УДК 53.08:536.2-536.6

METHOD OF JOINT DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF MATERIALS AND METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE THERMOMETRIC DEVICE

O. Mazurenko, L. Kharchenko, D. Kolomiyets, O. Mazurenko
National University of Food Technologies

Key words:
Thermoelectric converters
Thermophysical and metrological Characteristics
Accuracy of measurement

Article history:
Received 06.03.2019
Received in revised form 27.03.2019
Accepted 09.04.2019

Corresponding author:
O. Mazurenko
E-mail:
npnuht@ukr.net

ABSTRACT

A method of measurement is developed according to which the TPC of the test material and the metrological characteristics (MC) of the thermophysical device were determined by the results of experiments with the same material, which, in other words, is simultaneously an experimental and reference material.

It was established that regardless of the type of thermal regime (stationary, transitional, regular or any other), as well as the structure of the device, all methods of complex thermometric determination of TPC of materials are reduced to obtaining systems equations composed of equations that take into account the thermal Rx and capacitive Px ballast supports of a sample of a material. To determine these impediments and further calculate λh and (cρ) x of the test material, it is necessary to pre-determine the MC of the TM device, namely: ballast thermal Rb and capacitive Pb resistances, as well as working coefficients of thermoelectric converters of temperature (PT) of Kt and heat flow (PTP) Kq, of TM device.

The most common and, at the same time, one of the easiest ways to implement in determining the MC of TM devices is the way in which the characteristics of the device are determined by the results of experiments with reference materials, and the use of reference material is a major disadvantage of this method. Since according to the results of experiments with reference materials it is impossible to simultaneously determine the working coefficients of PTP and PT of TM devices, we introduced the concept of "generalizing" working coefficient of thermoelectric converters Ke of TM device, which made it possible, using analytical and graphic methods, to develop a fundamentally new method for the complex determination of TPC of material, according to which the TPC of material and the TM device are determined simultaneously by the results of the experiment with the samples of the test material.

The ability to simultaneously obtain information about the values of TPC of material and TM device can improve the accuracy of the study of temperature dependencies of material characteristics by taking into account the possible change in the characteristics of the device and sample from the temperature.

DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-2-17

СПОСІБ СПІЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ І МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМЕТРИЧНОГО ПРИЛАДУ

О.О. Мазуренко, Л.Л. Харченко, Д.П. Коломієць, О.Г. Мазуренко
Національний університет харчових технологій

У статті розроблено спосіб вимірювання, за яким ТФХ дослідного матеріалу і метрологічні характеристики (МХ) ТФХ-приладу визначаються за результатами експериментів з цим же матеріалом, який, інакше кажучи, одночасно є дослідним і еталонним матеріалом.

Встановлено, що незалежно від виду теплового режиму (стаціонарний, перехідний, регулярний або будь-який інший), а також будови приладу, всі способи комплексного теплометричного визначення ТФХ матеріалів зводяться до отримання систем рівнянь, складених з рівнянь, що враховують термічний R_x та ємнісний P_x баластні опори зразка матеріалу. Для визначення цих опорів та подальшого розрахунку λ_x і $(c\rho)_x$ дослідного матеріалу потрібно попередньо визначати МХ ТФХ-приладу, а саме: баластні термічний R_b і ємнісний опори P_b, а також робочі коефіцієнти термоелектричних перетворювачів температури (ПТ) K_t і теплового потоку (ПТП) K_q, ТФХ-приладу.

Найбільш поширеним і, одночасно, одним з найпростіших у реалізації для визначення МХ ТФХ-приладів є спосіб, де характеристики приладу визначаються за результатами дослідів з еталонними матеріалами, причому саме використання еталонного матеріалу є основним недоліком цього способу. Оскільки за результатами дослідів з еталонними матеріалами неможливо одночасно визначати робочі коефіцієнти ПТП і ПТ ТФХ-приладу, введено поняття узагальнюючого робочого коефіцієнту термоелектричних перетворювачів K_e ТФХ-приладу, що дало можливість, використовуючи аналітично-графічні методи, розробити принципово новий спосіб комплексного визначення ТФХ матеріалу, за яким ТФХ матеріалу та МХ приладу визначаються одночасно за результатами експерименту зі зразками дослідного матеріалу.

Можливість одночасного отримання інформації щодо значень ТФХ матеріалу і МХ приладу дає змогу підвищити точність дослідження температурних залежностей характеристик матеріалів шляхом урахування можливої зміни характеристик приладу та зразка від температури.

Ключові слова: *термоелектричні перетворювачі, теплофізичні та метрологічні характеристики, точність вимірювання.*

Постановка проблеми. З результатів аналізу способів і приладів визначення теплофізичних характеристик (ТФХ), наведеному в [1], випливає, що найбільш придатними для дослідження ТФХ термолабільних матеріалів є теплометричні засоби комплексного визначення ТФХ, які дають змогу виконувати дослідження як при наявності, так і відсутності в матеріалі фазових перетворень його складових. Було встановлено, що незалежно від виду теплового режиму (стаціонарний, перехідний, регулярний або будь-який інший), а також будови приладу, всі способи комплексного теплометричного визначення ТФХ матеріалів зводяться до отримання систем, складених з рівнянь виду:

$$R_m = R_x + R_b\,, \tag{1}$$

$$P_m = P_x + P_b\,. \tag{2}$$

де R_m, R_x, R_b — термічний опір відповідно системи «прилад-зразок», матеріалу та баластний; P_m, P_x, P_b — ємнісний опір, відповідно, системи «прилад-зразок», матеріалу та баластний.

Термічний опір системи «прилад-зразок» визначають як відношення різниці температур $\Delta t = t_1 - t_2$ на робочих поверхнях плоского зразка дослідного матеріалу до середньої густини теплового потоку, що проходить через зразок $\bar{q} = 0,5 \cdot (q_1 + q_2)$, які, у свою чергу, розраховують за результатами вимірювання термо-ЕРС, e_{t_i} і e_{q_i}, що генерують первинні термоелектричні перетворювачі температури (ПТ) і теплового потоку (ПТП) приладу, за формулою:

$$R_m = \frac{\Delta t}{\bar{q}} = \frac{t_1 - t_2}{0,5 \cdot (q_1 + q_2)} = \frac{K_t \cdot (e_{t_1} - e_{t_2})}{K_q \cdot (e_{q_1} - e_{q_2})}\,, \tag{3}$$

де K_t , K_q — робочий коефіцієнт перетворювача відповідно температури та теплового потоку:

$$t_i = K_t \cdot e_{t_i}\ ; \tag{4}$$

$$q_i = K_q \cdot e_{q_i}\,. \tag{5}$$

Ємнісний опір системи «прилад-зразок» при нагріванні (охолодженні) зразка дослідного матеріалу, наприклад, у регулярному тепловому режимі другого роду (квазістаціонарному режимі) визначають як відношення різниці густини теплового потоку $\Delta q = q_1 — q_2$ на робочих поверхнях зразка дослідного матеріалу до швидкості зміни $u_t = \delta\bar{t} / \Delta\tau$ середньої температури $\delta\bar{t} = \bar{t}_{\tau_2} - \bar{t}_{\tau_1} = = (t_1 + t_2)_{\tau_2} - (t_1 + t_2)_{\tau_1}$ зразка за проміжок часу $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$, які, у свою чергу, розраховують за результатами вимірювання термо-ЕРС, e_{t_i} і e_{q_i}, що генерують ПТ і ПТП приладу. З використанням робочих коефіцієнтів, K_t і K_q, перетворювачів, цей опір розраховують за формулою:

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{\Delta q}{u_t} = \Delta q \cdot \left(\frac{\delta\bar{t}}{\Delta\tau}\right)^{-1} = \Delta e_q \cdot \left(\frac{\Delta\bar{e}_t}{\Delta\tau}\right)^{-1} = \\ &= (e_{q_1} - e_{q_2}) \cdot \frac{K_q}{K_t}\left[\frac{(e_{t_1} + e_{t_2})_{\tau_2} - (e_{t_1} + e_{t_2})_{\tau_1}}{2 \cdot (\tau_2 - \tau_1)}\right]^{-1}. \end{aligned} \tag{6}$$

Термічний R_x і ємнісний P_x опори зразка дослідного матеріалу, а також баластні термічний R_b і ємнісний опори P_b приладу комплексного визначення ТФХ матеріалів (ТФХ-приладу) розраховують за формулами, відповідно:

$$R_x = h / \lambda_x \, ; \tag{7}$$

$$P_x = (c\rho)_x \cdot h \, ; \tag{8}$$

$$R_b = h_{R_b} / \lambda_b \, ; \tag{9}$$

$$P_b = (c\rho)_b \cdot h_{P_b} \, , \tag{10}$$

де h, h_{R_b} та h_{P_b} — відповідно, товщина зразка дослідного матеріалу, ефективні товщини баластних шарів, які визначають баластні термічний та ємнісний опори ТФХ-приладу; λ_x і $(c\rho)_x$ — відповідно, теплопровідність і об'ємна теплоємність зразка дослідного матеріалу; λ_b і $(c\rho)_b$ — відповідно, теплопровідність і об'ємна теплоємність баластних шарів ТФХ-приладу.

З результатів аналізу рівнянь (1)—(10) випливає, що для визначення R_x і P_x та подальшого розрахунку λ_x і $(c\rho)_x$ дослідного матеріалу попередньо потрібно визначити так звані метрологічні характеристики (МХ) ТФХ-приладу, а саме: баластні термічний R_b і ємнісний опори P_b, а також робочі коефіцієнти ПТ і ПТП, K_t і K_q, ТФХ-приладу.

Загальновідомо, що способи та прилади вимірювання неелектричних величин електричними методами можуть мати суттєві похибки. Визначення результуючої похибки приладу шляхом додавання її окремих складових, що можуть бути знайдені експериментальним або розрахунковими шляхом, є одним з найбільш складних питань метрології [2]. За широкого впровадження сучасної комп'ютерної техніки проблеми стабільності термоелектричних перетворювачів надзвичайно актуальні [3]. Властивості термометричних матеріалів, які виконують головну функцію — перетворення, не можна вважати стабільним під час експлуатації. Внаслідок особливостей виготовлення термометричних матеріалів функція перетворення, навіть однієї партії, характеризується певним розкидом, який все ж повинен бути в межах стандарту ДСТУ 2837-94 [4].

Мінімізація похибок — актуальне наукове завдання. Поки що не до кінця вивчено теплові, електричні та інші процеси перенесення у термометричних матеріалах, які зумовлюють нестабільність функції перетворення, формуючи при цьому інструментальну похибку [5]. Концепція оцінювання результату вимірювань може базуватись на різних підходах, але через одиничне вимірювання класичний підхід до похибок не завжди адекватний [6]. Крім того, більшість засобів вимірювання температури, які використовуються у виробництві, не завжди відповідають вимогам надійності та недостатньо універсальні, що значною мірою обмежує можливості й ефективність вимірювального контролю параметрів систем і агрегатів [7].

Згідно з [8; 9], для визначення МХ ТФХ-приладів найбільш поширеним і, одночасно, одним з найпростіших у реалізації є спосіб, де характеристики приладу визначаються за результатами дослідів з еталонними матеріалами, причому саме використання еталонного матеріалу є основним недоліком цього способу. У зв'язку з цим для підвищення точності комплексного визначення ТФХ термолабільних матеріалів, а також точності визначення МХ ТФХ-приладу **метою статті** є розроблення способу, за яким ТФХ дослідного матеріалу і МХ ТФХ приладу визначаються за результатами експериментів з дослідним матеріалом. Інакше кажучи, розроблення способу визначення характеристик матеріалу і приладу, де зразок дослідного матеріалу стосовно ТФХ-приладу одночасно є дослідним і еталонним матеріалом.

Матеріали і методи. Оскільки за результатами дослідів з еталонними матеріалами неможливо одночасно визначати робочі коефіцієнти ПТП і ПТ ТФХ-приладу введемо поняття узагальнюючого робочого коефіцієнта термоелектричних перетворювачів ТФХ-приладу, який будемо визначати за співвідношенням:

$$K_e = K_q / K_t \, . \tag{11}$$

У цьому випадку рівняння розрахунку термічного (3) і ємнісного (6) опорів системи «прилад-зразок» при нагріванні (охолодженні) зразка дослідного матеріалу у квазістаціонарному тепловому режимі матимуть вигляд:

$$R_m = \Delta e_t / (K_e \cdot \Delta e_q) \, ; \tag{12}$$

$$P_m = K_e \cdot \Delta e_q \cdot \Delta\tau / \Delta\overline{e}_t \, . \tag{13}$$

У квазістаціонарному тепловому режимі густина теплового потоку на «робочих» поверхнях зразка не змінюються у часі, тобто $q_1(\tau) = \text{const}$, $q_2(\tau) = \text{const}$, $q_1(\tau)$—$q_2(\tau)$=const. При цьому температура (t_1 та t_2) на робочих поверхнях зразка змінюється у часі лінійно:

$$t_1(\tau) - t_2(\tau) = \Delta t = \text{const}, \; u_t = \text{const}.$$

Оскільки робочий коефіцієнт ПТ залежить від температури [5—11], то з метою зменшення похибки визначення ТФХ матеріалів величина $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ у рівнянні (13) має являти собою проміжок часу, за який середній сигнал ПТ $\Delta\overline{e}_t = (e_{t1} + e_{t2}) / 2$ на поверхнях зразка дослідного матеріалу при нагріванні (охолодженні) у квазістаціонарному режимі змінюється на величину, яка дорівнює різниці термо-ЕРС цих перетворювачів, тобто $\Delta\overline{e}_t = \Delta e_t = e_{t1} - e_{t2}$. Методику визначення $\Delta\tau$ ілюструє рис. 1, де наведені прямі зміни термо-ЕРС, $e_{t1} = f(\tau)$ і $e_{t1} = f(\tau)$, а також зміни середнього значення $\overline{e}_t = f(\tau)$ цих термо-ЕРС, які генерують ПТ ТФХ-приладу, що розташовані на робочих поверхнях плоского зразка дослідного матеріалу.

Визначення часу $\Delta\tau$, за який середнє значення термо-ЕРС $\overline{e}_t$ ПТ приладу змінюється на величину, що має дорівнювати різниці сигналів ПТ на робочих поверхнях зразка матеріалу $\Delta\overline{e}_t = \Delta e_t$, а отже, частоти визначення ТФХ матеріалу можуть здійснюватися за різними алгоритмами.

Так, наприклад, ТФХ зразка матеріалу були визначені на момент τ_1, (рис. 1) при e_{t21}, $\overline{e}_{t1}$, e_{t11}. Проміжок часу, за який термо-ЕРС e_{t21} і $\overline{e}_{t1}$ збільшаться, відповідно, до $\overline{e}_{t1}$ і e_{t21}, буде дорівнювати $\tau_2 - \tau_1 = \Delta\tau/2$.

Частота визначення $\Delta\tau$ і, отже, визначення ТФХ матеріалу, може бути збільшена багатократно, якщо для визначення $\Delta\tau$ замість термо-ЕРС ПТ (які на час τ_2 мають бути досягнуті), у час τ_2 використовувати термо-ЕРС, що діяли на час τ_1. Розглянемо, наприклад, випадок визначення ТФХ дослідного матеріалу за результатами вимірювання термо-ЕРС, e_t і e_q, які генерують ПТ і ПТП двокоміркового ТФХ-приладу при нагріванні (охолодженні) зразків матеріалу у квазістаціонарному тепловому режимі.

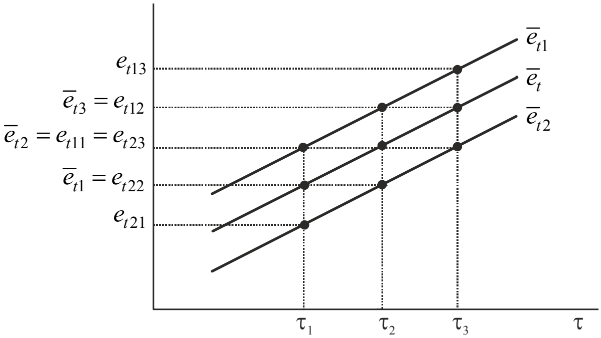

Рис. 1. Зміни термо-ЕРС, які генерують ПТ ТФХ-приладу у квазістаціонарному тепловому режимі

За результатами вимірювання сигналів ПТ і ПТП двокоміркового приладу (рис. 2) при нагріванні зразків дослідного матеріалу у квазістаціонарному тепловому режимі розрахуємо термічний R_m — (11) та ємнісний P_m — (12) опори системи «прилад-зразок».

Використання двокоміркового ТФХ-приладу тут обумовлено тим, що у разі подачі в проточні теплообмінники приладу енергоносія з однаковою температурою t_2, яка нижче за температуру t_1 електричного нагрівача, то при нагріванні у квазістаціонарному тепловому режимі обидва зразки товщиною $h_1 - h_2 = \Delta h \neq 0$, тобто які відрізняються між собою за величиною термічного $R_{x1} \neq R_{x2}$ та ємнісного $P_{x1} \neq P_{x2}$ опорів, мають однакову середню температуру $\bar{t} = (t_1 + t_2)/2$. Це є особливо важливим у разі використання для розрахунків ТФХ матеріалу узагальнюючого робочого коефіцієнта термоелектричних перетворювачів ТФХ-приладу.

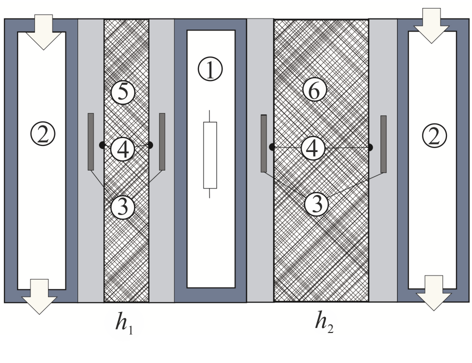

Рис. 2. Двокоміркований прилад комплексного визначення ТФХ матеріалів: 1 — електричний нагрівач; 2 — проточні теплообмінники; 3 — ПТП; 4 — ПТ; 5 і 6 — зразки дослідного матеріалу товщиною, відповідно, h_1 і h_2

У результаті підстановки у рівняння (1) та (2) виразів розрахунку їх складових: R_m — (11), R_x — (7), R_b — (9) та P_m — (12), P_x — (8), P_b — (10), і відповідного перетворення одержимо системи рівнянь виду:

$$\begin{cases} \left(\dfrac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_1 = \dfrac{K_e}{\lambda_x}\cdot h_1 + K_e\cdot R_b = K_e\cdot R_{x1} + K_e\cdot R_b \\ \left(\dfrac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_2 = \dfrac{K_e}{\lambda_x}\cdot h_2 + K_e\cdot R_b = K_e\cdot R_{x2} + K_e\cdot R_b \end{cases}; \tag{14}$$

$$\begin{cases} \left(\Delta\tau\cdot\dfrac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_1 = \dfrac{(c\rho)_x}{K_e}\cdot h_1 + \dfrac{P_b}{K_e} = \dfrac{P_{x1}}{K_e} + \dfrac{P_b}{K_e} \\ \left(\Delta\tau\cdot\dfrac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_2 = \dfrac{(c\rho)_x}{K_e}\cdot h_2 + \dfrac{P_b}{K_e} = \dfrac{P_{x2}}{K_e} + \dfrac{P_b}{K_e} \end{cases}. \tag{15}$$

Із систем рівнянь (14) і (15) випливає, що при постійній температурі залежності $\Delta e_t / \bar{e}_q$ від h, $(\Delta\tau\cdot\Delta e_q)/\Delta\bar{e}_t$ від h (рис. 3*а, б*), а також, $\Delta e_t / \bar{e}_q$ від R_x та $(\Delta\tau\cdot\Delta e_q)/\Delta\bar{e}_t$ від P_x (рис. 4а, б), являють собою прямі.

Так, пряма $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h)$, що наведена на рис. 3*а*, проходячи через точки J_1 і J_2, координати яких $[h_1\,;(\Delta e_t / \bar{e}_q)_1]$ і $[h_2\,;(\Delta e_t / \bar{e}_q)_2]$ отримані за результатами дослідів, перетинає вісь ординат графіка у точці А, що має координати $[0\,;(K_e\cdot R_b)]$.

У свою чергу, пряма $(\Delta\tau\cdot\Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(h)$ на рис. 3*б*, проходячи через точки Z_1 та Z_2, координати яких, відповідно, $[h_1\,;(\Delta\tau\cdot\Delta e_q / \Delta\bar{e}_t)_1]$ та $[h_2\,;(\Delta\tau\cdot\Delta e_q /, \Delta\bar{e}_t)_2]$, перетинає вісь ординат графіка у точці В, що має координати $[0\,;(P_b / K_e)]$.

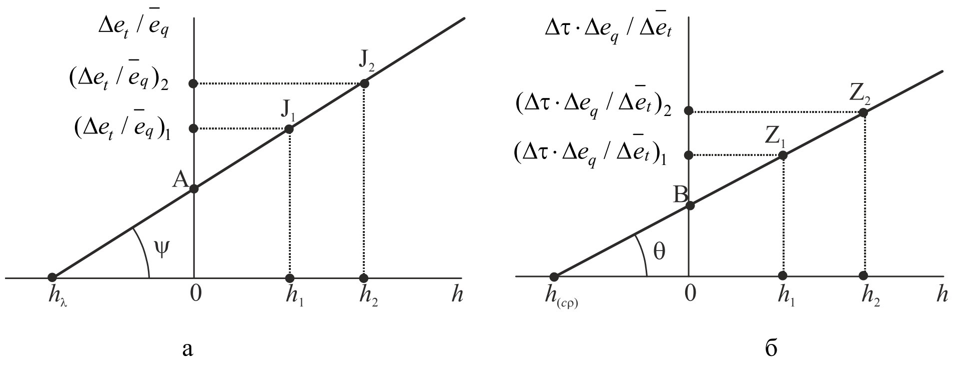

Рис. 3. Залежність значення комплексу термо-ЕРС ПТ і ПТП приладу:

а — $\Delta e_t / \bar{e}_q$, *б* — $(\Delta\tau\cdot\Delta e_q)/\Delta\bar{e}_t$; від товщини зразка дослідного матеріалу

Прямі $(\Delta e_t / \overline{e_q}) = f(h)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\overline{e_t}) = f(h)$ мають кут нахилу до вісі абсцис відповідного графіка $\psi = \mathrm{arctg}(K_e/\lambda_x)$ і $\theta = \mathrm{arctg}(c\rho)_x/K_e$ і перетинають цю вісь при:

$$|-h_\lambda| = \lambda_x \cdot R_b\,; \tag{16}$$

$$|-h_{(c\rho)}| = P_b / (c\rho)_x\,. \tag{17}$$

Зі збільшенням теплопровідності λ_x та об'ємної теплоємності $(c\rho)_x$ зразка дослідного матеріалу кут ψ, зменшується, а кут θ збільшується. При цьому:

- координати перетину прямих $(\Delta e_t / \overline{e_q}) = f(h)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\overline{e_t}) = f(h)$ з віссю ординат графіків залишаються без зміни;

- координата перетину прямої $(\Delta e_t / \overline{e_q}) = f(h)$ з віссю абсцис графіка переміщується в область від'ємних значень, а з прямою $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\overline{e_t}) = f(h)$ — у бік початку координат.

Оскільки зі зміною значень λ_x і $(c\rho)_x$ дослідного матеріалу значення відношень $|-h_\lambda|/\lambda_x = R_b$ та $|-h_{(c\rho)}|/(c\rho)_x = P_b$ залишається без зміни, то $|-h_\lambda|$ та $|-h_{(c\rho)}|$ є товщинами дослідного матеріалу, при яких термічний опір зразка матеріалу дорівнює, відповідно, баластному термічному і баластному ємнісному опорам ТФХ-приладу.

Особливістю розглянутих дослідів зі зразками матеріалу є можливість без використання попередньої інформації щодо значень МХ ТФХ-приладу визначити теплопровідність a_x дослідного матеріалу:

$$a_x = \mathrm{ctg}\psi \cdot \mathrm{ctg}\theta = \frac{\lambda_x}{K_e} \cdot \frac{K_e}{(c\rho)_x} = \frac{|-h_\lambda|}{K_e \cdot R_b} \cdot \frac{|-h_{(c\rho)}| \cdot K_e}{P_b} = \frac{\lambda_x}{(c\rho)_x}\,. \tag{18}$$

Побудувати графіки $(\Delta e_t / \overline{e_q}) = f(R_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\overline{e_t}) = f(P_x)$ за результатами дослідів зі зразками дослідного матеріалу у загальному випадку неможливо, оскільки λ_x і $(c\rho)_x$ такого матеріалу вважаються невідомими. Тому приймемо, що прямі, наведені на рис. 4, побудовані за результатами дослідів з еталонним матеріалом, теплопровідність λ_s і об'ємна теплоємність $(c\rho)_s$ якого відомі.

Зразки еталонного матеріалу товщиною $h_{s1} - h_{s2} = \Delta h_s \neq 0$, завдяки чому вони відрізнялися між собою за величиною термічного $R_{s1} \neq R_{s2}$ та ємнісного $P_{s1} \neq P_{s2}$ опорів, випробовували у квазістаціонарному режимі з використанням двокоміркового ТФХ-приладу.

На рис. 4 прямі $(\Delta e_t / \overline{e_q}) = f(R_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\overline{e_t}) = f(P_x)$, проходячи, відповідно, через точки E_1 і E_2 та точки F_1 і F_2, координати яких отримані за результатами експерименту зі зразками еталонного матеріалу, перетинають вісь ординат своїх графіків у точках A — $[0\,; (K_e \cdot R_b)]$ та B — $[0\,; (P_b / K_e)]$, координати яких не відрізняються від координат відповідних точок на рис. 3а, б.

При $(\Delta e_t / \overline{e_q}) = 0$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\overline{e_t}) = 0$ ці прямі перетинають вісі абсцис своїх графіків в області від'ємних значень при $|-R_x| = R_b$ та $|-P_x| = P_b$.

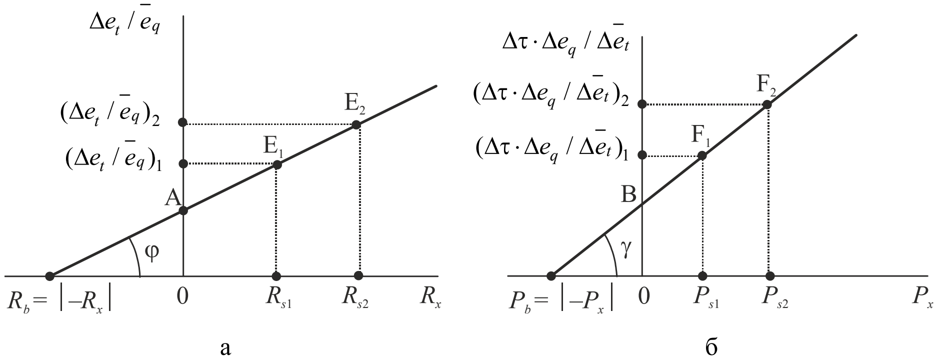

Рис. 4. Залежність значення комплексу термо-ЕРС ПТ і ПТП приладу:
а — $\Delta e_t / \bar{e}_q$ від термічного опору зразка дослідного матеріалу; б — $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q) / \Delta\bar{e}_t$ від ємнісного опору зразка дослідного матеріалу

На відміну від розглянутих раніше експериментів зі зразками дослідного матеріалу, за результатами експериментів зі зразками еталонного матеріалу можна розрахувати МХ ТФХ-приладу, значення яких у подальшому використовувати для визначення ТФХ дослідних матеріалів.

Так, із систем рівнянь (14) і (15) маємо:

$$K_e = \left[\left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q} \right)_1 - \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q} \right)_2 \right] \cdot (R_{s1} - R_{s2})^{-1} = = (P_{s1} - P_{s2}) \cdot \left[\left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t} \right)_1 - \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t} \right)_2 \right]^{-1}; \quad (19)$$

$$R_b = \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q} \right)_1 \cdot K_e^{-1} - R_{s1} = \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q} \right)_2 \cdot K_e^{-1} - R_{s2}; \quad (20)$$

$$P_b = K_e \cdot \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t} \right)_1 - P_{s1} = K_e \cdot \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t} \right)_2 - P_{s2}. \quad (21)$$

Тож потрібно визначити умови проведення експериментів зі зразками дослідного матеріалу і розробити методику обробки результатів цих експериментів, при використанні яких пряма $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h)$ збігається з прямою $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(R_x)$, а пряма $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(h)$ з прямою $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = = f(P_x)$. Інакше кажучи, при яких дослідний матеріал одночасно був би еталонним матеріалом.

Результати і обговорення. З результатів аналізу систем рівнянь (14), (15) та рис. 4 бачимо, що тангенси нахилу прямих $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(R_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(P_x)$, до вісі абсцис відповідних графіків дорівнюють: $tg\varphi =$

$= K_q$ та $tg\gamma = 1/K_q$. Оскільки $tg\varphi \cdot tg\gamma = K_q \cdot (1/K_q) = 1$, то сума кутів $(\varphi + \gamma)$ нахилу цих прямих до вісі абсцис їх графіків дорівнює $\pi/2$.

Звідси випливає, що в разі узгодження між собою масштабів величин, які відкладаються по осям абсцис і ординат графіків, прямі $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(R_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(P_x)$ будуть перетинати вісі абсцис таких графіків у її від'ємній частині у точках $|-R_x| = R_b$ та $|-P_x| = P_b$, рівновіддалених від початків координат. При цьому сума кутів нахилу прямих $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(h)$ до вісі абсцис їх графіків буде дорівнювати $\pi/2$, що згідно з (18) відповідає $a_x = 1$.

Водночас цієї умови, $a_x = 1$, недостатньо для того, щоб пряма $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h)$ «співпала» з прямою $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(R_x)$, а пряма $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(h)$ — з $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(P_x)$ та з'явилась можливість визначити МХ приладу і ТФХ матеріалу за результатами експериментів з дослідним матеріалом. Для цього потрібно, щоб дві з чотирьох ТФХ дослідного матеріалу: теплопровідність λ_x, об'ємна теплоємність $(c\rho)_x$, температуропровідність $a_x = \lambda_x / (c\rho)_x$, теплова активність $\beta_x = \sqrt{\lambda_x \cdot (c\rho)_x}$ дорівнювали б 1. Тут маємо враховувати, що якщо дві з чотирьох ТФХ матеріалу дорівнюють 1, то дві інші характеристики також будуть дорівнювати 1.

З результатів аналізу рівнянь (16), (17) випливає, що при $\lambda_x = (c\rho)_x = 1$, або інакше, при $a_x = \beta_x = 1$, отримаємо, що $|-h_{\lambda x}| = R_b$ та $|-h_{(c\rho)x}| = P_b$. Отже, за таких умов тангенси кутів ($tg\psi$ та $tg\theta$) нахилу прямих $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(h)$ до вісі абсцис їх графіків (рис. 3а,б) будуть дорівнювати тангенсам нахилу ($tg\varphi = K_q$ та $tg\gamma = 1/K_q$) прямих $(\Delta e_t / \bar{e}_q)$ від R_x та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t)$ від P_x до вісі абсцис відповідних графіків (рис. 4а, б).

Для аналізу взаємозв'язків між ТФХ дослідного матеріалу та МХ ТФХ-приладу, які використовуються у рівняннях:

$$\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q} = \frac{K_e}{\lambda_x} \cdot h + K_e \cdot R_b, ; \tag{22}$$

$$\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t} = \frac{(c\rho)_x}{K_e} \cdot h + \frac{P_b}{K_e}, ; \tag{23}$$

$$\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q} = K_e \cdot R_x + K_e \cdot R_b\ , ; \tag{24}$$

$$\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t} = \frac{P_x}{K_e} + \frac{P_b}{K_e}, \tag{25}$$

опису прямих, що наведені на рис. 3а, б та рис. 4а, б, за алгоритмом побудуємо суміщений графік цих прямих.

Передусім за результатами вимірювання термо-ЕРС, які генерують ПТ і ПТП двокоміркового (комірок 1 і 2) ТФХ-приладу (рис. 2) при нагріванні двох зразків дослідного матеріалу товщиною $h_1 - h_2 = \Delta h \neq 0$ у квазістаціонарному режимі, визначимо чисельні значення кутового коефіцієнта та вільного члена рівняння (23) і рівняння (24), які описують, відповідно, пряму $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h)$ і пряму $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(h)$.

Рівняння прямої, яка проходить через дві точки з координатами $[x_1 ; y_1]$ і $[x_2 ; y_2]$, запишемо у вигляді, подібному до (22), (23):

$$Y = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \cdot X + \frac{x_1 \cdot (y_1 - y_2) + y_1 \cdot (x_2 - x_1)}{(x_2 - x_1)}. \quad (26)$$

У результаті підстановки у (26) координат точок J_1, J_2 та Z_1, Z_2 (рис.3 а, б та рис.4 а, б) одержимо значення кутових коефіцієнтів і вільних членів лінійних рівнянь (23) і (24):

$$tg\psi = \frac{K_e}{\lambda_x} = \left[\left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_2 - \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_1\right] \cdot \Delta h^{-1} \ ; \quad (27)$$

$$K_e \cdot R_b = \left[h_{\mathrm{I}} \cdot \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_1 - h_{\mathrm{I}} \cdot \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_2 + \Delta h \cdot \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_1\right] \cdot \Delta h^{-1} \ ; \quad (28)$$

$$tg\theta = \frac{(c\rho)_x}{K_e} = \left[\left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_2 - \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_1\right] \cdot \Delta h^{-1} \ ; \quad (29)$$

$$P_b / K_e = \left[h_{\mathrm{I}} \cdot \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_1 - h_{\mathrm{I}} \cdot \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_2 + \Delta h \cdot \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_1\right] \cdot \Delta h^{-1}. \quad (30)$$

Визначимо також значення абсцис перетину прямих $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h)$ і $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(h)$ з віссю, та кутів нахилу прямих до вісі абсцис їхніх графіків:

$$|-h_\lambda| = \lambda_x \cdot R_b = \frac{h_1 \cdot \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_1 - h_1 \cdot \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_2 + \Delta h \cdot \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)}{\left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_2 - \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_1}; \quad (31)$$

$$|-h_{(c\rho)}| = \frac{P_b}{(c\rho)_x} = \frac{h_1 \cdot \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_1 - h_1 \cdot \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_2 + \Delta h \cdot \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_1}{\left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_2 - \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta\bar{e}_t}\right)_1}; \quad (32)$$

$$\psi = arctq\left[\left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_2 - \left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_1\right] \cdot \Delta h^{-1}; \quad (33)$$

$$\theta = arctq\left[\left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta \bar{e}_t}\right)_2 - \left(\Delta\tau \cdot \frac{\Delta e_q}{\Delta \bar{e}_t}\right)_1\right] \cdot \Delta h^{-1}. \quad (34)$$

Для побудови у декартових координатах графіка (рис. 5а), на якому суміщені залежності $\Delta e_t / \bar{e}_q$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t)$ від h_x, (рис. 3а, б), а також $\Delta e_t / \bar{e}_q$ від R_x та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t)$ н P_x (рис. 3а, б) на вісі абсцис такого графіка в обраному масштабі M_h нанесемо лінійну шкалу h. Для узгодження між собою масштабів величин, які відкладаються по вісі абсцис, h, і осям ординат, $\Delta e_t / \bar{e}_q$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t)$, суміщеного графіка, з точки h = —h_λ, (31), через третій квадрант графіка під кутом ψ (33) до вісі абсцис та з точки $h = -h_{(ср)}$, (32), через другий квадрант графіка під кутом θ (34) до вісі абсцис графіка, проводимо прямі, відповідно, $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h)$ і $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(h)$.

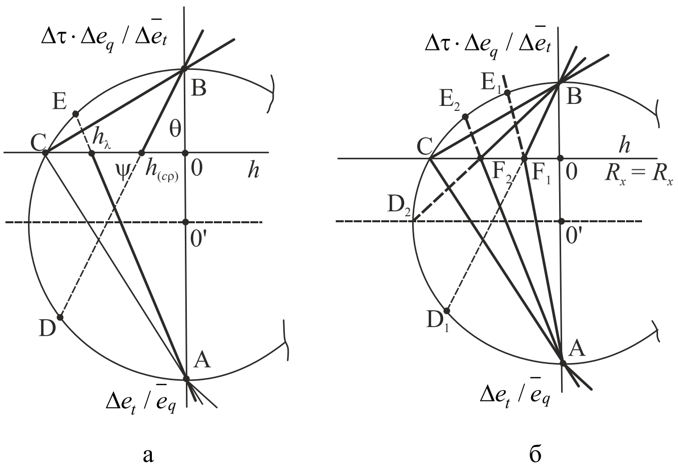

Рис. 5. До побудови (*а*) та аналізу (*б*) суміщеного графіка залежностей $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h)$, $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(h)$, $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(R_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) = f(P_x)$

При цьому пряма $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h)$ перетинає вісь ординат графіка у точці А, яка знаходиться на умовно від'ємній частині вісі, а пряма $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta\bar{e}_t) =$ $= f(h)$ — у точці В, на додатній частині вісі ординат графіка.

Оскільки прямі $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h_x)$ і $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$ перетинають вісі ординат своїх графіків (рис. 3а, б) при $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = K_e \cdot R_b$ і $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q/\Delta e_t) = P_b/K_e$, то масштаб M_{Rm} лінійної шкали $(\Delta e_t / \bar{e}_q)$, на «від'ємній» частині вісі ординат суміщеного графіка, та масштаб M_{Pm} лінійної шкали $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q/\Delta e_t)$ на «додатній» частині вісі ординат графіка, визначимо як відношення довжини відрізка 0-А — $L_{0A} = |-h_\lambda| \cdot tg\psi$ до значення $K_q \cdot R_b$ (28) та як відношення довжини L_{0B} відрізка 0-В — $L_{0B} = |-h_{(ср)}| \cdot tg\theta$ до значення P_b/K_q (30).

За значенням величин h, R_x, P_x вісь абсцис суміщеного графіка має бути спільною для двох пар прямих — пари прямих $(\Delta e_t / \bar{e}_q)$ від h і $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t)$ від h та пари прямих $(\Delta e_t / \bar{e}_q)$ від R_x і $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q/\Delta e_t)$ від P_x.

Прямі $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$ мають кут нахилу до вісі абсцис графіка ψ та θ і перетинають цю вісь у точках, відповідно, $|-h_\lambda| = \lambda_x \cdot R_b$ (31) та $|-h_{(c\rho)}| = P_x/(c\rho)_x$ (32).

На відміну від попередньої пари, прямі $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(R_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(P_x)$ мають мати кут нахилу до вісі абсцис суміщеного графіка, відповідно, $\varphi = arctq(K_q)$ і $\gamma = arctq(1/K_q)$ та перетинати вісь абсцис у точках, координати які мають чисельно дорівнювати:

$$|-h'_\lambda| / \lambda_b = R_b ; \tag{35}$$

$$|-h'_{(c\rho)}| \cdot (c\rho)_b = P_b , \tag{36}$$

де $|-h'_\lambda| = |-h_\lambda| / \lambda_x = R_b$ — ефективна товщина баластного шару, яка при теплопровідності матеріалу цього шару $\lambda_b = 1$ чисельно дорівнює баластному термічному опору ТФХ-приладу; $|-h'_{(c\rho)}| = |-h_{(c\rho)}| \cdot (c\rho)_x = P_b$ — ефективна товщина баластного шару, яка при об'ємній теплоємності матеріалу цього шару $(c\rho)_b = 1$ чисельно дорівнює баластному ємнісному опору ТФХ-приладу.

Тож по вісі абсцис суміщеного графіка відкладаються величини h, R_x, P_x, які мають розмірність, відповідно, [m], [K·m^2/W], [J/m^2·K], але які чисельно дорівнюють товщині зразка матеріалу. Отже, при нанесенні на вісь абсцис графіка рівномірної шкали h, вона ж шкала R_x, при $\lambda_x = 1$, вона ж шкала P_x, при $(c\rho)_x = 1$, у кожній точці шкали термічний і ємнісний опори зразка дослідного матеріалу мають чисельно дорівнювати один одному $R_x = P_x$, тобто $h / \lambda_x = h \cdot (c\rho)_x$, звідки $\beta_x = 1$.

За такої умови, при $\lambda_b = 1$ та $(c\rho)_b = 1$, координати точок A, ($(\Delta e_t / \bar{e}_q)_A = K_q \cdot R_e$) та B ($(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t)_B = P_b / K_e$) суміщеного графіка можуть бути подані так:

$$\left(\frac{\Delta e_t}{\bar{e}_q}\right)_A = K_e \cdot \frac{h_{R_b}}{\lambda_b} = K_e \cdot \frac{|-h_\lambda|}{\lambda_x} = K_e \cdot \frac{|-h_\lambda| / \lambda_x}{1} = K_e \cdot |-h'_\lambda| ; \tag{37}$$

$$\begin{gathered}\left(\frac{\Delta\tau \cdot \Delta e_q}{\Delta e_t}\right)_B = \frac{h_{P_b} \cdot (c\rho)_b}{K_e} = \frac{|-h_{(c\rho)}| \cdot (c\rho)_x}{K_e} = \\ = \frac{[|-h_{(c\rho)}| \cdot (c\rho)_x] \cdot 1}{K_e} = \frac{|-h'_{(c\rho)}|}{K_e} .\end{gathered} \tag{38}$$

Як випливає з результатів аналізу залежностей, наведених на рис. 3 та рис. 4, при $\lambda_x = (c\rho)_x = 1$ кожна з двох пар прямих, $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(h_x)$ і $(\Delta e_t / \bar{e}_q) = f(R_x)$, а також $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$ і $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(P_x)$, на суміщеному графіка мають бути представлені відповідними прямими, які, у свою чергу, мають перетинатися між собою під кутом π/2.

Оскільки прямі $(\Delta e_t / \overline{e}_q) = f(R_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(P_x)$, а також прямі $(\Delta e_t / \overline{e}_q) = f(h_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$, проходячи через точки А і В при $\lambda_x = (c\rho)_x = a_x = \beta_x = 1$, на суміщеному графіка мають перетинатися між собою під кутом π/2, через точки А та В проведемо коло діаметром $D = L_{0A} + L_{0B}$, центр O' якого знаходиться на вісі ординат графіка і в загальному випадку не співпадає з початком координат.

Це коло перетинає вісь абсцис графіка в точці С, абсциса якої — довжина відрізка 0-С, може бути розрахована як середнє геометричне довжин відрізків 0-А та 0-В, які утворюють діаметр кола. Разом з тим, враховуючи узгодженість масштабів величин, які відкладаються на осях графіка, абсциса точки С як середнє геометричне двох відрізків, на які поділено діаметр кола, або при $\lambda_x = (c\rho)_x = 1$ у (16), (17), може бути розрахована так:

$$h_C = \sqrt{L_{OA} \cdot L_{OB}} = \sqrt{(K_q \cdot R_b) \cdot (P_b / K_q)} \,. \tag{39}$$

Для зручності надання матеріалу тут, h_C, і далі, індексом «С» будемо виділяти величини, які відносяться до точки С суміщеного графіка.

На рис. 5 *а* прямі $(\Delta e_t / \overline{e}_q) = f(h_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$ перетинають коло у точках, відповідно, Е та D. Зі збільшенням λ_x, точка $|-h_\lambda| = \lambda_x \cdot R_b$ перетину прямої $(\Delta e_t / \overline{e}_q) = f(h_x)$ з віссю абсцис переміщується у бік точки С і далі у від'ємну область шкали. При цьому точка Е по колу переміщується проти стрілки годинника.

Зі зменшенням $(c\rho)_x$ точка $|-h_{(c\rho)}| = P_x/(c\rho)_x$ перетину прямої $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$ з віссю абсцис переміщується у бік точки С і далі у від'ємну область шкали, а точка D по колу переміщується за стрілкою годинника, тобто на зустріч точці Е.

Положення точок Е, D на колі збігаються з точкою С коли $|-h_{C\lambda}| = |-h_{C(c\rho)}| = |-h_C|$. При цьому сума кутів $\psi_C + \theta_C$ нахилу прямих $(\Delta e_t / \overline{e}_q) = f(h_x)$ та $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$ до вісі абсцис графіка дорівнює π/2 і, отже, при $\lambda_{Cx} = (c\rho)_{Cx}$, також і $a_{xC} = 1$. Тоді:

$$h_C = \sqrt{\lambda_x \cdot R_b \cdot \frac{P_b}{(c\rho)_x}} = \sqrt{a_{xC}} \cdot \sqrt{R_b \cdot P_b} = \sqrt{(c\rho)_b \cdot \frac{h_{R_b} \cdot h_{P_b}}{\lambda_b}} = \frac{h_b}{\sqrt{a_b}} \,. \tag{40}$$

У випадку, коли прямі $(\Delta e_t / \overline{e}_q) = f(h_x)$ і $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$ перетинаються між собою на ділянці 0-С вісі абсцис суміщеного графіка (рис. 5б), наприклад, у точці F_1, де $h_1 = |-h_{\lambda 1}| = |-h_{(c\rho)1}| = R_{x1} = P_{x1}$ або у точці F_2, де $h_2 = |-h_{\lambda 2}| = |-h_{(c\rho)2}| = R_{x2} = P_{x2}$, то в результаті перетворення рівностей $R_{x1} = \lambda_{1x} \cdot R_b = P_{x1} = P_b/(c\rho)_{1x}$ та $R_{x2} = \lambda_{2x} \cdot R_b = P_{x2} = P_b/(c\rho)_{2x}$ отримуємо:

$$\beta_{1x} = \beta_{2x} = \sqrt{P_b / R_b} = 1 \,. \tag{41}$$

Переміщення точки F взаємного перетину прямих $(\Delta e_t / \overline{e}_q) = f(h_x)$ і $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$ по вісі h графіка у бік точки C (рис. 5б), супроводжується збільшенням λ_x і зменшенням $(c\rho)_x$, отже, збільшенням a_x дослідного матеріалу. Значення теплової активності матеріалу при цьому не змінюється, $\beta_x = 1 = const$. Як і в попередньому випадку (рис. 5а), зміна теплопровідності, об'ємної теплоємності і температуропровідності дослідного матеріалу супроводжується переміщенням по колу точок E та D у бік вісі абсцис графіка, тобто точки C.

Характер залежності теплопровідності та об'ємної теплоємності дослідного матеріалу залежності від координати перетину, відповідно, прямої $(\Delta e_t / \overline{e}_q) = f(h_x)$ і прямої $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$ з віссю абсцис суміщеного графіка показано на рис. 6.

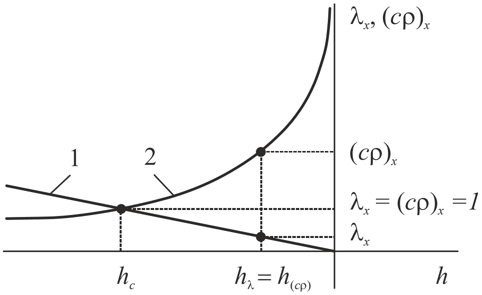

Рис. 6. Залежність значення теплопровідності 1 та об'ємної теплоємності 2 дослідного матеріалу від координати перетину прямих прямо $(\Delta e_t / \overline{e}_q) = f(h_x)$ та прямої $(\Delta\tau \cdot \Delta e_q / \Delta e_t) = f(h_x)$ з віссю абсцис суміщеного графіка

Як бачимо, тільки у точці C, де, як було показано раніше, теплова активність дослідного матеріалу $\beta_{xC} = 1$, теплопровідність λ_{xC} матеріалу дорівнює його об'ємній теплоємності $(c\rho)_{xC}$ і, відповідно, тут, у точці перетину кола з віссю абсцис суміщеного графіка температуропровідність дослідного матеріалу $a_{xC} = 1$.

Прямі, які на рис. 5а, б проходять через точки C і A та точки C і B можуть бути описані рівняннями виду, відповідно (24) і (25). Отже, у разі необхідності МХ приладу при $\lambda_x = (c\rho)_x = a_x = \beta_x$ можуть бути визначені таким чином:

$$K_e = \frac{L_{0\mathrm{A}}}{h_C} = \frac{h_C}{L_{0\mathrm{B}}} = \sqrt{\frac{K_e \cdot R_b}{P_b / K_q}} = \frac{K_e \cdot R_b}{\sqrt{(K_q \cdot R_b) \cdot (P_b / K_q)}} = \frac{\sqrt{(K_q \cdot R_b) \cdot (P_b / K_q)}}{P_b / K_q}; \quad (42)$$

$$R_b = P_b = \sqrt{(K_e \cdot R_b) \cdot (P_b / K_q)}. \quad (43)$$

Разом тим, як випливає з вищевикладеного, ТФХ дослідного матеріалу можуть бути розраховані з результатами вимірювання термо-ЕРС ПТ і ПТП двокоміркового приладу при нагріванні (охолодженні) зразків матеріалу в квазістаціонарному режимі без використання даних щодо МХ приладу при підстановці у формули:

$$\lambda_x = |-h_\lambda| / |-h_C|; \quad (44)$$

$$(c\rho)_x = |-h_C| / |-h_{(c\rho)}|; \quad (45)$$

$$a_x = |-h_\lambda| \cdot |-h_{(c\rho)}| / |-h_C|^2; \quad (46)$$

$$\beta_x = \sqrt{|-h_\lambda| / |-h_{(c\rho)}|}, \quad (47)$$

значень $|-h_\lambda| = \lambda_x \cdot R_b$, $|-h_{(c\rho)}| = P_b/(c\rho)_x$ та $|-h_C| = R_b = P_b$, розрахованих за рівняннями (31), (32) та рівнянням (39) з використанням (28), (30).

Висновок

1. У більшості методик визначення теплофізичних характеристик матеріалів передбачається попереднє проведення експериментів з еталонними матеріалами, за відомими характеристиками яких розраховують метрологічні характеристики приладу.

2. Для підвищення точності результатів досліджень розроблено принципово новий спосіб комплексного визначення ТФХ матеріалу, за яким ТФХ матеріалу та МХ приладу визначаються одночасно за результатами експерименту зі зразками дослідного матеріалу.

3. Можливість одночасного отримання інформації щодо значень ТФХ матеріалу і МХ приладу дає змогу підвищити точність дослідження температурних залежностей характеристик матеріалів шляхом врахування можливої зміни характеристик приладу та зразка від температури.

Література

1. Мазуренко О.О., Коломієць Д.П., Луценко В.В., Мазуренко О.Г. Теплометричні способи та прилади вимірювання теплофізичних характеристик харчових продуктів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій.* 2019. Т.25. № 1. С. 139—160.

2. Стадник Б.І., Яцишин С.П. Термоелектричні перетворювачі. Дослідження інструментальної похибки. *Системи обробки інформації.* 2009, випуск 5(79). С.106—109.

3. Яцишин С.П. Розвиток теоретичних основ і створення методів і алгоритмів мінімізації похибок термоперетворювачів на основі статистичної термодинаміки: дис. .... доктора техн. наук: 05.11.04. Львів, 2008. 275 с.

4. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики: ДСТУ 2837—94. Київ, Держстандарт України, 1994

5. Дороговець М.М. Обробка результатів вимірювань. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2007. 621 с.

6. Науменко А.М., Сизоненко В.М. Оцінка основних похибок вимірювальних перетворювачів температури. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил,* 2014, випуск 1 (38). С. 222—225

7. Платунов Е.С., Буравой С.Е., Курепин В.В., Петров Г.С. Теплофизические измерения и приборы: книга / под общ. ред. Е.С. Платунова. Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. 256 с.

8. Теплометрия: теория, метрология, практика: монография в трех частях. Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока / под ред. Т.Г. Грищенко. Київ: ИТТФ НАН Украины, 2017. 438 с.

9. Температурные измерения: Справочник / О.А. Геращенко и др.; отв.ред. О.А. Геращенко. Киев : Наук. думка, 1989. 704 с.

10. Теоретические основы теплофизики. Теплотехнический експеримент : Справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина 2-е изд., перераб.: Москва: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.

11. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 6th Edn., 2007