

1. ISO/TR 3313:1998 Measurement of fluid flow in closed conduits — Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments. 2. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. — 4-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. — 701 с. 3. Островский Э.С. Влияния локального ускорения на погрешность измерения пульсирующего расхода с помощью сужающих устройств // Расчет и конструирование расходомеров. Л., 1978. С. 28–30. 4. Никитина Т.А., Сичети А.И. Определения среднего расхода пульсирующих потоков // Гидромеханика. 1974. — Вып.27. — С. 65–70. 5. Grimson J., Hay H. Errors due to pulsation in orifice meters // J. of the Royal Aeronaut. Society. — 1971. — Vol.75. — № 4. — P. 284–287. 6. Дробышева Н.А., Никифоров А.Н. Измерение нестационарных расходов с помощью сужающих устройств // Метролог. обесп. измер. М.: ВНИИКИ, 1984. — Вып. 3. 32 с. 7. Dobrowolski B., Kabza Z., Pospolita J. The analysis of metrology performance of constriction flow-meters under pulsating flow-condition // The Proceedings of the X-th IMEKO World Congress. — 1985. — Vol.8. — P. 25–32. 8. Downing P.M., Mottram R.C. The effects of flow pulsations on orifice plate flowmeters // Fluid Flow Measur. Proc. Conf. — 1977. — P. 25–52.

УДК 536.2.083.

І. Васильківський, Я. Юсик

Національний університет “Львівська політехніка”,

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ НОВОЇ ЗРІВНОВАЖЕНОЇ МОСТОВОЇ СХЕМИ

© Васильківський І., Юсик Я., 2009

Наведені теоретичні основи побудови вимірювального перетворювача теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів на основі нової мостової теплової вимірювальної схеми, опис принципової схеми розробленого приладу та результати експериментальних досліджень.

In article brought theoretical motivation of building of measuring converter heat conductivity building and heat isolation material on base new bridge thermal measuring scheme, as well as brought description of the basic scheme of the developed measuring converter and results of experimental researches.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими практичними завданнями. Основними складовими похибок вимірювання теплопровідності у відомих розробках теплофізичних приладів є похибки вимірювання температур, їхніх різниць та теплових потоків. Крім того на точність вимірювання теплопровідності впливають неінформативні параметри, такі, як: контактні теплові опори, температури джерела та приймачів тепла, втрати тепла з бокових поверхонь елементів, температурна залежність теплопровідності, відтоки тепла по електродах термододу тощо.

Побудова приладів на основі зрівноважених мостових методів дає змогу значно підвищити точність вимірювання теплофізичних характеристик матеріалів за рахунок компенсації впливу вищевказаних неінформативних параметрів на результат вимірювань. Це своєю чергою дає змогу розширити діапазон вимірювання, а також, внаслідок спрощення вимірювальної схеми, значно підвищити надійність і зменшити собівартість приладів, які реалізують ці методи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомий вимірювальний перетворювач теплопровідності матеріалів [1] побудований на основі зрівноваженої мостової теплової вимірювальної

схеми (ТВС), принципова схема якого наведена на рис. 1. Принцип роботи цього вимірювального перетворювача полягає в тому, що джерело тепла 1 розміщується між двома ідентичними приймачами тепла 2 і може займати різні положення по довжині теплопровідного елемента 3. До приймачів тепла 2 примикають досліджуваний зразок 4 та еталонний зразок 5. Між зразками і теплопровідним елементом 3 розміщені температуровирівнюючі пластини 6 з вмонтованими в них спаями диференційної термопари 7. Зрівнювання температур пластин 6 контролюється нуль-індикатором 8. Зрівноваження досягається вибором положення джерела тепла 1 відносно теплопровідного елемента. Відстань l_1 від краю теплопровідного елемента до краю джерела тепла, довжина джерела тепла l і довжина теплопровідного елемента L використовуються для визначення теплопровідності матеріалу досліджуваного зразка λ_x :

$$\lambda_x = \lambda_e \frac{L-l-l_1}{l_1} \quad (1)$$

Підвищення точності досягається за рахунок ідентифікації температурних умов досліджуваного та еталонного зразків, що забезпечує виключення теплових втрат з бокових поверхонь зразків. Для підвищення точності вимірювання цим пристроєм, за рахунок звуження діапазону вимірювання, можна використовувати додаткові теплові опори, які вводять між теплопровідним елементом і зразками як досліджуваним, так і еталонним [2].

Зрівноважений мостовий метод дає можливість досягнути високої точності вимірювання і спростити процес його виконання, порівняно з іншими стаціонарними методами. Однак він не знайшов застосування для вимірювання теплопровідності будівельних матеріалів. Це пояснюється складністю реалізації, оскільки зразки будівельних матеріалів мають поперечний розмір не менше 250x250 мм [3], а виконати теплопровідний елемент під такий розмір уявляється практично неможливим.

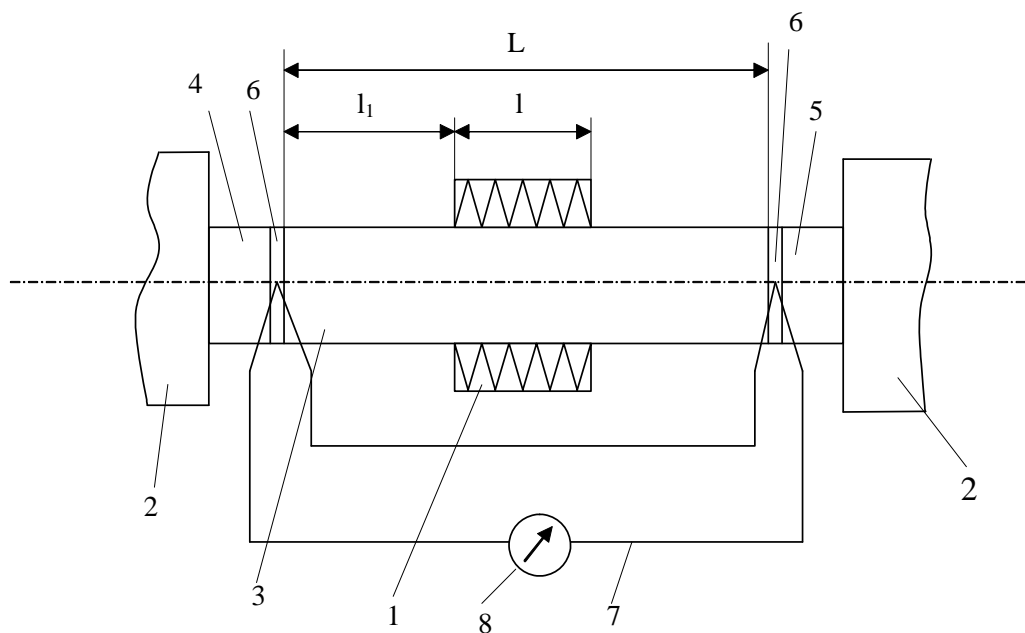


Рис. 1. Принципова схема перетворювача теплопровідності матеріалів, що реалізує зрівноважену мостову ТВС: 1 – джерело тепла; 2 – приймачі тепла; 3 – теплопровідний елемент; 4 – досліджуваний зразок; 5 – еталонний зразок; 6 – температуровирівнюючі пластини; 7 – диференційна термопара; 8 – нуль-індикатор

Основою для розробки вимірювального перетворювача теплопровідності будівельних матеріалів було запропоновано використовувати мостову ТВС неповного зрівноваження [4].

Досліджуваний зразок матеріалу входить в одне з плечей ТВС. Підбором співвідношення між тепловими опорами елементів цієї ТВС досягають мінімізації вихідного сигналу схеми, оскільки в цьому випадку є найменший вплив неінформативних параметрів. Це своєю чергою дає змогу значно підвищити точність вимірювання.

Однак ця схема має істотні недоліки, а саме:

- монтаж багатьох спаїв термопар в теплопровідний елемент ускладнює його конструкцію, значно збільшує його габарити і, тим самим, теплову інерційність усього перетворювача;
- потрібно вимірювати і реєструвати значну кількість сигналів диференційної термопари, яка утворюється комутацією різних її спаїв;
- незрівноваженість схеми не дає змоги позбутися впливу багатьох неінформативних параметрів і тим досягнути вищої точності.

Мета дослідження – створення на базі розроблених методологічних підходів нової зрівноваженої мостової ТВС з огляду на забезпечення мінімізації похибок, зумовлених впливом зовнішніх неінформативних параметрів та розробка конструкції вимірювального перетворювача теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Запропонована основою для розробки вимірювального перетворювача теплопровідності будівельних і теплоізоляційних матеріалів нова зрівноважена мостова ТВС з послідовним ввімкненням досліджуваного і еталонного зразків і з нерухомим джерелом тепла. Схема з'єднання теплових опорів у такій схемі наведена на рис. 2.

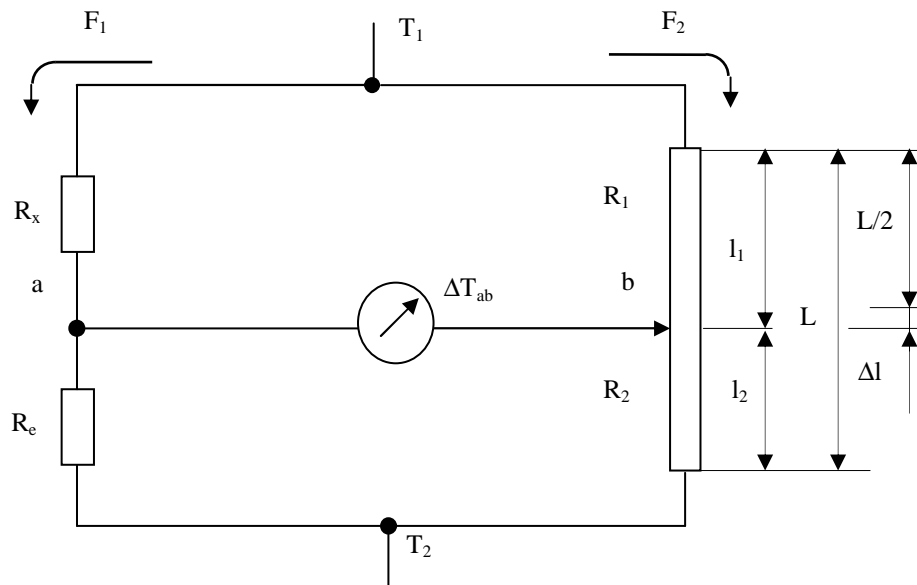


Рис. 2. Схема з'єднання теплових опорів та розподілу теплових потоків і температур у зрівноваженій мостовій ТВС з нерухомим джерелом тепла і послідовним ввімкненням досліджуваного та еталонного (стандартного) зразків

Вимірювання теплопровідності виконують так. Переміщують точку вимірювання температури по осі теплопровідного елемента до тих пір, поки не настане рівновага вимірювальної схеми ($\Delta T_{ab}=0$). Тоді можна записати:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{\Delta T_{12}}{R_x + R_e}; & F_2 &= \frac{\Delta T_{12}}{R_1 + R_2}; \\ F_1 &= \frac{\Delta T_{1a}}{R_x}; & F_2 &= \frac{\Delta T_{1b}}{R_1}; \\ \Delta T_{ab} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де ΔT_{12} – різниця температур джерела і приймача тепла; ΔT_{ab} – різниця температур у вимірювальній діагоналі; $R_x; R_e; R_1; R_2$ – теплові опори досліджуваного, еталонного зразків, частин теплопровідного елемента, відповідно; F_1, F_2 – теплові потоки в різних гілках мостової схеми.

Звідси отримаємо формулу для визначення теплового опору досліджуваного зразка:

$$R_x = R_e \frac{R_1}{R_2} = R_e \frac{l_1}{l - l_1}, \quad (3)$$

або – теплопровідності досліджуваного зразка:

$$\lambda_x = \lambda_e \frac{l_x}{l_e} \cdot \frac{S_e}{S_x} \cdot \frac{l - l_1}{l_1}, \quad (4)$$

де λ_x , λ_e – коефіцієнти теплопровідності досліджуваного і еталонного зразка; l_x , l_e – товщини досліджуваного та еталонного зразка, відповідно; l_1 – відстань від джерела тепла до точки вимірювання температури по осі теплопровідного елементу; l – довжина частини теплопровідного елементу, яка розташована між джерелом і приймачем тепла; S_x , S_e – площі поперечного перерізу досліджуваного і еталонного зразків, відповідно.

Оскільки в цій схемі теплопровідний елемент і досліджуваний зразок перебувають в різних гілках, то їхні розміри і теплопровідність можуть значно відрізнятись. Тому ця схема є перспективною для розроблення на її основі вимірювального перетворювача теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів. Порівняно зі схемою неповного зрівноваження вона має низку переваг, основна з яких – контроль рівноваги здійснюється однією диференційною термопарою, тому не потрібні монтаж і комутація багатьох термопар, зменшується обсяг експериментальних даних, теплопровідний елемент включений в іншу гілку схеми, тому має значно менші габарити тощо.

Розроблений вимірювальний перетворювач теплопровідності будівельних матеріалів в діапазоні від 0,03 до 1 Вт/(м·К) дозволяє застосування досліджуваних зразків з $R_{xmax} = 5$ К/Вт і $R_{xmin} = 0,5$ К/Вт, де R_{xmax} – максимально можливе значення теплового опору досліджуваного зразка; R_{xmin} – мінімально можливе значення теплового опору досліджуваного зразка. Принципова схема розробленого перетворювача показана на рис. 3.

Теплові потоки в теплопровідних колах приладу задаються джерелами тепла 1 і 8. Між джерелом тепла 1 і приймачем тепла 2 розміщено досліджуваний 3 та еталонний 4 зразки, розділені температуровирівнювальною пластиною 5, в якій вмонтовано спай диференційної термопари 6. Бокові поверхні зразків захищені від теплообміну з навколишнім середовищем пластинами 7. Між джерелом тепла 8 і приймачем тепла 9 розміщено теплопровідний елемент 10, який може переміщуватися механізмом, що складається з упорів 11, пластин 12, напрямних 13, ходового гвинта 14 і ручки 15. Переміщення фіксується мікрометром 16. Бокова поверхня теплопровідного елемента захищена від теплообміну з навколишнім середовищем теплоізоляційним кожухом 17. Посередині теплопровідного елемента вмонтовано другий спай диференційної термопари 6. Опорні елементи фіксуються за допомогою корпусу 18. Температури джерел тепла 1 і 8 і приймачів тепла 2 і 9 задають та підтримують за допомогою рідинних термостатів 19 і 20, відповідно. Рівність нулю сигналу диференційної термопари 6 контролюється за допомогою нуля-індикатора 21.

Джерела і приймачі тепла виконані у вигляді проточних камер, в яких циркулюють теплоносії заданої температури з відповідних термостатів.

Вимірювання виконують так. Включають термостати 19 і 20, забезпечуючи тим самим циркуляцію теплоносіїв у відповідних камерах.

Встановлюють досліджуваний зразок 3 на температуровирівнювальну пластину 5 і притискають його зверху джерелом тепла 1. Переміщують теплопровідний елемент 10 до тих пір, поки нуля-індикатор не покаже, що сигнал диференційної термопари 6 дорівнює нулю. За положенням теплопровідного елемента 10 знаходять теплопровідність досліджуваного зразка.

Досліджуваний зразок матеріалу 3 виконується у вигляді пластин з поперечними розмірами 250x250 мм і товщиною від 10 до 50 мм.

Розглядуваний прилад працює в комплекті з двома рідинними термостатами, які задають температуру вимірювання, та мікровольтметром з ціною поділки 1 мкВ і менше.

Для розрахунку оптимальних параметрів елементів приладу використовуються співвідношення отримані, враховуючи умови досягнення максимальної чутливості [5].

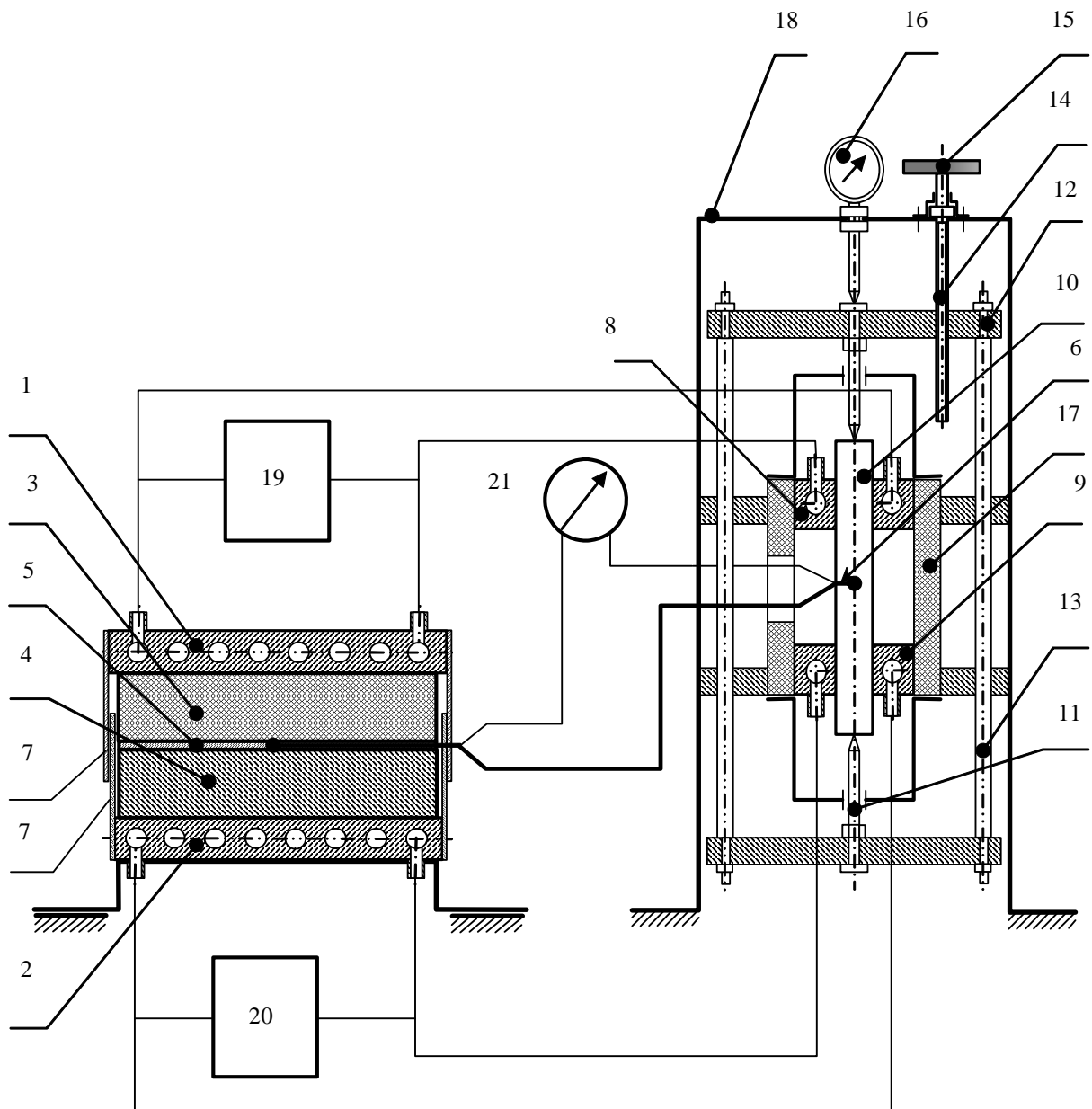


Рис. 3. Принципова схема вимірювального перетворювача теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів в діапазоні від 0,03 до 1 Вт/(м·К): 1 – джерело тепла; 2 – приймач тепла; 3 – досліджуваний зразок; 4 – еталонний зразок; 5 – температуріврівнювальна пластина; 6 – диференційна термопара; 7 – захисні пластини; 8 – джерело тепла; 9 – приймач тепла; 10 – теплопровідний елемент; 11 – упори; 12 – пластини; 13 – напрямні; 14 – ходовий гвинт; 15 – ручка; 16 – мікрометр; 17 – теплоізоляційний кожух; 18 – корпус; 19, 20 – термостати

Враховуючи заданий діапазон вимірювання, для градуювання вимірювального перетворювача використовувався набір зразків, виготовлених з органічного скла, дані про теплопровідність якого прогнозовані з високою точністю $\pm 3\%$ [6, 7], з однаковими поперечними розмірами 250×250 мм, але з різними товщинами. Враховуючи геометричні розміри міри теплопровідності, виготовленої із зразкового матеріалу (зразкової міри теплопровідності), її можна розглядати як зразкову міру теплового опору.

Для заданого діапазону вимірювання $R_x=0,5\pm 5$ К/Вт знайдено тепловий опір теплопровідного елемента і еталонного зразка. Із конструктивних міркувань вибрано довжину робочої зони теплопровідного елемента $l = 100$ мм, діаметр 15 мм, а максимальне відхилення нагрівача від середини теплопровідного елемента $\Delta l = \pm 25$ мм.

Тепловий опір еталонного зразка розраховується, враховуючи діапазон вимірювання $R_{x\min}/R_{x\max}$:

$$\frac{R_{x\max}}{R_e} = \frac{R_e}{R_{x\min}},$$

або

$$R_e = \sqrt{R_{x\max} \cdot R_{x\min}} = 1,58 \text{ К/Вт.} \quad (5)$$

Матеріалом для еталонного зразка також вибрано органічне скло. Враховуючи поперечні розміри зразка, розраховуємо його товщину

$$l_e = R_e \cdot \lambda_e \cdot S_e = 19,4 \text{ мм.}$$

Приймаємо, найближчу дійсну товщину листового органічного скла $l_e = 20$ мм. Уточнений тепловий опір еталонного зразка $R_e = 1,63$ К/Вт.

Розглянемо математичну модель розроблюваного приладу, якою вибрано вираз (3). З аналізу математичної моделі очевидно, що вимірюється відношення теплових опорів досліджуваного та еталонного зразка. Значного впливу тепловий опір теплопровідного елемента на результат вимірювання не робить, хоча з умови максимальної чутливості і конструктивних міркувань необхідно забезпечити симетричність теплових потоків в різних гілках ТВС. Частина теплопровідного елемента довжиною l повинна мати тепловий опір, що дорівнює сумі теплових опорів досліджуваного і еталонного зразків в середині діапазону: $R_T = R_{cep_x} + R_e = 1,63 + 1,63 = 3,26$ К/Вт.

Звідси можна розрахувати теплопровідність матеріалу, з якого виготовляють теплопровідний елемент так, щоб його частина довжиною l мала тепловий опір, що дорівнює 3,26 К/Вт.

Апробація вимірювального перетворювача проводили при вимірюванні теплопровідності пінобетонів з різними наповнювачами під час їх виготовлення. Залежно від умов, за яких виконували спінування, і виду наповнювача можна отримати пінобетон з різними технічними (теплоізоляційними) характеристиками. Під час аналізу зміни теплопровідності отриманого пінобетону залежно від різних факторів, виявлялись закономірності їх впливу і надавались рекомендації для створення матеріалу з найнижчою теплопровідністю. Використання цього приладу дозволило підібрати такий склад компонентів, за якого досягнуте значення теплопровідності пінобетону було в межах 0,065–0,072 Вт/(м·К).

Висновки. Отже, розробка вимірювального перетворювача теплопровідності на основі нової мостової ТВС усуває необхідність вимірювання абсолютних значень температур та їх різниць, теплових потоків, що проходять через зразки, зменшує вплив неінформативних параметрів на результат вимірювання, що своєю чергою дає змогу значно підвищити точність вимірювання, розширити діапазон вимірювання, а також, внаслідок спрощення вимірювальної схеми, значно підвищити надійність і зменшити собівартість приладів.

Крім того, вимірювальний перетворювач, розроблений на основі нової мостової ТВС значно простіший і технологічніший за конструкцією. Так, наприклад, він дає змогу знизити вимоги до точності завдання температур джерела і приймача тепла, до їх теплоізоляції, використовувати будь-які термопари, без їх попереднього градування і періодичних повірок.

1. А.С.1376021 (СССР). Способ измерения теплопроводности веществ. Я.Т. Рогоцкий, Е.П. Пистун, И.С. Василькинский. – Оpubл. в Б.И., 1988, № 7. 2. А.С.1599740 (СССР). Способ измерения теплопроводности веществ. Е.П. Пистун, И.С. Василькинский, Я.Т. Рогоцкий, Я.П. Юсык, О.М. Вента. – Оpubл. в Б.И., 1990, № 38. 3. ГОСТ 7076-99. Междержавный стандарт. Материалы и výroби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору в стаціонарному тепловому режимі. – К.: Держстандарт України, 2000. 4. Пистун Є.П., Васильківський І.С., Юсык Я.П. Новий метод вимірювання теплопровідності будівельних та теплоізоляційних матеріалів // Научн.-техн. журнал "Методи та прилади контролю якості". Вип.3. – Івано-Франківськ: Вид-во "Простір-М", 1999. – С. 25–27. 5. Пистун Е.П. Чувствительность измерительных преобразователей и приборов // Измерительная техника, №1, 1983. – С. 7–12. 6. Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 154 с. 7. ДСТУ 2568-94. Метрологія. Державна служба стандартних довідкових даних України. Основні положення. – К.: Держстандарт України, 1994.