

УДК 536.2.081.7:612.117.6

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.6.83382

С.М. Матвієнко, С.П. Вислоух

НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ РІДИН МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПІДГРІВУ ТЕРМІСТОРА

Background. This work addresses the determination accuracy improvement of thermal conductivity of liquids by direct heating thermistor method.

Objective. The aim of the paper is the determination accuracy improvement of thermal conductivity of liquids by analysis of possible measurement errors and development of methods and means of their reduction.

Methods. Types of materials' thermal conductivity measurement errors are identified, which allowed differentially approach to their analysis. The introduction of appropriate correction factors, determined through the use of standard liquids, was proposed to reduce the error of the measurement method.

Results. Main causes of errors in the research are considered and effective ways to reduce them are provided. The possibility of reducing the measurement error by accumulating the data of multiple observations and their statistical processing is justified.

Conclusions. Results of experimental studies with control materials using established device, which showed high accuracy and efficiency for measuring the thermal conductivity of liquids are presented.

Keywords: accuracy improvement; thermal conductivity of liquids; direct heating thermistor method.

Вступ

Важливими задачами техніки теплофізичних досліджень є підвищення їх точності та продуктивності. Тільки ефективні методи вимірювання, які засновані на фундаментальних метрологічних підходах [1–7], дають змогу отримувати достовірні результати і можуть бути застосовані до нових речовин і розчинів органічних рідин [8–10], що постійно виготовляються і синтезуються як у вітчизняній, так і світової промисловості.

Більшість промислових приладів для вимірювання теплофізичних характеристик (ТФХ) матеріалів має похибку вимірювання, що досягає 7%. У багатьох випадках така точність не є достатньою для проведення якісних теплофізичних досліджень.

Для одержання результатів вимірювання з великою точністю та достовірністю необхідно виконати значну кількість досліджень. Такий підхід потребує значного часу проведення досліджень. Тому застосування приладів, що уможливають одночасне вимірювання великої кількості досліджуваних зразків, зменшить час проведення досліджень та підвищить точність отриманих результатів.

Крім того, аналіз причин виникнення похибок вимірювання ТФХ і впливу дестабілізуючих факторів, що спричиняють ці похибки, є важливим питанням, вирішення якого дає змогу забезпечити заданий метрологічний рівень визначення теплопровідності матеріалів.

Постановка задачі

Метою роботи є підвищення точності визначення теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора завдяки аналізу виникнення можливих похибок вимірювання та розробці методів і засобів їх зменшення.

Види похибок визначення теплопровідності рідин

Як правило, всі похибки визначення теплопровідності можна розділити на похибки методу вимірювання теплопровідності, інструментальні похибки, суб'єктивні похибки, що викликані діями оператора, а також похибки обробки результатів вимірювання.

Такий поділ похибок допомагає уникати дублювання при аналізі їх джерел виникнення і дає змогу згрупувати складові похибки, сумарний вплив від яких на результати вимірювання теплопровідності можна визначити кількісно.

Аналіз похибок методу вимірювання теплопровідності рідин і способів їх зниження

За основу методу вимірювання теплофізичних характеристик покладено прямий підігрів термістора, який має низку переваг над іншими методами. Основними його перевагами є малі розміри термістора та форма його головки, що значно спрощує конструкцію вимірю-

вального зонда. Використання термістора дає змогу вимірювати ТФХ досліджуваних матеріалів в об'ємі до 1 мл. Суть методу прямого підігріву термістора полягає у використанні явища його саморозігріву за рахунок протікання електричного струму через термістор. При реєстрації даних використовується ділянка вольт-амперної характеристики, де зменшення опору термістора більше, ніж відносне збільшення струму. На цій ділянці проявляється ефект саморозігріву термістора, і величина падіння опору буде залежати від температури його розігріву, тобто від навколишнього середовища, в якому він перебуває.

Термістор закріплюється на кінці вимірювального зонда, який у процесі дослідження занурюється в досліджувану рідину, що знаходиться в пробірці. В основу вимірювального каналу покладено мостову схему. Одним із елементів напівплеча мостової схеми є термістор як чутливий елемент. На вимірювальний міст подається імпульс розігріву, час якого більший за сталу частоту термістора. Сигнал розбалансу мосту спочатку підсилюється диференційним підсилювачем, а потім перетворюється аналого-цифровим перетворювачем на числове значення (в умовних одиницях), що є пропорційним температурі розігріву термістора. Протягом імпульсу розігріву через короткі проміжки часу значення на виході аналого-цифрового перетворювача записуються в пам'ять мікроконтролера, а потім передаються до зовнішнього персонального комп'ютера, де формується файл даних вимірювання. Дані вимірювання, що записані за час дії імпульсу розігріву, являють собою термограму нагріву термістора, на основі якої визначається теплопровідність досліджуваної рідини.

Поширення теплової енергії в термісторному зонді у процесі вимірювання теплопровідності рідини можна представити схемою, що наведена на рис. 1.

Під дією імпульсу електричного струму тепла енергія, яка виробляється термістором, розсіюється в досліджуваній рідині та елементами конструкції тримача термістора. При цьому термістор поступово прогрівається протягом часу тривалості імпульсу. Графік саморозігріву термістора — термограма — використовується для визначення ТФХ досліджуваної рідини.

Похибка методу містить складові, які виникають переважно внаслідок недосконалості застосованої математичної моделі температурного поля у вимірювальному пристрої й прийнятих допущень і спрощень.

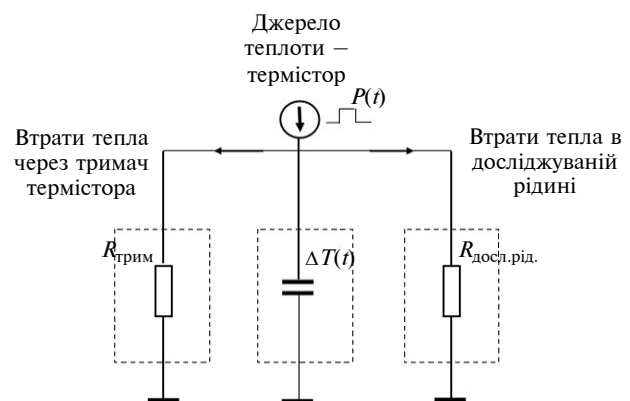


Рис. 1. Схема поширення теплової енергії в термісторному зонді

При розробці математичної моделі температурного поля у вимірювальному пристрої застосовано такі спрощення і допущення:

- температурне поле в досліджуваному зразку залежить тільки від часу;
- у шарі досліджуваного матеріалу відсутні внутрішні джерела теплоти;
- зміна теплофізичних властивостей досліджуваного матеріалу в процесі проведення вимірів не враховується;
- тепловий контактний опір між шарами досліджуваного матеріалу, а також між досліджуваним матеріалом і термістором незначний.

Однією з причин виникнення похибки вимірювання теплопровідності є розбіжність характеристик (параметрів) термістора, що зумовлена розмірами його оболонки. Тоді для ідеальної моделі термісторного датчика як кулі з радіусом r та ідеальною теплопровідністю коефіцієнт теплопровідності визначається за формулою [11]

$$\lambda = \frac{P_t}{4\pi r \Delta T}, \quad (1)$$

де λ — коефіцієнт теплопровідності досліджуваної рідини, Вт/(м·К); P_t — потужність термістора, Вт; r — радіус термістора, м; ΔT — температура розігріву термістора, К.

Наявність оболонки, яка впливає на процес теплообміну між нагрітим термістором та оточуючою його досліджуваною рідиною, призводить до виникнення похибки вимірювання температури розігріву термістора. Крім того, залежність опору термістора від температури є нелінійною, що додатково вносить систематичну похибку при розрахунках теплопровідності.

Введення в розрахункову формулу методу корегувальних коефіцієнтів, що визначені в ре-

зультаті вимірювання еталонних рідин з відомими теплофізичними характеристиками, дає змогу зменшити систематичну похибку вимірювання. Для цього в розрахунковій формулі методу введено [12]:

- K_{hi} – коефіцієнт, що корегує похибку вимірювання температури досліджуваного зразка i -м термістором;

- K_{Pi} – коефіцієнт, що здійснює компенсацію похибки різниці значень на виході аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) до середньостатистичного значення, що виміряне i -м термістором;

- K_{ki} – коефіцієнт, що корегує чутливість i -го термістора, тобто коефіцієнт відхилення реальної характеристики, що отримана за даними досліджень, від розрахункової;

- $N_{(+40)}$ – значення на виході АЦП при температурі зонда $+313,15$ К;

- ΔT_0 – температура саморозігріву термістора, що викликана наявністю у нього оболонки, К;

- K_0 – коефіцієнт пропорційності, що визначає чутливість термістора до значення теплопровідності досліджуваної речовини, яка його оточує.

З урахуванням наведених коефіцієнтів формула для розрахунку коефіцієнта теплопровідності за даними вимірювань $\lambda_{д.р.i}$ буде мати вигляд [12]:

$$\lambda_{д.р.i} = \frac{P_T}{4\pi r \cdot K_{ki} \cdot (T_{(+40)} - T_0) - \Delta T_0 \cdot N_{(+40)}} \times \frac{K_0 \cdot N_{(+40)}}{N_{3vi} - N_{1vi} - (N_{(+40)} - K_{hi} \cdot N_{1vi}) \cdot K_{Pi}}, \quad (2)$$

де N_{3vi} – виміряне числове значення розігріву термістора в кінцевій точці на термограмі, що одержана в результаті вимірювання; N_{1vi} – виміряне числове значення розігріву термістора в початковій точці на термограмі, що одержана в результаті вимірювання.

Коефіцієнти K_{hi} , K_{Pi} , K_{ki} визначаються для кожного термістора окремо в ході калібрувальних процедур із використанням еталонних рідин з відомими ТФХ. Ці коефіцієнти є характеристиками термісторного зонда. Коефіцієнти ΔT_0 , K_0 також визначаються за даними калібрувальних досліджень із використанням як еталонних рідин з відомими ТФХ, але вони обчис-

люються як середнє значення відповідних параметрів для всіх зондів.

Коефіцієнт пропорційності K_0 , який визначає чутливість термістора до значення теплопровідності досліджуваної речовини, обчислюється за формулою

$$K_0 = \frac{(\Delta T_{ет.2в.} - \Delta T_{ет.1в.})}{(\Delta T_{ет.2р.} - \Delta T_{ет.1р.})}, \quad (3)$$

де $\Delta T_{ет.2в.}$ і $\Delta T_{ет.1в.}$ – виміряні значення температури розігріву термістора, встановлені за результатами досліджень із використанням еталонних речовин з найменшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад 96 %-ного розчину етилового спирту ($\Delta T_{ет.2в.}$), та найбільшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад дистильованої води ($\Delta T_{ет.1в.}$); $\Delta T_{ет.2р.}$ і $\Delta T_{ет.1р.}$ – значення температури розігріву термістора при дослідженні еталонних речовин відповідно з найменшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад $\Delta T_{ет.2в.}$, та найбільшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад $\Delta T_{ет.1в.}$.

Температура саморозігріву термістора ΔT_0 , що викликана наявністю оболонки, визначається за формулою

$$\Delta T_0 = \Delta T_{ет.2в.} - \frac{(\Delta T_{ет.2в.} - \Delta T_{ет.1в.}) \cdot \Delta T_{ет.1р.}}{(\Delta T_{ет.2р.} - \Delta T_{ет.1р.})}. \quad (4)$$

Коефіцієнти K_{hi} , K_{Pi} , K_{ki} , ΔT_0 , K_0 визначаються в ході калібрувальних досліджень із використанням як досліджуваних еталонних рідин з відомими ТФХ.

Таким чином, введення корегувальних коефіцієнтів у розрахункову формулу визначення теплопровідності рідин (2) дає змогу зменшити похибку методу вимірювання.

Аналіз похибок процесу вимірювання і способи їх зниження

Інструментальна похибка, як правило, є найбільш значимою з усіх складових похибок визначення теплопровідності матеріалів. Вона зумовлена недосконалістю засобів вимірювання та впливом дестабілізуючих факторів різного роду, які створюють перешкоди при дослідженні зразків.

Вимірювальний канал приладу [12], що використовується при проведенні досліджень,

має шістдесят каналів вимірювання температури й один канал вимірювання часу.

Проведено аналіз факторів, що впливають на точність та достовірність вимірювання за допомогою приладу, та визначено комплекс заходів для запобігання впливу дестабілізуючих факторів.

Розроблений прилад складається з таких основних частин: вимірювальний зонд; термостат; вимірювальний блок; блок керування; блок живлення; джерело безперебійного живлення; зовнішній персональний комп'ютер із програмним забезпеченням.

Основними факторами впливу на вимірювальний зонд є зміна температури, тиску і вологості навколишнього середовища, нестабільність контактного термоопору в області вимірювання (області контакту термістора і досліджуваної рідини) та тепловіддачі в цій області.

Дестабілізуючим фактором, що впливає на чутливий елемент, є теплоємність термісторного зонда, яка залежить від його геометричних розмірів і матеріалів, з яких він виготовлений.

До дестабілізуючих факторів, які можуть впливати на роботу приладу, належать також теплові опори контакту поверхні зонда з досліджуванним матеріалом, що формують температурне поле в області вимірювання при визначенні теплопровідності.

Важливою для визначення теплопровідності термісторного зонда є зміна температури навколишнього середовища. Зниження впливу температури навколишнього середовища на результати вимірювання забезпечується за допомогою її реєстрації в зоні вимірювання та подальшим корегуванням даних.

Зменшення складової загальної похибки результатів вимірювання температури навколишнього середовища здійснено автоматичним корегуванням результатів вимірювання на основі аналізу експериментальних даних, що отримані за різних температур навколишнього середовища. Це корегування здійснюється програмними засобами, що створені в рамках виконаних досліджень.

Дестабілізуючими факторами, що впливають на АЦП і вимірювальний канал приладу, є завади, які класифікуються за формою, джерелами походження, за механізмом впливу на електричну схему тощо.

За формою завади будь-якого походження поділяються на імпульсні, флуктуаційні і регулярні.

За джерелами виникнення завади поділяються на внутрішні і зовнішні.

За джерелами і механізмом впливу на вимірювальний канал завади є такими:

- кондуктивні завади;
- електричні наведення;
- перехресні завади;
- завади постійного струму;
- завади, викликані наявністю заземлених контурів;

- завади, пов'язані з електроживленням.

Для боротьби з такими завадами в первинну мережу живлення вводяться мережний фільтр і джерело безперебійного живлення, що зменшують коливання напруги в мережі та його фільтрацію. Також зменшення завад у ланцюгах вторинного електроживлення здійснюється фільтрацією високочастотних сигналів. Для боротьби з електричними наведеннями застосоване електромагнітне екранування.

На результати вимірювання теплопровідності матеріалів впливає похибка АЦП. Значення цієї похибки можна зменшити, застосовуючи накопичення даних вимірювання з подальшою обробкою математичними методами. Такий алгоритм застосований у програмі обробки даних мікроконтролерів вимірювального блока.

На прилад, який працює у масштабі реального часу в приміщеннях за кімнатної температури, впливають такі фактори: механічні (удари, вібрації, прискорення); кліматичні (температура, вологість, тиск навколишнього середовища); зовнішні та внутрішні завади (шуми від мережі живлення, випромінювання електричних і магнітних полів).

Унаслідок великого діапазону температур навколишнього середовища в зоні вимірювання приладу постійний температурний режим забезпечується термостатом. Для стабільної роботи вимірювального каналу та зменшення впливу кліматичних факторів навколишнього середовища вузли приладу розміщені в шафі зі скляними дверцятами, а в приладі вжито спеціальних заходів: використано електрорадіоелементи, що розраховані на роботу в широкому температурному діапазоні; застосовано конструктивні елементи, що забезпечують малий тепловий опір теплоти.

Для обґрунтування прийнятих допущень при розробці вимірювального приладу з метою зменшення похибок процесу дослідження реалізовано такі заходи:

- для забезпечення рівномірності температурного поля в досліджуваному матеріалі пробірка з рідиною розміщується в алюмінієвому контейнері термостата, що захищений з усіх

боків теплоізоляцією, яка зменшує теплові потоки у навколишнє середовище через бічні грані контейнера;

- для зменшення похибки, що викликана наявністю джерела теплової енергії в досліджуваному матеріалі при його нагріванні або охолодженні при перебігу в ньому хімічних реакцій або наявністю структурних та фазових перетворень, запропоновано попередньо виконати дослідження матеріалу на предмет відсутності в ньому зазначених вище явищ у заданому діапазоні температур;

- для зменшення теплових контактних опорів запропоновано здійснювати попередню підготовку поверхні досліджуваного зразка. Зразок не повинен мати забруднень і пошкоджень, поверхню чутливого елемента доцільно попередньо змащувати досліджуваною рідиною без утворення різного роду плям та прошарків повітря у вигляді кульок;

- для зниження похибки впливу власної теплоємності термістора та його оболонки застосовано датчики з мінімально можливими габаритами і масою. При цьому теплоємність термісторного зонда буде досить низькою, що дає змогу знехтувати тепловою інерцією датчика.

Крім того, для зменшення впливу інструментальної похибки на процес вимірювання введено алгоритм попередньої обробки даних вимірювань, реалізовано електронні схеми згідно з рекомендаціями виробників електрорадіоелементів із застосуванням фільтрувальних елементів, введено додаткові конструктивні елементи для мінімізації впливу дестабілізуючих факторів та мінімізації похибок при вимірюванні, використано безперебійне джерело живлення, а також здійснено розподіл джерел вторинного живлення різних блоків приладу з метою послаблення їх взаємовпливу.

Аналіз похибок процесу, що вносяться оператором при проведенні досліджень, і способи їх зниження

Похибки, що вносяться оператором, вважаються помилковими його діями при проведенні досліджень.

У ході проведення вимірювання методом прямого підігріву термістора можлива поява похибок, що викликані помилковими діями оператора, а саме:

- недостатньо ретельною підготовкою досліджуваного зразка до проведення вимірювань і його розміщенням у вимірювальному картриджі;

- використанням приладу в умовах наявності джерел електромагнітних завад, вібрації, коливань температури та інших дестабілізуючих факторів;

- помилками при встановленні температури термостата;

- введенням неправильних вхідних даних у вікно програми керування приладом.

Для зниження імовірності виникнення цих похибок розроблено покрокову методику проведення експерименту та створено інструкцію користувача.

Аналіз похибок обробки результатів вимірювання та способи їх зниження

Для зменшення впливу похибок обробки результатів вимірювання процес розрахунків ТФХ досліджуваних рідин автоматизовано. Попередньо визначено та враховано корегувальні коефіцієнти залежності отриманих даних від поточної температури зразка, визначено та враховано корегувальні коефіцієнти, що отримані статистичною обробкою даних вимірювання еталонних рідин з відомими ТФХ, а також здійснено фільтрацію даних вимірювань з метою вилучення хибних значень з істотними відхиленнями від середнього значення за сеанс вимірювання.

Результати вимірювання теплопровідності рідин з урахуванням реалізованих методів і засобів

З метою визначення ефективності застосування запропонованої методики та відповідних засобів підвищення точності вимірювання при визначенні коефіцієнтів теплопровідності рідин проведено експериментальні дослідження з використанням таких рідин:

- дистильована вода;
- фізіологічний розчин (0,9 %-ний розчин NaCl у дистильованій воді);
- молоко 2,5 % жирності;
- 25 %-ний розчин етилового спирту в дистильованій воді;
- 60 %-ний розчин гліцерину в очищеній воді;
- 80 %-ний розчин гліцерину в очищеній воді;
- 85 %-ний розчин гліцерину в очищеній воді (розчин нашкірний 85 %, медичний);
- 70 %-ний розчин етилового спирту в воді (“Септол”);

Таблиця. Результати вимірювання коефіцієнта теплопровідності

Режим	Значення теплопровідності та величина похибки	Дистильована вода	0,9 % розчин NaCl у воді	Молоко	25 % розчин етилового спирту в воді	60 % розчин гліцерину в воді	80 % розчин гліцерину	70 % розчин етилового спирту в воді ("Септол")	75 % розчин етилового спирту в воді	96 % розчин етилового спирту в воді
1 сеанс 10 хв	Теплопровідність, Вт/(м·К) Похибка, %	0,6288 1,09	0,6097 1,64	0,5632 1,25	0,4753 0,92	0,4001 1,24	0,3428 1,22	0,2671 1,23	0,2445 1,19	0,1741 1,8
2 сеанси по 10 хв	Теплопровідність, Вт/(м·К) Похибка, %	0,6296 0,67	0,6113 1,06	0,5632 0,9	0,4751 0,65	0,3998 0,91	0,3428 1,05	0,267 1,02	0,2444 0,96	0,174 1,47
3 сеанси по 10 хв	Теплопровідність, Вт/(м·К) Похибка, %	0,6295 0,58	0,6112 0,79	0,5632 0,70	0,4752 0,60	0,4001 0,84	0,3429 0,88	0,2672 0,93	0,2445 0,86	0,174 1,40
5 сеансів по 10 хв	Теплопровідність, Вт/(м·К) Похибка, %	0,63 0,55	0,6109 0,66	0,5634 0,58	0,4753 0,52	0,4002 0,78	0,343 0,74	0,2672 0,83	0,2445 0,78	0,1740 1,25
1 сеанс по 10 хв (одна рідина)	Теплопровідність, Вт/(м·К) Похибка, %	0,6288 0,38	0,6097 0,4	0,5632 0,38	0,4753 0,46	0,4001 0,48	0,3428 0,44	0,2671 0,48	0,2445 0,65	0,1741 0,99
Дані з довідників, Вт/(м·К)		0,628	—	0,564	0,477	0,399	0,336	0,259	0,245	0,175

• 75 %-ний розчин етилового спирту в воді ;

• етиловий спирт медичний 96-Екстра (96 %-ний розчин етилового спирту в воді).

При проведенні вимірювань використано створений прилад, що має шістдесят термісторних зондів [13].

Достовірність результатів досліджень підтверджена відповідними даними з довідника [14].

Результати вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваних рідин наведено в таблиці.

Одним із методів підвищення точності є прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями, що регламентовані ДСТУ ГОСТ 8.207.2008 [15]. Це дає змогу зменшити випадкову складову похибки вимірювання. Збільшити кількість вимірюваних значень можна збільшенням тривалості часу сеансу вимірювання, протягом якого кількість вимірюваних термограм буде більшою, або застосуванням додаткових досліджуваних зразків при одночасному вимірюванні їх ТФХ. Для оцінки використання запропонованих методів і засобів підвищення точності проведено розрахунки вимірюваних значень коефіцієнта теплопровідності всіх досліджуваних рідин для 10, 20, 40, 60 та 1200 вимірюваних

термограм. На рис. 2 зображені графіки залежності похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності від його значення за різної кількості застосованих термограм.

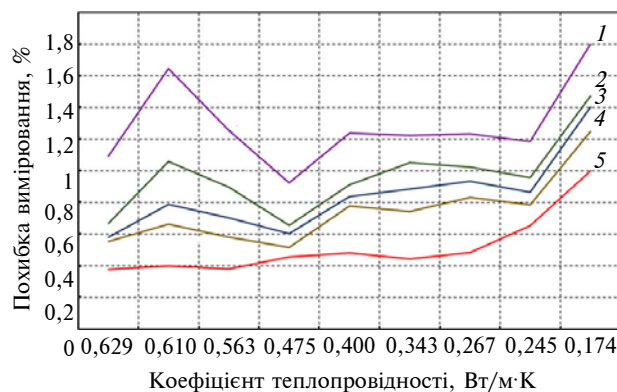


Рис. 2. Графіки похибок визначення коефіцієнта теплопровідності: 1, 2, 3, 4 – відповідно для 20, 40, 60, 100 термограм, вимірюваних одним зондом; 5 – для 1200 термограм, вимірюваних 60-ма зондами

Висновки

1. Визначено основні види похибок вимірювання теплопровідності рідин та здійснено їх класифікацію за джерелами виникнення, що

дало змогу уникнути їх дублювання при визначенні методів і способів зниження загальної похибки.

2. Використання корегувальних коефіцієнтів у математичній моделі визначення теплопровідності рідин, що враховують похибки вимірювання термістором температури досліджуваного зразка, компенсацію похибки значення вимірюваної термістором різниці до середньостатистичної величини, значення на виході АЦП, температуру саморозігріву термістора, що викликана наявністю у нього оболонки, чутливість термістора зонда до значення теплопровідності досліджуваної речовини, дало змогу отримати загальну похибку вимірювань, що не перевищує 3 %.

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

4. Для підвищення точності вимірювання використано збільшену тривалість сеансу вимірювання з подальшою статистичною обробкою, що дало змогу визначити метрологічні характеристики створеного приладу та оцінити точність вимірювання.

5. Збільшеної кількості одночасно досліджуваних зразків (від 3 до 60) дало можливість зменшити статистичну похибку вимірювання.

6. Проведено експериментальні дослідження з використанням різноманітних рідин, що дало змогу підтвердити ефективність застосування запропонованих методів та відповідних засобів підвищення точності вимірювання при визначенні коефіцієнтів теплопровідності рідин.

На основі представленої конструкції приладу в рамках подальших досліджень планується розробка термісторного зонда та експериментальної установки для вимірювання твердих матеріалів методом прямого підігріву термістора.

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. Луцаев А.А. Применение метода периодического нагрева в экспериментальной теплофизике // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ. – СПб: СПбГУНиПТ, 2010. – С. 182–195.
3. Ивлиев А.Д. Применение метода температурных волн для исследования теплофизических свойств конденсированных веществ // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ. – СПб: СПбГУНиПТ, 2010. – С. 65–74.
4. Ключев В.В. Неразрушающий контроль: справочник. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.
5. *Microminiaturized* thermistor arrays for temperature gradient, flow and perfusion measurements / H. Kuttner, G. Urban, A. Jachimowicz et al. // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 1991. – 27, № 1-3. – P. 641–645.
6. Ould-Lahoucine C., Sakashita H., Kumada T. A method for measuring thermal conductivity of liquids and powders with a thermistor probe // *Int. Commun. Heat Mass Transfer*. – 2003. – 30, № 4. – P. 445–454.
7. *Approaches* to extract thermal properties from dual-thermistor heat pulse experimental data / H. Zhang, L. He, G. Zhao et al. // *Measurement Sci. Technol*. – 2003. – 15, № 1. – P. 221–227.
8. *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.
9. *Холодильная* технология пищевых продуктов / В.Е. Куцакова, С.В. Фролов, В.И. Филиппов, В.Б. Данин. – СПб: ГИОРД, 2007. – 224 с.
10. 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.
11. 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.
12. Matvienko S. Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method // *Int. J. Eng. Res. Sci*. – 2016. – 2, iss. 5. – P. 250–258.
13. 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.

14. *Справочник по теплопроводности газов и жидкостей* / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
15. *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.A. Lipaev, "Application of the periodic heating of experimental thermal physics", in *Proc. Int. Conf. Modern Methods and Research Means of Thermophysical Properties of Substances*, St. Petersburg, Russia, 2010, pp. 182–195 (in Russian).
3. A.D. Ivliev, "Application of thermal waves for investigation of thermal properties of condensed matter", in *Proc. Int. Conf. Modern Methods and Research Means of Thermophysical Properties of Substances*, St. Petersburg, Russia, 2010, pp. 65–74 (in Russian).
4. V.V. Klyuev, *Unbrakable Control*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 2010 (in Russian).
5. H. Kuttner *et al.*, "Microminiaturized thermistor arrays for temperature gradient, flow and perfusion measurements", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 27, no. 1-3, pp. 641–645, 1991. doi: 10.1016/0924-4247(91)87064-A
6. C. Ould-Lahoucine *et al.*, "A method for measuring thermal conductivity of liquids and powders with a thermistor probe", *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 30, no. 4, pp. 445–454, 2003. doi: 10.1016/S0735-1933(03)00073-3
7. H. Zhang *et al.*, "Approaches to extract thermal properties from dual-thermistor heat pulse experimental data", *Measurement Sci. Technol.*, vol. 15, no. 1, pp. 221–227, 2003. doi: 10.1088/0957-0233/15/1/031
8. 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).
9. V.E. Kutsakova *et al.*, *Refrigerated Food Technology*. St. Petersburg, Russia: GIOR, 2007 (in Russian).
10. 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).
11. 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*, iss. III, pp. 49–52, 2012 (in Russian).
12. 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.
13. 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
14. N. B. Vargaftik *et al.*, *Handbook of Thermal Conductivities of Liquids and Gases*. Moscow, SU: Energoatomizdat, 1990 (in Russian).
15. *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

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ РІДИН МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПІДІГРІВУ ТЕРМІСТОРА

Проблематика. Розглянуто питання підвищення точності визначення теплопровідності рідин при вимірюванні методом прямого підігріву термістора.

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення точності визначення теплопровідності рідин завдяки аналізу виникнення можливих похибок вимірювання та розробці методів і засобів їх зменшення.

Методика реалізації. Встановлено види похибок вимірювання теплопровідності матеріалів, що дало змогу диференціально підійти до їх аналізу. Запропоновано для зменшення похибки методу вимірювання вводити відповідні корегувальні коефіцієнти, що визначаються використанням еталонних рідин.

Результати дослідження. Розглянуто основні причини виникнення похибок при проведенні досліджень та наведено ефективні способи їх зменшення. Обґрунтовано можливість зменшення похибки вимірювання накопиченням даних багаторазових спостережень та їх статистичною обробкою.

Висновки. Надано результати експериментальних досліджень з контрольними матеріалами за допомогою створеного приладу, що показали високу точність та ефективність використання методу прямого підігріву термістора для визначення теплопровідності рідин.

Ключові слова: підвищення точності; теплопровідність рідин; метод прямого підігріву термістора.

С.М. Матвиенко, С.П. Выслоух

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПОДОГРЕВА ТЕРМИСТОРА

Проблематика. Рассмотрены вопросы повышения точности определения теплопроводности жидкостей при измерении методом прямого подогрева термистора.

Цель исследования. Целью работы является повышение точности определения теплопроводности жидкостей путем анализа возникновения возможных погрешностей измерения и разработки методов и средств их уменьшения.

Методика реализации. Установлены виды погрешностей измерения теплопроводности материалов, что позволило дифференциально подойти к их анализу. Предложено для уменьшения погрешности метода измерения вводить соответствующие корректирующие коэффициенты, которые определяются путем использования эталонных жидкостей.

Результаты исследования. Рассмотрены основные причины возникновения погрешностей при проведении исследований, и приведены эффективные способы их уменьшения. Обоснована возможность уменьшения погрешности измерения путем накопления данных многократных наблюдений и их статистической обработки.

Выводы. Представлены результаты экспериментальных исследований с контрольными материалами с помощью созданного прибора, которые показали высокую точность и эффективность использования метода прямого подогрева термистора для определения теплопроводности жидкостей.

Ключевые слова: повышение точности; теплопроводность жидкостей; метод прямого подогрева термистора.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ “КПІ ім. І. Сікорського”

Надійшла до редакції
16 жовтня 2016 року