися у спеціальних таблицях.

Для визначення коефіцієнта ефективної теплопровідності композиту  $\lambda_K$  кожного зразка експериментально-розрахунковим методом була використана розрахункова модель двовимірного нестационарного температурного поля в середньому поперечному перерізі зразка, оточеного шаром теплоізоляції з пінополістиролу. Правомірність такої постановки підтверджується експериментальними показами контрольних термопар верхнього (В1) та нижнього (Н1) перерізів: за прийнятої

витрати теплоносія поздовжній градієнт температури не перевищував 2,5% температурного градієнта в середньому поперечному перерізі зразка.

При розв'язанні цієї задачі початкові та граничні умови бралися з експерименту.

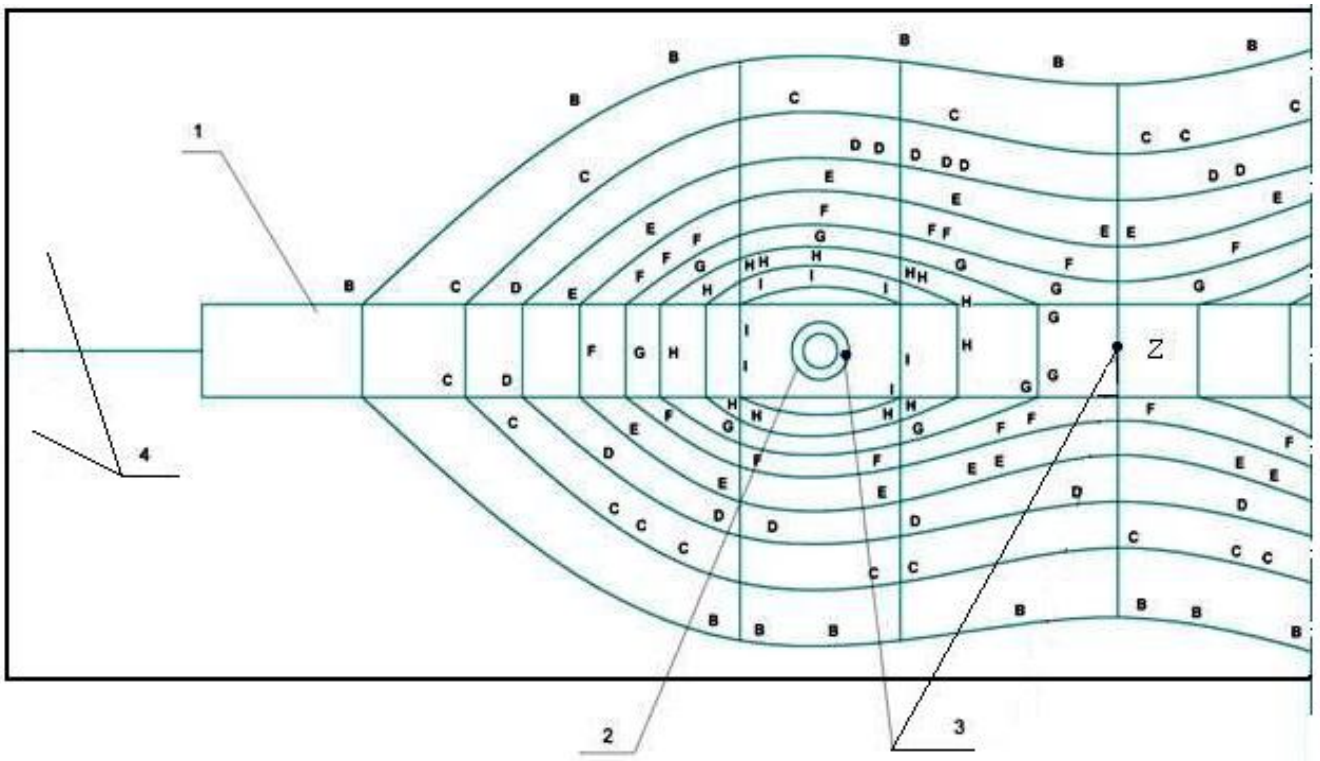
На зовнішній границі теплоізолюючого корпусу задавалися граничні умови третього роду, за яких теплообмін поверхні з довкіллям вираховують за законом Ньютона-Ріхмана. При цьому коефіцієнт тепловіддачі приймався з умов природної конвекції і становив  $\alpha_d = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Оскільки в експерименті термопари з індексом 1 безпосередньо підпаювалися до бічної поверхні трубок, то для цієї області приймалися граничні умови першого роду, тобто задавалися отримані з експерименту значення температури стінки трубки  $t_T(\tau) = f(\tau)$  у середньому поперечному перерізі зразка. Розрахунки проводилися за методом кінцевих елементів (МКЕ) за допомогою програмного пакету COMSOL3.3 [3].

Для налагодження та усунення можливих методологічних помилок при використанні зазначе-

ного пакету програм попередньо розглядалося тестове завдання, що має аналітичний розв'язок [4]. У цьому завданні розглядається напівобмежений ізотропний масив з однакових рівномірно розташованих поруч циліндричних каналів (трубок) з однією і тією ж температурою рідини  $t_{ж}$ , що протікає в них, і коефіцієнтом теплопередачі  $k_{ж}$  при заданих на верхній границі масиву значеннях температури довкілля  $t_{о,с}$  і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{о,с}$ .

На рис. 2 показано температурне поле в середньому поперечному перерізі дослідного зразка, отримане при розв'язанні задачі з використанням МКЕ. Тут 1 – фрагмент тепловідвідної панелі на основі композиту із 40% об'ємною часткою сталевого дробу; 2 – мідні трубки для теплоносія; 3 – термопари С1 і С2; 4 – теплоізоляція з пінополістиролу. Вихідні дані та результати розрахунку відповідають наступним параметрам: коефіцієнт ефективної теплопровідності  $\lambda_K = 2,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $t_d = 17,5^\circ\text{C}$ ; тривалість протікання гарячої води  $\tau = 600 \text{ с}$ ;  $t_T = 83,5^\circ\text{C}$ ; температура композиту в середній точці зразка (Z) дорівнює  $56,5^\circ\text{C}$ .



**Рис. 2. Температурне поле в середньому поперечному перерізі дослідного зразка:**  
 $A = 20,1; B = 26,5; C = 32,8; D = 39,2; E = 45,5; G = 58,2; H = 64,5; I = 71$  (лінії ізотерм,  $^\circ\text{C}$ ).

Порівняння результатів розрахунку зазначеного завдання з використанням аналітичного методу і тестового завдання, розв'язаного методом МКЕ, вказує на практично повний збіг значень (різниця окремих значень не більше 1%). Це дає можливість пропонувати прийнятну методіку для чисельного розрахунку теплофізичних параметрів тепловідвідної панелі з композитів із різними наповнювачами.

На рис. 3 наведено графіки для визначення коефіцієнта ефективної теплопровідності  $\lambda_K$  зразка з композиту з 40% об'ємною часткою сталевого дробу експериментально-розрахунковим методом. Побудовані розрахункові криві температури 1, 2, 3 для точки (Z) у середньому поперечному

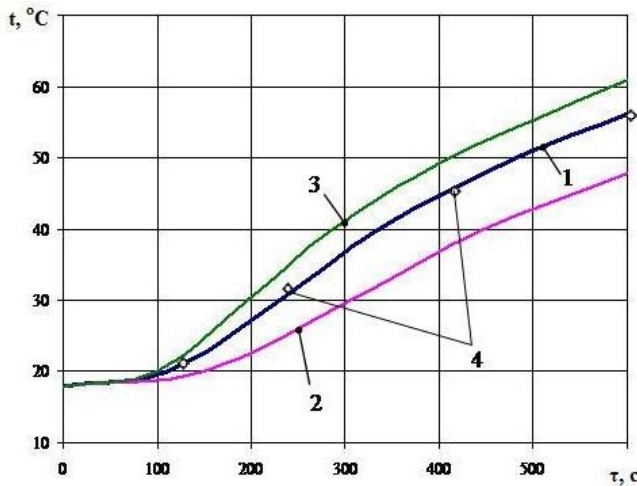


Рис. 3.

перерізі зразка за інших рівних умов відрізняються лише прийнятими значеннями  $\lambda_K$  рівного відповідно 2,5; 1,8 та 3 Вт/(м·К). При цьому мітками (4) позначені експериментальні дані, отримані перед проведенням серії розрахунків методом послідовних наближень. Як бачимо, температурна

крива 1, що має  $\lambda_K = 2,5$  Вт/(м·К), практично збігається з експериментальними точками.

У такий же спосіб визначали значення коефіцієнта  $\lambda_K$  для всіх експериментальних зразків. За збігу розрахункових та експериментальних кривих нагрівання середньої точки Z зразка із композитом із цементно-піщаною сумішшю без наповнювача коефіцієнт  $\lambda_K$  дорівнює 1,15-1,2 Вт/(м·К), що практично відповідає довідковим даним [4]. Для зразків, композити яких містили 20% металевого дробу, величина  $\lambda_K$  становила 1,8 Вт/(м·К).

**Висновки.** 1. Отримані експериментально-розрахунковим методом значення  $\lambda_K$  достатньо точно збігаються з результатами розрахунків, отриманих із відповідних виразів, наведених у роботах [1, 2], для композитних сумішей при об'ємній концентрації наповнювача  $v_2$  не більше 40%. Розбіжності значень перебували в межах припустимої точності розрахунків та експерименту і не перевищували 3-5%.

2. Запропонована методика дозволяє визначати значення  $\lambda_K$  композиту при використанні металевих наповнювачів неоднорідної форми й розмірів, наприклад, роздробленої металеві стружки тощо.

1. Кучинський В.П., Суржик О.М., Шевчук В.І. Характеристики композиційних тепловідводів фотобатарей та сонячних колекторів // Відновлювана енергетика. – 2005. – № 3-4. – С.16–19.

2. Васецький Ю.М. Електродинаміка. Основні поняття, потенціальні та квазістаціонарні поля. – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту "НАУ-друк", 2009. – 160 с.

3. [www.comsol.com](http://www.comsol.com)

4. Теоретические основы теплотехники: Справочник / Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, книга 2, 1988. – 560 с.