

## ТЕМПЕРАТУРОМЕТРИЧНІ МОСТОВІ СХЕМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

© Васильківський І., Юсик Я., 2008

**Проаналізовано методологічні підходи до розроблення теплофізичних приладів, запропоновані авторами статті, що дають змогу вимірювати в широкому діапазоні значень теплопровідності і з високою точністю. Розглянуто конструкції деяких приладів для вимірювання теплопровідності, побудованих з використанням запропонованих методологічних підходів.**

**In this article the methodological going is analysed near development of thermophysical devices the articles which allow to conduct measuring in the wide range of values of heat-conducting with high exactness are offered authors. The constructions of row of devices are resulted for measuring of heat-conducting of built with the use of the developed methodological approaches.**

**Постановка проблеми та її зв'язок із важливими практичними завданнями.** Сьогодні у практиці теплофізичних вимірювань відомо декілька десятків різних методів і варіантів тепловимірювальних комірок, призначених для вимірювання теплопровідності матеріалів. Їх велика кількість зумовлена різними факторами, серед яких необхідно виділити: різні можливі види теплового режиму, велику відмінність матеріалів з теплопровідності і фізико-механічних властивостей, за формою досліджуваного зразка.

Серійний випуск приладів для вимірювання теплопровідності в Україні не налагоджено, хоча в наявності є розробки відділу теплотерії Інституту технічної теплофізики НАН України і інших організацій [1, 2]. Все це створювало і сьогодні створює великі труднощі як в сенсі реалізації вимірювання теплопровідності матеріалів, так і в метрологічному забезпеченні цих вимірювань. Отже, розроблення нових методологічних підходів до розроблення теплофізичних приладів, що дають змогу виконувати вимірювання в широкому діапазоні значень теплопровідності і з високою точністю, і як результат нових теплофізичних приладів, досконаліших порівняно з існуючими, надзвичайно актуальна.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відомих розробках теплофізичних приладів підвищення точності вимірювання досягали вдосконаленням методик виконання вимірювань, технологій виготовлення і конструкцій існуючих приладів [3, 4, 5]. При цьому, для досягнення їх нечутливості до неінформативних параметрів використовують методи параметричної стабілізації (конструкторсько-технологічні), які реалізуються використанням вузлів та елементів покращеної якості і стабільності (охоронні нагрівачі, складну систему теплових екранів, високоточні термопари з електродами зменшеного діаметра тощо) Однак ці міри призводять до значного подорожчання та ускладнення приладів і не дозволяють значно підвищити точність теплофізичних вимірювань.

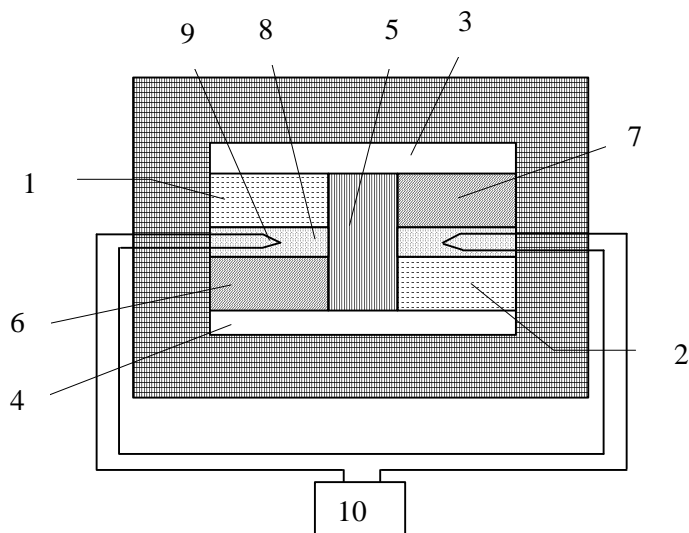
**Мета дослідження** – огляд теплофізичних приладів, побудованих з використанням розроблених нами методологічних підходів.

**Виклад основного матеріалу.** На кафедрі автоматизації теплових та хімічних процесів Національного університету “Львівська політехніка” впродовж декількох десятків років запропоновано нові методологічні підходи до розроблення теплофізичних приладів, що дозволяють виконувати вимірювання в широкому діапазоні значень теплопровідності і з високою точністю. В

основі запропонованих підходів було використано принцип інваріантності [6, 7] – забезпечення компенсації впливу різних неінформативних параметрів на результат вимірювання. Значно підвищити точність і спростити роботу теплофізичних приладів, за одночасного зниження їх собівартості, можна тільки створенням їх на основі досконаліших вимірювальних схем, застосовуючи структурні методи підвищення точності вимірювань.

Для розрахунку розроблених мостових вимірювальних схем (зрівноважених, незрівноважених та неповного зрівноваження) застосовано теорію теплових ланцюгів, яка ґрунтується на аналогії процесів переносу тепла й електрики. Запропоновані методи усувають необхідність вимірювання абсолютних значень теплових потоків. Про значення шуканої величини судять за перепадами температур у різних ділянках теплопровідного кола, тому вони отримали назву температурометричних.

Для визначення коефіцієнта теплопровідності газових або рідинних прошарків можна застосувати незрівноважений мостовий метод [8], який полягає в тому, що між джерелом та приймачем тепла створюють два теплопровідних кола: одне – з досліджуваного та порівняльного зразка, а друге – з порівняльного та досліджуваного зразка. Вимірюють температури в області контакту зразків і за вимірними значеннями розраховують коефіцієнт теплопровідності досліджуваного зразка. Принципова схема приладу, що реалізує розглядувану незрівноважену мостову схему, показана на рис. 1.



*Рис. 1. Принципова схема приладу для вимірювання теплопровідності матеріалів на основі незрівноваженої мостової теплової вимірювальної схеми: 1, 2 – досліджуване середовище; 3 – нагрівач; 4 – охолоджувач; 5 – теплоізоляційна прокладка; 6, 7 – порівняльні зразки; 8 – температуровирівнюючі пластини; 9 – датчі температури; 10 – вторинний прилад*

Також на основі теплової мостової вимірювальної схеми неповного зрівноваження запропоновано метод вимірювання теплопровідності матеріалів із низькою теплопровідністю та розроблено на базі цього методу прилад для вимірювання теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів [9].

Цей метод полягає в створенні двох теплових потоків, один з яких пропускають послідовно через досліджуваний зразок та зразок порівняння, а другий – через однорідний теплопровідний елемент, який виконано у вигляді пакета пластин, вимірюють температуру між пластинами в точках по осі пакета, знаходять серед них точку, температура якої найближча до температури області контакту досліджуваного зразка та зразка порівняння, і за різницею цих температур та положенням точки вимірювання по осі пакета визначають теплопровідність досліджуваного зразка.

Розглянемо мостову вимірювальну схему неповного зрівноваження. Схема з'єднання теплових опорів в ній показана на рис. 2.

Запишемо рівняння теплових потоків для обох плечей вимірювальної схеми:

$$W_1 = \frac{T_1 - T_a}{R_1} = \frac{T_a - T_2}{R_2}; \quad W_2 = \frac{T_1 - T_b}{R_0} = \frac{T_b - T_2}{R_x}, \quad (1)$$

де  $T_1$  – температура джерела тепла;  $T_2$  – температура приймача тепла;  $T_a, T_b$  – температури в вимірювальній діагоналі;  $R_x$  – тепловий опір матеріалу досліджуваного зразка;  $R_0, R_1 = R + DR + \dots + DR = R + i \cdot DR, R_2 = DR + \dots + R = j \cdot DR$  – теплові опори елементів вимірювальної схеми;  $i, j$  – кількість теплових опорів  $\Delta R$  для кожного плеча, відповідно.

Враховуючи, що кількість тепла, яка виділяється джерелом тепла

$$W = W_1 + W_2, \quad (2)$$

після нескладних перетворень отримуємо

$$R_x = \frac{R_0 \cdot R_2 \cdot W - (R_1 + R_2 + R_0) \cdot \Delta T_{ab}}{R_1 \cdot W + \Delta T_{ab}}, \quad (3)$$

де  $\Delta T_{ab}$  – різниця температур у вимірювальній діагоналі; або після перетворення:

$$R_x = \frac{A_0 + A_1 \cdot \Delta T_{ab}}{1 + A_2 \cdot \Delta T_{ab}}, \quad (4)$$

де  $A_0 = R_0 \cdot \frac{R_2}{R_1}; A_1 = -\frac{R_1 + R_2 + R_0}{R_1 \cdot W}; A_2 = \frac{1}{R_1 \cdot W}$

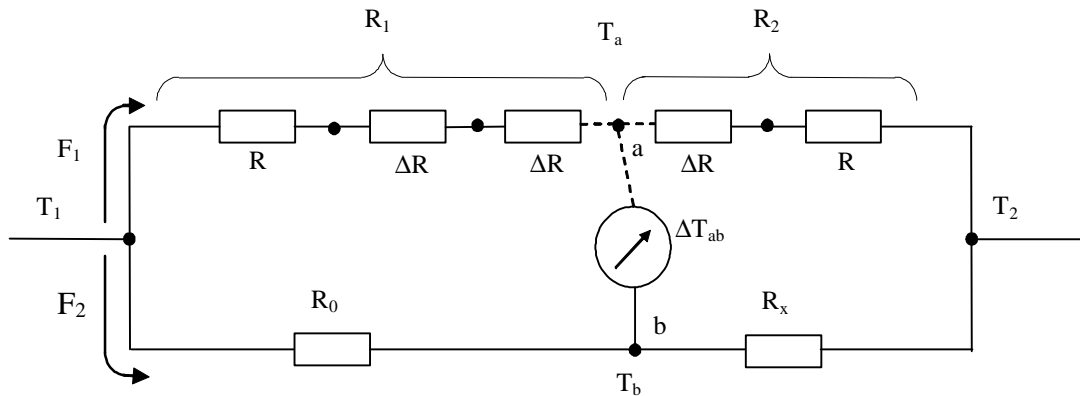


Рис. 2. Схема з'єднання теплових опорів та розподілу теплових потоків і температур у мостовій вимірювальній схемі неповного зрівноваження

Принципова схема приладу для вимірювання теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів показана на рис. 3.

Між джерелом тепла 1 і приймачами тепла 2 розміщені теплопровідний елемент 3 і зразок порівняння 4, а також зразок 5 досліджуваного матеріалу. Теплопровідний елемент 3 і зразок 4 являють собою пакети пластин, виготовлених із одного матеріалу, наприклад, органічного скла, між якими розміщені спаї диференційних термопар 6. Термопари через комутуючий пристрій 7 по чергово під'єднуються до вторинного приладу 8. Нижній приймач тепла 2, теплопровідний елемент 3, електричний нагрівач 1 та зразок 4 з'єднані між собою стаціонарно. Досліджуваний зразок 5 розміщується на зразку 4 і притискається верхнім приймачем тепла 2. Бокові поверхні теплопровідного кола захищені від теплообміну з навколишнім середовищем теплоізоляційними екранами 9. Температуру нижнього і верхнього стоків тепла 2 задають та підтримують за допомогою рідинного термостату 10.

Крім того, також розроблено зрівноважені мостові вимірювальні схеми та теплофізичні прилади, побудовані на їх основі.

Запропоновано метод і на його основі прилад для вимірювання теплопровідності зразків матеріалів циліндричної форми з низькою та середньою теплопровідністю (до 10 Вт/м·К) [10], побудований на основі зрівноваженої мостової вимірювальної схеми.

Схема з'єднання теплових опорів в розглядуваній зрівноваженій мостовій вимірювальній схемі показана на рис. 4, а принципова схема розробленого на цій основі приладу для вимірювання теплопровідності матеріалів – на рис.5.

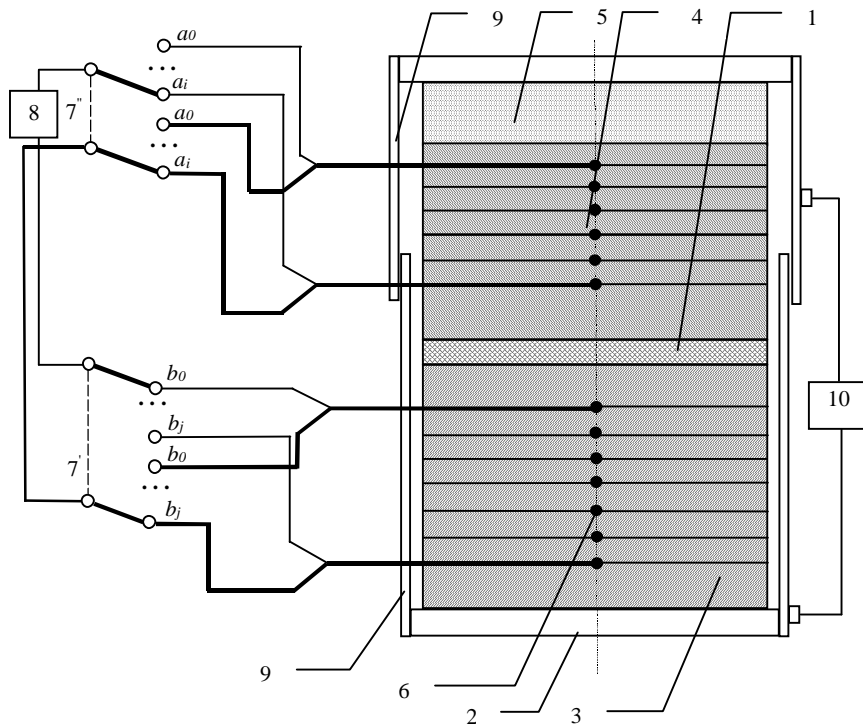


Рис. 3. Принципова схема приладу для вимірювання теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів: 1 – джерело тепла; 2 – приймачі тепла; 3 – теплопровідний елемент; 4 – зразок порівняння; 5 – досліджуваний зразок; 6 – диференційні терморпарі; 7', 7'' – перемикачі пристрою комутації терморпар; 8 – вторинний прилад; 9 – теплоізоляційні екрани; 10 – рідинний термостат

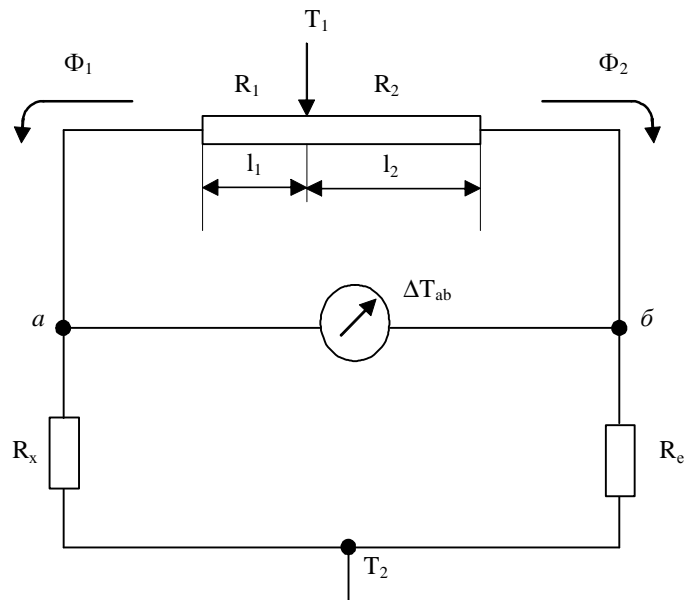


Рис. 4. Схема з'єднання теплових опорів та розподілу теплових потоків і температур у зрівноваженій мостовій тепловій вимірювальній схемі зі зрівноваженням температурних перепадів на досліджуваному та порівняльному зразках

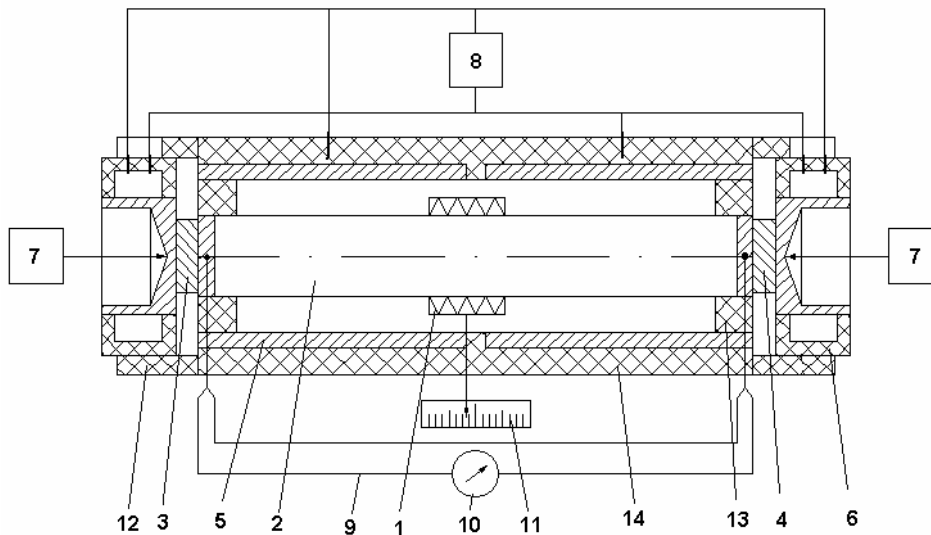


Рис.5. Принципова схема приладу для вимірювання теплопровідності матеріалів з низькою та середньою теплопровідністю: 1 – джерело тепла; 2 – теплопровідний елемент; 3 – досліджуваний зразок; 4 – порівняльний зразок; 5 – мідні температуровирівнюючі елементи; 6 – приймачі тепла; 7 – механізм притискування; 8 – термостат; 9 – диференційна термонара; 10 – нуль-індикатор; 11 – шкала; 12 – теплоізоляційні муфти; 13 – центруючі теплоізоляційні вставки; 14 – кожух

На основі законів Кірхгофа для теплових кіл запишемо умову рівнянь для зрівноваженої теплової вимірювальної схеми, складеної з теплових опорів, відповідно до рис. 4.

$$\begin{cases} \Phi_1 \cdot R_1 - \Phi_2 \cdot R_2 = \Delta T_{a\delta} \\ \Phi_1 \cdot R_x - \Phi_2 \cdot R_e = \Delta T_{a\delta} \\ \Delta T_{a\delta} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

де  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  – теплові потоки, що проходять в колах досліджуваного і порівняльного зразків, відповідно;  $R_1$ ,  $R_2$  – теплові опори частин теплопровідного елемента від нагрівача до торців теплопровідного елемента з боку досліджуваного і порівняльного зразка, відповідно;  $R_x$ ,  $R_e$  – теплові опори досліджуваного і порівняльного зразка, відповідно;  $\Delta T_{a\delta}$  – різниця температур між точками  $a$  і  $\delta$  (в діагоналі мостової теплової вимірювальної схеми).

Із системи рівнянь (5) отримаємо формулу для визначення теплового опору досліджуваного зразка:

$$R_x = R_e \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (6)$$

Враховуючи, що тепловий опір елемента теплового кола визначається як:

$$R = \frac{l}{I \cdot S}$$

де  $I$  – теплопровідність;  $l, S$  – довжина і площа поперечного перерізу елемента, отримуємо формулу для визначення теплопровідності досліджуваного взірця:

$$I_x = I_e \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{S_e}{S_x} \cdot \frac{l_x}{l_e} \quad (7)$$

де  $l_1, l_2$  – довжина частини теплопровідного елемента від нагрівача до торців з боку досліджуваного і порівняльного зразків, відповідно; індекси „ $x$ ”, „ $e$ ” визначають приналежність до досліджуваного та порівняльного зразка, відповідно.

Для вимірювання теплопровідності високотеплопровідних пластин та листових матеріалів, у діапазоні до 400 Вт/м·К і більше, запропоновано мостову зрівноважену вимірювальну схему і на її основі побудовано прилад [11] із зрівноваженням теплових потоків, що проходять через стандартні (порівняльні) і досліджуваній зразки.

Мостова вимірювальна схема, яка є в основі побудови такого приладу, показана на рис.6.

Для цієї схеми можна записати таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{T_1 - T_a}{R_{x1} + R_{e1}} = \frac{T_a - T_2}{R}; \\ F_2 = \frac{T_1 - T_b}{R_{x2} + R_{e2}} = \frac{T_b - T_2}{R}; \end{cases} \quad (8)$$

де  $T_1$  – температура джерела тепла;  $T_2$  – температура приймачів тепла;  $T_a, T_b$  – температури в вимірювальній діагоналі;  $R_{x1}, R_{x2}$  – теплові опори частин досліджуваного зразка;  $R_{e1}, R_{e2}$  – теплові опори першого та другого порівняльного зразка, відповідно;  $R$  – тепловий опір тепломірних елементів.

Умову рівності теплових потоків ( $F_1=F_2$ ), що проходять через еталонні зразки, досягають дією теплового потоку на обмежену зону досліджуваного зразка й переміщенням місця дії (підведення) цього теплового потоку на досліджуваній зразок. Очевидно, що із врахуванням ідентичності тепломірних елементів, виконання умови рівності теплових потоків, які проходять по різних теплопровідних колах, отримуємо при  $\Delta T_{ab}=T_a - T_b = 0$ . Із системи рівнянь (8), враховуючи вищенаведені умови:  $F_1=F_2$  і  $\Delta T_{ab}=0$ , записуємо рівняння рівноваги:

$$R_{x1} + R_{e1} = R_{x2} + R_{e2} \quad (9)$$

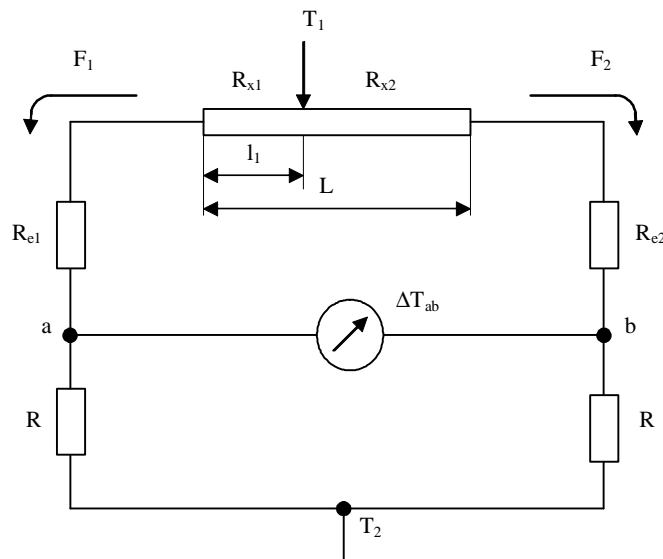


Рис. 6. Схема з'єднання теплових опорів та розподілу теплових потоків і температур у зрівноваженій мостовій тепловій вимірювальній схемі зі зрівноваженням теплових потоків, що проходять через досліджуваній та порівняльні зразки

Звідси, розписавши значення теплових опорів елементів вимірювальної схеми через їх геометричні розміри та теплопровідність, отримуємо формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності досліджуваного зразка:

$$I_x = \frac{L - 2l_1}{S_x \left( \frac{l_{e1}}{I_{e1} \cdot S_{e1}} - \frac{l_{e2}}{I_{e2} \cdot S_{e2}} \right)}, \quad (10)$$

де  $I_x$ ,  $I_{e1}$ ,  $I_{e2}$  – коефіцієнти теплопровідності досліджуваного, першого і другого порівняльних зразків, відповідно;  $L$  – відстань між порівняльними зразками;  $l_1$  – відстань від середини місця дії теплового потоку до одного із порівняльних зразків;  $l_{e1}$ ,  $l_{e2}$  – товщина першого та другого порівняльних зразків, відповідно;  $S_x$ ,  $S_{e1}$ ,  $S_{e2}$  – площа поперечного перерізу досліджуваного, першого та другого порівняльних зразків, відповідно.

Після нескладних перетворень отримуємо

$$I_x = A - B \cdot l_1 \quad (11)$$

де  $A$  і  $B$  – константи приладу, які знаходять під час градування, причому

$$A = \frac{L}{S_x \left( \frac{l_{e1}}{I_{e1} \cdot S_{e1}} - \frac{l_{e2}}{I_{e2} \cdot S_{e2}} \right)}, \quad B = \frac{2}{S_x \left( \frac{l_{e1}}{I_{e1} \cdot S_{e1}} - \frac{l_{e2}}{I_{e2} \cdot S_{e2}} \right)}$$

Принципова схема приладу для вимірювання теплопровідності високотеплопровідних листових матеріалів показана на рис. 7.

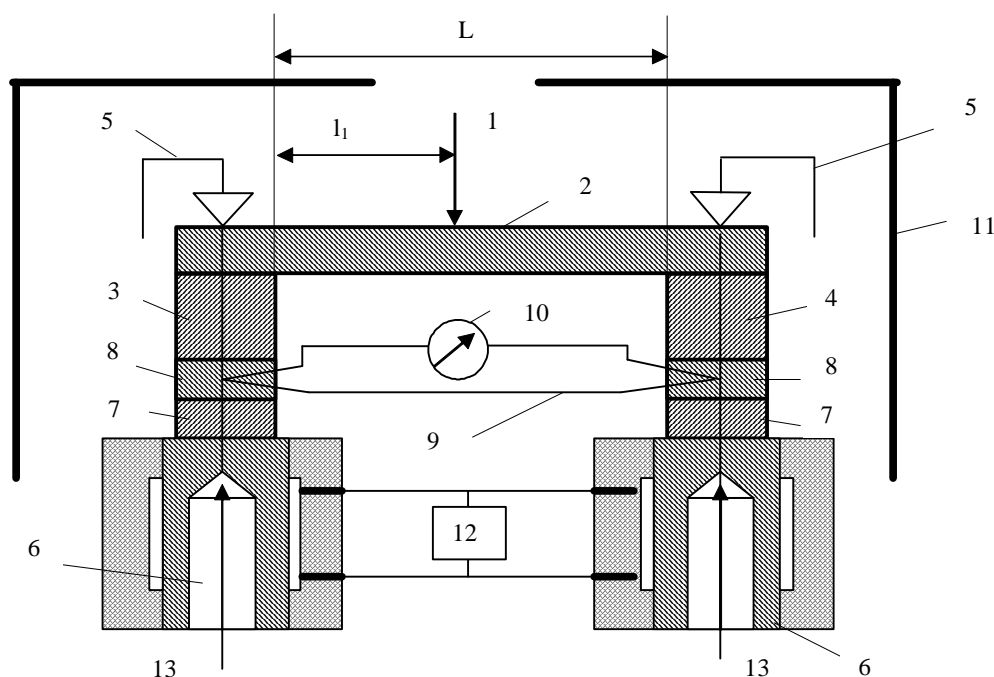


Рис.7. Принципова схема приладу для вимірювання теплопровідності пластин та листових матеріалів: 1 – джерело тепла; 2 – досліджуваний зразок; 3 і 4 – порівняльні зразки; 5 – затискачі; 6 – приймачі тепла; 7 – тепломірні елементи; 8 – температуровирівнюючі пластини; 9 – диференційна термопара; 10 – нуль-індикатор; 11 – теплоізоляційний корпус; 12 – термостат; 13 – упори

Вузькоспрямований на досліджуваний зразок 2 тепловий потік задається спеціальним джерелом тепла 1, яке виконане з можливістю переміщення цього потоку вздовж осі досліджуваного зразка. Зразок 2 притискається до порівняльних (еталонних) зразків 3 і 4 затискачами 5, які зафіксують усі елементи теплопровідних кіл. На поверхні приймачів тепла 6 приклеєні тепломірні елементи 7 з однаковими тепловими опорами і температуровирівнюючі пластини 8 з вмонтованими в них спаями диференційної термопари 9. Рівність температур пластин контролюється нуль-індикатором 10. Бокові поверхні елементів теплопровідного кола захищені від теплообміну з навколишнім середовищем теплоізоляційним корпусом 11. Приймачі тепла 6 омиваються рідиною із термостату 12 і встановлені на упорах 13. Тепловий потік джерела тепла 1 переміщують вздовж осі досліджуваного зразка так, щоб в стаціонарному тепловому режимі сигнал диференційної термопари 9 дорівнював нулю. У результаті, за розташуванням місця дії цього

теплогового потоку щодо порівняльних зразків 3 і 4 визначають шуканий коефіцієнт теплопровідності.

Вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваного зразка здійснюють у стаціонарному тепловому режимі, коли теплові потоки, що проходять через порівняльні зразки 3 і 4, відповідно, рівні між собою. Теплові потоки, що проходять через еталонні зразки 3 і 4, вимірюються за допомогою двох однакових за тепловим опором тепломірних елементів 7, які контактують, з одного боку, з поверхнею приймача тепла 6, а з іншого – з температуровирівнюючими пластинами 8. За температурними перепадами на тепломірних елементах 7 судять про контрольовані теплові потоки. Рівність цих теплових потоків фіксують за дорівнюванням нулю ( $\pm 1$  мкВ) сигналу диференційної термопари 9 в стаціонарному тепловому режимі. Вважається, що стаціонарний тепловий режим настає тоді, коли сигнал диференційної термопари 9 у вказаних межах не змінюється протягом 20 хв.

Запропоновано метод і на його основі побудовано прилад для вимірювання теплопровідності високотеплопровідних матеріалів для досліджуваних зразків циліндричної форми в діапазоні до 400 Вт/м·К і більше [12].

Мостова вимірювальна схема, яка є в основі побудови такого приладу, показана на рис.8.

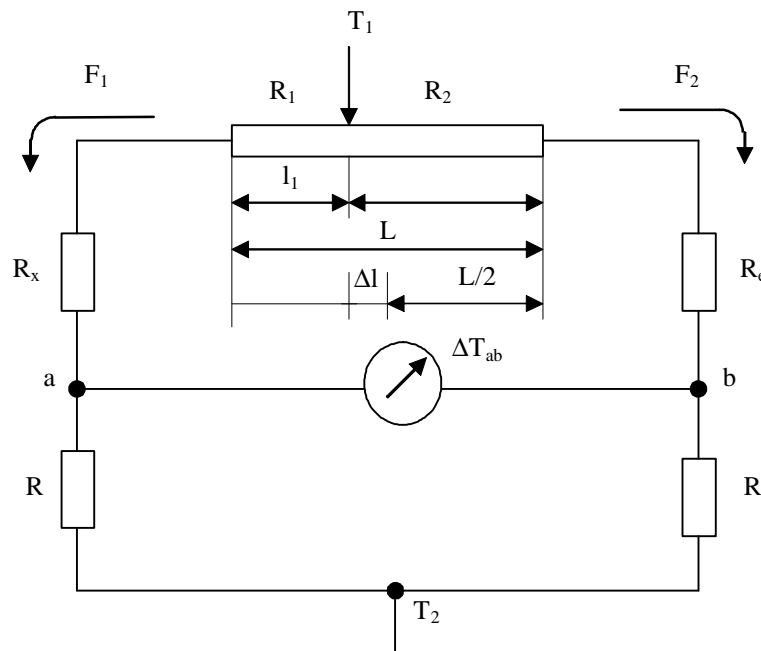


Рис. 8. Схема з'єднання теплових опорів та розподілу теплових потоків та температур у зрівноваженій мостовій тепловій вимірювальній схемі зі зрівноваженням теплових потоків, що проходять через досліджуваній та порівняльний зразки

У разі рівноваги вимірювальної схеми ( $\Delta T_{ab}=0$ ), можна записати:

$$R_x + R_l = R_e + R_2 \quad (12)$$

Звідси отримуємо формулу для розрахунку коефіцієнта теплопровідності досліджуваного зразка:

$$l_x = \frac{l_x}{S_x \left( \frac{l_e}{I_e S_e} - \frac{l_1 - l_2}{I_T S_T} \right)} = \frac{l_x}{S_x \left( \frac{l_e}{I_e S_e} - \frac{2 \cdot \Delta l}{I_T S_T} \right)}, \quad (13)$$

де  $\lambda_x$ ,  $\lambda_e$ ,  $\lambda_T$  – коефіцієнт теплопровідності досліджуваного, порівняльного зразків та теплопровідного елемента, відповідно;  $l_x$ ,  $l_e$  – товщина досліджуваного та порівняльного зразків, відповідно;  $l_1$  – відстань від місця дії теплового потоку до досліджуваного зразка;  $l_2$  – відстань від



місця дії теплового потоку до порівняльного зразка;  $S_x$ ,  $S_e$ ,  $S_T$  – площа поперечного перерізу досліджуваного і порівняльного зразків та теплопровідного елемента, відповідно.

Принципова схема такого приладу показана на рис.9.

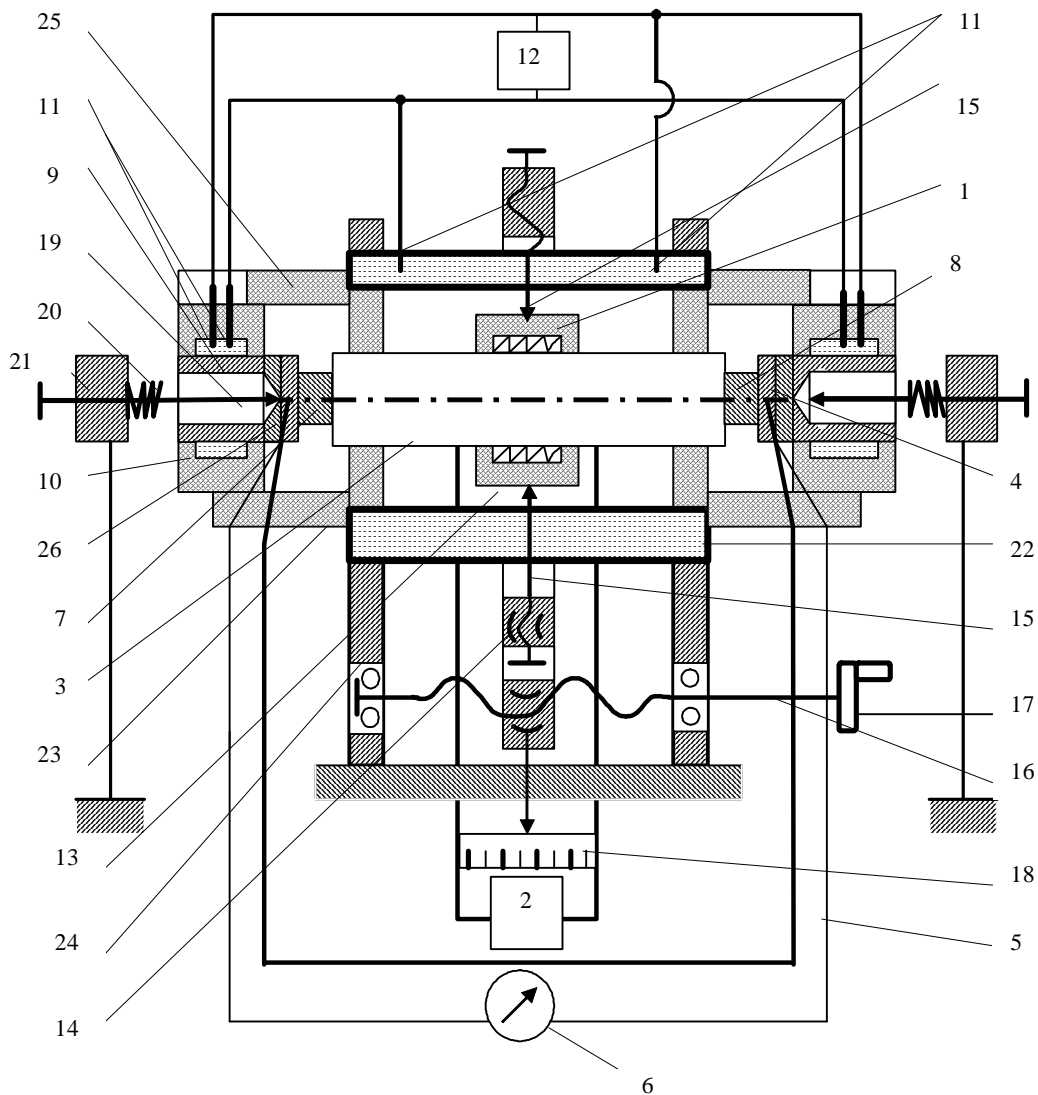


Рис. 9. Принципова схема приладу для вимірювання теплопровідності високотеплопровідних матеріалів для досліджуваних зразків призматичної форми: 1 – електричний нагрівач; 2 – джерело живлення; 3 – теплопровідний елемент; 4 – температуровирівнюючі пластини; 5 – диференційна термопара; 6 – нуль-індикатор; 7 – досліджуваний зразок; 8 – порівняльний зразок; 9 – мідні блоки; 10 – камери; 11 – штуцери; 12 – рідинний термостат; 13 – корпус нагрівача; 14 – повзун; 15 – упори; 16 – гвинт; 17 – ручка; 18 – шкала; 19 – стрижні; 20 – пружини; 21 – пластини; 22 – кожух; 23 – теплоізоляційні вставки; 24 – опори; 25 – теплоізоляційні екрани; 26 – тепломірні елементи

Теплові потоки в теплопровідних колах приладу задаються електричним нагрівачем 1, який розміщено на теплопровідному елементі 3 з можливістю переміщення вздовж його осі. До торців теплопровідного елемента 3 примикають досліджуваний 7 та порівняльний (еталонний) 8 зразки, які притискаються до них за допомогою приймачів тепла, стрижнів 19, пружин 20 і пластин 21. Приймачі тепла виконані у вигляді мідних блоків 9, які омиваються рідиною з термостату 12, циркулюючою в камерах 10. На мідні блоки приклеєні тепломірні елементи 26, які мають однакові теплові опори, і мідні температуровирівнюючі пластини 4, в які вмонтовано спаї диференційної термопари 5, під'єднаної до нуль-індикатора 6.

Електричний нагрівач 1 на теплопровідному елементі 3 закритий корпусом 13. Його переміщення здійснюється ручкою 17, яка приводить у рух повзун 14 за допомогою упорів 15.

Температура середовища, що оточує теплопровідний елемент 3 підтримується на рівні температури приймачів за допомогою кожуха 22, виконаного у вигляді камери, виготовленої з міді, в якій циркулює теплоносій з термостату 12. Теплопровідний елемент 3 відцентровується щодо кожуха 22 теплоізоляційними вставками 23. Своєю чергою кожух 22 закріплений в опорах 24. Під час виконання вимірювань, для зменшення теплових втрат з бокових поверхонь досліджуваного 7 та еталонного 8 зразків, вони закриваються теплоізоляційними екранами 25, рухомими щодо камер 10. Відхилення джерела тепла щодо середини теплопровідного елемента  $\Delta l$  зчитується за шкалою 18.

Авторами також розроблено низку мостових схем і на їх основі приладів для вимірювання температуропровідності рідин [13, 14] та теплоємності матеріалів [15].

**Висновки.** Отже, побудова приладів на основі мостових вимірювальних схем дає змогу значно підвищити точність вимірювання теплофізичних характеристик матеріалів за рахунок зменшення похибок від вимірювань абсолютних значень температур та їх різниць, теплових потоків, що проходять через зразки, впливу температури джерела та приймача тепла та інших неінформативних параметрів на результат вимірювань. Це своєю чергою дає змогу виконувати вимірювання в широкому діапазоні значень теплопровідності, а також, внаслідок спрощення вимірювальної схеми, значно підвищити надійність і зменшити собівартість приладів, які реалізують ці схеми.

1. Герашенко О.А., Грищенко Т.Г. Приборы для теплофизических измерений: Каталог. – К., 1991. 2. Теплофизические измерения и приборы / Под общей ред. Е.С. Платунова. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. – 256 с. 3. Буравой С.Е., Олейник Б.Н. Современное состояние и проблемы метрологического обеспечения теплофизических измерений // Измерительная техника, 1987. – №5. – С. 28–30. 4. Сергеев О.А. Метрология и средства измерений тепловых величин // Итоги науки и техники ВИНТИ. Метрология и измерительная техника, 1982, 2, №5. – С.179–223. 5. Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 154 с. 6. Туз Ю.М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств. – К.: Вища школа, 1976. – 289 с. 7. Петров Б.Н., Викторов В.А. и др. Принцип инвариантности в измерительной технике. – М.: Наука, 1976. – 244 с. 8. А.с. №428260 (СССР). Способ измерения теплофизических характеристик газовых и жидкостных прослоек / Е.П. Пистун, Я.Т. Рогоцкий. – Оpubл. в Б.И., 1974, №18. 9. Патент на корисну модель №27320. Спосіб вимірювання теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів / І.С. Васильківський, Є.П. Пістун, Я.П. Юсик. – Офіційний бюлетень "Промислова власність", 2007, №17. 10. А.с. №1376021 (СССР). Способ измерения теплопроводности веществ / Я.Т. Рогоцкий, Е.П. Пистун, И.С. Васильковский. – Оpubл. в Б.И., 1988, №7. 11. А.С. №1681216 (СССР). Способ измерения теплопроводности материалов / Пистун Пистун, Я.Т. Рогоцкий. И.С. Васильковский. Я.П. Юсык. – Оpubл. в Б.И., 1991, № 36. 12. А.С. №1536969 (СССР). Способ измерения теплопроводности веществ / Пистун, Я.Т. Рогоцкий. И.С. Васильковский. Я.П. Юсык. 13. А.С. №1631386 (СССР). Способ определения температуропроводности жидкостей / Е.П. Пистун, Я.Т. Рогоцкий. И.С. Васильковский, Я.П. Юсык. – Оpubл. в Б.И., 1991, № 8. 14. А.С. №1495697 (СССР). Способ определения температуропроводности жидкости / Е.П. Пистун, Я.Т. Рогоцкий. И.С. Васильковский. – Оpubл. в Б.И., 1989, № 27. 15. А.С. №1529091 (СССР). Способ измерения теплофизических характеристик материалов / Пистун, Я.Т. Рогоцкий. И.С. Васильковский. – Оpubл. в Б.И., 1989, № 46.