УДК 536.2.081.7:612.117.6
DOI: 10.20535/1810-0546.2017.5.107938

Г.С. Тимчик, А.М. Матвієнко, М.Ф. Терещенко, С.М. Матвієнко*
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ КОНВЕКЦІЇ В РІДИНІ НА ПОХИБКУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПІДІГРІВУ ТЕРМІСТОРА

Background. The problems of choosing the optimal utensil diameter for the test liquids on the basis of the investigation of the convection phenomenon effect on the error when measuring the thermal conductivity of liquids by the method of direct heating of a thermistor are considered.
Objective. The aim of the paper is to carry out experimental studies to determine the effect of the convection phenomenon on the error in measuring the thermal conductivity of liquids.
Methods. An estimation of the thermistor heating temperature measuring accuracy by the method of direct heating of the thermistor for the test liquid in utensils of different diameters in determining the coefficient of thermal conductivity is carried out. Series of experimental research was carried out with the help of a device for measuring the liquids TPC in order to determine the optimum design of the probe and the thermostat, to select the optimum volume of the material research and to choose the materials of construction.
Results. The results of experimental research with control liquids using the developed instrument based on the method of direct heating of the thermistor are presented, the thermistor heating temperature fluctuation values depending on the utensil diameter with the test liquid are determined.
Conclusions. It is substantiated that when designing devices for measuring the TPC of liquids, it is necessary to take into account the individual properties of the liquids under investigation and to create the greatest possible uniform heating or cooling of the utensil with the test material. Also, it is necessary to use the minimum diameter utensils. It is recommended to use utensils for the test liquid with a diameter of up to 10 mm to reduce the error in measuring the liquid thermal conductivity.

Keywords: thermal conductivity; direct heating thermistor method; thermophysical characteristics of liquid materials.

Вступ

Аналіз сучасної ситуації в галузі метрології теплофізичних вимірювань показує, що проблема підвищення точності, ефективності методів вимірювання теплофізичних характеристик (ТФХ) була і є актуальною. На стадії проектування методів і засобів вимірювання виникає похибка, яка пов'язана з явищем конвекції в досліджуваній рідині при її нагріванні або охолодженні. Таким чином, явище конвекції спотворює результати вимірювання теплопровідності. Проблема може бути вирішена визначенням раціональної конструкції вимірювального зонда, а також правильним вибором посуду та конструкції термостата, характеристик і режимів роботи чутливого елемента через впровадження оптимальних режимних параметрів проведення експерименту [1]. Для зменшення впливу явища конвекції дослідниками визначено основні вимоги до конструкції вимірювальної комірки [2], а саме – обмежений діапазон різниці температури нагрівача, навколишнього середовища і товщини шару досліджуваної рідини. Але конструкції вимірювальних комірок у кожному з методів різні, що зумовлює низку специфічних додаткових вимог окремо для кожного методу. Наприклад, при вимірюванні методом нагрітої нитки необхідно, щоб діаметр нитки був мінімальним [2].

Тому правильний вибір посуду для досліджуваної рідини при вимірюванні теплопровідності методом прямого підігріву термістора є необхідним для визначення раціональної конструкції вимірювального зонда та підвищення точності вимірювання.

Постановка задачі

Метою роботи є дослідження впливу процесів конвекції в досліджуваній рідині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора і, таким чином, підвищення точності вимірювання завдяки вибору оптимальної конструкції, а також розробка рекомендацій і способів зменшення адитивних похибок при вимірюванні коефіцієнта теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора.

Основний матеріал дослідження

Суть методу прямого підігріву термістора полягає у використанні явища його саморозігріву за рахунок протікання через нього електричного

* corresponding author: sergey33333@voliacable.com

струму. Значення температури саморозігріву термістора буде залежати від температури навколишнього середовища, в якому він розміщений, тобто від теплофізичних характеристик досліджуваної рідини, в яку він занурений.

Для ідеальної моделі термісторного датчика у вигляді кулі радіусом r з ідеальною теплопровідністю ($\lambda > 10$ Вт/м·К) коефіцієнт теплопровідності λ визначається за формулою [3]

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

де λ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної рідини, Вт/(м·К); $P_т$ – потужність термістора, Вт; r – радіус термістора, м; ΔT – температура розігріву термістора, °С.

Таким чином, для визначення коефіцієнта теплопровідності методом прямого підігріву термістора необхідно виміряти температуру розігріву термістора в досліджуваній рідині. Похибка її визначення впливає на точність розрахунку значення теплопровідності досліджуваної рідини за даними вимірювання, тому було проведено серію досліджень похибок вимірювання температури розігріву термістора в об'ємній тарі (посуді) різного діаметра та їх системне моделювання.

Для досліджень використовувалася експериментальна установка [4], яка має два вимірювальних зонди. Термістори закріплюються на кінці конусоподібних вимірювальних зондів, які в процесі вимірювання занурюються в рідину. Посудини різного діаметра (8, 20, 50 мм) з рідиною розміщуються на горизонтальній площині нагрівального елемента термостата так, як це зображено на рис. 1.

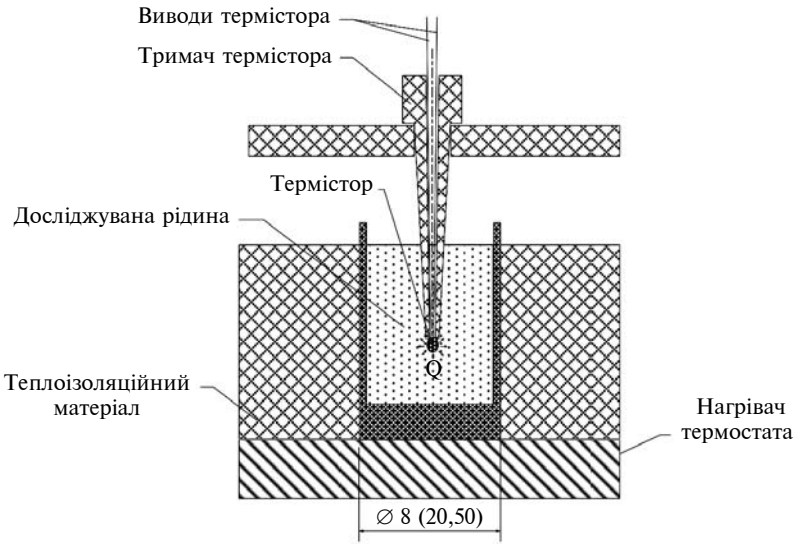

Рис. 1. Розміщення термісторного зонда в рідині при проведенні досліджень

Термістор кожного вимірювального зонда ввімкнений в одне з плечей вимірювального мосту. Структурна схема установки зображена на рис. 2.

Сигнал розбалансу мосту оброблюється за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Числові значення на виході АЦП пропорційні температурі термісторів. За допомогою електричного імпульсу, який подається на вимірювальні мости, термістори розігріваються. Протягом імпульсу розігріву через короткі проміжки часу значення на виході АЦП записуються в пам'ять мікроконтролера приладу, а потім передаються до зовнішнього персонального комп'ютера, де формується файл даних вимірювання. Дані вимірювання, записані за час дії імпульсу розігріву, являють собою термограми нагріву термісторів, за даними яких визначається температура їх саморозігріву.

Обчислення коефіцієнта теплопровідності, яке проводиться через вимірювання температури розігріву термістора, що має тепловий контакт із досліджуваним матеріалом [5, 6], здійснюється за формулою

$$\lambda_{д.м.} = \frac{B(Q \cdot D)}{S(T_{hot} - T_{cold})t},$$

де $\lambda_{д.м.}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваного матеріалу [Вт/м·К чи в несистемних одиницях (ккал/сек·м·°С)]; T_{hot} – температура термістора, розігрітого електричним струмом, °С; T_{cold} – температура термістора до нагрівання електричним струмом, °С; B – коефіцієнт, одержаний у результаті калібрувальних тестувань з еталонними матеріалами з відомими теплофізичними характеристиками; D – товщина вимірювального шару, м; S – площа досліджуваного зразка, м^2; t – час, с; Q – кількість теплової енергії, яка виділяється термістором під дією електричного струму, Дж.

Але, враховуючи малу площу контакту, обробку результатів вимірювання доцільно проводити, використовуючи більш точне рівняння [4, 5]:

$$\lambda_{д.м.} = \frac{B \cdot Q}{(T_{hot} - T_{cold}) - A \cdot Q}, \quad (1)$$

де A – коефіцієнт, одержаний у результаті калібрувальних тестувань з еталонними матеріалами з відомими теплофізичними характеристиками.

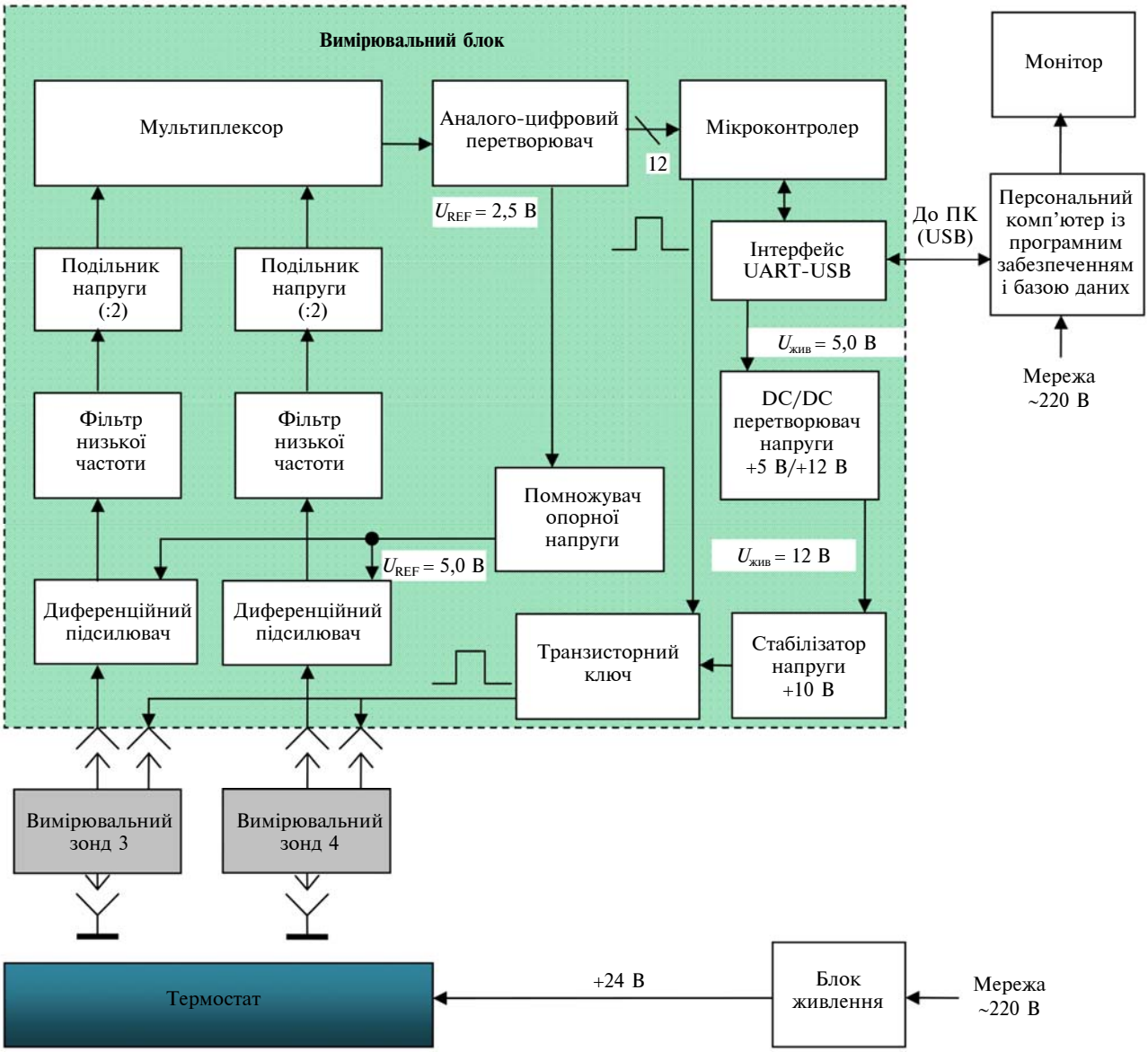

Рис. 2. Структурна схема експериментальної установки

Числове значення коефіцієнта B визначається в результаті калібрувальних тестувань еталонних матеріалів з відомими ТФХ і залежить від площі поверхні капсули, яка перебуває в тепловому контакті з досліджуваним матеріалом (радіусом контактної поверхні), та значення T_{hot}.

Під дією імпульсу електричного струму теплова енергія розсіюється конструкцією зонда та поширюється в досліджуваній рідині. Термістор протягом імпульсу поступово прогрівається. Графік саморозігріву термістора – термограма $\Delta T(t)$ – використовується для визначення ТФХ досліджуваних рідин [4, 7].

Однією з причин виникнення випадкової адитивної складової похибки вимірювання є те, що в досліджуваній рідині за рахунок нагрівання або охолодження її термостатом і термістором до температури, яка відрізняється від температури навколишнього середовища, виникає явище конвекції. Внаслідок цього явища в досліджуваній рідині постійно відбувається переміщення теплих і холодних шарів. Нагрівання або охолодження досліджуваної рідини термостатом зумовлене необхідністю стабілізації температури досліджуваного зразка за час вимірювання та визначення ТФХ досліджуваних рідин за різних температур.

Вільна, або природна, конвекція виникає у зв'язку зі зміною густини рідини від нагрівання, яке здійснюється нерівномірно [8]. Вільна конвекція виникає всюди, наприклад, біля нагрітих стінок або біля дна посудини, трубопроводів, у холодильниках при охолодженні продуктів тощо. Цей вид теплообміну виконує важливу роль як у промисловості, так і в побуті. Вільний теплообмін виникає в нерівномірно нагрітому газі або в рідині, які знаходяться як в обмеженому, так і в необмеженому просторі. Якщо тіло має більш високу температуру, ніж навколишнє середовище, то шари рідини, нагріваючись від тіла, легшають і під дією підйомної сили піднімаються вверх, а на їх місце приходять із навколишнього середовища більш холодні шари. Внаслідок цього явища виникає вільний конвекційний рух рідини (рис. 3).

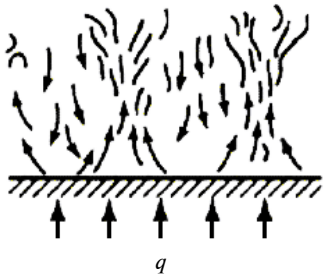

Рис. 3. Характер руху рідини при природній конвекції в необмеженому просторі при нагріванні горизонтальної стінки знизу [8]

Під конвекцією розуміють рух мікрочастинок одна відносно одної [8]. Будь-який рух пов'язаний із переносом кінетичної енергії, а отже, зі зміною температури. Тому якщо середовище має нерівномірну температуру, то процес конвекції буде спрямований на її вирівнювання по всьому об'єму.

Залежно від причин, які викликають рух частинок рідини чи газу, розрізняють два види конвекції: вільну і вимушену. В розглядуваному випадку виникає вільна конвекція, яка зумовлена градієнтом температур між нагрітим електричним струмом термістором і навколишнім середовищем та між горизонтальною площиною нагрівального елемента термостата і навколишнім середовищем. Для зменшення впливу конвекції, що виникає за рахунок градієнта температур між нагрітим електричним струмом термістором і навколишнім середовищем, тривалість імпульсу розігріву термістора в нашому дослідженні зменшено до оптимальних 6 с (згідно з рекомендаціями дослідників [9, 10] вона має становити 1–11 с).

Предметом дослідження є вплив явища конвекції на похибку вимірювання, яка виникає за рахунок градієнта температур між горизонтальною площиною нагрівального елемента термостата і навколишнім середовищем. Вільна конвекція (природна) – це рух частинок за рахунок дії на них підйомної сили в результаті різниці щільності. Інтенсивність такої конвекції буде залежати від роду речовини, різниці температури окремих частинок речовини і від обсягу простору, де відбувається рух частинок. Вимушена (примусова або штучна) конвекція викликана роботою сторонніх збудників (вентилятора, насоса тощо) і виникає в результаті різниці тисків, створюваної цими збудниками.

Кількість теплоти, що передається конвекцією, розраховується за загальноприйнятим рівнянням тепловіддачі Ньютона–Ріхмана [9]:

$$Q = \alpha F(t_{ст} - t_{р}),$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, що характеризує інтенсивність теплообміну на поверхні тіла, Вт/(м^2·К); $t_{ст}$ і $t_{р}$ – відповідно температури стінки та рідини, °С.

Визначення коефіцієнта тепловіддачі викликає найбільші труднощі при розрахунку конвективного теплообміну, оскільки на коефіцієнт α впливають безліч різних чинників. Основними з них є природа виникнення руху рідини та її теплофізичні властивості. На тепловіддачу впливають фізичні властивості рідини (теплопровідність λ, теплоємність c, щільність ρ, в'язкість ν, коефіцієнт теплового розширення β і температуропровідність a), форма і розміри теплообмінної поверхні, а також її положення в просторі.

Точне значення коефіцієнта теплопровідності можна встановити тільки дослідно в кожному окремому випадку. Для аналітичного визначення α необхідно скласти шість диференціальних рівнянь, при розв'язанні яких з'являються дев'ять констант, а для їх знаходження необхідно розв'язати ще чотирнадцять рівнянь.

Для практичного спрощення розрахунків тепловіддачі вдаються до критеріїв теплової подібності [9]. Критерій подібності – це безрозмірний комплекс, що складається з величин, які характеризують певне явище. При проведенні дослідів з метою знаходження коефіцієнта тепловіддачі вимірюють насамперед ті величини, які

входять у критерії подібності. А результати дослідів оброблюються у формі критеріальних рівнянь, які подаються у вигляді залежності

$$K = C \cdot K_1^{n_1} \cdot K_2^{n_2} \cdot ... \cdot K_z^{n_z},$$

де K – визначуваний домінантний критерій; C – константа подібності; $K_1^{n_1} \cdot K_2^{n_2} \cdot ... \cdot K_z^{n_z}$ – критерії, що визначаються; n_1, n_2, ..., n_z – показники ступеня.

Найбільш часто в теорії теплообміну використовуються такі критерії подібності (числа):

– критерій Нуссельта, що характеризує інтенсивність конвективного теплообміну:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda};$$

– критерій Грасгофа, що характеризує інтенсивність вільного руху:

$$\mathrm{Gr} = \beta \cdot 9,8 \cdot d^3 \cdot \frac{\Delta t}{\upsilon^2};$$

– критерій Прандтля, що характеризує фізичні властивості рідини:

$$\mathrm{Pr} = \frac{\upsilon}{a},$$

де d – геометричний розмір тіла, м; ν – кінематична в'язкість потоку, м^2/с; $\beta = 1/(273 + t)$ – коефіцієнт температурного розширення, 1/К; α – температуропровідність, м^2/с.

При вільній конвекції критеріальне рівняння має вигляд [9]

$$\mathrm{Nu} = C(\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr})^n.$$

При вимушеній конвекції аналітичні розв'язки задач із визначення теплопередачі в ламінарному і турбулентному рухах отримані за цілої низки допущень, тому практичного застосування не набули, а знання щодо визначення коефіцієнта теплопровідності в основному базуються на експериментальних дослідженнях.

Результати досліджень

Для обчислення коефіцієнта теплопровідності методом прямого підігріву термістора необхідно виміряти температуру розігріву термістора в досліджуваній рідині. Точність її визначення впливає на точність розрахунку значення теплопровідності досліджуваної рідини за даними вимірювання, тому і була проведена оцінка точності вимірювання температури розігріву термістора в посуді різного діаметра.

З метою визначення оптимальної конструкції зонда і термостата, вибору оптимального об'єму досліджуваного матеріалу та вибору конструктивних матеріалів проведено серію експериментальних досліджень за допомогою установки для вимірювання ТФХ рідин (рис. 4) [4]. Вимірювання температури розігріву термістора виконується протягом 6 с з паузою охолодження 20 с із використанням як досліджуваної рідини дистильованої води. Вибір як досліджуваної рідини дистильованої води зумовлений необхідністю досліджень ТФХ водних розчинів і сумішей, якими є насамперед біологічні середовища. Для підтвердження результатів вимірювання проведені також порівняльні дослідження розчинів води та гліцерину в різних концентраціях, які мають інші ТФХ. Дослідження проводилися в посудинах діаметром 8, 20 і 50 мм, розміщених на нагрівальному елементі термостата. Температура термостата підтримувалася впродовж сеансів вимірювання на рівні +40 ± 0,5 °С.

На рис. 5–7 наведенні термограми розігріву термістора протягом 500 с у посудинах діаметром 50, 20 і 8 мм відповідно. Пунктирними лініями на графіках показані мінімальна та максимальна температури розігріву термістора.

Температура розігріву термістора визначається як різниця значень температури в кінцевій точці термограми і температури в початковій точці розігріву. На графіках на рис. 8–10 наведені коливання температури розігріву термістора протягом сеансів вимірювання в посудинах діаметром 50, 20 і 8 мм відповідно.

Для графіків на рис. 5–10 тривалість імпульсу розігріву термістора становить 6 с; паузи охолодження між імпульсами розігріву по 20 с вилучені.

З графіків видно, що зі зменшенням діаметра посудини зменшується й інтенсивність вільного конвекційного руху рідини, а це істотно зменшує похибку вимірювання температури розігріву термістора, за значенням якої за формулою (1) визначається коефіцієнт теплопровідності досліджуваного матеріалу. Числові значення відхилення температури розігріву від середнього значення в посудинах різних діаметрів наведені в табл. 1.

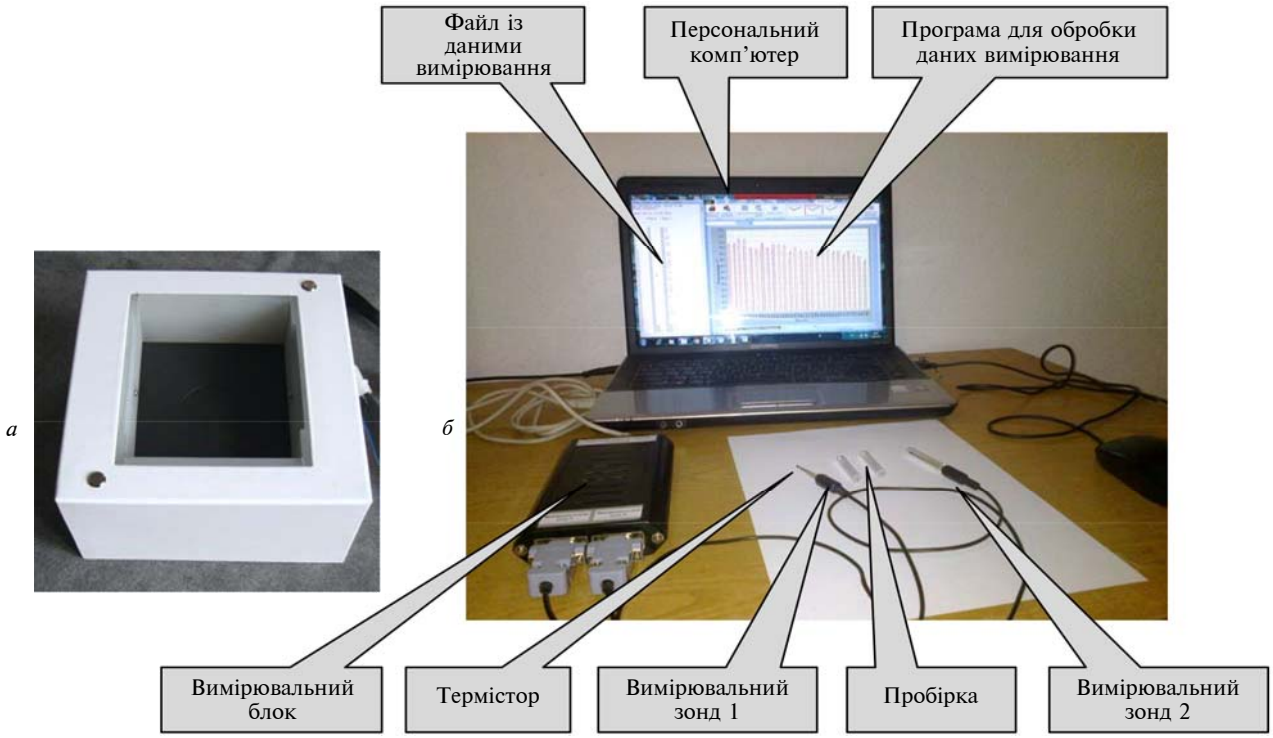

Рис. 4. Фото експериментальної установки: *а* – термостат; *б* – вимірювальний блок і персональний комп'ютер для зчитування та обробки даних

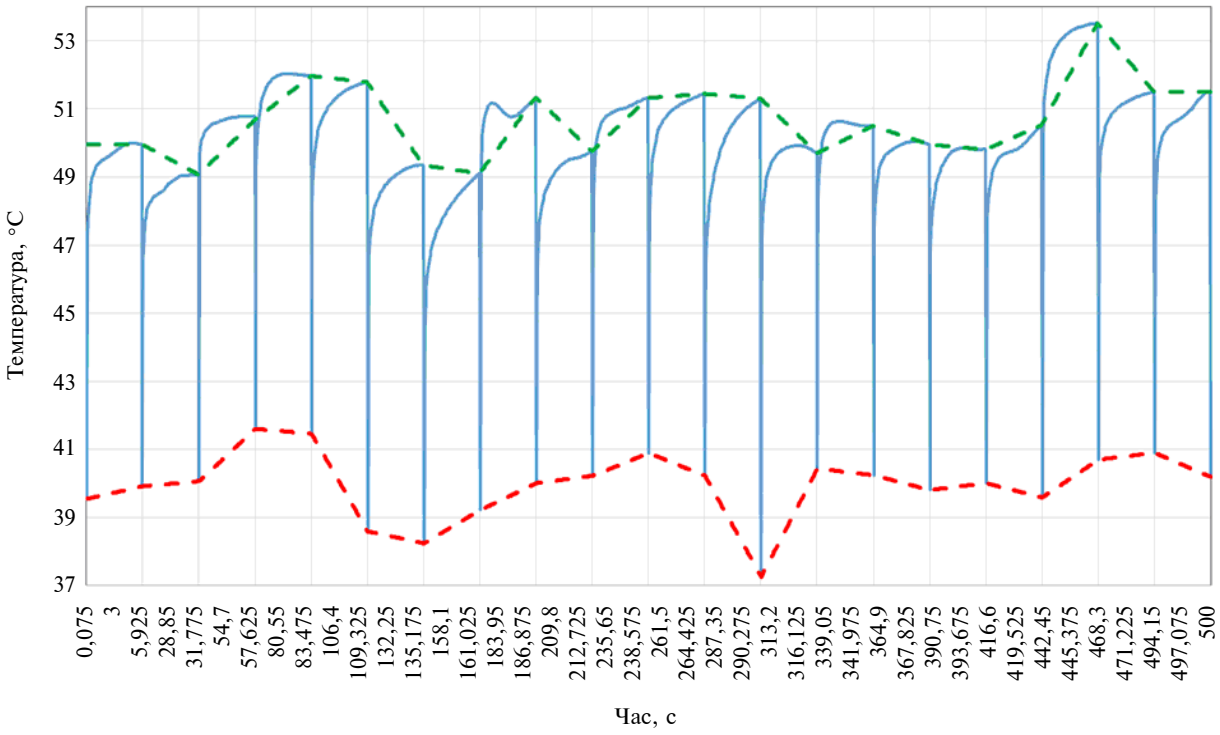

Рис. 5. Термограми розігріву термістора протягом 500 с у посудині діаметром 50 мм: ——— – термограма розігріву термістора; - - - – початкова температура розігріву термістора; - - - – кінцева температура розігріву термістора

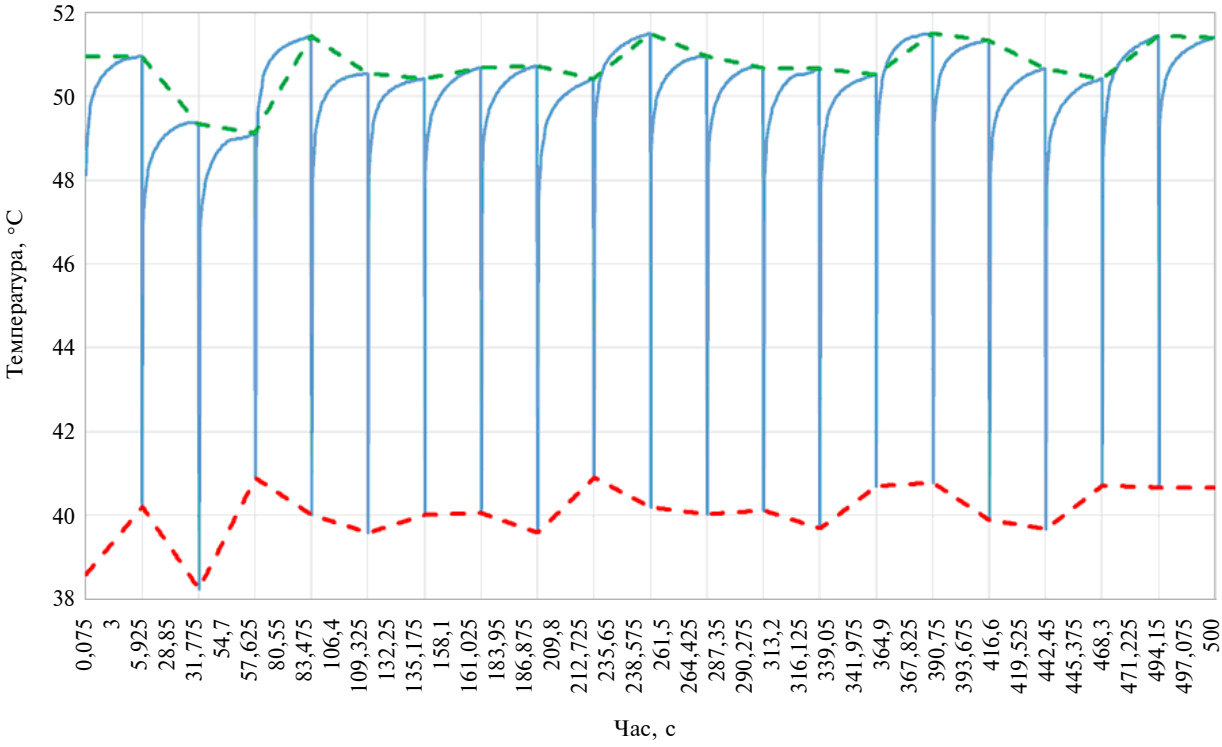

Рис. 6. Термограми розігріву термістора протягом 500 сек у плоскодонній пробірці діаметром 20 мм: — термограма розігріву термістора; - - - початкова температура розігріву термістора; - - - кінцева температура розігріву термістора

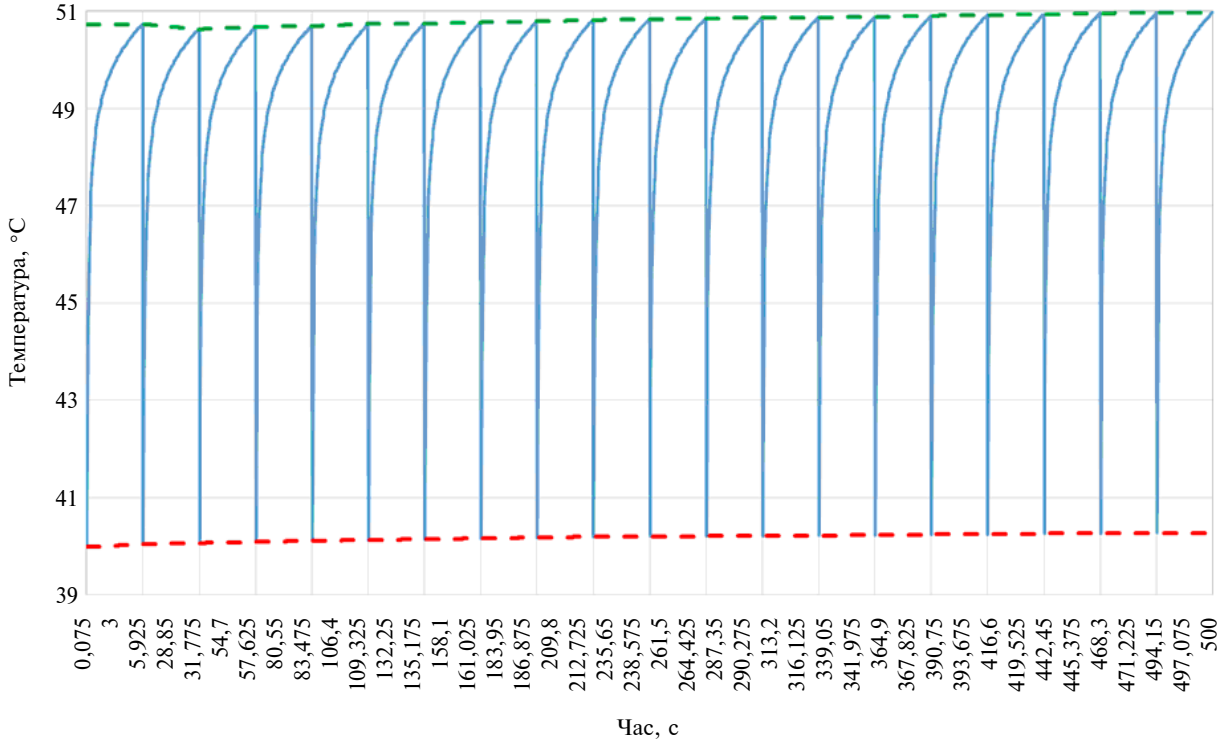

Рис. 7. Термограми розігріву термістора протягом 500 с у пробірці діаметром 8 мм: — термограма розігріву термістора; - - - початкова температура розігріву термістора; - - - кінцева температура розігріву термістора

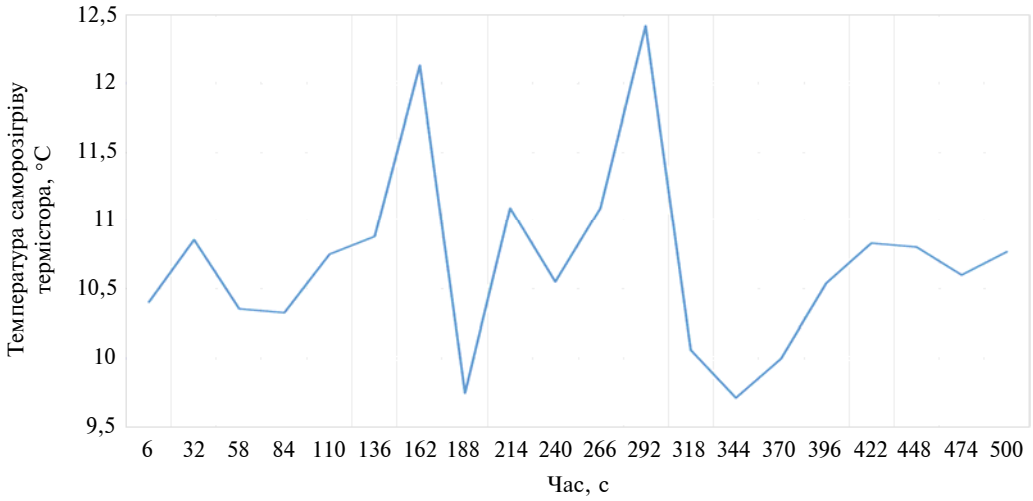

Рис. 8. Зміна температури саморозігріву термістора протягом 500 с у посудині діаметром 50 мм

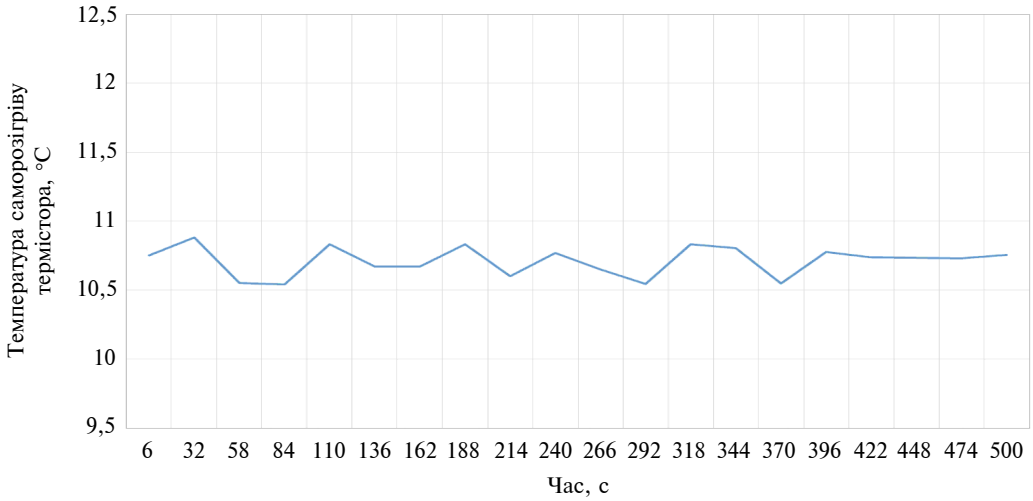

Рис. 9. Зміна температури саморозігріву термістора протягом 500 с у плоскодонній пробірці діаметром 20 мм

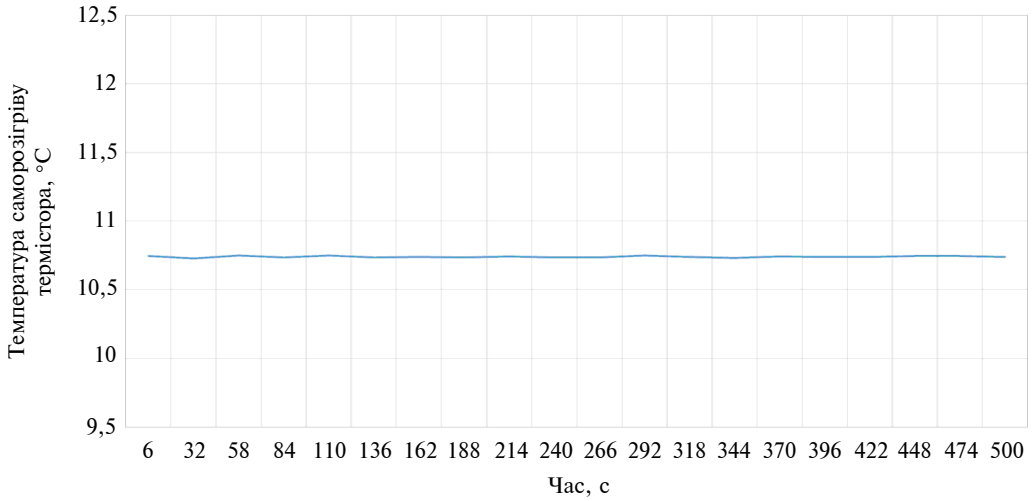

Рис. 10. Зміна температури саморозігріву термістора протягом 500 с у пробірці діаметром 8 мм

***Таблиця* 1.** Відхилення температури розігріву від середнього значення в посудинах різного діаметра

Діаметр посудини з досліджуваним матеріалом, мм	Характеристика, визначена за термограмою	Максимальне значення, °С	Мінімальне значення, °С	Середнє значення, °С	Максимальні абсолютні значення відхилення, °С	Середньоквадратична похибка температури розігріву термістора, %
8	Початкова температура розігріву термістора	40,335	39,985	40,204	0,326 –0,544	–
	Кінцева температура розігріву термістора	51,073	50,730	50,943	0,253 –0,419	–
	Температура розігріву термістора	10,750	10,729	10,739	0,099 –0,096	0,33
25	Початкова температура розігріву термістора	40,899	38,242	40,025	2,183 –4,456	–
	Кінцева температура розігріву термістора	51,504	49,124	50,737	1,511 –3,179	–
	Температура розігріву термістора	10,882	10,543	10,712	1,594 –1,578	5,29
50	Початкова температура розігріву термістора	41,605	37,263	39,953	4,135 –6,732	–
	Кінцева температура розігріву термістора	51,96262	49,12406	50,65024	2,591073 –3,01318	–
	Температура розігріву термістора	12,4205	9,712831	10,69731	16,10859 –9,20305	42,19

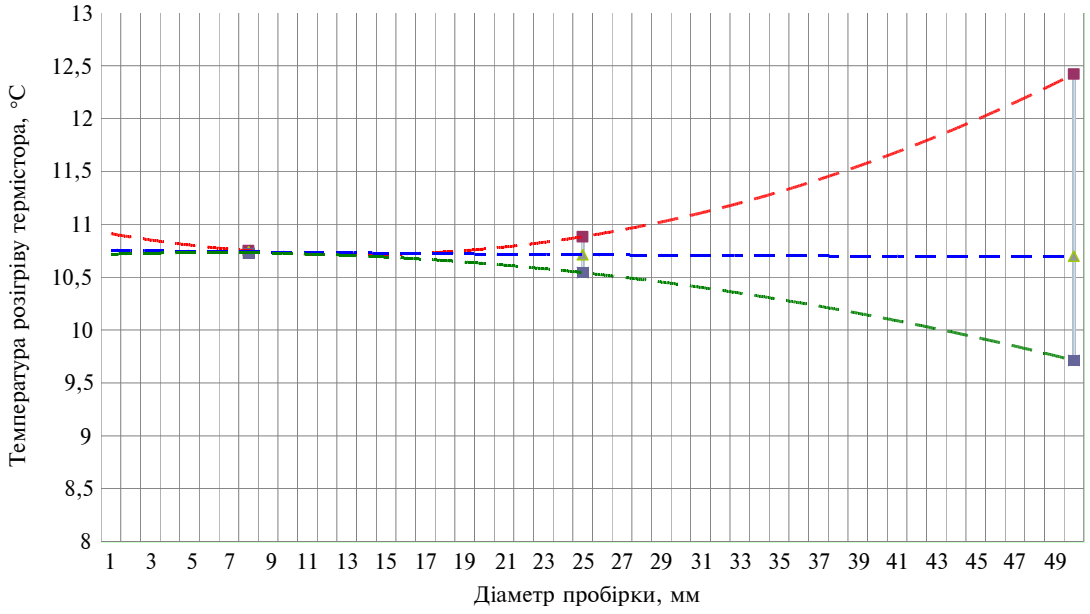

Рис. 11. Залежність виміряного значення температури розігріву термістора від діаметра пробірки та коридор коливань виміряних значень: — максимальне значення; — середнє значення; — мінімальне значення

На рис. 11 зображено залежність виміряного значення температури розігріву термістора від діаметра пробірки та коридор коливань виміряних значень температури.

Оскільки похибка вимірювання температури розігріву термістора є основною складовою похибки визначення коефіцієнта теплопровідності, що обчислюється за формулою (1), то визначимо вплив похибки значень відхилення температури розігріву термістора у дистильованій воді в посудинах різного діаметра. Обчислені значення похибки наведені в табл. 2, а графічна залежність похибки зображена на рис. 12.

Проведені дослідження для дистильованої води та порівняльні дослідження рідин із різними коефіцієнтами теплопровідності (розчинів гліцерину у воді в різних концентраціях) підтвердили тенденцію зростання похибок вимірювання температури зі збільшенням діаметра посудини, що своєю чергою призводить до збільшення похибки при визначенні коефіцієнта теплопровідності за значенням температури розігріву термістора. Збільшення похибки визначення коефіцієнта теплопровідності зі збільшенням діаметра посудини зумовлене різним ступенем конвекції в посудинах різного діаметра. Особливо це проявляється при роботі в рідинному середовищі випромінювачів ультразвукових терапевтичних апаратів [11–13]. Похибка, яка виникає при дослідженні рідин із різними коефіцієнтами теплопровідності, буде залежати від фізичних властивостей конкретної рідини, тому в дослідженнях доцільно використовувати посуд якомога меншого діаметра. Таку залежність підтверджують й інші дослідники [14, 15]. Так, Р. Кравець [15] зазначає, що при діаметрі термістора 1,5 мм товщина шару досліджуваної рідини має бути не більше 5 мм. Цього достатньо для того, щоб при малому часі нагрівання термістора (до 10 с) ефект конвекції не впливав на похибку вимірювання, а при математичному моделюванні в розрахунках ТФХ дозволяє вважати рідину напівнескінченним середовищем.

***Таблиця* 2.** Числові значення похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності в посудинах різного діаметра

Діаметр посудини з досліджуваним матеріалом, мм	Виміряне середнє значення, Вт/м·К	Систематична похибка*, %	Абсолютна похибка, Вт/м·К	Відносна похибка вимірювання, %
8	0,6295	0,09	0,0078	1,24
25	0,6229	–0,968	0,0861	13,8
50	0,6195	–1,516	0,7743	125,0

*При багаторазових вимірюваннях для зменшення похибки вимірювання необхідно вносити поправку на систематичну похибку залежно від діаметра посудини відповідно для кожної із досліджуваних рідин. Значення поправок визначаються дослідно.

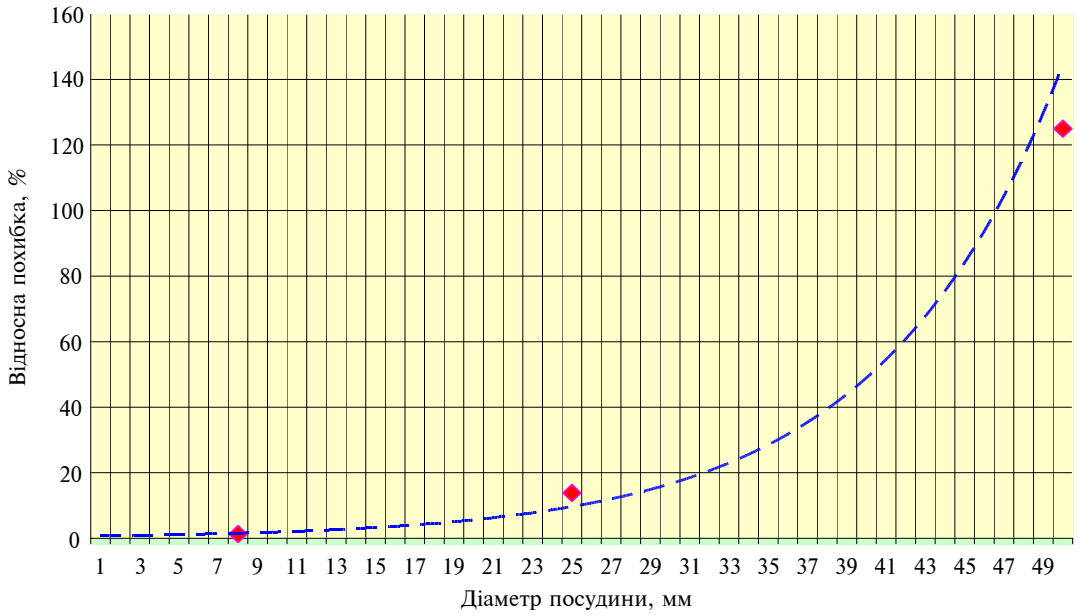

Рис. 12. Залежність відносної похибки вимірювання від діаметра посудини при дослідженні дистильованої води

Висновки

Для визначення раціональної конструкції вимірювального зонда і правильного вибору посуду для досліджуваної рідини при вимірюванні теплопровідності методом прямого підігріву термістора в роботі проведено дослідження можливих похибок, які пов'язані з явищем конвекції в досліджуваній рідині, кількісно оцінено ці похибки і розроблено рекомендації, спрямовані на підвищення точності вимірювання.

1. При проектуванні приладів для вимірювання ТФХ рідин необхідно враховувати індивідуальні властивості досліджуваних рідин і забезпечити максимально можливе рівномірне нагрівання або охолодження посудини з досліджуваним матеріалом. Для зменшення похибки вимірювань, яка виникає за рахунок впливу явища конвекції у рідинах, необхідно проводити вимірювання за мінімальної різниці температури нагрівача та навколишнього середовища, а також використовувати посуд мінімального діаметра.

2. Зі зменшенням діаметра посудини зменшується інтенсивність руху рідини при вільній (природній) конвекції.

3. При вимірюванні температури розігріву термістора діаметр пробірки має бути не більшим 10 мм. У цьому випадку похибка вимірювання температури розігріву термістора за рахунок природної конвекції не перевищуватиме 0,35 %, тому істотно не впливатиме на загальну похибку вимірювання ТФХ.

4. У випадку коли при дослідженнях неможливо використати посудину діаметром менше 10 мм, необхідно вимірювання проводити багаторазовим методом з усередненням результатів вимірювання і при розрахунках вносити поправки на систематичну похибку залежно від діаметра посудини відповідно для кожної із досліджуваних рідин, значення яких визначаються дослідно. Іншим способом вирішення проблеми є вимірювання температури розігріву термістора в посудині та вимірювальному зонді, які розміщені повністю в термостаті, де навколишнім середовищем для них є камера термостата, а явище конвекції не виникає.

5. Камера термостата повинна мати достатній розмір для розміщення зондів та посудини з досліджуваною рідиною, що не завжди зручно при вимірюваннях великої кількості досліджуваних рідин.

6. Зважаючи на малі розміри термісторного зонда і, порівняно з іншими методами, короткий час вимірювання ТФХ (1–10 с), метод прямого підігріву термістора можна використовувати як при вимірюванні ТФХ, так і для досліджень інтенсивності конвекції в рідинах і газах. Також, завдяки невеликим своїм розмірам, термістор має малу теплову інерційність, що дає змогу спостерігати швидкоплинні теплові процеси в рідинах і газах.

Конструкція розробленого приладу відкриває широкі перспективи застосування методу прямого підігріву термістора в різних галузях промисловості. В рамках подальших досліджень планується реєстрація швидкоплинних теплових процесів у різного роду рідинах і газах.

Подяка

Колектив авторів висловлює подяку Міністерству освіти і науки України, оскільки робота виконувалась за фінансової підтримки проекту ДР 0117U004263.

Список літератури

1. *Пономарев С.В., Балабанов П.В., Трофимов А.В.* Оценка погрешностей измерения теплофизических свойств твердых материалов // Измер. техника. – 2004. – № 1. – С. 44–47.
2. *Теоретические* и практические основы теплофизических измерений / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин и др. – М.: Физмалит, 2008. – 408 с.
3. *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.
4. *Матвієнко С.М., Філіппова М.В., Мартинчук О.А.* Дослідження теплопровідності матеріалів за допомогою методу імпульсної термістометрії // Вісник Кременчуцьк. нац. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2015. – Вип. 6 (95). – С. 106–112.
5. *Atkins R.T., Wright E.A.* Thermistor-based thermal conductivity measurement system: U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Special Report 90-24. – 1990. – P. 1–11.
6. *Thermal* Conductivity Measurement Method: Patent 04522512 USA / R.T. Atkins. – Jun. 11, 1985.
7. *Matvienko S., Vysloukh S., Martynchyk O.* Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method // Eastern-European J. Enterprise Technol. – 2016. – **4**, № 5. – P. 250–258.

8. *Орлов М.Е.* Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен. – Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 204 с.
9. *Врагов А.П.* Теплообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв. – Суми: Вид-во СумДУ, 2006. – 262 с.
10. *Woodbury K.A.* An experimental and analytical investigation of liquid moisture distribution in roof insulating systems: Ph.D. thesis in Mech. Eng. – Virginia Polytechnic Institute and State University, 1984.
11. *Терещенко М.Ф., Кирилова А.В.* Принципи побудови сучасних ультразвукових терапевтичних апаратів // Вісник НТТУ "КПІ". Сер. Приладобудування. – 2010. – Вип. 40. – С. 136–143.
12. *Відчутники* контрольно-вимірювальних систем: монографія / Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, М.А. Вайнтрауб, Т.Р. Клочко. – К.: НТУУ "КПІ", 2008.
13. *Чутники* електромагнітного випромінювання для біотехнічних досліджень / Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, М.А. Вайнтрауб, Т.Р. Клочко. – К.: МП Леся, 2004.
14. *Van Gelder M.F.* A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures: Ph.D. thesis. – Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
15. *Kravets R.R.* Determination of thermal conductivity of food materials using a bead thermistor: Ph.D. thesis in Food Sci. Technol. – Virginia Polytechnic Institute and State University, 1988.

References

[1] S.V. Ponomarev *et al.*, "Estimation of errors in measuring the thermophysical properties of solid materials", *Izmeritelnaya Tekhnika*, no. 1, pp. 44–47, 2004 (in Russian).
[2] S.V. Ponomarev *et al.*, *Theoretical and Practical Basis of Thermophysical Measurements*. Moscow, Russia: Fizmalit, 2008 (in Russian).
[3] D.V. Akulenko *et al.*, "The measurement of thermal conductivity medium using a direct heating thermistor method", in *Proc. Problems of Technogenic Security and Sustainable Development*, no. 3, pp. 49–52, 2012 (in Russian).
[4] S. Matvienko *et al.*, "Investigation of thermal conductivity of materials by means of pulsed thermistometry method", *Visnyk Kremenchuts'kogo Natsional'nogo Universitetu im. M. Ostrograds'kogo*, vol. 95, no. 6, pp. 106–112, 2015 (in Ukrainian).
[5] R.T. Atkins *et al.*, "Thermistor-based thermal conductivity measurement system", U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Special Report 90-24, pp. 1–11, 1990.
[6] R.T. Atkins, "Thermal conductivity measurement method", U.S. Patent 04522512, 1985.
[7] 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, pp. 20–30, 2016. doi: 10.15587/1729-4061.2016.75459
[8] M.E. Orlov, *Theoretical Foundations of Heat Engineering. Heat and Mass Exchange*. Ulyanovsk, Russia: Ulyanovsk State Technical University, 2013 (in Russian).
[9] A.P. Vragov, *Heat Exchange Processes and Equipment for Chemical and Gas Refineries*. Sumy, Ukraine: Sumy State University, 2006 (in Russian).
[10] K.A. Woodbury, "An experimental and analytical investigation of liquid moisture distribution in roof insulating systems", Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1984.
[11] M.F. Tereshchenko *et al.*, "Principles of constructing modern ultrasound therapeutic devices", *Visnyk NTTU KPI. Ser. Priladobuduvannya*, vol. 40, pp. 136–143, 2010 (in Ukrainian).
[12] G.S. Tymchik *et al.*, *Tangents of Control and Measuring Systems*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2008 (in Ukrainian).
[13] G.S. Tymchik *et al.*, *Sensors of Electromagnetic Radiation for Biotechnical Research*. Kyiv, Ukraine: MP Lesya, 2004 (in Ukrainian).
[14] F.M. van Gelder, "A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures", Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
[15] R.R. Kravets, "Determination of thermal conductivity of food materials using a bead thermistor", Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1988.

Г.С. Тимчик, А.М. Матвієнко, М.Ф. Терещенко, С.М. Матвієнко

ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ КОНВЕКЦІЇ В РІДИНІ НА ПОХИБКУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПІДІГРІВУ ТЕРМІСТОРА

Проблематика. Розглянуто питання підбору оптимального діаметра посуду для досліджуваних рідин на основі дослідження впливу явища конвекції на похибку при вимірюванні коефіцієнта теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора.

Мета дослідження. Метою роботи є проведення експериментальних досліджень з визначення впливу конвекції на похибку при вимірюванні коефіцієнта теплопровідності рідин.

Методика реалізації. Проведено оцінку точності вимірювання температури розігріву термістора методом прямого підігріву термістора для досліджуваної рідини в посудинах різного діаметра при визначенні коефіцієнта теплопровідності. Виконано се-

рію експериментальних досліджень за допомогою установки для вимірювання теплофізичних характеристик (ТФХ) рідин з метою визначення оптимальної конструкції зонда і термостата, вибору оптимального об'єму досліджуваного матеріалу та вибору конструктивних матеріалів.

Результати дослідження. Надано результати експериментальних досліджень з контрольними рідинами за допомогою розробленого приладу на основі методу прямого підігріву термістора, встановлено значення коливання температури розігріву термістора залежно від діаметра посудини з досліджуваною рідиною.

Висновки. Обґрунтовано, що при проектуванні приладів для вимірювання ТФХ рідин необхідно враховувати індивідуальні властивості досліджуваних рідин і забезпечити максимально можливе рівномірне нагрівання або охолодження посудини з досліджуваним матеріалом. Також необхідно використовувати посуд мінімального діаметра. Рекомендовано для зменшення похибки вимірювання теплопровідності рідин використовувати посуд для досліджуваної рідини діаметром до 10 мм.

Ключові слова: теплопровідність; метод прямого підігріву термістора; теплофізичні характеристики рідких матеріалів.

Г.С. Тымчик, А.Н. Матвиенко, Н.Ф. Терещенко, С.Н. Матвиенко

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКЦИИ В ЖИДКОСТИ НА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПОДОГРЕВА ТЕРМИСТОРА

Проблематика. Рассмотрены вопросы подбора оптимального диаметра посуды для исследуемых жидкостей на основе исследования влияния явления конвекции на погрешность при измерении коэффициента теплопроводности жидкостей методом прямого подогрева термистора.

Цель исследования. Целью работы является проведение экспериментальных исследований по определению влияния конвекции на погрешность при измерении коэффициента теплопроводности жидкостей.

Методика реализации. Проведена оценка точности измерения температуры разогрева термистора методом прямого подогрева термистора для исследуемой жидкости в посуде разного диаметра при определении коэффициента теплопроводности. Проведена серия экспериментальных исследований с помощью установки для измерения теплофизических характеристик (ТФХ) жидкостей с целью определения оптимальной конструкции зонда и термостата, выбора оптимального объема изучаемого материала и выбора конструктивных материалов.

Результаты исследования. Представлены результаты экспериментальных исследований с контрольными жидкостями с помощью разработанного прибора на основе метода прямого подогрева термистора, определены значения колебания температуры разогрева термистора в зависимости от диаметра посуды с исследуемой жидкостью.

Выводы. Обосновано, что при проектировании приборов для измерения ТФХ жидкостей необходимо учитывать индивидуальные свойства исследуемых жидкостей и обеспечить максимально возможное равномерное нагревание или охлаждение посуды с исследуемым материалом. Также необходимо использовать посуду минимального диаметра. Рекомендовано для уменьшения погрешности измерения теплопроводности жидкостей использовать посуду для исследуемой жидкости диаметром до 10 мм.

Ключевые слова: теплопроводность; метод прямого подогрева термистора; теплофизические характеристики жидких материалов.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
31 травня 2017 року