

УДК 519.816:004.9 + 519.6

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.2.96328

С.М. Матвієнко, С.П. Вислоух, К.Г. Філоненко*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПІДГРІВУ ТЕРМІСТОРА

Background. This work addresses the development of an experimental device and increasing the accuracy of determining the thermal conductivity of solid materials by thermistor direct heating method.

Objective. The aim of the paper is to create the installation, conduct experimental studies to determine the value of the thermal conductivity of solid materials by thermistor direct heating method and to research destabilizing factors that affect the measurement error, and to suggest ways to increase the accuracy of measurements.

Methods. Experimental device has been created, which work is based on the direct heating method of the thermistor and necessary researches have been carried out. The results of the measurement are given by setting the thermal conductivity coefficients of various materials, which make it possible to expand the scope of the method.

Results. Rational operating modes and design of probes for measuring the thermal conductivity of solid materials depending on their TPC are proposed and justified. Ways to reduce the measurement error by thermistor direct heating method are presented. Investigation of destabilizing factors influencing the measurement error made it possible to determine means of reducing their influence on the results of determining the thermal conductivity of solid materials and to suggest ways to increase the accuracy of measurements.

Conclusions. The experimental device has been tested experimentally and implemented in the research and production activities of “VIRCOM” and in the educational process of the Department of Instrumentation Design and Engineering of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Keywords: thermal conductivity; thermistor direct heating method; experimental device; thermophysical characteristics of solid materials.

Вступ

У рамках впровадження технологій з енергозбереження використовуються матеріали, які мають особливі теплоізоляційні та теплопровідні характеристики. Створюються нові полімерні матеріали, які мають підвищені теплоізоляційні та теплопровідні властивості порівняно із зазвичай використовуваними матеріалами [1–4].

Аналіз сучасної ситуації в області теплофізичного приладобудування показує, що проблема підвищення точності, ефективності та оперативності методів вимірювання теплофізичних характеристик (ТФХ) була і залишається актуальною. Питання дослідження ТФХ матеріалів розглядаються в працях З.А. Бурової, Л.Й. Воробйова, Л.В. Декуші, О.Л. Декуші, В.П. Варгафтика, С.А. Тагоєва, Д.С. Сіманкової, А.Г. Коротких, А.А. Липаєва, А.Д. Івлієва, А.А. Кісліцина, Д.В. Пономарьова, А.В. Жарова, Д.В. Акуленка, Дж.В. Вальвано, Г.Т. Андерсона, Г. Аркіна, М.Ф. ван Гелдера та ін.

Порівняльна оцінка методів визначення теплопровідності твердих матеріалів дала змогу

встановити, що в цьому випадку доцільно використовувати метод прямого підігріву термістора, який ефективно застосований при визначенні теплопровідності рідин [5]. З урахуванням особливостей визначення теплопровідності твердих матеріалів на стадії проектування засобу вимірювання виникає питання створення раціональної конструкції вимірювального зонда. Вибір характеристик і режимів роботи чутливого елемента, яким є термістор, визначення ефективної схеми вимірювання можуть бути здійснені завдяки проведенню експериментальних досліджень [6]. При цьому для забезпечення необхідної точності визначення теплопровідності матеріалів важливими є аналіз можливих похибок вимірювання та їх кількісна оцінка.

Постановка задачі

Метою роботи є розробка засобу дослідження теплопровідності твердих матеріалів та проведення відповідних експериментів для визначення шляхів підвищення точності вимірювання ТФХ. На цій основі передбачається виконати аналіз причин виникнення похибок та

*corresponding author: sergey33333@voliacable.com

обґрунтувати способи їх зменшення при вимірюванні коефіцієнта теплопровідності методом прямого підігріву термістора.

Реалізація поставленої задачі

Як вказано в [5], за основу методу вимірювання теплофізичних характеристик покладено прямий підігрів термістора, який має низку переваг над іншими методами. Основними з них є малі розміри термістора та форма його головки, що значно спрощує конструкцію вимірювального зонда.

На рис. 1 наведено конструкцію зонда, що пропонується для вимірювання коефіцієнта теплопровідності твердих, умовно-твердих і сипких матеріалів.

Металева капсула, в якій розміщений термістор, має плоску поверхню для термічного контакту з досліджуваним матеріалом. Вимірювальний зонд цією поверхнею притискається до досліджуваного зразка. За рахунок нерівності поверхні (шорсткості) цього зразка або непаралельності контактних поверхонь термічний контакт може бути неякісним, що може призвести до появи значної похибки при вимірюванні.

Згідно з методом прямого підігріву термістора вимірювання теплопровідності здійснюється застосуванням явища його саморозігріву за рахунок протікання через нього електричного струму. При реєстрації даних вимірювання використовується ділянка вольт-амперної характеристики, де зменшення опору термістора більше, ніж відносно збільшення струму [5]. На цій ділянці проявляється ефект саморозігріву термістора, і величина падіння опору буде залежати від температури його розігріву, тобто від навколишнього середовища, в якому він розміщений. Графік саморозігріву термістора у вигляді термограми використовується для визначення ТФХ досліджуваних матеріалів.

Однією з причин виникнення систематичної похибки визначення теплопровідності є те, що термістор не має ідеальних теплофізичних характеристик, які обумовлені наявністю його оболонки та її розмірами. Для ідеальної моделі термісторного датчика у вигляді кулі радіусом r його коефіцієнт теплопровідності визначається за формулою [7]

$$\lambda = \frac{P_t}{4\pi r \Delta T},$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваного матеріалу, Вт/(м·К); P_t – потужність термістора, Вт; r – радіус термістора, м; ΔT – температура розігріву термістора, °С.

Наявність оболонки, яка впливає на процес теплообміну між нагрітим термістором і досліджуваним матеріалом, призводить до появи похибки вимірювання температури розігріву термістора. Крім цього, залежність опору термістора від температури є нелінійною, що додатково вносить систематичну похибку при розрахунках теплопровідності. Введення корегувальних коефіцієнтів, що визначаються в результаті вимірювання еталонних матеріалів із відомими теплофізичними характеристиками, дає можливість значно зменшити цю похибку.

Тоді формула для розрахунку коефіцієнта теплопровідності за даними вимірювань матиме такий вигляд [8]:

$$\lambda_{д.р.і} = \frac{P_t}{4\pi r \cdot K_{ki}(T_{(+40)} - T_o) - \Delta T_o N_{(+40)}} \times \frac{K_o \cdot N_{(+40)}}{N_{3vi} - N_{1vi} - (N_{(+40)} - K_{hi} N_{1vi}) \cdot K_{Pi}},$$

де $\lambda_{д.р.і}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваного матеріалу, що визначений за даними вимірювання i -го термісторного зонда; N_{3vi} – числове значення в кінцевій точці розігріву термістора за термограмою, що отримане в результаті вимірювання i -го термісторного зонда; N_{1vi} – числове значення в початковій точці розігріву термістора за термограмою, що отримана в результаті вимірювання i -го термісторного зонда; K_{hi} – коефіцієнт, що корегує похибку вимірювання i -м термістором температури досліджуваного зразка; K_{Pi} – коефіцієнт, що корегує залежність значення вимірюваної i -м термістором різниці $N_{3vi} - N_{1vi}$ від температури досліджуваного зразка; K_{ki} – коефіцієнт, що корегує чутливість i -го термістора (виконує компенсацію похибки значення вимірюваної i -м термістором різниці $N_{3vi} - N_{1vi}$ до середньостатистичного значення); ΔT_o – температура саморозігріву термістора, що визначена за результатами досліджень із використанням еталонних матеріалів, °С (додатковий саморозігрів термістора викликаний наявністю оболонки); K_o – коефіцієнт пропорційності, що визначає чутливість термістора до значення теплопровідності досліджуваного матеріалу.

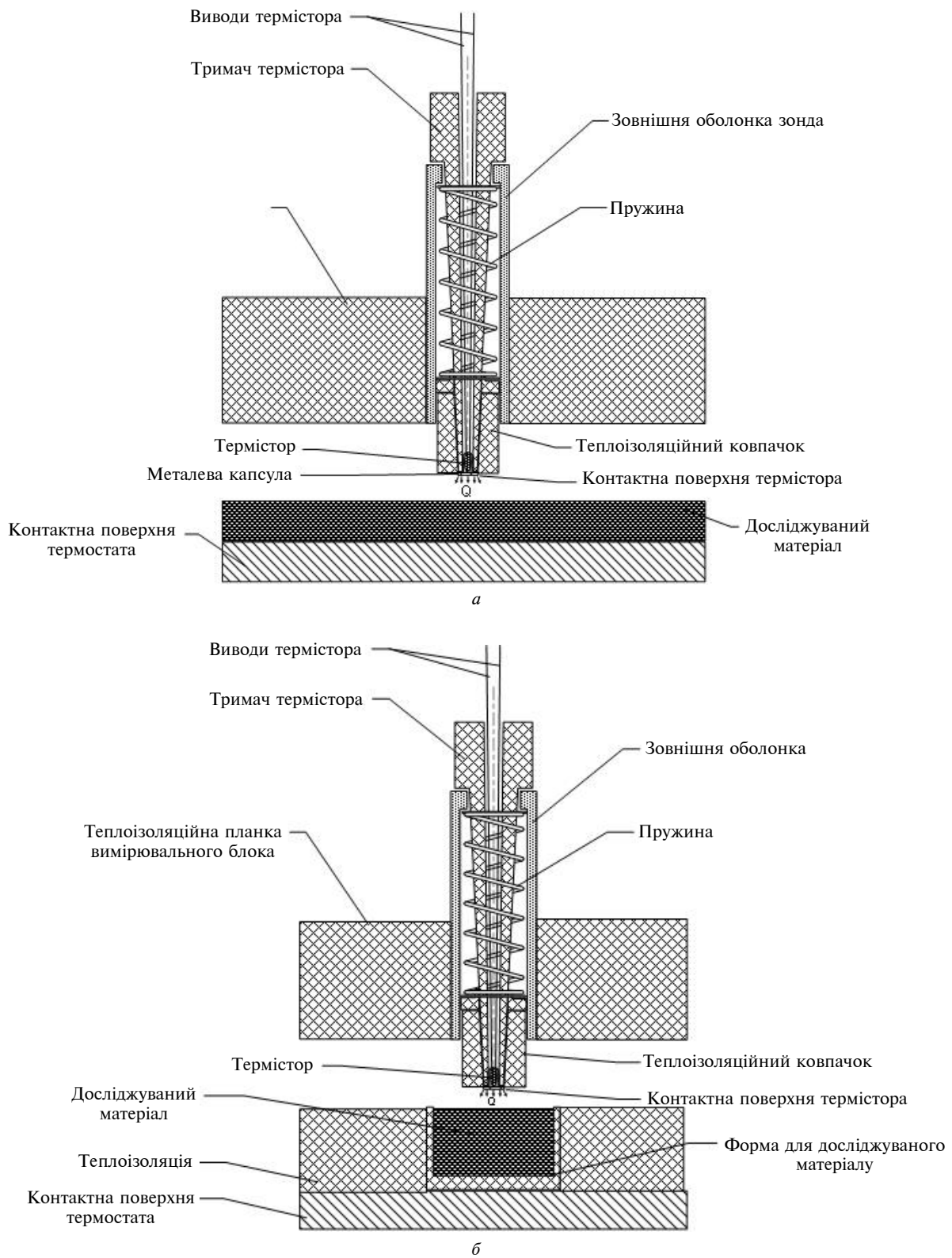


Рис. 1. Конструкція зонда для вимірювання коефіцієнта теплопровідності: *a* – твердих матеріалів, *б* – умовно-твердих і сипких матеріалів

Коефіцієнт пропорційності K_o визначається за формулою

$$K_o = \frac{(\Delta T_{\text{ет.2в.}} - \Delta T_{\text{ет.1в.}})}{(\Delta T_{\text{ет.2р.}} - \Delta T_{\text{ет.1р.}})},$$

де $\Delta T_{\text{ет.2в.}}$ і $\Delta T_{\text{ет.1в.}}$ – значення температури розігріву термістора, що визначені за результатами досліджень із використанням еталонних речовин із найменшим ($\Delta T_{\text{ет.2в.}}$) та найбільшим ($\Delta T_{\text{ет.1в.}}$) коефіцієнтами теплопровідності; $\Delta T_{\text{ет.2р.}}$ та $\Delta T_{\text{ет.1р.}}$ – значення температури розігріву термістора для еталонних речовин із найменшим ($\Delta T_{\text{ет.2р.}}$) та найбільшим ($\Delta T_{\text{ет.1р.}}$) коефіцієнтами теплопровідності.

Температура саморозігріву термістора ΔT_o , що зумовлена наявністю оболонки, визначається за формулою

$$\Delta T_o = \Delta T_{\text{ет.2в.}} - \frac{(\Delta T_{\text{ет.2в.}} - \Delta T_{\text{ет.1в.}}) \cdot \Delta T_{\text{ет.2р.}}}{(\Delta T_{\text{ет.2р.}} - \Delta T_{\text{ет.1р.}})}.$$

Коефіцієнти K_n , K_{Π} , K_k , ΔT_o , K_o визначаються в ході калібрувальних досліджень із використанням як еталонних матеріалів з відомими ТФХ.

Для досконального дослідження теплових процесів, які відбуваються при нагріванні термістора, розглянемо модель стаціонарного стану.

Для реалізації засобу визначення теплопровідності твердих матеріалів запропоновано схему вимірювання, в якій використано термістор RH16 із зовнішнім діаметром голівки 1,8 мм, що має оболонку з епоксидної смоли. Термістор розміщений у металевій капсулі з латуні товщиною 0,5 мм. Оболонка термістора, капсула та досліджуваний матеріал мають різні коефіцієнти теплопровідності, тому розв'язок диференціального рівняння теплопровідності для $r < r_o$ має вигляд [9]

$$T_o(r) = \frac{\left[r_o^2 - r^2 + \frac{2}{H_o} r_o \lambda_o + 2r_o^2 \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_k} \right) \right]}{8\pi \lambda_o r_o^3}, \quad (1)$$

де r – відстань від термістора, м; r_o – радіус оболонки термістора, м; q – потужність, що подається на термістор, Вт; λ_k – коефіцієнт теплопровідності матеріалу капсули, Вт/м·К; λ_o – коефіцієнт теплопровідності матеріалу оболонки

термістора, Вт/м·К; H_o – коефіцієнт теплопередачі оболонки термістора, Вт/м²·К.

За умови $r_o < r < r_k$ маємо

$$T_k(r) = \frac{\left[r_k^2 - r^2 + \frac{2}{H_k} r_k \lambda_k + 2r_k^2 \left(\frac{\lambda_k}{\lambda_{\text{д.м.}}} \right) \right]}{8\pi \lambda_k r_k^3}, \quad (2)$$

де r_k – радіус капсули термістора, м; q – потужність, що подається на термістор, Вт; λ_k – коефіцієнт теплопровідності матеріалу капсули, Вт/м·К; λ_o – коефіцієнт теплопровідності матеріалу оболонки термістора, Вт/м·К; $\lambda_{\text{д.м.}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу досліджуваного зразка, Вт/м·К; H_k – коефіцієнт теплопередачі капсули, Вт/м²·К.

У випадку $r > r_k$ маємо

$$T(r) = \frac{q}{4\pi r \lambda_{\text{д.м.}}}. \quad (3)$$

Залежності (1)–(3) дають змогу розрахувати розподіл температури в зонді та досліджуваному матеріалі.

Експериментальна установка для вимірювання твердих матеріалів

На основі запропонованого методу вимірювання теплопровідності твердих матеріалів розроблена експериментальна установка, яка складається з вимірювального блока, блока живлення, блока зондів і термоелектричного нагрівача-охолоджувача та має чотири вимірювальних зонди (рис. 2). Термістори закріплюються на кінці вимірювальних зондів у металевій капсулі, що своєю контактною поверхнею в процесі вимірювання притискається до досліджуваного матеріалу за допомогою пружини. Термістор кожного вимірювального зонда увімкнений в одне із плечей вимірювального моста. Під дією електричного імпульсу, який подається на вимірювальні мости, термістори розігріваються. Вимірюваний сигнал розбалансу всіх чотирьох мостів поступає на аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Числові значення на виході АЦП пропорційні температурі розігріву термісторів. Протягом імпульсу розігріву через короткі проміжки часу значення на виході АЦП записуються в пам'ять мікроконтролера установки, а потім передаються до зовнішнього персонального комп'ютера, де формується

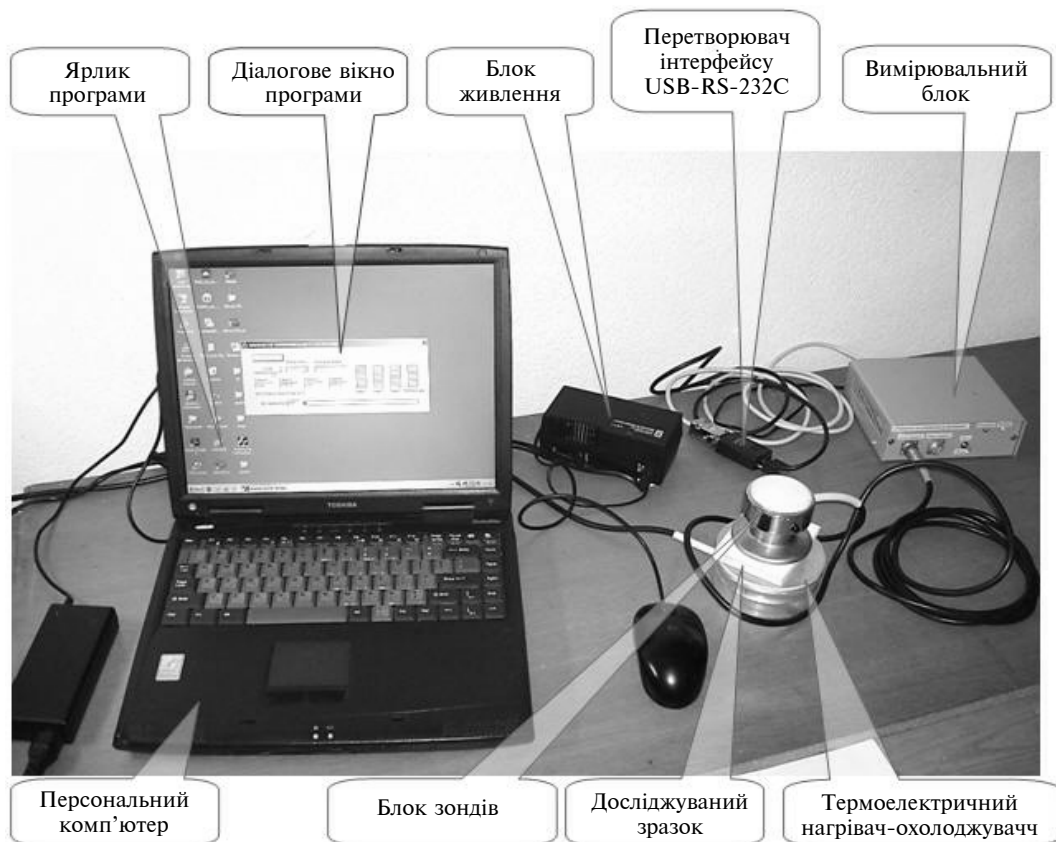


Рис. 2. Загальний вигляд експериментальної установки для вимірювання коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів

файл даних вимірювання. Дані вимірювання, що записані за час дії імпульсу розігріву, відображаються у вигляді термограми, за якою визначається температура саморозігріву термістора.

Заходи зменшення похибок процесу вимірювання

Похибки вимірювання можна розділити на методичні (похибки методу), інструментальні, суб'єктивні (похибки оператора), а також похибки обробки результатів вимірювання [10].

Інструментальна похибка, як правило, є найбільш значимою з усіх складових похибок. Вона визначається недосконалістю засобу вимірювання і впливом дестабілізуючих факторів різного роду, що створюють завади в процесі вимірювання.

Аналіз можливих причин виникнення похибки вимірювання дає підстави стверджувати, що для досягнення високої точності вимірювання необхідно вжити низку заходів. Зокрема, потрібно знизити можливість виникнення похибки, що викликана діями оператора, через створення покрокової методики проведення

вимірювань з урахуванням властивостей досліджуваних матеріалів, а також застосування схемотехнічних і конструктивних методів, що зменшують вплив різноманітних завад на результати досліджень при конструюванні та розробці вимірювального засобу.

Важливим при вимірюванні теплопровідності твердих матеріалів є вибір режиму роботи термісторного зонда для забезпечення необхідної його чутливості до теплофізичних властивостей досліджуваного матеріалу та якісного теплового контакту з матеріалом.

Результати експериментальних досліджень

З метою зменшення похибки вимірювання, визначення оптимальних і ефективних режимів роботи термістора, вибору характеристик конструкції вимірювального зонда, вибору раціонального методу вимірювання та обчислення ТФХ за термограмою розігріву термістора проведено експериментальні дослідження за допомогою створеної установки для вимірювання ТФХ твердих матеріалів, що має чотири термісторних зонди.

На рис. 3 наведено результати визначення ТФХ досліджуваних матеріалів, що мають теплопровідність 10; 1,0 і 0,1 Вт/м·К. При проведенні цих досліджень використано термістор радіусом 0,9 мм, що має оболонку з епоксидної смоли теплопровідністю $\lambda_o = 0,325$ Вт/м·К і капсулу з латуні ($\lambda_k = 100$ Вт/м·К) товщиною 0,5 мм. Середня потужність термістора становила 31,5 мВт при напрузі на вимірювальному мості 12 В.

З наведених графіків розподілу температури в зонді та досліджуваному матеріалі видно, що потужності термістора достатньо для вимірювання теплопровідності матеріалів у діапазоні від 0,1 до 1,0 Вт/м·К.

При вимірюванні від 1,0 Вт/м·К для забезпечення чутливості вимірювальних зондів до теплофізичних характеристик досліджуваних матеріалів необхідно збільшувати потужність термістора. Також при вимірюванні від 1,0 Вт/м·К на похибку вимірювання впливає якість теплового контакту між контактною поверхнею зонда та досліджуваним матеріалом (термічний опір контактної шару $\Delta T_{к.ш.}$).

У процесі виконання експериментальних досліджень теплопровідності твердих матеріалів проведено вимірювання температури розігріву термістора протягом 6 с із паузою охолодження 20 с із використанням як досліджуваних матеріалів пластини ПВХ товщиною 8 мм (рис. 4), пластини вакуумної гуми товщиною 6 мм (рис. 5) та латунної пластини товщиною 8 мм (рис. 6).

Температура розігріву термістора визначалась як різниця значень температури в кінцевій точці термограми і температури в початковій точці розігріву. На рис. 4–6 температура, що вимірюється термісторами впродовж імпульсу розігріву, подана в умовних одиницях числових значень на виході АЦП вимірювального блока, які прямо пропорційні напрузі розбалансу вимірювального моста, тобто температурі розігріву термістора.

З термограм на рис. 4–6 видно, що внаслідок наявності контактної капсули, яка збільшує теплову інерційність зонду за 6 с імпульсу розігріву, зонд не повністю встигає нагрітися. Тому для збільшення чутливості зонда до навколишнього середовища доцільно збільшити тривалість імпульсу розігріву залежно від теплопровідності досліджуваного матеріалу та розмірів контактної капсули.

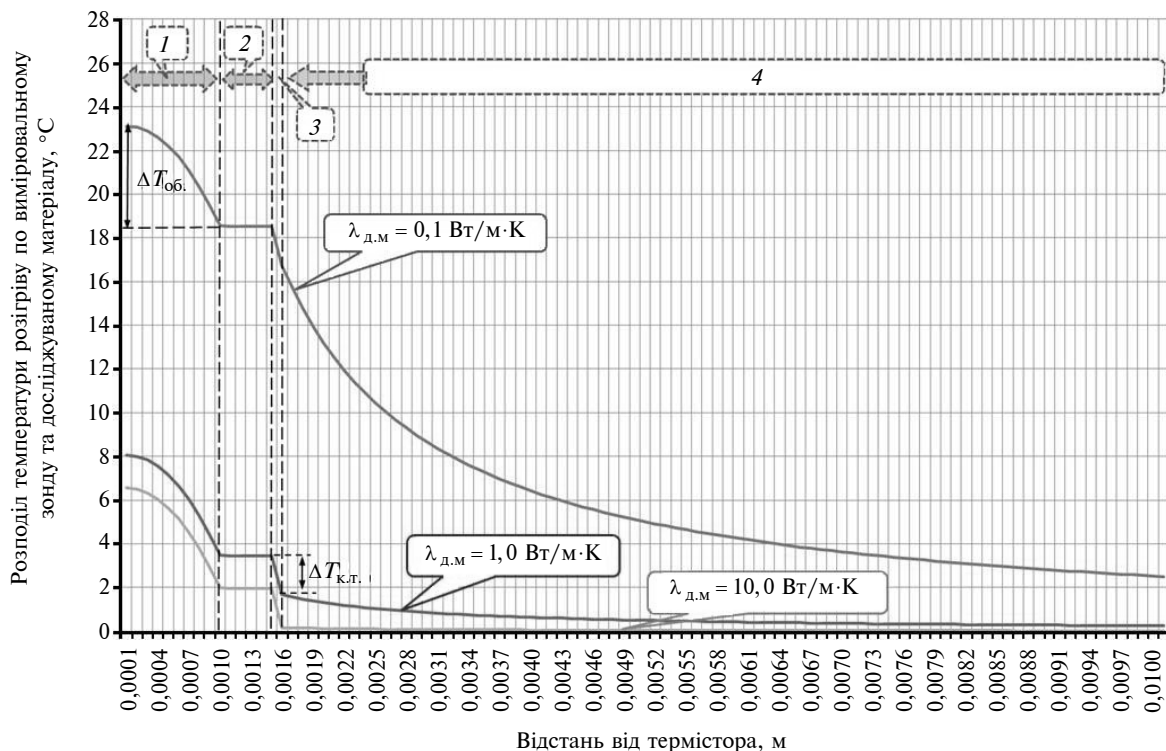


Рис. 3. Результати розрахунків розподілу температури в зонді та досліджуваному матеріалі при використанні як досліджуваних матеріалів із теплопровідністю 10; 1,0 і 0,1 Вт/м·К: 1 – розподіл температури в термісторі радіусом r ; 2 – розподіл температури в металевій капсулі; 3 – прошарок між досліджуваним матеріалом 4 та контактною поверхнею металеві капсули; зона 4 – досліджуваний матеріал

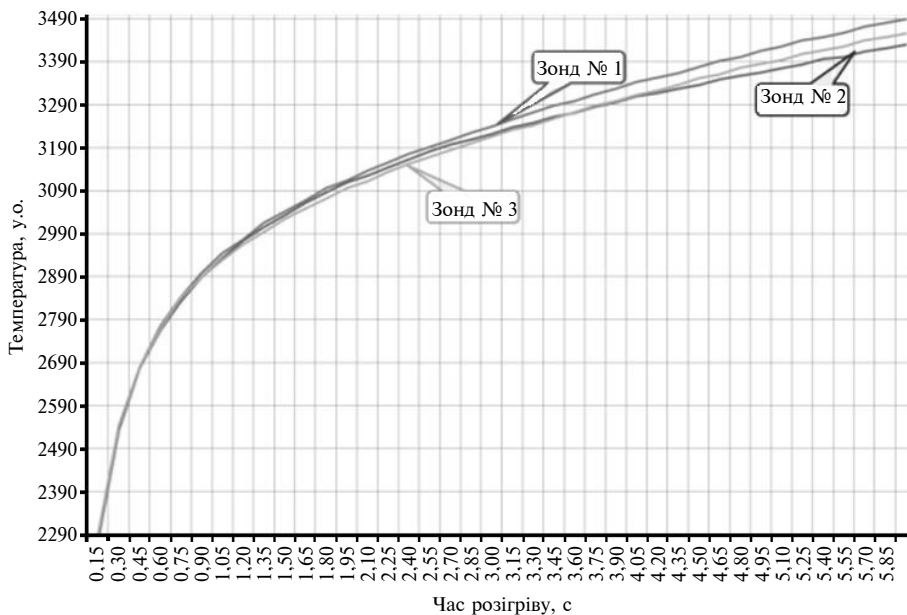


Рис. 4. Термограма розігріву термісторів 3-х вимірювальних зондів для пластини ПВХ

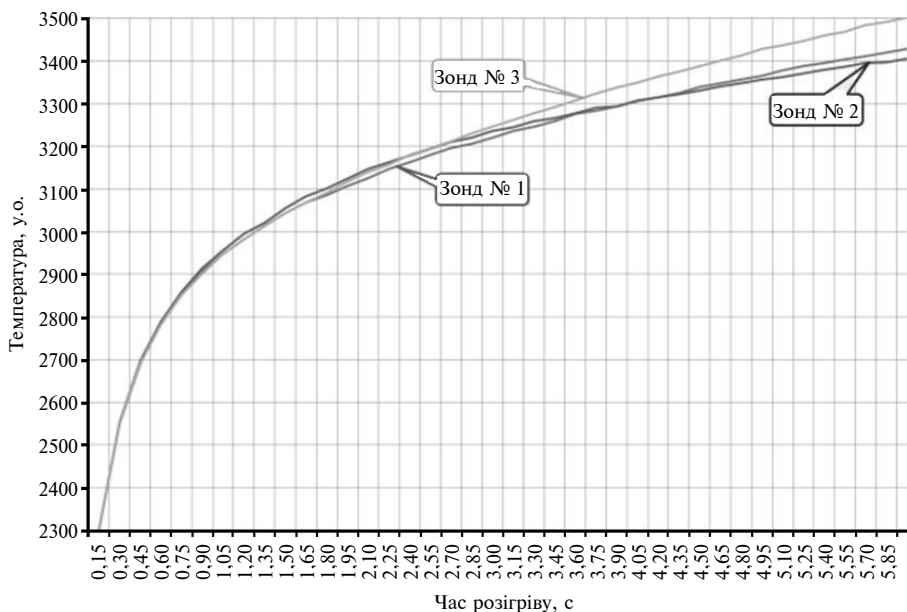


Рис. 5. Термограма розігріву термісторів 3-х вимірювальних зондів для вакуумної гуми

На рис. 7 наведено діаграми розподілу температури розігріву термісторів 3-х вимірювальних зондів при визначенні теплопровідності пластини вакуумної гуми, пластини латуні та пластини ПВХ. З цих діаграм можна зробити висновок, що деякі із зондів при проведенні вимірювань мали неякісний тепловий контакт із досліджуваним матеріалом.

Аналіз температури розігріву термісторів 3-х зондів для різних матеріалів показує:

- виміряне значення температури розігріву термістора менше очікуваного значення

відповідно до розрахунків. Це пояснюється неврахованим у розрахунках відтоком тепла через елементи конструкції зонда та недостатньою тривалістю імпульсу розігріву термістора;

- деякі із зондів можуть мати неякісний тепловий контакт із досліджуваним матеріалом;

- діапазон різниці значень температури розігріву термістора (не більше 2°C) невеликий порівняно з діапазоном значень коефіцієнта теплопровідності досліджуваних матеріалів (від 0,1 до $100 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). За рахунок підвищення потужності термістора цей діапазон вимірювання можна збільшити.

На основі проведених досліджень для зменшення похибки вимірювання розроблено рекомендації з вибору теплових характеристик матеріалів зонда, електричних характеристик вимірювального каналу та методів вимірювання і обчислення коефіцієнта теплопровідності досліджуваного матеріалу. Рекомендовані значення зведені в таблицю.

При проведенні вимірювання теплопровідності твердих матеріалів найбільш ефективним мето-

дом підвищення точності є прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями. Похибка вимірювання при цьому визначається за ДСТУ ГОСТ 8.207.2008 [11] залежно від кількості виміряних значень. Такий метод значно зменшує випадкову складову похибки вимірювання. Це можна реалізувати завдяки збільшенню кількості вимірювальних зондів в установці або підвищенню часу сеансу вимірювання.

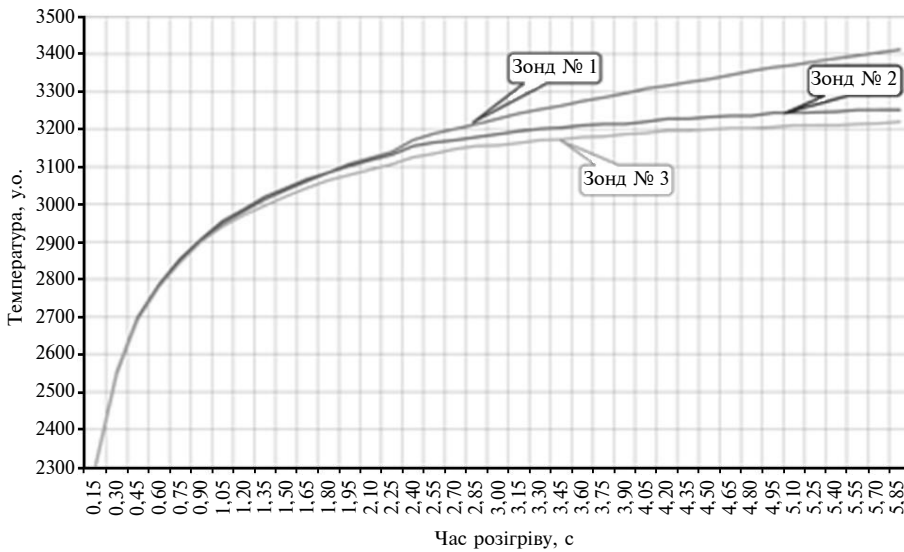


Рис. 6. Термограма розігріву термісторів 3-х вимірювальних зондів для пластини з латуні

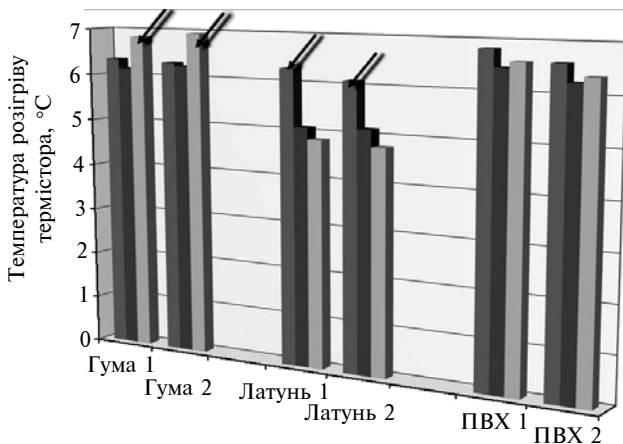


Рис. 7. Діаграми розподілу температури розігріву термісторів 3-х вимірювальних зондів (■ – № 1; ■ – № 2; ■ – № 3) таких матеріалів: пластини вакуумної гуми ($\lambda_{д.м.} = 0,175 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$); пластини латуні ($\lambda_{д.м.} = 100 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$); пластини ПВХ ($\lambda_{д.м.} = 0,159 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$)

Для обробки даних вимірювання багаторазових спостережень з урахуванням можливості появи неякісного теплового контакту доцільно з масиву отриманих даних вилучити ті дані вимірювання, які перевищують середньоквадратичне відхилення з урахуванням коефіцієнта асиметрії розподілу значень, що зумовлено зсувом значень у напрямі області зменшення коефіцієнта теплопровідності.

Шляхи зменшення похибок вимірювання

Результати проведених експериментальних досліджень теплопровідності твердих матеріалів за допомогою створеної установки дають змогу надати такі практичні рекомендації з метою зменшення похибки вимірювання теплопровідності досліджуваних матеріалів:

- застосовувати теплоізолювальні матеріали конструкції зонда з коефіцієнтом теплопровідності $\leq 0,05 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
- використовувати у вимірювальному зонді термістор мінімальних розмірів та з мінімальною сталою часу розігріву, з максимальними допустимою робочою температурою і допустимою потужністю;
- капсула, в якій розмішений термістор, має бути малих розмірів для зменшення теплової інерційності зонда, її контактна поверхня з

Таблиця. Рекомендовані теплові характеристики матеріалів вимірювального зонда, електричні характеристики вимірювального зонда та методи вимірювання і обчислення коефіцієнта теплопровідності досліджуваних матеріалів

Характеристика	Значення характеристики			Примітка
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К	0,1–1,0	1,0–10,0	10–100	–
Товщина стінки капсули, мм	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	–
Коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоізоляційного ковпачка, Вт/м·К	$\leq 0,05$	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$	–
Опір термістора при +25 °С, Ом	2000	2000	2000	–
Потужність термістора, мВт	≥ 30	≥ 50	≥ 100	–
Амплітуда імпульсу, В	≥ 12	≥ 24	≥ 48	На вимірювальному мості
Тривалість імпульсу, с	≥ 10	≥ 16	≥ 24	$\tau \leq 7 \text{ с}$
Тривалість паузи охолодження, с	30	50	100	$\tau \leq 7 \text{ с}$

досліджуваним матеріалом має бути пропорційною розміру термістора;

- рекомендовано збільшувати тривалість імпульсу розігріву та потужність термістора пропорційно значенню коефіцієнта теплопровідності досліджуваного матеріалу;

- при обробці результатів досліджень застосовувати прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями за мажоритарним принципом визначення коефіцієнта теплопровідності;

- збільшувати кількість зондів при вимірюванні коефіцієнта теплопровідності одного і того ж матеріалу, що дає змогу скоротити час процедури дослідження.

Запропоновані теплові характеристики матеріалів вимірювального зонда, електричні характеристики каналу та методи вимірювання і обчислення коефіцієнта теплопровідності досліджуваних матеріалів при використанні методу прямого підігріву термістора дають можливість підвищити точність вимірювання.

Висновки

1. Створено експериментальну установку, робота якої базується на методі прямого підігріву термістора, та проведено дослідження, що дає змогу ефективно використовувати запропонований метод для вимірювання ТФХ твердих матеріалів.

2. Наведено результати вимірювання коефіцієнтів теплопровідності різноманітних мате-

ріалів у діапазоні від 0,15 до 0,7 Вт/м·К за допомогою установки, що дають можливість розширити область використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання теплопровідності умовно твердих і сипких матеріалів.

3. Запропоновано та обґрунтовано раціональні режими роботи та конструкцію зондів для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів залежно від їх ТФХ і показано способи зменшення похибки вимірювання методом прямого підігріву термістора.

4. Дослідження дестабілізуючих факторів, які впливають на похибку вимірювання, дало змогу визначити засоби зменшення їх впливу на результати визначення теплопровідності та запропонувати способи підвищення точності вимірювань.

5. Експериментальна установка пройшла дослідну перевірку та впроваджена в дослідницьку і виробничу діяльність ТОВ “ВІРКОМ”, а також у навчальний процес кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

6. Передбачається проведення додаткових експериментальних досліджень ТФХ умовно твердих, сипких і полімерних матеріалів та розроблення рекомендацій з вибору чутливого елемента вимірювального каналу та їх практичне застосування.

Список літератури

1. Любимова Д.А., Пономарев С.В., Дивин А.Г. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО ТГТУ, 2014. – 79 с.
2. Экспериментальный метод измерения теплопроводности наножидкости / А.В. Жаров, Н.Г. Савинский, А.А. Павлов, А.Н. Евдокимов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6-8. – С. 1345–1350.
3. Холодильная технология пищевых продуктов / В.Е. Куцакова, С.В. Фролов, В.И. Филиппов, В.Б. Данин. – СПб: ГИОРД, 2007. – 224 с.
4. Филиппов В.И. Применение методов регулярного теплового режима для определения теплофизических характеристик пищевых продуктов // Научн. журн. НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств. – 2015. – № 3. – С. 22–30.
5. Matvienko S., Vysloukh S., Martynchuk O. Increasing accuracy of measuring thermal conductivity of liquids by using the direct heating thermistor method // Eastern-European J. Enterprise Technol. – 2016. – 4, № 5 (82). – P. 20–30.
6. Пономарев С.В., Балабанов П.В., Трофимов А.В. Оценка погрешностей измерения теплофизических свойств твердых материалов // Измер. техника. – 2004. – № 1. – С. 44–47.
7. Акуленко Д.В., Агапов А.Н., Проценко И.Г. Измерение коэффициента теплопроводности среды с использованием термистора прямого подогрева // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития: Сб. науч. статей молодых ученых, аспирантов и студентов ФГБОУ ВПО ТГТУ. – 2012. – Вып. III. – С. 49–52.
8. Matvienko S., Vysloukh S., Martynchuk O. Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method // Int. J. Eng. Res. Sci. – 2016. – 2, iss. 5. – P. 250–258.

9. *Hot-ball method for measuring thermal conductivity* / E. Kubičár, V. Vretenár, V. Štofanič, V. Boháč // *Int. J. Thermophys.* – 2010. – № 31. – P. 1904–1918.
10. *Матвієнко С.М., Вислоух С.П.* Підвищення точності вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора // *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. – 2016. – № 6. – С. 85–93.
11. *Державна система забезпечення єдності вимірювань. Прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями. Методи обробки результатів спостережень. Основні положення: ДСТУ ГОСТ 8.207:2008.* – Чинний від 01.10.2008, № 201. – 7 с.

References

- [1] D.A. Lyubimova *et al.*, *Measurement of Thermal Properties of Thermal Insulation Materials by Regular Condition of the Third Kind*. Tambov, Russia: FGBOU VPO TGTU, 2014 (in Russian).
- [2] A.V. Zharov *et al.*, "The experimental method of measuring the thermal conductivity of nanofluids", *Fundamental'nye Issledovaniya*, no. 6-8, pp. 1345–350, 2014 (in Russian).
- [3] V.E. Kutsakova *et al.*, *Refrigerated Food Technology*. St. Petersburg, Russia: GIORD, 2007 (in Russian).
- [4] V.I. Filippov, "The application of regular thermal regime methods for determining the thermal characteristics of foods", *Nauchnyj Zhurnal NIU ITMO*, no. 3, 2015, pp. 22–30 (in Russian).
- [5] S Matvienko *et al.*, "Increasing accuracy of measuring thermal conductivity of liquids by using the direct heating thermistor method", *Eastern-European J. Enterprise Technol.*, vol. 4, no. 5 (82), pp. 20–30, 2016. doi: 10.15587/1729-4061.2016.75459
- [6] S.V. Ponomarev *et al.*, "Estimation of errors in measuring the thermophysical properties of solid materials", *Izmeritel'naya Tekhnika*, no. 1, 2004, pp. 44–47 (In Russian).
- [7] D.V. Akulenko *et al.*, "The measurement of thermal conductivity medium using a direct heating thermistor method", *Problemy Tekhnogennoy Bezopasnosti i Ustoychivogo Razvitiya FGBOU VPO TGTU*, no. III, pp. 49–52, 2012 (in Russian).
- [8] S. Matvienko *et al.*, "Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method", *Int. J. Eng. Res. Sci.*, vol. 2, iss. 5, pp. 250–258, 2016.
- [9] E. Kubičár *et al.*, "Hot-ball method for measuring thermal conductivity", *Int. J. Thermophys.*, no. 31, pp. 1904–1918, 2010. doi: 10.1007/s10765-008-0544-4
- [10] S. Matvienko *et al.*, "Accuracy improvement of thermal conductivity measurement of liquids used by direct heating thermistor method", *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 6, pp. 85–93, 2016 (in Ukrainian). doi: 10.20535/1810-0546.2016.6.83382
- [11] *The State System of Ensuring the Uniformity of Measurements. Direct Measurements with Multiple Observations. Methods of Treatment of Observations*, DSTU GOST 8.207:2008, Oct. 01, 2008 (in Ukrainian).

С.М. Матвієнко, С.П. Вислоух, К.Г. Філоненко

ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПІДІГРІВУ ТЕРМІСТОРА

Проблематика. Розглянуто питання розробки експериментальної установки та підвищення точності визначення теплопровідності твердих матеріалів при вимірюванні методом прямого підігріву термістора.

Мета дослідження. Метою роботи є створення установки, проведення експериментальних досліджень із визначення теплопровідності твердих матеріалів методом прямого підігріву термістора і дослідження дестабілізуючих факторів, які впливають на похибку вимірювання. На основі цього пропонуються способи підвищення точності вимірювань.

Методика реалізації. Створено експериментальну установку, робота якої базується на методі прямого підігріву термістора, та проведено необхідні дослідження. Наведено результати вимірювання за допомогою установки коефіцієнтів теплопровідності різноманітних матеріалів, що дають можливість розширити область використання методу.

Результати дослідження. Запропоновано та обґрунтовано раціональні режими роботи і конструкцію зондів для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів залежно від їх ТФХ, а також запропоновано способи зменшення похибки вимірювання методом прямого підігріву термістора. Дослідження дестабілізуючих факторів, які впливають на похибку вимірювання, дало змогу визначити засоби зменшення їх впливу на результати визначення теплопровідності твердих матеріалів і запропонувати способи зниження похибки вимірювання.

Висновки. Розроблена установка пройшла експериментальну перевірку та впроваджена в дослідницьку і виробничу діяльність ТОВ "ВІРКОМ" та в навчальний процес кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Ключові слова: теплопровідність; метод прямого підігріву термістора; експериментальна установка; теплофізичні характеристики твердих матеріалів.

С.М. Матвієнко, С.П. Вислоух, К.Г. Філоненко

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВЕДНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПОДОГРЕВА ТЕРМИСТОРА

Проблематика. Рассмотрены вопросы разработки экспериментальной установки и повышения точности определения теплопроводности твердых материалов при измерении методом прямого подогрева термистора.

Цель исследования. Целью работы является создание установки, проведение экспериментальных исследований по определению значения теплопроводности твердых материалов методом прямого подогрева термистора и исследование дестабилизирующих факторов, влияющих на погрешность измерения. На основе этого предлагаются способы увеличения точности измерений.

Методика реализации. Создана экспериментальная установка, работа которой основана на методе прямого подогрева термистора, и проведены необходимые исследования. Приведены результаты измерения с помощью установки коэффициентов теплопроводности различных материалов, которые дают возможность расширить область использования метода.

Результаты исследования. Предложены и обоснованы рациональные режимы работы и конструкция зондов для измерения теплопроводности твердых материалов в зависимости от их ТФХ, а также предложены пути уменьшения погрешности измерения методом прямого подогрева термистора. Исследование дестабилизирующих факторов, влияющих на погрешность измерения, позволило определить средства уменьшения их влияния на результаты определения теплопроводности твердых материалов и предложить способы уменьшения погрешности измерений.

Выводы. Созданная установка прошла экспериментальную проверку и внедрена в исследовательскую и производственную деятельность ООО "ВИРКОМ" и в учебный процесс кафедры производства приборов Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского".

Ключевые слова: теплопроводность; метод прямого подогрева термистора; экспериментальная установка; теплофизические характеристики твердых материалов.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
30 січня 2017 року