

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МАТЕРІАЛІВ
ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ІМПУЛЬСНОЇ ТЕРМІСТОМЕТРІЇ****С. М. Матвієнко, М. В. Філіппова**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: sergey33333@voliacable.com**О. А. Мартинчук**Український науково-дослідний інститут харчування
вул. Чигоріна, 18, м. Київ, 01042, Україна. E-mail: gaster@yandex.ru

В роботі висвітлені дані по технічному аналізу можливості використання методу імпульсної термістометрії (прямого підігріву термістора) для вимірювання теплопровідності матеріалів. Розглянута функціональна схема експериментальної установки для вимірювання теплопровідності та методика проведення експерименту, яка дає змогу отримати дані для подальшого їх аналізу. Розглянуто оцінку результатів вимірювання, що говорить про можливість подальшого використання наведеного методу для вимірювання теплопровідності. За результатами проведення експерименту та аналізу результатів вимірювання зроблені висновки щодо подальшого використання наведеного методу для вимірювання теплопровідності різних матеріалів (як рідин так і твердих матеріалів) з широким діапазоном значень теплопровідності та збільшення точності вимірювання. На основі розробленого методу та проведених експериментальних досліджень розроблено новий пристрій для проведення вимірювань неруйнівними методами термістометрії для використання в промислових умовах.

Ключові слова: теплопровідність матеріалів, термістометрія.**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВодНОСТИ МАТЕРИАЛОВ
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ИМПУЛЬСНОЙ ТЕРМИСТОМЕТРИИ****С. Н. Матвиенко, М. В. Филиппова**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: sergey33333@voliacable.com**А. А. Мартинчук**Украинский научно-исследовательский институт питания
ул. Чигорина, 18, г. Киев, 01042, Украина. E-mail: gaster@yandex.ru

В работе освещены данные по техническому анализу возможности использования метода импульсной термистометрии (прямого подогрева термистора) для измерения теплопроводности материалов. Рассмотрена функциональная схема экспериментальной установки для измерения теплопроводности и методика проведения эксперимента, позволяющая получить данные для последующего их анализа. Рассмотрена оценка результатов измерения, которая говорит о возможности дальнейшего использования описанного метода для измерения теплопроводности. По результатам проведения эксперимента и анализа результатов измерения сделаны выводы относительно дальнейшего использования приведенного метода для измерения теплопроводности различных материалов (как жидкостей так и твердых материалов) с широким диапазоном значений теплопроводности и увеличения точности измерения. На основе разработанного метода и проведенных экспериментальных исследований разработано новое устройство для проведения измерений неразрушающими методами термистометрии для использования в промышленных условиях.

Ключевые слова: теплопроводность материалов, термистометрия.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Потреба у вимірі теплопровідності існує практично в будь-яких галузях науки і промисловості. Особливої актуальності точні вимірювання теплопровідності мають в будівництві та енергетиці, металургії та матеріалознавстві, авіації і космонавтиці, електроніці і приладобудуванні.

В даний час збільшується число споживачів, яким необхідні робочі засоби вимірювання, що забезпечують виконання вимог з енергозбереження та теплозахисту у високотехнологічних галузях промисловості. Перш за все в будівництві та енергетиці.

Впровадження великої кількості нових енергозберігаючих стандартів в будівництві зумовило появу певних проблем в роботі сертифікаційних та випробувальних центрів. Необхідність технологічного контролю і сертифікації матеріалів за показниками теплопровідності виникає при виробництві та експлуатації нових матеріалів різного призначення, а також при випробуваннях для встановлення відповідності до вимог нормативних документів найбільш

відповідальних елементів складних інженерних об'єктів, наприклад, огорожувальних конструкцій будівель і споруд [1]. Це особливо важливо для матеріалів, теплопровідність для яких є параметром сертифікації. Сучасні теплоізоляційні матеріали, від яких залежить ефективність енергозбереження, повинні мати низьку теплопровідність, а це значно збільшує діапазон виміру теплопровідності [2].

Вимірювання теплопровідності також використовується новітніми галузями науки, медицини, техніки. Так в медицині вимірювання теплопровідності біологічних матеріалів використовується в імунології, а в поліграфії - для визначення в'язкості фарб.

Все це зумовило потребу в простих та точних приладах для вимірювання теплопровідності матеріалів [3–5].

В даній роботі були проведені дослідження можливості використання методу імпульсної термістометрії для вимірювання теплопровідності рідин, виробів та матеріалів.

До числа найбільш ефективних методів визначення теплопровідності можуть бути віднесені неруйнівні методи, що дозволяють здійснювати вимірювання без взяття проб досліджуваного матеріалу. З їх допомогою є можливість отримувати інформацію про теплопровідність при максимальному збереженні природної структури матеріалу. Крім того, за допомогою неруйнівних методів може бути досягнута найбільш висока інформативність вимірювань, так як вони не вимагають складної попередньої підготовки досліджуваних матеріалів. Крім цього такі методи і засоби дозволяють зберігати в цілісності досліджувані об'єкти, якими є готові вироби [6].

Мета роботи – розробка системи вимірювання теплопровідності виробів та матеріалів методом імпульсної термістотметрії зі статистичної обробкою даних.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Під «теплопровідністю» розуміють процес переносу теплової енергії структурними частинками речовини (молекулами, атомами, іонами) в процесі їх теплового руху. Даний теплообмін може відбуватися в будь-яких об'єктах з неоднорідним розподілом температур, а механізм перенесення теплоти буде залежати від агрегатного стану речовини. Явище теплопровідності полягає в тому, що кінетична енергія атомів та молекул, яка визначає температуру об'єкту, передається іншому об'єкту при їх взаємодії або передається з більш нагрітих областей об'єкту до менш нагрітих [6].

Коефіцієнт теплопровідності є фізичним параметром речовини, що характеризує його здатність проводити теплоту, та визначається як:

$$\lambda = \frac{d^2 Q_\tau}{\left(\frac{dt}{dn}\right) dF d\tau} \quad (1)$$

Чисельно коефіцієнт теплопровідності λ дорівнює кількості теплоти Q_τ , що виділяється імпульсом тривалістю τ з частотою F і проходить за одиницю часу (dt/dn) через одиницю ізотермічної поверхні за умови, що $\text{grad}=1$. Його розмірність $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Значення коефіцієнта теплопровідності для різних речовин визначаються з довідкових таблиць, побудованих на підставі експериментальних даних [7]. Для більшості матеріалів залежність коефіцієнта теплопровідності від температури приблизно можна виразити у вигляді лінійної функції [8]:

$$\lambda = \lambda_0 [1 + b(t - t_0)] \quad (2)$$

де λ_0 – значення коефіцієнта теплопровідності при температурі $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

b – постійна, що визначається за результатами дослідження.

Для здійснення вимірювань коефіцієнта теплопровідності використовується схема моста з термістором.

Для розігріву терморезистора за допомогою прямого підігріву потрібно невеликий струм, що полегшує побудову принципової схеми пристрою і забезпечує низьке енергоспоживання. Для цього узятий терморезистор RH16 2кОм, який має опір 2 кОм при 25°C .

Опір моста обирається таким чином, що всі значення резисторів мосту рівні. Виходячи з характеристики обраного терморезистора R , обирають резистори мосту, причому опір резисторів буде визначати робочу температуру, до якої буде розігріватися терморезистор R . Необхідно врахувати, щоб температура розігріву терморезистора була більше температури середовища, для якої призначене використання приладу.

Потужність, що розсіюється при подачі імпульсного сигналу на термістор, визначається як [9]:

$$Q = 4\pi r T_\Delta \lambda \quad (3)$$

де Q – потужність, що розсіюється на термісторі; r – радіус зонда (термістора); T_Δ – температура розігріву термістора; λ – коефіцієнт теплопровідності.

З іншого боку, потужність, що подається на термістор, розраховується за формулою [10]:

$$Q = FW \quad (4)$$

де F – частота імпульсів; W – енергія одного імпульсу. Тоді:

$$W = \frac{U^2}{R_T} \tau \quad (5)$$

де R_T – опір термістора; U – амплітуда імпульсів; τ – тривалість імпульсів.

Опір термістора визначається за формулою:

$$R_T = R_0 \exp B \left(\frac{1}{T + T_\Delta} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (6)$$

де R_0 – опір термістора при нормованій температурі T_0 ; B – технологічний коефіцієнт (характеристики термістора); T_Δ – температура розігріву термістора в $^\circ\text{K}$; T – температура навколишнього середовища в $^\circ\text{K}$; T_0 – температура, при якій нормується опір термістора в $^\circ\text{K}$.

Термістор є плечем мостової схеми з чотирьох резисторів, тому формула потужності набуває вигляду:

$$W = \frac{U_m^2 \cdot R_T}{(R_m + R_T)^2} \cdot \tau \quad (7)$$

де U_m – амплітуда імпульсів, що подається на вимірювальний міст; R_m – постійні опори мосту.

Враховуючи потужність, яка подається на термістор, повністю розсіюється в досліджуваному середовищі:

$$\frac{U_m^2 \cdot R_T}{(R_m + R_T)^2} \cdot \tau \cdot F = 4\pi r T_\Delta \lambda \quad (8)$$

Звідки визначаємо коефіцієнт теплопровідності:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{U_m^2 \cdot R_T}{4\pi r T_\Delta (R_m + R_T)^2} \cdot \tau \cdot F = \\ &= \frac{U_m^2 \cdot R_0 \exp B \left(\frac{1}{T + T_\Delta} - \frac{1}{T_0} \right)}{4\pi r T_\Delta (R_m + R_0 \exp B \left(\frac{1}{T + T_\Delta} - \frac{1}{T_0} \right))^2} \cdot \tau \cdot F. \end{aligned} \quad (9)$$

Якщо досліджувана рідина знаходиться в термостаті при постійній температурі T_0 , а вимірювальний міст збалансований при температурі T_0 ($R_m=R_0$; $T=T_0$), то маємо:

$$\lambda = \frac{\tau \cdot F \cdot U_m^2 \cdot \exp B \left(\frac{1}{T + T_\Delta} - \frac{1}{T_0} \right)}{4\pi r T_\Delta \cdot R_0 \left(1 + \exp B \left(\frac{1}{T + T_\Delta} - \frac{1}{T_0} \right) \right)^2} \quad (10)$$

З наведених формул для розрахунків теплопровідності отримуємо:

$$\frac{\lambda_x}{\lambda_0} = K \frac{T_{\Delta 0}}{T_{\Delta x}}, \text{ або } \lambda_x = \frac{KT_{\Delta 0}}{T_{\Delta x}} \lambda_0, \quad (11)$$

де K – коефіцієнт пропорційності; $T_{\Delta 0}$ – температура розігріву еталону рідини з відомим коефіцієнтом теплопровідності; λ_0, λ_x – теплопровідність досліджуваної рідини; λ_0 – теплопровідність еталонної рідини.

Температуру розігріву термістора визначають як різницю між початковим та кінцевим значенням температури розігріву термістора по графіках нагріву термістора за час тривалості імпульсу розігріву.

При проведенні експериментальних досліджень, в якості матеріалу було використано: дистильовану воду, 0,9 % водний розчин NaCl, 40 % водний розчин етилового спирту, 40 % водний розчин цукру, машинне масло, які мають якісний тепловий контакт з термісторним зондом.

Для зменшення впливу коливань температури зовнішнього середовища на результати вимірювань досліджувані рідини розміщувалися у стерильних пробірках ємністю по 200 мкл. в медичному термостаті, який нагріває їх до температури 36°C.

Після нагрівання оператор занурює в вимірювальне середовище термісторні сенсори, підключені за мостовою схемою, та запускає початок вимірювання на ПК.

Функціональна схема приладу, використаного в ході експерименту для вимірювання теплопровідності наведена на рис. 1

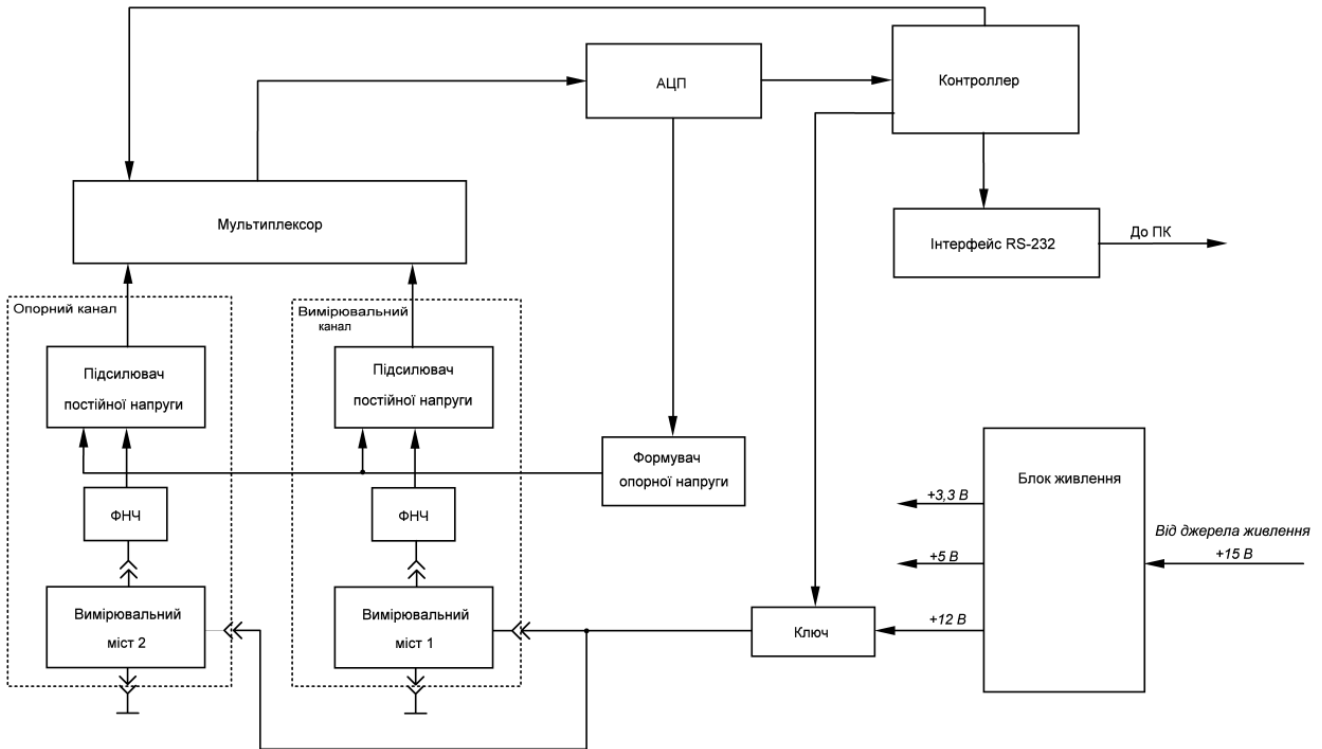


Рисунок 1 – Функціональна схема приладу, використаного в ході експерименту для вимірювання теплопровідності

Експериментальна установка працює наступним чином: після отримання команди про початок вимірювання контролер, за допомогою ключа, подає напругу на вимірювальні мости впродовж 6 секунд. Електричний струм, що протікає через термістор нагріває його, змінюючи температуру термістора. Власна температура термістора пропорційна коефіцієнту теплопровідності рідини у яку він занурений. Зміна температури приводить до зміни опору термістора, а отже і до розбалансу вимірювального моста.

Різниця потенціалів з вимірювальної діагоналі мосту поступає на вхід підсилювача постійної напруги, на виході якого отримуємо підсилений сигнал.

Сигнали з підсилювачів першого та другого вимірювального мостів подаються на вхід мультиплексора, який перемикає ці сигнали на вхід АЦП за командою контролера. З АЦП сигнал у цифровому вигляді подається в контролер де він проходить попередню статистичну обробку та зберігається як масив даних до кінця вимірювального циклу.

За 6 секунд вимірювання контролер опитує 240 разів кожен з мостів й накопичує та усереднює отримані дані. Впродовж наступних 20 секунд на вимірювальний міст не поступає напруга, і термістор охолоджується. Таким чином час виконання одного циклу складає 26 секунд. Під час охоло-

дження термістора відбувається передача результатів першого циклу в ПК через інтерфейс RS-232.

Вимірювальна сесія складається з 10 циклів, а загальний час вимірювання складає 260 секунд. Графік вимірювальної сесії наведений на рис. 2

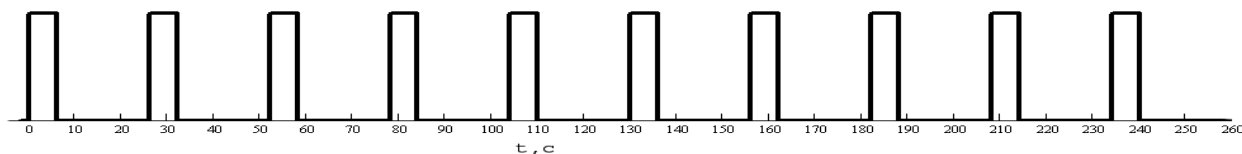


Рисунок 2 – Графік вимірювальної сесії

На рис.3. приведено графіки зміни напруги в діагоналі вимірювального мосту впродовж імпульсу розігріву термістора для різних рідин.

З графіків видно, що збільшення теплопровідності досліджуваної рідини призводить до зменшення температури розігріву термістора (зменшується кут нахилу характеристики), що чітко розмежовує досліджувані рідини. Температура розігріву термістора на графіках приведена в умовних одиницях, які можна перерахувати в абсолютні температурні показники. Впродовж сеансу темпе-

ратура досліджуваних рідин змінювалась за рахунок коливань температури в термостаті тому графіки однієї і тієї ж рідини дещо розмиті (див. графіки для машинного масла).

Графік дрейфу температури впродовж сеансу вимірювання приведений на рис.4.

З рис. 4 видно, що впродовж вимірювального сеансу температура дослідного зразка збільшувалась, що впливало на дані вимірювання. Тому при визначенні коефіцієнту теплопровідності для збільшення точності вимірювання необхідно вводити температурні поправки.

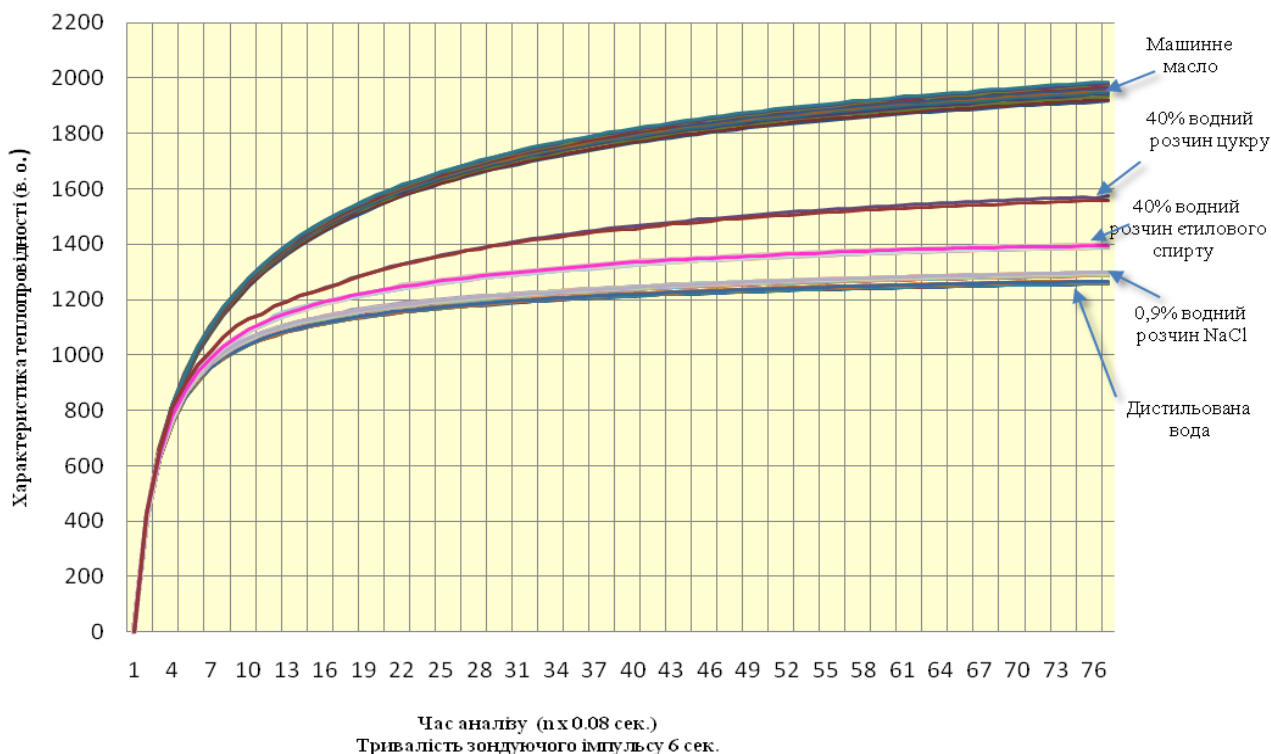


Рисунок 3 – Сімейства кривих напруги в діагоналі вимірювального мосту для різних рідин

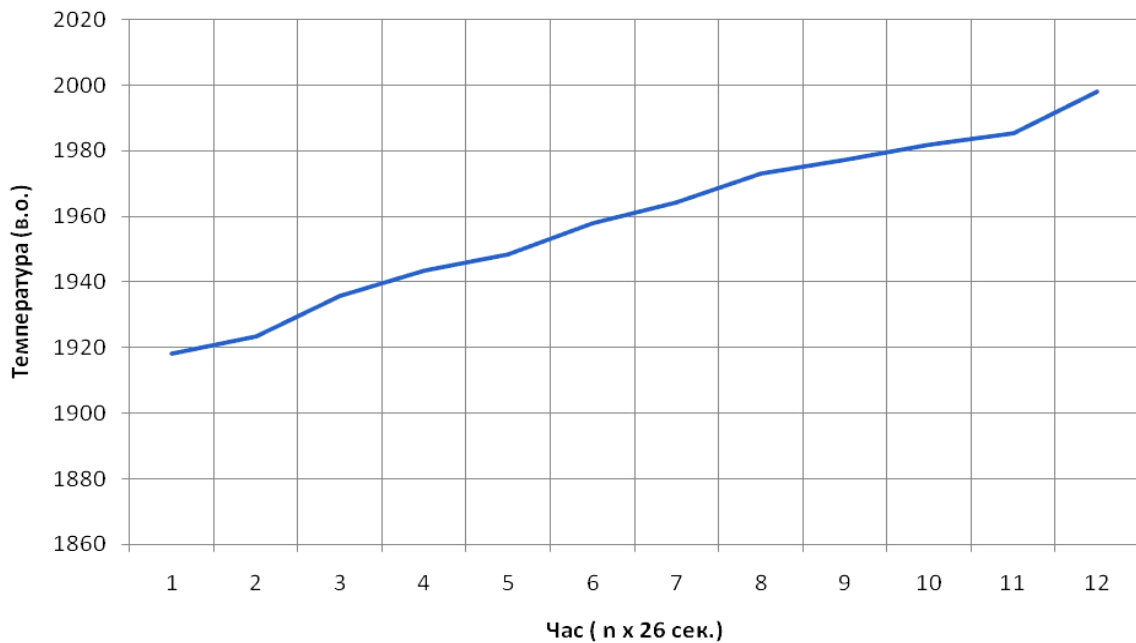


Рисунок 4 – Дрейф температури впродовж сеансу вимірювання

ВИСНОВКИ. Дослідження зумовлене загальною необхідністю розробки нової системи та методів вимірювання теплопровідності рідин та матеріалів з метою визначення їх властивостей і технологічного стану. Необхідність контролю якості виробів та матеріалів на всіх етапах виробництва зумовлює пошук та створення досконаліших методів та засобів неруйнівного контролю теплопровідності матеріалів. Результати вимірювань підтвердили, що методом імпульсної термістотрії можна проводити вимірювання коефіцієнта теплопровідності.

З урахуванням наведених даних та виходячи з поставленої задачі, для досягнення високого ступеня точності вимірювань використано стаціонарний порівняльний метод. В даному випадку в якості опорного взяти одну із рідин, наприклад воду. Для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів необхідно змінити конструкцію термісторного зонду для забезпечення надійного теплового контакту з досліджуванним матеріалом.

Для забезпечення максимальної точності вимірювання та широкого діапазону значень теплопровідності необхідно:

- Забезпечити надійний тепловий контакт зонду з досліджуванним матеріалом;
- Здійснювати корекцію значень в залежності від температури досліджуваного матеріалу по даним довідників та електричних характеристик вимірювального пристрою;
- Використовувати різний ступінь розігріву термісторного зонду шляхом збільшення діапазону струму, що проходить через термістор;
- Використати при вимірюванні в якості опорних еталонні зразки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Установа для вимірювання коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів ИТ-7С / З.А. Бузова, Л.И. Воробйов, Л.В. Декуша, О.Л. Декуша // Метрологія та прилади. Харків, 2009. – № 6. – С. 9–15.
2. Нестационарный метод и экспериментальная установка для измерения теплопроводности теплоизоляторов / И.В. Ковалева, И.В. Кораблев, Ю.И. Азима // Измерительная техника. – 2005. – № 8. – С. 38–43.
3. Влияние определяющих факторов на результаты измерения коэффициентов теплопроводности методом локального теплового воздействия / Л.В. Декуша, Т.Г. Грищенко, Т.В. Менделеева, Л.И. Воробьев, О.Л. Декуша // Пром. теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 2. – С. 74–80.
4. Чуриков А.А., Сенкевич А.Ю. Многостадийный метод и информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 62–69.
5. Особенности экспресс-измерения теплопроводности на образце конечной толщины прибором ИТ-8 / Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева, Л.И. Воробьев, О.Л. Декуша // Промтеплотехника. – 2004. – Т. 26, № 5. – С. 76–81.
6. Калинин А.Н. Погрешности измерений теплопроводности образцов произвольной геометрии неразрушающим сравнительным методом двухточечного зондирования поверхности: тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции "Метрологическое обеспечение теплофизических измерений при низких температурах" / отв. Ред. А.Н. Калинин. – Хабаровск, 1988. – часть I. – С. 48–49.
7. Прибор для определения теплового сопротивления и коэффициента теплопроводности изоляционных материалов / Ю.В. Алешкевич, А.Ф. Бегун-

кова, Г.Р. Гольберг и др. // Приборостроение. – 1986. – Т. 11, № 8. – С. 99–102.

8. Лыков А.В. Теория теплопроводности.– М.: Высш. шк., 1987. – 600 с.

9. Kubičár L., Bágel L., Vretenár V., Štofanič V.: Validation test of the Hot Ball method for setting of the

cement paste. In proceedings of the THERMOPHYSICS 2005, Kočovce, Slovakia, P 38–42.

10. Kubičár L. Kubičár L., 1990, Pulse Method of Measuring Basic Thermophysical Parameters, in Comprehensive Analytical Chemistry, Vol XII, Thermal Analysis, Part E, Ed Svehla G, (Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier).

RESEARCH OF MATERIALS THERMAL CONDUCTIVITY USING PULS HEATING THERMISTOR METHOD

S. Matvienko, M. Filippova

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
prosp. Peremohy, 37, 03056, Kyiv-56, Ukraine. E-mail: sergey33333@voliacable.com

A. Martynchyk

vul. Chygoryna, 18, 01042, Kyiv, Ukraine. E-mail: gaster@yandex.ru

Purpose. This work is focused on to technical analysis of state of possibility of using direct heating thermistor method to measure the thermal conductivity of materials. **Methodology.** It was developed a functional diagram of the research facility for measuring thermal conductivity and the experimental technique that allows to obtain the data for later analysis. **Results.** According to the experimental results and analysis of measurement results the conclusions about the future use of above method for measuring thermal conductivity various materials (liquids and solids) with a wide range of thermal conductivity parameters and increase accuracy were done. **Originality.** For the first time it was described the evaluation measurement results, which enable the possibility of further usage of the method for thermal conductivity measuring. **Practical value.** On the basis of obtained method and experimental research we developed a new device for non-destructive measurements of the thermal conductivity for use in industrial environments.

Key words: thermal conductivity materials, pulse heating thermistor.

REFERENCES

1. Burova, Z.A., Vorobyov, L.Y., Dekusha, L.V. and Dekusha, O.L. (2009), "Device for measuring thermal conductivity building materials IT-7S", *Metrolohiya ta pryklady*, vol. 6, pp. 9–15.

2. Kovaleva, I.V., Korablev, I.V., Azima, Y.I. (2005), "Non-stationary method and the experimental setup for measuring the thermal conductivity of heat insulator", *Izmeritel'naya tekhnika*, vol. 8, pp. 38–43.

3. Dekusha, L.V., Grishchenko, T.G., Mendeleeva, T.V., Vorob'ev, L.I., Dekusha, O.L. (2005), "Influence of the determining factors on the measurement results of thermal conductivity by local thermal effects", *Prom. Teplotekhnika*, vol. 27, no. 2, pp. 74–80.

4. Churikov, A.A., Senkevich, A.Y. (2002), "The multi-stage method, information and measuring system non-destructive testing of thermal properties", *Transactions of TGTU*, vol. 8, no. 1, pp. 62–69.

5. Dekusha, L.V., Mendeleeva, T.V., Vorob'ev, L.I., Dekusha, O.L. (2004), "Features rapid measurement thermal conductivity of a sample finite thickness instrument IT-8", *Promteplotekhnika*, vol. 26, no. 5, pp. 76–81.

6. Kalinin, A.N. (1988), "Thermal conductivity measurement error models arbitrary geometry of a non-destructive method comparative two-point sensing surface", *Pogreshnosti izmereniy teploprovodnosti*

obraztsov proizvol'noy geometrii nerazrushaitsim sravnitel'nym metodom dvukhtochchnogo-zondirovaniya poverkhnosti: tezisy dokladov V Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Metrologicheskoe obespechenie teplofizicheskikh izmereniy pri nizkikh temperaturakh" [Abstracts of V All-Union Scientific and Technical Conference "Metrological maintenance of thermal measurements at low temperatures"], Khabarovsk, part I, pp. 48–49.

7. Aleshkevich, Y.V., Begunkova, A.F., Golberg, G.R. et. al. (1986), "The device for determining the thermal resistance and thermal conductivity of insulation materials", *Priborostroenie*, vol. 11, no. 8, pp. 99–102.

8. Lykov, A. V. (1967), *Teoriya teploprovodnosti* [The theory of heat conduction], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.

9. Kubičár, L., Bágel, L., Vretenár, V. and Štofanič, V. (2005), "Validation test of the Hot Ball method for setting of the cement paste", *In proceedings of the THERMOPHYSICS 2005*, Kočovce, Slovakia, pp. 38–42.

10. Kubičár L. Kubičár L., (1990), *Pulse Method of Measuring Basic Thermophysical Parameters, in Comprehensive Analytical Chemistry, Vol XII, Thermal Analysis, Part E*, Ed Svehla G, (Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier).

Стаття надійшла 25.12.2015.