

Визначення складу речовин та їх сумішей на основі теплопровідності з використанням методу прямого розігріву термістора

С. М. Матвієнко, В. В. Шевченко, М. Ф. Терещенко, А. Ю. Кравченко,
Р. О. Іваненко

Досліджено теплофізичні властивості різноманітних речовин та сумішей неруйнівним методом. Пропонується визначити величину теплопровідності речовин та сумішей методом прямого підігріву термістора.

Створено пристрій для вимірювання теплопровідності різноманітних речовин та сумішей, принцип дії якого базується на вимірюванні температури розігріву термістора в досліджуваній речовині. При цьому враховується нелінійний характер отриманої залежності розігріву термістора.

На основі проведених досліджень показана можливість визначення складу суміші за її коефіцієнтом теплопровідності. Надані результати експериментальних досліджень з еталонними рідинами, розчинами цукру, гліцерину та спирту у воді. Надані результати вимірювань теплофізичних властивостей (ТФВ) біологічних речовин (кров та плазма крові людини, білок та жовток курячого яйця та інші), деяких овочів за допомогою методу прямого підігріву термістора в діапазоні температур від +25 °С до +40 °С.

Обґрунтовано, що при дослідженнях ТФВ речовин методом прямого підігріву термістора можливе визначення складу сумішей за їх теплопровідністю, але при цьому необхідно враховувати індивідуальні властивості досліджуваних рідин. Надано рекомендації щодо проведення дослідження ТФВ речовин та визначення за їх теплопровідністю складу сумішей з врахуванням індивідуальних властивостей досліджуваних речовин.

Використання запропонованого методу прямого підігріву термістора для визначення складу суміші розчинів, біологічних матеріалів та харчових продуктів надає можливість аналізувати склад наноречовин, отримувати достовірні дані про ступінь алергічної реакції. А у випадку визначення складу харчових продуктів – враховувати отримані дані при розробці холодильного обладнання та продовженні строку зберігання продуктів зі збереженням їх корисних властивостей

Ключові слова: вимірювання, теплопровідність, термістор,, теплофізичні характеристики речовин, склад суміші

1. Вступ

Всебічне дослідження властивостей матеріалів, в тому числі і їх теплофізичних властивостей, а зокрема теплопровідності, викликає необхідність розробки ефективних методів і методики досліджень. Коефіцієнт теплопровідності є важливим показником теплових процесів різного роду. До числа найбільш ефективних методів визначення коефіцієнта теплопровідності можуть бути віднесені методи неруйнівного контролю. З їх допомогою можна отримувати інфор-

мацію про теплопровідність досліджуваного матеріалу при максимальному збереженні його природної структури. Крім того, за допомогою неруйнівних методів може бути досягнута найбільш висока продуктивність вимірювань, оскільки дані методи не вимагають трудомісткої підготовки досліджуваних матеріалів. Вимірювання ТФВ речовин використовується для визначення їх складу. Метод теплового неруйнівного контролю, зокрема «метод теплопровідності», застосовується для визначення складу газових сумішей, в технологічних сумішах різного складу [1] в газоаналізаторах, з метою розробки сучасних інноваційних охолоджуючих рідин (нанорідин) [2], неруйнівного контролю вмісту зв'язуючої рідини в полімерно-композитних матеріалах на стадії їх виготовлення [3]. Також «метод теплопровідності» використовується для вимірювання вмісту води та етанолу в сумішах [4], для визначення наявності та ступеню імунологічної реакції [5], встановлення температури нагріву поверхні ультразвукового випромінювача [6] та інше.

Актуальною є розробка нових методів та приладів на їх основі, завдяки яким значно спрощується процес вимірювання теплопровідності матеріалів неруйнівним методом. Важливим є те, що створюється можливість одночасного вимірювання кількох дослідних зразків з підвищеною продуктивністю (при умові скорочення терміну часу процедури вимірювання множини дослідних зразків) і заданою точністю вимірювання.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [7] наведено результати досліджень з визначення теплопровідності речовин. Показано, що більшість з існуючих методів вимірювання теплопровідності мають ряд недоліків. Залишилось невирішеним питання громіздкості тепловимірювальних систем. Це зумовлює підвищені вимоги до умов проведення експерименту. Разом з тим, підвищується час вимірювання, а також невирішена проблема проведення досліджень кількох зразків одночасно. Варіантом подолання вказаних труднощів може бути застосування математичної обробки даних термограм розігріву термістора протягом тривалості імпульсу його розігріву. Але залишилися невирішеним питання, пов'язане з використанням цього способу при вимірюванні в широкому діапазоні температур. Причиною цього є нелінійна залежність опору термістора від його температури та зміна потужності термістора в процесі його нагрівання, що призводить до збільшення похибки вимірювання. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути введення в розрахункову формулу відповідних поправок.

Саме такий підхід використаний в роботі [7]. Однак в цій роботі не розглянуте питання зміни режимів роботи та параметрів вимірювального мосту для забезпечення мінімального значення похибки визначення коефіцієнта теплопровідності. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого вимірюванню коефіцієнта теплопровідності в широкому діапазоні температур при відповідних режимах роботи та параметрах вимірювального мосту.

Так, в роботі [8] проведений детальний аналіз методів вимірювання ТФВ біологічних речовин і аналіз досліджень, зроблених різними дослідниками. Ав-

тор прийшов до висновку, що найбільш доцільним методом вимірювання ТФВ біологічних матеріалів є саме метод імпульсного підігріву термістора.

В роботах [9–11] наведені результати досліджень визначення коефіцієнта теплопровідності за значенням температури розігріву термістора, що має тепловий контакт з досліджуваною речовиною. В роботах [12, 13] наведені результати досліджень визначення коефіцієнта теплопровідності шляхом математичної обробки даних термограми розігріву термістора протягом тривалості імпульсу його розігріву. В роботі [14] наведені результати досліджень визначення коефіцієнта теплопровідності шляхом порівняння температури розігріву термістора в досліджуваній речовині і температури розігріву термістора в еталонній речовині. Але в оприлюднених результатах робіт [9–14] залишилась проблема застосування великої кількості корегуючих коефіцієнтів в математичних моделях визначення теплопровідності речовин (сумішей), що суттєво збільшує похибку вимірювання для ряду досліджень. Слід зауважити, що для точного визначення величини теплопровідності такий підхід є недоцільним, оскільки при невеликій різниці за величинами теплопровідності речовин буде неможливо визначити ТФВ сумішей.

Слід відмітити, що для визначення величини розподілу газових сумішей та розчинів часто використовують достатньо простий метод аналізу складу суміші. Даний метод заснований на залежності її коефіцієнта теплопровідності від концентрації компонентів суміші («метод теплопровідності») [15–18]. Застосування методу прямого підігріву термістора для визначення складу речовин (сумішей) шляхом вимірювання коефіцієнта їх теплопровідності дозволяє створити простий експрес метод визначення складу речовин [18].

Вельми затребуваним є створення ефективних методів вимірювання теплопровідності речовин з метою визначення їх теплофізичних властивостей та аналізу складу сумішей на основі визначення їх ТФВ. Необхідність контролю ТФВ речовин на всіх етапах виробництва зумовлює пошук та вдосконалення засобів неруйнівного контролю теплопровідності матеріалів.

На основі вищевикладеного можна зробити висновок, що ефективний метод дослідження речовин ґрунтується на визначенні їх ТФВ, зокрема теплопровідності. Але не існує однозначного опису теплофізичних механізмів, що відбуваються протягом короткочасного нагрівання різноманітних речовин джерелом тепла малих розмірів. Тому важливим фактором для достовірного визначення складу речовин є їх ТФВ як основні параметри властивостей речовин.

Прилади, які використовуються для визначення складу речовин за їх ТФВ, є складними для реалізації, вимагають довготривалих досліджень, пред'являють підвищені вимоги до умов експерименту, потребують тривалого процесу градування, характеризуються складністю конструкції вимірювальної комірки, мають обмежену чутливість датчиків та вимагають великого об'єму досліджуваної речовини. Все вищевказане призводить до значної похибки вимірювань. Це суттєво обмежує можливості методу визначення складу речовини за величиною теплопровідності для практичного використання у біомедичних дослідженнях, дослідженнях харчових продуктів та дослідженнях складу сумішей.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є дослідження можливості визначення складу розчинів, біологічних матеріалів та харчових продуктів за їх теплофізичними характеристиками методом прямого підігріву термістора на основі їх теплофізичних властивостей в різних діапазонах температур. Зокрема дослідження можливості застосування даного методу для визначення складу суміші за її коефіцієнтом теплопровідності.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- обґрунтувати можливість використання методу прямого підігріву термістора для визначення коефіцієнта теплопровідності різноманітних речовин – сумішей;
- розробити принципи побудови пристрою для реалізації запропонованого методу в різних діапазонах температур;
- привести необхідну математичну залежність, що пояснює процес визначення величини теплопровідності речовин на основі отриманих даних температури розігріву термістора;
- здійснити дослідження з визначення величини теплопровідності розчинів, біологічних матеріалів та харчових продуктів та здійснити оцінку похибки визначення отриманих даних.

4. Матеріали і методи досліджень з визначення коефіцієнта теплопровідності речовин

Для визначення коефіцієнта теплопровідності речовин найпростішим методом є метод прямого підігріву термістора, який використовує здатність термістора до саморозігріву при протіканні через нього електричного струму. Температура розігріву термістора залежить від температури навколишнього середовища, в якому термістор знаходиться, тобто від теплофізичних характеристик досліджуваної речовини, з якою даний вимірювальний елемент (термістор) має тепловий контакт.

В ідеальному випадку, коли термістор має форму кулі радіусом r за умови ідеальною теплопровідністю ($\lambda > 10$ Вт/м·К), а тепла енергія розповсюджується рівномірно від нього в усі сторони. При цьому на межі розмежування між термістором та навколишнім середовищем існує тепловий контакт (відсутній тепловий опір), значення коефіцієнта теплопровідності λ навколишньої досліджуваної речовини визначається за формулою [9, 19, 32]:

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

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

Таким чином, для визначення значення коефіцієнта теплопровідності методом прямого підігріву термістора достатньо виміряти безпосередньо температуру розігріву термістора в досліджуваній речовині.

4. 1. Пристрій для вимірювання теплопровідності речовин

Вимірювання температури розігріву термістора в досліджуваній речовині при різних температурах проводиться за допомогою вимірювального пристрою, спрощена структурна схема якого зображена на рис. 1.

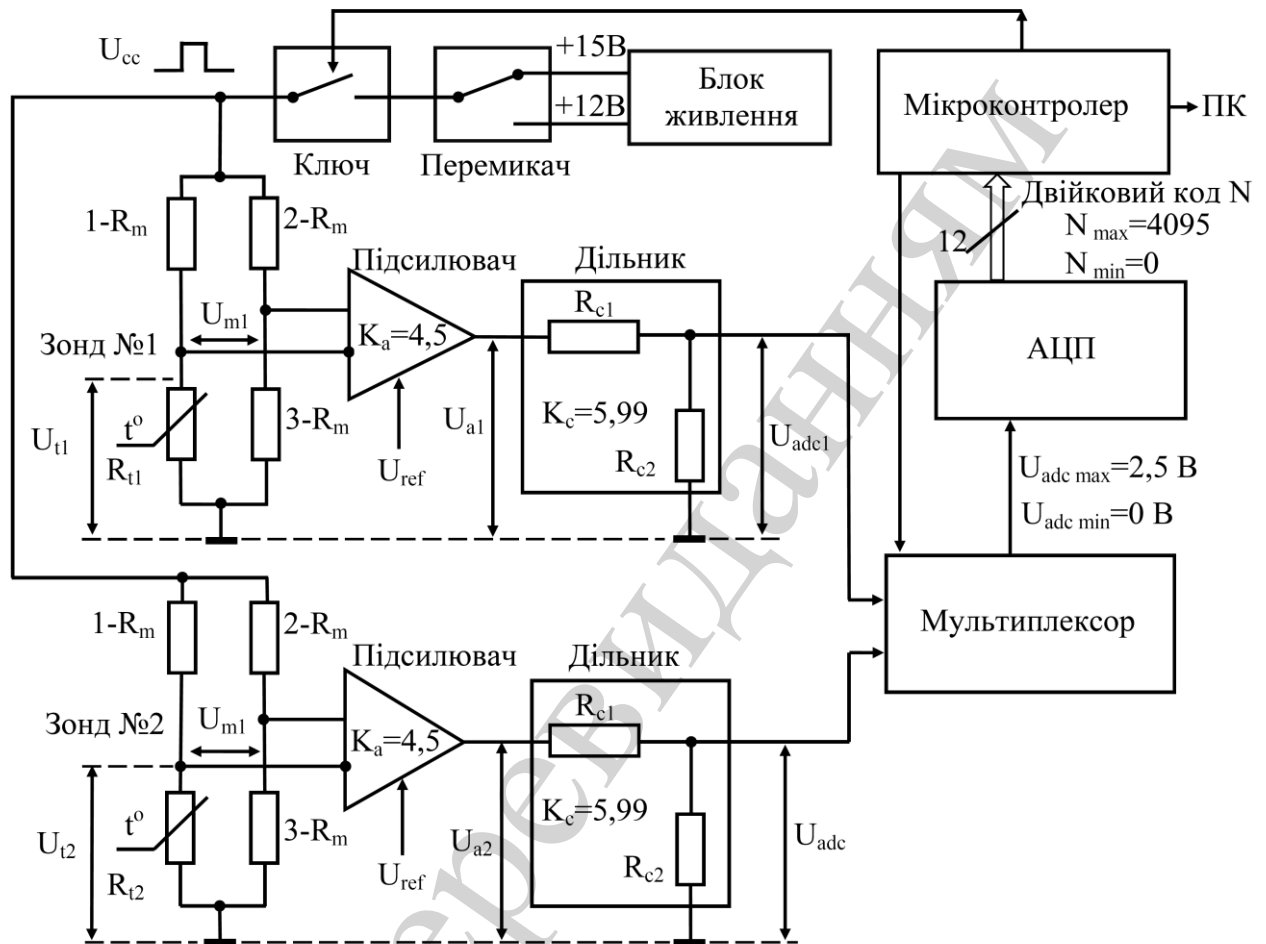


Рис. 1. Структурна схема пристрою, за допомогою якого проводиться визначення коефіцієнта теплопровідності методом прямого підігріву термістора

В одне із плечей вимірювального мосту включено термістор R_t . Значення опору трьох інших резисторів R_m однакове і залежить від діапазону температур, в якому проводиться вимірювання. В даному випадку використовувався тип термістора RH16 – 3G202FB «MITSUBISHI MAT. CORP.» (Японія), який при температурі $+25\text{ }^\circ\text{C}$ має значення опору $2\text{ кОм} \pm 1\%$. Якщо вимірювання здійснюється в діапазоні температур від $+30\text{ }^\circ\text{C}$ до $+70\text{ }^\circ\text{C}$, то використовувався зонд № 2 з $R_m=1,15\text{ кОм}$ і при цьому міст збалансований при температурі $+40\text{ }^\circ\text{C}$. Вимірювальний пристрій для вимірювання в різних діапазонах температур має два паралельних вимірюваних канали з різними зондами. Для одночасного вимірювання коефіцієнта теплопровідності кількох досліджуваних речовин вимірювальний пристрій має два зонди, розбалансування мостів яких вимірюється тим же АЦП. Вимірювані сигнали від різних зондів подаються на АЦП через мультиплексор.

Якщо вимірювання здійснюється в діапазоні температур від +18 °С до +48 °С, використовувався зонд № 1 з $R_m=1,87$ кОм і вимірювальний міст збалансований при +27 °С. Наявність двох різних зондів для вимірювання в різних діапазонах температури зумовлена необхідністю забезпечення точності вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин за умови, що відносна похибка вимірювання не перевищує 3 % і за умови роздільної здатності 0,0006 °С вимірювання температури в кожному з діапазонів. Напряга в діагоналі моста посилюється підсилювачем і подається через подільник на аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Подільник напруги необхідний для узгодження діапазону напруги на виході підсилювача, який складає від 0 до +15 В з допустимою максимальною напругою на вході АЦП, що змінюється від 0 до +2,5 В. На виході АЦП отримуємо двійковий код, значення якого пропорційне напрузі розбалансування мосту. Це розбалансування вимірюється мікроконтролером на початку імпульсу струму, що протікає в термісторі під дією напруги U_{cc} і в його кінці, та передається через інтерфейс в персональний комп'ютер (ПК), а отриманий масив даних зберігається у вигляді текстового файлу. В даному випадку для зв'язку вимірювача з ПК використовуються модулі Wi-Fi. За одержаними даними розігріву термістора під дією імпульсу струму, які зберігаються в файлі (значенню N на початку імпульсу і в його кінці), визначається температура розігріву термістора. Положенням перемикача встановлюється необхідна амплітуда U_{cc} імпульсу – 12 В для Зонду № 2 або 15 В для Зонду № 1 для забезпечення однакової потужності термістора в різних діапазонах температури.

Представлений в роботі пристрій вдосконалено на основі раніше розробленого авторами приладу [7, 18, 19]. Вдосконалений пристрій використовується для визначення теплопровідності при різних діапазонах температур. Відрізняється від раніше розробленого приладу тим, що застосовуються різні схемні рішення для різних термісторних зондів, при цьому змінюється амплітуда імпульсу розігріву для встановлення однакової потужності термістора в змінних діапазонах температур.

4. 2. Обґрунтування математичної залежності значення коефіцієнта теплопровідності від вимірюної температури розігріву термістора

Представлена математична залежність забезпечення процесу вимірювання теплопровідності різних речовин, на відміну від існуючих, враховує ряд умов, які забезпечують зниження похибки вимірювання та зменшують час, що необхідний як для підготовки зразків для вимірювань, так і для проведення досліджень безпосередньо.

Так, опір термістора обчислюється за формулою [20]:

$$R_t = R_{25} \cdot e^{B \left(\frac{1}{T+273,15} - \frac{1}{298,15} \right)}, \quad (2)$$

де R_t – опір термістора, Ом; R_{25} – опір термістора при номінальній температурі +25 °С, Ом; B – технологічний коефіцієнт, що залежить від матеріалу термістора, 1/К; T – температура термістора, К.

В даному випадку при температурі навколишнього середовища $T_{nc}=+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ напруга на термісторі становить:

$$U_t = \frac{U_{cc} \cdot R_{25} \cdot e^{B\left(\frac{1}{T+273,15} - \frac{1}{298,15}\right)}}{R_t + R_{25} \cdot e^{B\left(\frac{1}{T+273,15} - \frac{1}{298,15}\right)}}, \quad (3)$$

де U_t – напруга на термісторі, В; U_{cc} – амплітуда імпульсу розігріву, В.

Струм I_t , що проходить через термістор:

$$I_t = \frac{U_{cc}}{R_t + R_{25} \cdot e^{B\left(\frac{1}{T+273,15} - \frac{1}{298,15}\right)}}, \quad (4)$$

де I_t – струм, який проходить через термістор, А.

Потужність термістора P_t :

$$P_t = U_t \cdot I_t, \quad (5)$$

де P_t – потужність, що подається на термістор потужність термістора, Вт.

Зважаючи на те, що при різних температурах опір термістора різний в зондах № 1 та № 2, тоді при однаковій амплітуді імпульсу розігріву потужність термістора буде різною. Для вирівнювання потужності термісторів зондів № 1 та № 2 необхідно для них використовувати різні амплітуди (U_{cc}) імпульсів розігріву. Так, в даному випадку для зонду № 1 амплітуда імпульсу розігріву складає +15 В, а для зонду № 2 – +12 В. На графіках рис. 2 приведено залежність потужності термістора від температури для зондів № 1 та № 2.

Температура розігріву термістора ΔT визначається по значенню опору термістора, який залежить від його температури. В свою чергу, опір термістора визначає напругу розбалансування вимірювального мосту, в одне з плечей якого ввімкнений термістор. Якщо вимірювання напруги розбалансування вимірювального мосту здійснюється за допомогою АЦП, то дана напруга буде представлена значенням на виході АЦП, тобто двійковим кодом числа N . Визначення ж значення коефіцієнта теплопровідності за виміряним значенням N здійснюється за допомогою програмних засобів, що реалізовані на ПК.

Для визначення залежності двійкового коду числа N на виході АЦП від температури термістора для обох зондів послідовно визначимо залежність напруги на елементах структурної схеми.

Напруга в діагоналі мосту U_m :

$$U_m = U_t - \frac{U_{cc}}{2}, \quad (6)$$

де U_t – напруга на термісторі, В; U_{cc} – амплітуда імпульсу розігріву, В.

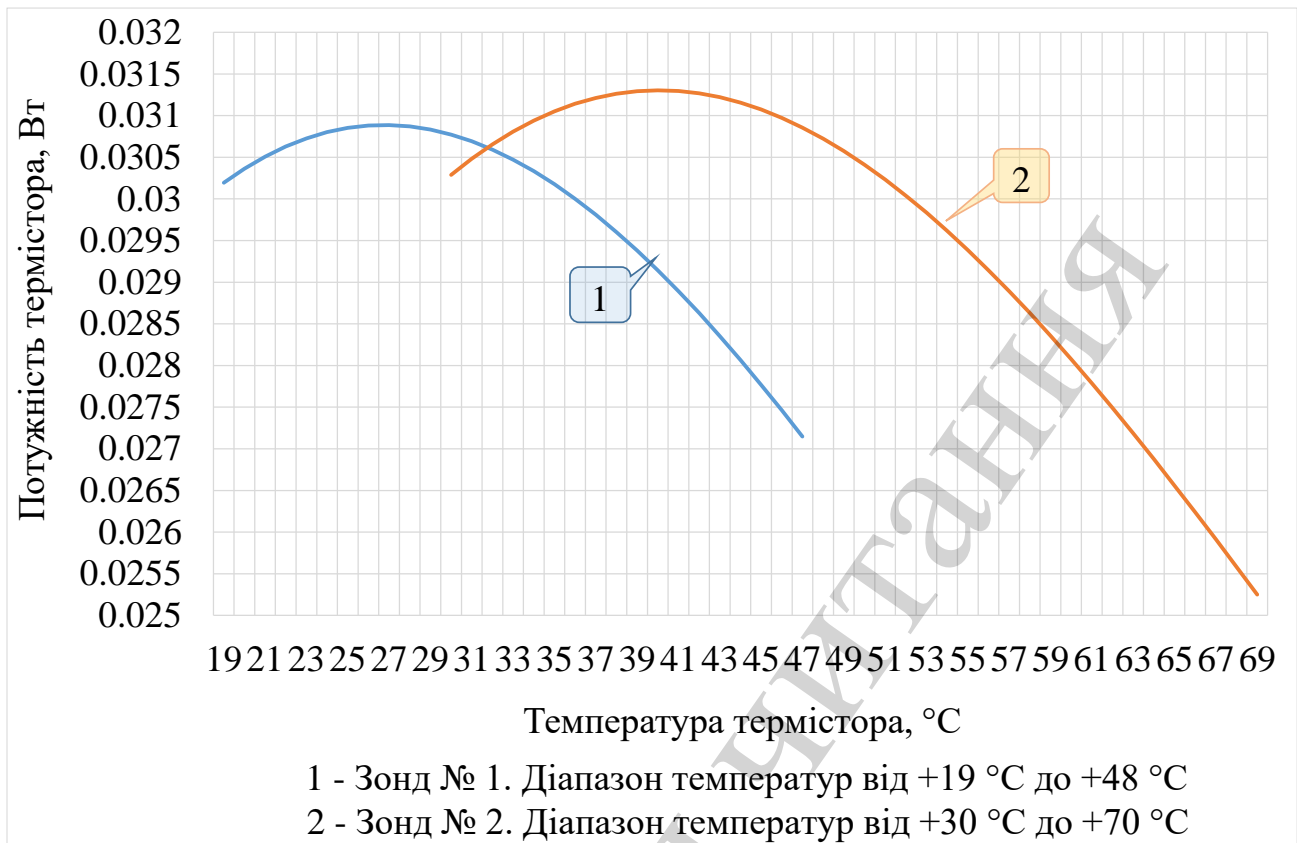


Рис. 2. Залежність потужності термістора від температури для зондів № 1 та № 2

Напруга на виході підсилювача U_a :

$$U_a = K_a \cdot U_m + U_{ref}, \quad (7)$$

де U_{ref} – опорна напруга диференційного підсилювача, В; K_a – коефіцієнт підсилення диференційного підсилювача.

Напруга на вході АЦП U_{adc} :

$$U_{adc} = \frac{U_a}{K_c}, \quad (8)$$

де K_c – коефіцієнт ділення дільника.

Тоді числове значення на виході АЦП, тобто двійковим кодом числа N , N_{adc} :

$$N_{adc} = U_{adc} \cdot \frac{N_{adc\max}}{U_{adc\max}}, \quad (9)$$

де $N_{adc\max}$ – максимальне числове значення на виході АЦП, у. о.; $U_{adc\max}$ – максимальне значення напруги на вході АЦП, В.

В даному вимірювачі використовується залежність числових значень на виході АЦП N від температури термістора в діапазоні температури від $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+48\text{ }^{\circ}\text{C}$ для мосту № 1 з $R_m=1,87\text{ кОм}$ і в діапазоні температури від $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ для мосту № 2 з $R_m=1,15\text{ кОм}$. Функції залежності числового значення на виході АЦП від температури термістора розраховані за реальними електричними характеристиками вимірювального каналу приладу і наведені на рис. 3.

Температура розігріву термістора, внаслідок проходження через нього імпульсу електричного струму, пропорційна різниці числових значень на виході АЦП в кінці імпульсу (кінцевій точці розігріву) та на його початку (початковій точці розігріву). Необхідно зауважити, що у термістора наявна оболонка із скла або епоксидної смоли, а також присутня похибка визначення опору термістора та нелінійний характер залежності опору термістора від температури. Тому є необхідність введення в розрахункову формулу (1) додаткових коефіцієнтів пропорційності, які визначаються шляхом тестування на еталонних рідинах з відомими ТФХ [21, 22].

Враховуючи нелінійний характер залежності, приведеної на рис. 3 для коригування її в лінійну, при виконанні обчислень коефіцієнта теплопровідності, введемо відповідні поправки. Тоді формула (1) для визначення коефіцієнта теплопровідності при температурі T прийме наступний вигляд:

$$\lambda_{д.р.} = \frac{P_T \cdot K_0}{4\pi r \left(\left((N_K - N_n) - (N_{(T)} - K_{ні} N_n) \cdot K_{II} \right) \cdot K_{кі} \frac{T_{ref} - T_0}{N_{ref}} - \Delta T_0 \right)}, \quad (10)$$

де $\lambda_{д.р.}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної речовини, Вт/(м·К); P_T – потужність термістора, Вт; r – радіус термістора, м; ΔT_0 – додаткова температура розігріву термістора, викликана наявністю оболонки у термістора і виміряна в результаті калібрування приладу з використанням еталонних речовин, К; K_0 – коефіцієнт пропорційності, який теж визначається в результаті калібрування вимірювача тестів з використанням еталонних речовин. Даний коефіцієнт характеризує чутливість термісторного зонда до значення коефіцієнта теплопровідності досліджуваної речовини, в якій знаходиться вимірювальний зонд; N_K – числове значення в кінцевій точці розігріву термістора, що одержана в результаті вимірювання термісторним зондом; N_n – числове значення в початковій точці розігріву термістора, що одержана в результаті вимірювання термісторним зондом; $K_{ні}$ – коефіцієнт, що корегує виміряне значення коефіцієнта теплопровідності в залежності від похибки вимірювання термісторним зондом температури досліджуваного зразка (похибки вимірювання термісторним зондом значення температури до початку нагрівання термістора); K_{II} – коефіцієнт, що корегує залежність значення виміряної термісторним зондом різниці $N_K - N_n$ від температури досліджуваного зразка; $K_{кі}$ – коефіцієнт, що визначає чутливість термісторного зонду (здійснює компенсацію похибки значення виміряної термісторним зондом різниці $N_K - N_n$ до середньостатистичного значення по всіх зондах); T_{ref} – температура термістора, яка дорівнює $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$; T_0 – температура термістора, при якій $N_{АЦП}=0$; N_{ref} – числове значення на

виході АЦП при температурі зонда $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ для зонда № 1, та при температурі зонда $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ для зонда № 2, $N_{(T)}$ – числове значення на виході АЦП при температурі зонда T (в даному випадку коефіцієнт теплопровідності визначався при температурах дослідних зразків $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$), що розраховане при умові лінійної залежності $N=f(T)$.

Значення коефіцієнтів ΔT_o , K_o , K_n , K_{Π} , K_k необхідно визначити під час досліджень індивідуально для кожного зонда в ході калібрувальних тестувань з використанням в якості досліджуваних еталонних рідин з відомими ТФВ. Ці коефіцієнти є характеристиками термісторного зонда. Також необхідно провести аналіз невизначеності значень коефіцієнтів ΔT_o , K_o , K_n , K_{Π} , K_k коефіцієнта теплопровідності еталонних рідин з відомими ТФВ, які застосовувалися при калібруванні. Це необхідно для визначення точності вимірювання коефіцієнта теплопровідності пристроєм.

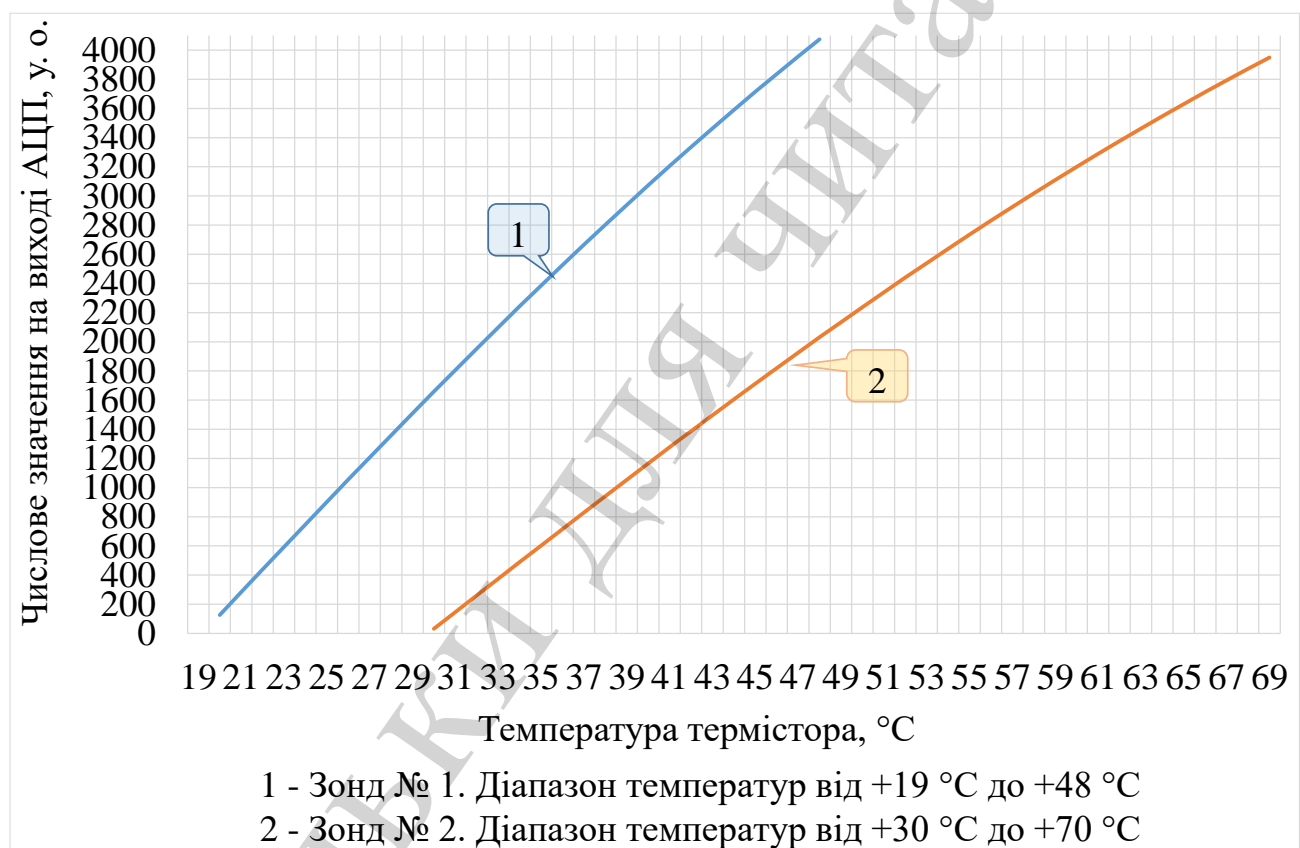


Рис. 3. Залежність числового значення на виході АЦП від температури

Розглянуто результати вимірювань коефіцієнта теплопровідності розчинів цукру, гліцерину, етилового спирту у воді, біологічних матеріалів (кров людини та плазма кров людини, молока різного ступеня жирності, білка та жовтка курячих яєць). Також проведені вимірювання коефіцієнта теплопровідності таких речовин, що відносяться до харчових продуктів (лимон, банан, апельсин).

Зважаючи на те, що для багатьох речовин коефіцієнт теплопровідності не є постійним, а залежить від температури T , вимірювання проведені при температурі $+25\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ з використанням зонда № 1 і при температурі $+40\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ з викори-

станням зонда № 2. Такі дані необхідні для об'єктивної оцінки результатів вимірювання коефіцієнта теплопровідності та створення моделі залежності теплових властивостей від температури. Залежність в інтервалах температур можна апроксимувати лінійною функцією, наприклад [23]:

$$\lambda(T) = \lambda_0 [1 + \alpha_0 (T - T_0)], \quad (11)$$

де λ_0 – значення коефіцієнта теплопровідності при температурі T_0 ; α_0 – емпірична постійна [11], що визначається шляхом порівняння вимірюваного значення коефіцієнта теплопровідності при різних температурах досліджуваних зразків; T – температура середовища.

Запропонована математична залежність значення коефіцієнта теплопровідності від вимірюваної температури розігріву термістора, на відміну від існуючих, враховує умови розповсюдження теплової енергії від чутливого елемента при вимірюванні температури досліджуваного зразка, зміну потужності термістора в процесі його нагрівання і чутливість термісторного зонду до значення теплопровідності досліджуваної речовини.

4. 3. Конструктивні особливості розробленого вимірювача для визначення ТФВ речовин

Вимірювання коефіцієнта теплопровідності проводилися за допомогою системи, зовнішній вигляд якої показаний на рис. 4, а конструкція зонду – на рис. 5. Термістори закріплюється на кінці конусоподібних вимірювальних зондів.

Для вимірювання рідин зондом № 1 в діапазоні температури розігріву термістора від +18 °С до +48 °С для стабілізації температури під час сеансу вимірювання досліджуваним матеріалом заповнювалась пробірка діаметром 8 мм в обсязі 350–450 мкл і розміщувалась в контейнері при температурі +25±2 °С. Зовнішній вигляд контейнера зображений на рис. 6 .

Для вимірювання теплопровідності харчових продуктів в якості досліджуваних речовин було використано банан, лимон, апельсин з використанням зонду № 1. В діапазоні температури розігріву термістора від +18 °С до +48 °С в матеріалі попередньо відповідного діаметра створювався отвір, а потім в цей отвір встановлюється зонд. На рис. 7, а–г приведено приклади розташування зонду.

Для вимірювання рідких матеріалів зондом № 2 в діапазоні температури розігріву термістора від +30 °С до +70 °С досліджуваним матеріалом за допомогою дозатора (рис. 6, б) заповнювалась пробірка діаметром 8 мм в обсязі 350–450 мкл і розміщувалась в картриджі, а сам картридж був встановлений в термостат. В термостаті (рис. 6, а) здійснювалося нагрівання дослідних зразків до температури +40±2 °С для стабілізації температури під час сеансу вимірювання.

Перед вимірюванням проводиться процедура калібрування вимірювача з використанням еталонних рідин з відомими коефіцієнтами теплопровідності. Установка має два вимірювальні зонди, вимірювальний блок і додатково термостат (рис. 6). Обробка результатів вимірювань здійснюється за допомогою ПК, підключеного до розробленого вимірювального пристрою. Для проведення сеансу ви-

мірювання оператор занурює в досліджуваний зразок вимірювальні зонди, після чого запускає процедуру вимірювання на ПК за допомогою відповідного програмного забезпечення.

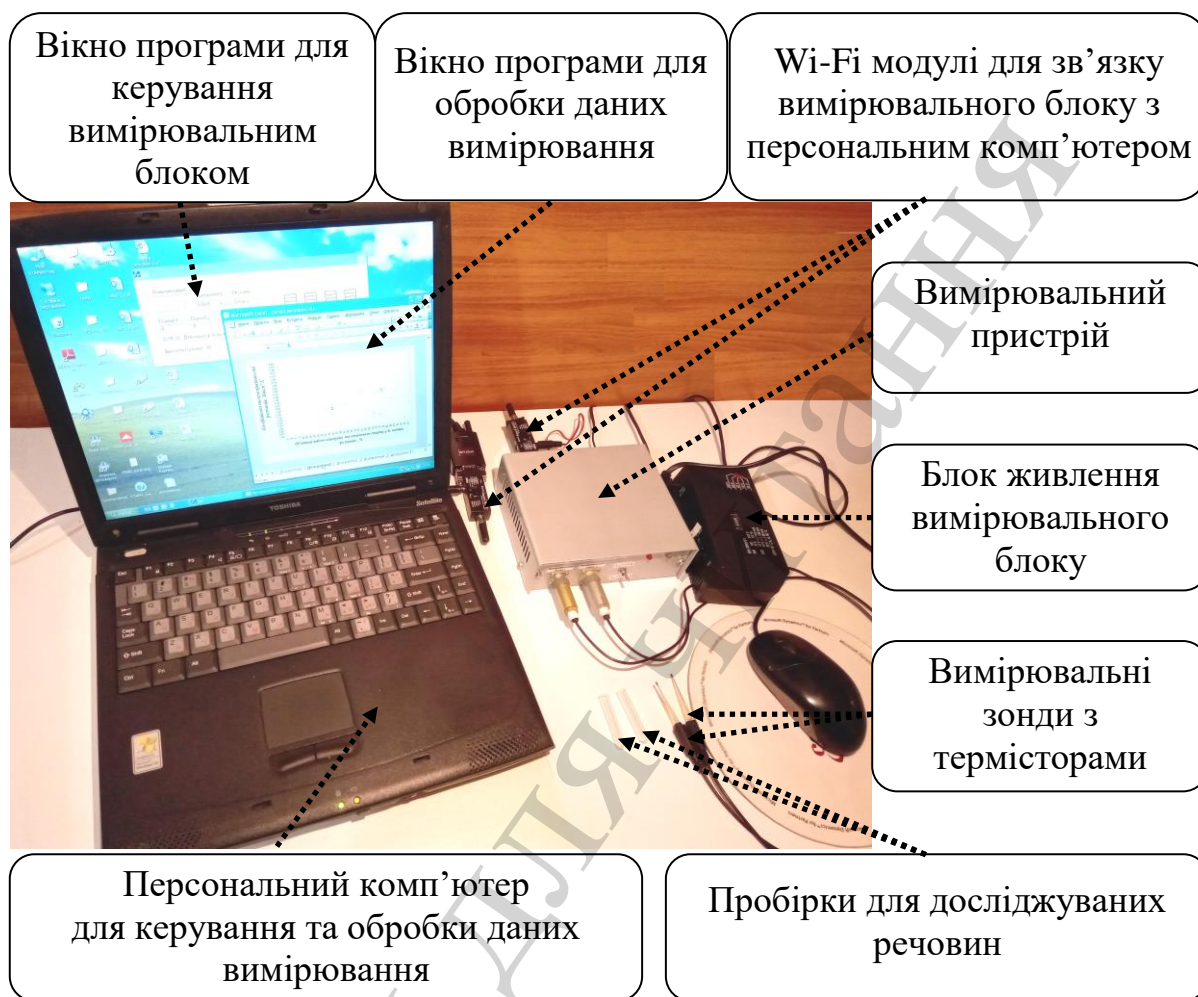


Рис. 4. Зовнішній вигляд системи для вимірювання теплопровідності речовин



Рис. 5. Конструкція вимірювального зонду приладу.

На початку і в кінці розігріву значення на виході АЦП записуються в пам'ять мікроконтролера вимірювального пристрою, а потім передаються до зовнішнього ПК, де формується файл даних вимірювання. По цим даним вимі-

рювання визначається температура саморозігріву термістора. Тривалість нагрівання термістора має бути більшою, ніж постійна часу термістора. В даному випадку для термістора типу RH15 постійна часу складає 6 с. і тому тривалість нагрівання має складати більше 6 с. Тривалість паузи між імпульсами для ефективного охолодження термістора має перевищувати тривалість імпульсу розігріву більше ніж в 4–5 разів.

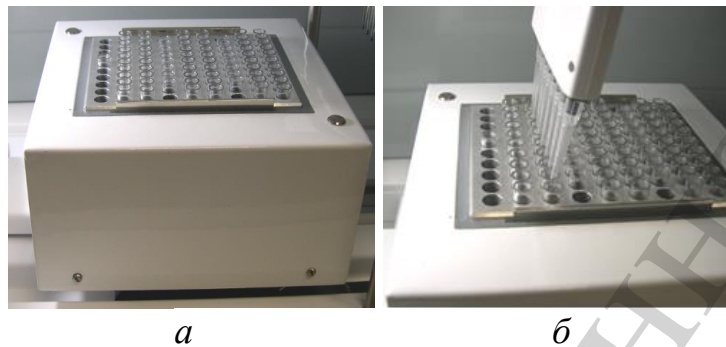


Рис. 6. Термостат розробленого пристрою: *a* – термостат з контейнером, *б* – заповнення пробірки досліджуваною рідиною за допомогою багатоканального дозатора

Обчислення коефіцієнта теплопровідності, яке проводиться шляхом вимірювання температури розігріву термістора, що має тепловий контакт з досліджуваним матеріалом, здійснюється за формулою (10).

Запропонована конструкція вимірювача для визначення ТФВ речовин, в порівнянні з існуючими, дозволяє спростити конструкцію пристрою, знижує вимоги до умов підготовки експерименту, що, в свою чергу, зменшує час досліджень. При цьому, процес градування термісторних зондів також спрощується, оскільки запропонована математична залежність значення коефіцієнта теплопровідності від вимірної температури розігріву термістора враховує похибку вимірювання термісторами температури. Також слід зазначити, що вказаний вимірювач дозволяє вимірювати ТФВ речовин у невеликих розмірах, до 0,2 мкл, що значно розширює застосування методу прямого підігріву термістора для різних галузей.

5. Результати досліджень з визначення теплопровідності розчинів, біологічних матеріалів та харчових продуктів

Перед проведенням досліджень для визначення значень коефіцієнтів ΔT_o , K_o , K_{ni} , K_{Pi} , K_{ki} для кожного з зондів (i – номер зонду) було проведення калібрування вимірювального пристрою, яке полягало в визначенні шляхом контрольних вимірювань температури розігріву термісторів в еталонних рідинах з відомими ТФВ. В якості еталонних рідин використовувалися дистильована вода, 85 % розчин гліцерину в очищеній воді та 96 % розчин етилового спирту в воді. Методика визначення значень коефіцієнтів ΔT_o , K_o , K_{ni} , K_{Pi} , K_{ki} приведена в роботі [7].

Для перевірки похибки визначення коефіцієнтів пропорційності та визначення коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин вимірювального пристрою проведено контрольне дослідження теплопровідності еталонних рідин:

- дистильованої води;
- 85 % розчину гліцерину в очищеній воді (Розчин нашкірний 85 %, медичний);
- етилового спирту медичного марки 96-Екстра (96 % розчин етилового спирту в воді).

Результати досліджень приведені в табл. 1.

Ці і подальші вимірювання теплопровідності досліджуваних матеріалів проводилися сеансами по 10 хв. (кількість сеансів – 10) дослідних зразків при досягненні температури досліджуваних зразків +25 °С (для зонда № 1) та +40 °С (для зонда № 2).

Розрахунок значень коефіцієнтів теплопровідності при даних температурах здійснювався по формулі (10) за даними вимірювання і відповідно значенням $N_{(T)}$ при температурах зонда $T +25$ °С та +40 °С, які розраховані з умови лінійної залежності числового значення на виході АЦП (N) від температури (T).

Для перевірки адекватності розробленої математичної залежності при визначенні коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин використано результати сукупності вимірювань, а результати приведено в табл. 1. Встановлено, що за критерієм Фішера отримана залежність є адекватною з довірчою ймовірністю 0,95. Розрахункова величина критерію F_p , що становить 1,12261825, не перевищує табличного (критичного) значення $F_{\text{табл}}$, яке дорівнює 1,8307 при рівні значущості $\alpha=0,05$ та кількості ступенів свободи $f_1=10$ та $f_2=990$.

Таблиця 1

Результати дослідження теплопровідності еталонних рідин

Досліджувана речовина	Температура, °С	Коефіцієнт теплопровідності				
		Математичне очікування, Вт/(м·К)	Середньоквадратичне відхилення, σ , Вт/(м·К)	Відносна похибка, %	Довідникові дані, Вт/(м·К)	Дані інших дослідників *
Дистильована вода	+25 °С	0,611	0,006	1,57	0,609	[24]
	+40 °С	0,629	0,007	1,11	0,628	[24]
85 % розчин гліцерину в воді	+25 °С	0,332	0,005	1,92	0,33	[24]
	+40 °С	0,337	0,005	1,65	0,336	[24]
Етиловий спирт медичний (96 % розчин етилового спирту в воді)	+25 °С	0,180	0,003	1,87	0,178	[24,25]
	+40 °С	0,174	0,003	1,80	0,175	[24,25]

Примітка: * – в стовпчику «Джерело інформації» табл. 1 наведені виміряні значення коефіцієнта теплопровідності речовин, розчинів, що приведені в довідниках. В квадратних дужках приведено посилання на джерело інформації, а в круглих дужках – значення температури зразка, при якій надано значення.

Як відомо, речовини можуть змінювати свої властивості в часі та при зміні їх температури, тому дослідження їх характеристик треба проводити з врахуванням цих обставин.

Виміряні значення теплопровідності, похибка вимірювання та емпіричний коефіцієнт залежності теплопровідності від температури наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати вимірювання теплопровідності розчинів, біологічних речовин та деяких харчових продуктів.

Біологічний матеріал	Зо-нд №	Виміряні дані			Дані інших дослідників*
		Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К (температура, °С)	Відносна похибка, %	Емпірична постійна α_0 , 1/°С	
20 % Розчин цукру	1	0,540 (+25 °С)	2,4	0,00125	0,535(20 °С) [25] 0,56(40 °С) [25]
	2	0,564 (+40 °С)	2,2		
40 % Розчин цукру	1	0,475 (+25 °С)	2,3	0,0011	0,47(20 °С) [25] 0,492(40 °С) [25]
	2	0,495 (+40 °С)	2,1		
60 % Розчин цукру	1	0,407 (+25 °С)	2,5	0,0007	0,405(20 °С) [25] 0,419(40 °С) [25]
	2	0,422 (+40 °С)	2,3		
20 % Розчин етилового спирту	1	0,477 (+25 °С)	1,8	0,00095	0,471(20 °С) [24] 0,49(40 °С) [24]
	2	0,495 (+40 °С)	1,7		
40 % Розчин етилового спирту	1	0,368 (+25 °С)	1,6	0,00045	0,364(20 °С) [24] 0,373(40 °С) [24]
	2	0,371 (+40 °С)	2,0		
60 % Розчин етилового спирту	1	0,277 (+25 °С)	2,3	0,00015	0,276(20 °С) [24] 0,279(40 °С) [24]
	2	0,276 (+40 °С)	2,2		
80 % Розчин етилового спирту	1	0,210 (+25 °С)	2,3	-0,00015	0,212(20 °С) [24] 0,209(40 °С) [24]
	2	0,205 (+40 °С)	2,1		
Етиловий спирт	1	0,166 (+25 °С)	2,1	-0,00025	0,167(20 °С) [24] 0,162(40 °С) [24]
	2	0,164 (+40 °С)	2,2		
20 % Розчин гліцерину	1	0,527 (+25 °С)	1,8	0,00125	0,522(20 °С) [24] 0,547(40 °С) [24]
	2	0,545 (+40 °С)	1,7		
40 % Розчин гліцерину	1	0,452 (+25 °С)	1,9	0,00095	0,452(20 °С) [24] 0,471(40 °С) [24]
	2	0,474 (+40 °С)	1,7		
60 % Розчин гліцерину	1	0,390 (+25 °С)	1,8	0,0006	0,387(20 °С) [24] 0,399(40 °С) [24]
	2	0,397 (+40 °С)	1,9		
80 % Розчин гліцерину	1	0,332 (+25 °С)	2,1	0,0003	0,33(20 °С) [24] 0,336(40 °С) [24]
	2	0,334 (+40 °С)	2,0		
Молоко коров'яче 1,0 %	1	0,542 (+25 °С)	1,9	0,0008	0,544(27 °С) [26]
	2	0,577 (+40 °С)	1,6		

Молоко коров'яче 2,5 %	1	0,558 (+25 °C)	1,95	0,0006	0.554(20 °C) ±7,9 % [26] 0.612(80 °C) ±7,9 % [26] [28]
	2	0,561 (+40 °C)	1,7		
Молоко коров'яче 3,2 %	1	0,547 (+25 °C)	1,96	0,0009	0,56(+40 °C) [21]
	2	0,565 (+40 °C)	1,7		
Яйце курине (жовток)	1	0,338 (+25 °C)	2,6	0,0006	0.357(7,8 °C) [28] 0.337 (19,4 °C) [28] 0.383 (31,3 °C) [28] 0.34
	2	0,349 (+40 °C)	2,4		
Яйце курине (білок)	1	0,577 (+25 °C)	2,5	-0,0005	0.5(7,8 °C) [28] 0.583 (19,4 °C) [28] 0.577 (31,3 °C) [28] 0.56
	2	0,567 (+40 °C)	2,2		
Кров (цільна)	2	0,494 (+40 °C)	2,7	–	0.506 (38.1°C) [29]
Кров (плазма)	2	0,567 (+40 °C)	2,6	–	0.581(36.4°C) [29]
Яблуко червоне	1	0.51 (+25 °C)	3,0	–	0.46 (23 °C) [30]
Яблуко зелене	1	0.418 (+25 °C)	2,9	–	0.43 (27 °C) [30]
Апельсин	1	0.576 (+25 °C)	2,6	–	0.588 (28 °C) [31]
Лимон	1	0.521 (+25 °C)	2,7	–	0.592 (28 °C) [31]
Банан	1	0.424 (+25 °C)	2,9	–	0.498 (27 °C) [31]

*Примітки: * – в стовпчику «Дані публікацій» табл. 2 наведені виміряні значення коефіцієнта теплопровідності речовин, розчинів, сумішей, деяких харчових продуктів, біологічних матеріалів проведені іншими дослідниками. В квадратних дужках приведено посилання на джерело інформації, а в круглих дужках – значення температури зразка, при якій проводилися вимірювання.*

Вимірювання коефіцієнта теплопровідності біологічних матеріалів були проведені з метою досліджень їх властивостей та створення підґрунтя для подальшої розробки методики проведення різноманітних досліджень в області медицини. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності деяких харчових продуктів були проведені з метою досліджень їх властивостей та оцінки можливості застосування методу для досліджень ТФВ харчових продуктів.

З метою встановлення невизначеності вимірювання коефіцієнта теплопровідності проведено 10 вимірювань сеансами по 10 хв. для дослідних зразків речовин, розчинів, сумішей, деяких харчових продуктів, біологічних матеріалів.

Середнє арифметичне значення (математичне очікування) коефіцієнта теплопровідності $\bar{\lambda}_{d.p.}$ кожного дослідного зразка визначено за формулою:

$$\bar{\lambda}_{d.p.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{d.p.i}, \quad (12)$$

де $\lambda_{d.p.i}$ – результат i -го вимірювання, Вт/(м·К); n – кількість повторень вимірювань кожної із M досліджуваних речовин.

Результати обчислень внесені надано в табл. 1.

Визначено сумарну стандартну похибку за формулою:

$$\Delta\lambda_{d.p.} = \sqrt{\Delta\lambda_{d.p.вип.}^2 + \Delta\lambda_{d.p.сист.}^2}, \quad (13)$$

де $\Delta\lambda_{d.p.вип.}$ – оцінка випадкової похибки результату вимірювання і при значенні довірчої ймовірності $p=0,95$; $\Delta\lambda_{d.p.сист.}$ – систематична похибка (різниця значення величини, отриманої в результаті вимірювання (середнє значення всіх вимірювань в серії) і еталонного значення – табличного значення, взятого з довідників.

Тоді для рівня значущості α , що відповідає довірчій ймовірності $p=1-\alpha$, результат вимірювань відрізняється від істинного на величину, яка не перевищує $\Delta\lambda_{d.p.}$. Таким чином можна визначити інтервал значень вимірюваної величини $[\bar{\lambda}_{d.p.} - \Delta\lambda_{d.p.}, \bar{\lambda}_{d.p.} + \Delta\lambda_{d.p.}]$, що є довірчим інтервалом.

Напівширину довірчого інтервалу визначають як

$$\Delta\lambda_{d.p.вип.} = t_{\alpha,n} S, \quad (14)$$

де $t_{\alpha,n}$ – табличне значення коефіцієнта Стюдента, що взятий з рівнем значущості α при кількості степенів свободи n ; S – середня квадратична похибка середнього арифметичного

За визначеними середнім арифметичним значенням та значенням сумарної стандартної похибки визначено відносну похибку обчислень як:

$$\delta = \frac{\Delta\lambda_{d.p.}}{\bar{\lambda}_{d.p.}} 100 \%, \quad (15)$$

де δ – відносна похибка вимірювання, %; $\Delta\lambda_{d.p.}$ – сумарна стандартна невизначеність, що включає випадкову і систематичну складову, Вт/(м·К); $\bar{\lambda}_{d.p.}$ – середнє арифметичне значення коефіцієнта теплопровідності дослідних зразків, Вт/(м·К).

Результати обчислень внесені надано в табл. 1, 2.

6. Обговорення результатів досліджень з визначення теплофізичних властивостей речовин та оцінки факторів, що впливають на проведення вимірювань

Вимірювання теплопровідності плазми крові здійснювалося після відділення сепаратором рідкої частини від формених елементів. Ця процедура реалізована за допомогою центрифугування цільної крові.

При дослідженні теплопровідності білка та жовтка курячих яєць виявлено, що при підвищенні температури від +25 °С до +40 °С теплопровідність білка падає, а теплопровідність жовтка зростає. Розміщення вимірювального зонда при дослідженні теплопровідності в пробірках з зразками білка та жовтка показано на рис. 7, а.

При дослідженні теплопровідності молока з різним ступенем жирності виявлено, що з ростом вмісту жирів теплопровідність молока падає. Розміщення вимірювального зонда в пробірці з зразком молока показано на рис. 7, б.

При цьому також здійснювались дослідження з визначення теплопровідності таких фруктів, як лимон та банан (рис. 7, в, г).

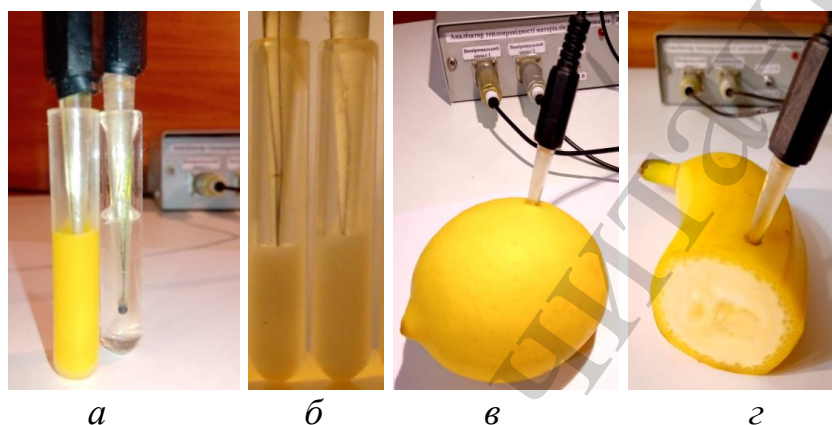


Рис. 7. Дослідження теплопровідності: а – білка та жовтка курячих яєць; б – молока; в – citrusових; г – фруктів (банан)

Для порівняння, в табл. 2 наведено дані вимірювання, які наявні в публікаціях. Експериментальна похибка вимірювання коефіцієнта теплопровідності для більшості речовин методом прямого підігріву термістора не перевищувала 3 %, що підтверджено даними вимірювань приведеними в табл. 1, 2. Похибка вимірювання коефіцієнта теплопровідності еталонних рідин не перевищувала 2 %, а похибка вимірювання коефіцієнта теплопровідності фруктів та овочів знаходиться в діапазоні від 2 % до 4 % %, що підтверджено даними вимірювань, приведеними в табл. 1, 2.

Невеликі розміри вимірювальних зондів дозволяють здійснювати вимірювання коефіцієнта теплопровідності рідин об'ємом до 200 мкл і визначення коефіцієнта теплопровідності зразків фруктів і овочів невеликих розмірів, таких як полуниці або вишні. В ході досліджень встановлено, що на результати вимірювання теплопровідності фруктів та овочів впливає їх вологість, тому при таких дослідженнях можна отримати принаймні приблизні оцінки величини теплопровідності з урахуванням вмісту води в матеріалі. Експериментально встановлено, що вологість фруктів та овочів, а також їх температура, найбільше впливають на значення теплопровідності.

При вимірюванні коефіцієнта теплопровідності розчинів впливає похибка дозування складових компонентів при підготованні розчинів та сумішей при їх підготовці до досліджень.

В деяких розчинах може з часом відбуватися осідання більш важких ферментів, що приводить до розшарування суміші і як наслідок до спотворення результатів вимірювання. В таких випадках необхідно обмежити час підготування суміші до дослідження та тривалість процедури вимірювання. Більшість з таких сумішей є біологічні рідини, наприклад, кров людини або тварини.

Вимірювання коефіцієнта теплопровідності багатокомпонентних речовин вміст кожного компонента слід визначати шляхом введення в розчин додаткових речовин, які при взаємодії з відповідним компонентом змінюють ТФВ суміші. Прикладом такого дослідження є визначення наявності та ступеню імунологічної реакції [5, 7] коли до біологічної рідини (крові людини або плазми крові людини) додається рідкий алерген, який при наявності імунологічної реакції змінює коефіцієнт теплопровідності біологічної рідини.

Проведені дослідження теплопровідності фізіологічних речовин та харчових продуктів підтверджують, що для більшості досліджених зразків з підвищенням температури коефіцієнт теплопровідності λ збільшується. Винятком є 80 % і 96 % розчин етилового спирту у воді та білок курячого яйця (табл. 2), в яких з підвищенням температури коефіцієнт теплопровідності λ зменшується (емпірична постійна (\square_0) від'ємна).

З одержаних в результаті досліджень даних вимірювання теплопровідності розчинів можна зробити висновок, що за виміряним коефіцієнтом теплопровідності можна встановити вміст розчиненої речовини. Встановлено, що точність, з якою може бути визначено об'ємний вміст, залежить від різниці коефіцієнтів теплопровідності компонентів. Для дотримання необхідної точності при вимірюваннях необхідно в залежності від значень різниці коефіцієнтів теплопровідності компонентів вибрати алгоритм досліджень [21].

Проведені дослідження підтверджують ефективність використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання коефіцієнта теплопровідності різноманітних речовин – сумішей в різних діапазонах температур, а також можливість визначення за виміряним коефіцієнтом теплопровідності вмісту розчиненої речовини. Так, завдяки невеликим розмірам термісторних зондів (рис. 5) даним методом можна проводити вимірювання досліджуваних речовин в малих об'ємах (рис. 7, а, б). Процедура вимірювання може складати декілька хвилин, оскільки постійна часу термістора невеликих розмірів складає кілька секунд. Просте схематичне рішення пристрою, за допомогою якого проводиться визначення коефіцієнта теплопровідності методом прямого підігріву термістора (рис. 1), дозволяє використовувати запропонований метод для одночасного вимірювання кількох досліджуваних зразків, що значно зменшує час проведення досліджень. Це є перевагою даного дослідження в порівнянні з аналогічними.

З аналізу приведеної математичної залежності визначення величини теплопровідності речовин на основі отриманих даних температури розігріву термістора (10) видно, що для досягнення точності вимірювання менше 3 % в різних діапазонах температур необхідно забезпечити однакову потужність термістора (рис. 2). Така необхідність пояснюється нелінійною залежністю опору термістора від його температури.

При подальших застосуваннях методу на практиці і в подальших теоретичних надбаннях необхідно обов'язково враховувати характеристики термістора і для кожного конкретного випадку мають бути застосовані термістори з відповідними характеристиками в відповідних режимах роботи.

Так, при вимірюваннях в широкому діапазоні температур необхідно змінювати значення амплітуди імпульсу розігріву термістора та застосовувати різні модифікації термісторів. Наприклад, для вимірювання при температурі більше 100 °C необхідно застосовувати термістори, вкриті оболонкою зі скла.

При подальших дослідженнях інших речовин, сумішей, біологічних та харчових матеріалів мають бути враховані не тільки вказані проблеми, а й властивості самих досліджуваних матеріалів, особливо, коли вони змінюються з часом, або під впливом зовнішніх факторів.

7. Висновки

1. Одержані дані в результаті досліджень співпадають (похибка відхилення не перевищує 2,7 %) з опублікованими в літературі даними, а відносна похибка визначення значення коефіцієнта теплопровідності за даними вимірювань загалом не перевищувала 3 %. Результати досліджень підтверджують можливість використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання коефіцієнта теплопровідності різноманітних речовин.

2. Простота вимірювального зонду та конструкції вимірювача дозволяють створювати прості засоби вимірювання для одночасного визначення кількох досліджуваних зразків, що суттєво зменшує час досліджень і, таким чином, підвищують продуктивність вимірювань.

3. Запропонована математична залежність, що описує процес визначення ТФВ речовин, заснований на тому, що для визначення значення коефіцієнта теплопровідності методом прямого підігріву термістора достатньо виміряти безпосередньо температуру розігріву термістора в досліджуваній речовині. При цьому враховується нелінійний характер отриманої залежності розігріву термістора, а при виконанні обчислень коефіцієнта теплопровідності введено відповідні поправки.

4. Здійснені вимірювання коефіцієнта теплопровідності розчинів цукру, гліцерину та етилового спирту у воді підтверджують можливість застосування теплового контролю з використанням методу прямого підігріву термістора для визначення складу різних сумішей. Умовою для застосування цього методу є відмінність значень коефіцієнтів теплопровідності складових компонентів розчину. Різниця значень коефіцієнтів теплопровідності складових компонентів розчину буде визначати похибку при обчисленні вмісту досліджуваної складової компоненти в суміші (розчині). При дослідженні багатоконпонентних речовин вміст кожного компонента слід визначати шляхом введення в розчин додаткових речовин, які при взаємодії з відповідним компонентом змінюють ТФХ суміші.

Література

1. Guimarães, A. O., Machado, F. A. L., da Silva, E. C., Mansanares, A. M. (2012). Thermal Effusivity and Thermal Conductivity of Biodiesel/Diesel and

Alcohol/Water Mixtures. *International Journal of Thermophysics*, 33 (10-11), 1842–1847. doi: <https://doi.org/10.1007/s10765-012-1280-3>

2. Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E., Grulke, E. A. (2001). Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Applied Physics Letters*, 79 (14), 2252–2254. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1408272>

3. An, E.-J., Park, S.-S., Chun, W.-G., Park, Y.-C., Jeon, Y.-H., Kim, N.-J. (2012). A Comparative Study on the Thermal Conductivities and Viscosities of the Pure Water and Ethanol Carbon Nanofluids. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 32 (spc3), 213–219. doi: <https://doi.org/10.7836/kses.2012.32.spc3.213>

4. Brionizio, J. D., Orlando, A. de F., Bonnier, G. (2017). Characterization of a spherical heat source for measuring thermal conductivity and water content of ethanol and water mixtures. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8, 18. doi: <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2017007>

5. Мартинчук, О. А., Матвієнко, С. М., Вислоух, С. П. (2016). Пат. № 113044 UA. Пристрій та спосіб реєстрації теплових процесів у біологічних пробах. № а201603519; заявл. 04.04.2016; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.

6. Kravchenko, A. Y., Tereshchenko, M. F., Vysloukh, S. P., Tymchik, G. S. (2019). Modeling of the temperature field on the working surface of an ultrasonic emitter. *KPI Science News*, 2, 83–90. doi: <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.2.167537>

7. Matvienko, S., Vysloukh, S., Martynchuk, O. (2016). Increasing accuracy of measuring thermal conductivity of liquids by using the direct heating thermistor method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (5 (82)), 20–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75459>

8. Van Gelder, M. F. (1998). A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures. Blacksburg, Virginia, 160.

9. Акуленко, Д. В., Агапов, А. Н., Проценко, И. Г. (2012). Измерение коэффициента теплопроводности среды с использованием термистора прямого подогрева. *Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития: сборник научных статей молодых ученых, аспирантов и студентов ФГБОУ ВПО "ТГТУ"*, III, 49–52.

10. Atkins, R. T., Wright, E. A. (1990). Thermistor-based thermal conductivity measurement system. U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Special Report 90-24.

11. Atkins, R. T. (1985). Pat. No. 04522512 USA. Thermal conductivity measurement method.

12. Kharalkar, N. M., Hayes, L. J., Valvano, J. W. (2008). Pulse-power integrated-decay technique for the measurement of thermal conductivity. *Measurement Science and Technology*, 19 (7), 075104. doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/7/075104>

13. Kharalkar, N. M., Valvano, J. W. (2006). Finite element analysis and experimental verification of multilayered tissue characterization using the thermal technique. 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. doi: <https://doi.org/10.1109/iembs.2006.259836>

14. Матвієнко, С. М., Філіппова, М. В., Мартинчук, О. А. (2015). Дослідження теплопровідності матеріалів за допомогою методу імпульсної термістOMETрії. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, 6 (1), 106–111.
15. Матвієнко, С. М., Вислоух, С. П. (2016). Підвищення точності вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора. Наукові вісті НТУУ “КПІ”, 6, 85–93. doi: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2016.6.83382>
16. Дивин, А. Г., Пономарев, С. В. (2014). Методы и средства измерения состава и свойств веществ. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 104.
17. Шашков, А. Г., Василенко, В. Б., Золотухина, А. Ф. (2007). Фактор термодиффузии газовых смесей: методы определения. Минск: Белорусская наука, 238.
18. Тимчик, Г. С., Вислоух, С. П., Матвієнко, С. М. (2018). Контроль складу речовин за допомогою "методу теплопровідності". Перспективні технології та прилади, 12, 157–164.
19. Matvienko, S., Vysloukh, S., Matvienko, A., Martynchyk, A. (2016) Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method. International Journal of Engineering Research & Science (IJOER), 2 (5), 250–258.
20. NTS Thermistors. General Technical Information, EPCOS AG 2018. Reproduction, publication and dissemination of this brochure and the information contained therein without EPCOS' prior express consent is prohibited. URL: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/531116/19643b7ea798d7c4670141a88cd993f9/pdf-general-technical-information.pdf>
21. Tymchik, G., Vysloukh, S., Tereshchenko, N., Matvienko, S. (2018). Investigation Thermal Conductivity of Biological Materials by Direct Heating Thermistor Method. 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). doi: <https://doi.org/10.1109/elnano.2018.8477460>
22. Коротких, А. Г. (2011). Теплопроводность материалов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 97.
23. Варгафтик, Н. Б., Филиппов, Л. П., Тарзиманов, А. А., Гоцкий, Е. Е. (1990). Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 352.
24. Ewetumo, T., Festus, B., Adedayo, K. (2017). Development of an Instrument for Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Tropical Fruit Juice. American Journal of Scientific and Industrial Research, 8 (2), 22–33.
25. Гинзбург, А. С., Громов, М. А., Красовская, Г. И. (1980). Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Москва, 288.
26. Zhang, H., He, L., Cheng, S., Zhai, Z., Gao, D. (2003). A dual-thermistor probe for absolute measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity by the heat pulse method. Measurement Science and Technology, 14 (8), 1396–1401. doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/8/327>

27. Gustavsson, M., Gustafsson, S. E. (2006). Thermal conductivity as an indicator of fat content in milk. *Thermochimica Acta*, 442 (1-2), 1–5. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.11.037>
28. Fontana, A. J., Varith, J., Ikediala, J., Reyes, J., Wacker, B. (1999). Thermal properties of selected foods using a dual needle heat-pulse sensor.
29. Giering, K., Minet, O., Lamprecht, I., Müller, G. (1995). Review of thermal properties of biological tissues. *SPIE PM 25*, 45–65
30. Fontana, A., Varith, J., Ikediala, J., Reyes, J., Wacker, B. (1999). Thermal properties of selected foods using a dual needle heat-pulse sensor.
31. Ikegwu, O. J., Ekwu, F. C. (2009). Thermal and Physical Properties of Some Tropical Fruits and Their Juices in Nigeria. *Journal of Food Technology*, 7 (2), 38–42.
32. Popiel, P., Tymchik, G., Skytsiouk, V., Klotchko, T., Begaliyeva, K. (2018). The active surface of the sensor at a contact to the technological object. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2501639>

Не є перевиданням