

КАЛІБРУВАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДАТЧИКІВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ

Новий калібрувальний стенд розроблено в Інституті технологічних вимірювань і технології датчиків Технічного університету Ільменау для калібрування датчиків теплового потоку. Стенд забезпечує відомі температури по обидві сторони датчика теплового потоку, на основі яких може бути визначений тепловий потік. Для визначення температур застосовується відомий метод, калібрування термометрів для вимірювання контактної поверхні. За допомогою значень, вимірюваних термометрами, розподіленими уздовж центральної осі двох усереднюючих блоків, екстраполюються температури поверхні кожного усереднюючого блока, і тим самим температури поверхні датчика теплового потоку. Екстрапольовані температури поверхні регулюються таким чином, що різниця двох температур змінюється в діапазоні від 0 до 200 мК. Використовуючи ці різниці температур і сигнал датчика, можна визначити зсув і чутливість датчика теплового потоку. Датчики теплового потоку на основі термобатарей і датчики на основі поперечного ефекту Зеебека було побудовано й відкалібровано на стенді.

Ключові слова: датчик теплового потоку, калібрування, температура поверхні

A new calibration bench was developed at the Institute for Process Measurement and Sensor Technology of Technische Universität Ilmenau to calibrate heat flux sensors (HFS). The bench provides well known temperatures at both sides of the HFS, from which the heat flux can be determined. The temperatures are determined using a method known from the calibration of contact surface thermometers. By means of the values measured by thermocouples distributed along the central axis of two homogenization blocks, the surface temperatures of each homogenization block, and thereby the surface temperatures of the HFS, are extrapolated. The extrapolated surface temperatures are controlled in a manner that the difference between the two temperatures changes in the range of 0 mK to 200 mK. Using these temperature differences and the sensor signal, the offset and the sensitivity of the HFS can be determined. HFS based on thermopiles and HFS based on the transversal seebeck-effect were constructed calibrated at the bench.

Key words: heat flux sensor, calibration, surface temperature

Вступ

Датчики теплового потоку провідної природи звичайно калібруються на тендах методом ізольованої гарячої плити [1]. Цей метод вимагає відомого теплового потоку через досліджуваний датчик. Такий тепловий потік зазвичай створюється нагрівачем з однієї сторони датчика теплового потоку, вимірюється за допомогою різниці температур на пластині, відомої геометрії і теплопровідності, та розсіюється тепловідводом з іншої сторони датчика теплового потоку. Одною з основних вимог цього методу є спрямований потік від джерела тепла через

досліджуваний датчик, що може бути забезпеченим повністю. Калібрувальний стенд, показаний у пропонованій статті, використовує інший підхід. Для дослідження характеристик досліджуваного датчика визначається температура його поверхні.

Конструкція та принцип роботи

Калібрувальний стенд

Калібрувальний стенд являє собою осьову симетричну конструкцію, що складається із двох спіральних нагрівачів і двох циліндричних усереднюючих блоків (сталь 1.4301) з інтегральними термопарами К-типу, оточеними ізоляцією з лужно-земельної силікатної вати (рис. 1). Усереднюючі блоки мають діаметр 76 мм і висоту 25 мм. Геометрія повітряного проміжку між блоками залежить від геометрії досліджуваного датчика. Потужність нагрівачів у верхній частині верхнього і в нижній частині нижнього усереднюючого блока можна регулювати індивідуально та нагрівати стенд у температурному діапазоні від 20 °С до 400 °С.

Три термопари в кожному усереднюючому блоці використовуються для екстраполяції температур поверхні блоків за допомогою методу квадратного многочлена. Цей метод відомий як метод калібрування контактних термометрів для вимірювання температури поверхні [2]. За допомогою цього методу температури поверхні усереднюючих блоків і датчиків теплового потоку відповідно визначаються та використовуються як регульована змінна. Нагрівачі дають можливість регулювати температури таким чином, що різниця екстрапольованих температур поверхні змінюється від $\Delta T = 0$ К до $\Delta T = \pm 200$ мК. Встановлено, що різниця температур 200 мК досить велика, щоб одержати сигнал, що піддається обчисленню, і досить мала, щоб одержати не дуже сильну деформацію теплового поля.

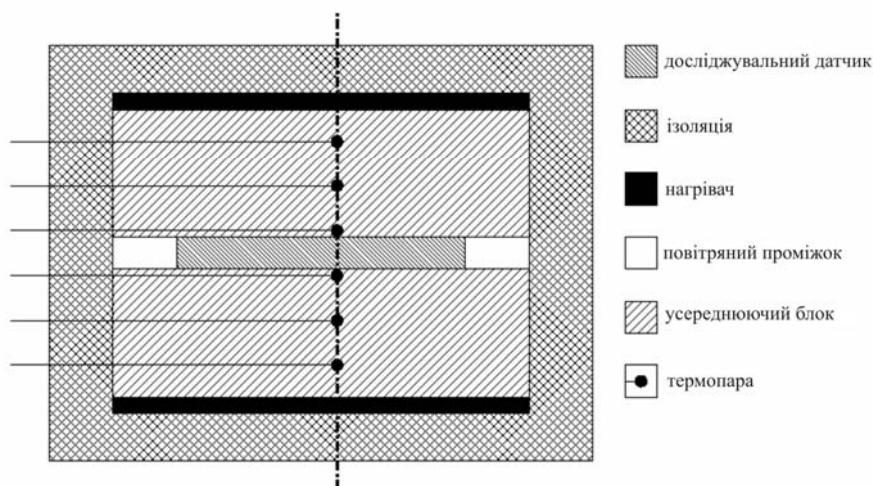


Рис. 1. Конструкція калібрувального стенда.

Принцип роботи

Мета калібрування – визначити чутливість S і зсув U_0 характеристики (1) датчика теплового потоку (HFS)

$$U_{\text{HFS}} = U_0 + S \cdot \Delta T, \quad (1)$$

де ΔT – різниця температур між верхньою й нижньою частиною датчика теплового потоку.

Кожна з температур має похибки за рахунок вимірювання температур і невідомого температурного поля на поверхні датчика теплового потоку (2).

$$U_{\text{HFS}} = U_0 + S \cdot [(T_{\text{upper}} + E_{\text{upper}}) - (T_{\text{lower}} + E_{\text{lower}})]. \quad (2)$$

Щоб компенсувати вплив цих похибок, дві різниці температур $T_{\text{upper}} - T_{\text{lower}}$ (а і б) використовуються для визначення $S(\Delta T)$. Припустивши, що похибки E постійні або змінюються незначним чином, $S(\Delta T)$ можна визначити, використовуючи два сигнали U і чотири температури T (3):

$$\begin{aligned} U_{\text{HFS,a}} &= U_0 + S \cdot [(T_{\text{upper,a}} + E_{\text{upper}}) - (T_{\text{lower,a}} + E_{\text{lower}})] \\ U_{\text{HFS,b}} &= U_0 + S \cdot [(T_{\text{upper,b}} + E_{\text{upper}}) - (T_{\text{lower,b}} + E_{\text{lower}})] \\ S(\Delta T) &= \frac{U_{\text{HFS,a}} - U_{\text{HFS,b}}}{(T_{\text{upper,a}} - T_{\text{lower,a}}) - (T_{\text{upper,b}} - T_{\text{lower,b}})}. \end{aligned} \quad (3)$$

Щоб визначити зсув U_0 , датчик теплового потоку необхідно перемкнути за однієї температури або змінити полярність електричного з'єднання з досліджуванним приладом (4):

$$\begin{aligned} U_{\text{HFS,plus}} &= U_0 + S \cdot [(T_{\text{upper}} + E_{\text{upper}}) - (T_{\text{lower}} + E_{\text{lower}})] \\ U_{\text{HFS,min us}} &= U_0 + S \cdot [(T_{\text{lower}} + E_{\text{lower}}) - (T_{\text{upper}} + E_{\text{upper}})] \\ U_0 &= \frac{U_{\text{HFS,plus}} + U_{\text{HFS,min us}}}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Щоб одержати чутливість як функцію теплового потоку \dot{q} , використовується одномірне формулювання закону Фур'є (5)

$$\dot{q} = -\lambda \nabla T, \quad (5)$$

де λ – теплопровідність. Допускаючи одномірну теплопровідність та постійний градієнт температури по довжині датчика l , одержимо (6):

$$\dot{q} = -\frac{\lambda}{l} \Delta T. \quad (6)$$

З використанням рівнянь (3) і (6) чутливість $S(\dot{q})$ описується рівнянням (7).

$$S(\dot{q}) = \frac{l}{\lambda} \cdot \frac{U_{\text{HFS,a}} - U_{\text{HFS,b}}}{(T_{\text{upper,a}} - T_{\text{lower,a}}) - (T_{\text{upper,b}} - T_{\text{lower,b}})}. \quad (7)$$

Теплопровідність і товщина залежать від температури, але їх змінами в невеликому температурному інтервалі 200 мК можна знехтувати:

Досліджувані датчики

Досліджувані датчики було сконструйовано в Інституті технологічних вимірювань і технології датчиків Технічного університету Ільменау. Було використано два принципи: одна конструкція на основі термобатарей, що є відомим принципом для датчиків теплового потоку

[3], а інша – на основі поперечного ефекту Зеебека [4, 5]. Обидва типи датчиків мали однакові геометричні параметри – диски діаметром 54 мм і висотою 1.5 мм.

Датчики теплового потоку на основі термобатарей

Датчики складаються із двох кілець термопар типу-Е, термічно з'єднаних паралельно і послідовно електрично. Ці так звані термобатареї мають 25 спаїв на внутрішньому кільці і 35 спаїв на зовнішньому кільці й монтуються на опорі зі склокераміки ($\lambda = 1.72 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$, рис.2). Для дослідження впливу наповнювача (теплопровідний наповнювач, $\lambda = 3 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$) було створено датчики з наповнювачем і без нього.

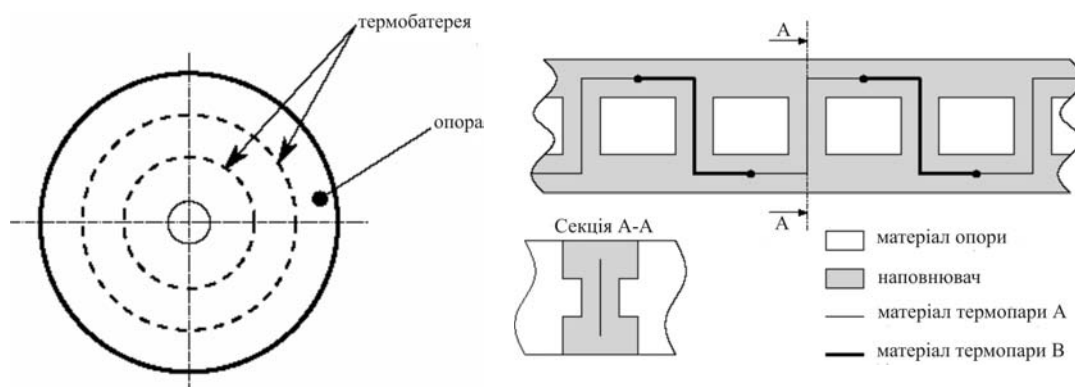


Рис. 2. Конструкція датчика теплового потоку й поперечний переріз уздовж однієї термобатареї.

Теоретична чутливість $S(\dot{q})$ (8)

$$S(\dot{q}) = \frac{n \cdot S_{TC}(T) \cdot l_j}{\lambda} \quad (8)$$

залежить від чутливості $S_{TC}(T)$ термопари типу-Е, відстані між спаями l_j , теплопровідності й числа n термопар у термобатарей [3]. Чутливість $S(\Delta T)$ залежить тільки від $S_{TC}(T)$ і n (9).

$$S(\Delta T) = n \cdot S_{TC}(T). \quad (9)$$

Для розрахунків теоретичної чутливості було використано еквівалентну електричну схему [2]. За допомогою цієї моделі й значень $S_{TC}(T)$ із [6] для різних температур було визначено чутливість (табл. 1).

Таблиця 1

Теоретична чутливість датчика теплового потоку на основі термобатарей

	60 °C		100 °C		150 °C	
	$S(\Delta T)$, мкВК ⁻¹	$S(\dot{q})$, мкВВТ ⁻¹ м ²	$S(\Delta T)$, мкВК ⁻¹	$S(\Delta T)$, мкВВТ ⁻¹ м ²	$S(\dot{q})$, мкВК ⁻¹	$S(\Delta T)$, мкВВТ ⁻¹ м ²
25 з наповнювачем	56.96	406.83	58.61	56.96	406.83	58.61
35 з наповнювачем	79.66	568.28	81.96	79.66	568.28	81.96
25 без наповнювача	40.42	194.97	41.59	40.42	194.97	41.59
35 без наповнювача	56.51	272.20	58.14	56.51	272.20	58.14

Датчик теплового потоку на основі поперечного ефекту Зеебека

Основною частиною датчиків є суцільний диск, утворений шарами $NiCr$ і $CuNi$, складеними в стос. Ці метали (матеріал для термопари типу E) зварені дифузійним зварюванням і розрізані на диски під кутом 45° (рис. 3). У цьому штучному анізотропному матеріалі коефіцієнт Зеебека σ й теплопровідність λ є тензорами другого порядку та описуються (10) і (11), де λ_{\parallel} й σ_{\parallel} описують властивості матеріалу уздовж, а λ_{\perp} й σ_{\perp} – перпендикулярно основної осі стоса [5].

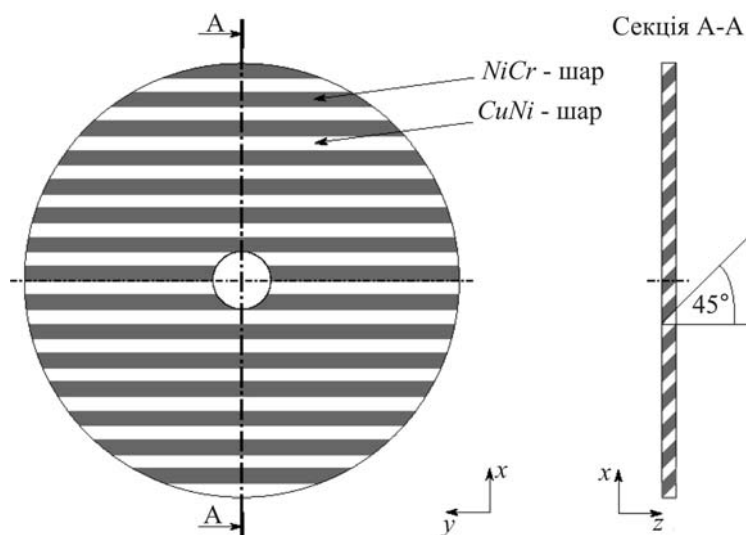


Рис. 3. Конструкція датчика теплового потоку зі штучного анізотропного матеріалу.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{\parallel} \cos^2 \alpha + \sigma_{\perp} \sin^2 \alpha & 0 & \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) \\ 0 & \sigma_{\parallel} & 0 \\ \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) & 0 & \sigma_{\parallel} \cos^2 \alpha + \sigma_{\perp} \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{\parallel} \cos^2 \alpha + \lambda_{\perp} \sin^2 \alpha & 0 & \frac{1}{2}(\lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp}) \sin(2\alpha) \\ 0 & \lambda_{\parallel} & 0 \\ \frac{1}{2}(\lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp}) \sin(2\alpha) & 0 & \lambda_{\parallel} \cos^2 \alpha + \lambda_{\perp} \sin^2 \alpha \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Сигналом датчика служить електричне поле E , створюване термоЕРС всередині датчика (12), інтегроване уздовж напрямку вимірюваної напруги, у цьому випадку U_x (13)

$$E = \sigma \cdot \nabla T, \quad (12)$$

$$U_x = \int_0^d \left((\sigma_{\parallel} \cos^2 \alpha + \sigma_{\perp} \sin^2 \alpha) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx. \quad (13)$$

Припускаючи одномірну теплопровідність в напрямку z з постійним градієнтом, одержимо сигнал датчика як функцію різниці температур ΔT у напрямку z (14):

$$U_x = \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) \frac{d}{l} \Delta T_z. \quad (14)$$

Отже, теоретична чутливість $S(\Delta T)$ залежить від анізотропії термоЕРС $(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp})$ кута, що відсікає α , діаметра d і товщини датчика l . Крім того, теоретична чутливість $S(\dot{q})$ залежить від теплопровідності λ в напрямку z :

$$S(\Delta T) = \frac{U_x}{\Delta T_z} = \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) \frac{d}{l}, \quad (15)$$

$$S(\dot{q}) = \frac{U_x}{\dot{q}_z} = \frac{(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) d}{(\lambda_{\parallel} \cos^2 \alpha + \lambda_{\perp} \sin^2 \alpha) l}. \quad (16)$$

На відміну від датчиків теплового потоку на основі термобатареї, теоретична чутливість цієї конструкції залежить від більшого числа властивостей матеріалу. Крім вищезгаданих властивостей, електричний питомий опір використовується для визначення σ_{\parallel} [5]. Оскільки ці властивості матеріалу точно невідомі і в літературі можна зустріти кілька різних значень, моделювання чутливості методом Монте-Карло було виконано з використанням значень, наведених у табл. 2 і $\pm 20\%$ коливання кожного з них.

Таблиця 2

Властивості матеріалів NiCr і CuNi [2], [7], [8], [9]

матеріал	σ , мкВК ⁻¹	λ , Втм ⁻¹ К ⁻¹	γ , мкОм ⁻¹ м ⁻¹
NiCr	28.07	19.0	1.4
CuNi	-42.05	25.29	2.0

Результатом такого моделювання є мінімальні й максимальні очікувані значення чутливості за трьох температур, наведених в табл. 3. Значну відмінність між мінімальними й максимальними очікуваними значеннями можна пояснити нелінійним співвідношенням властивостей матеріалу в моделі (10). Розраховані значення визначають діапазон, у якому повинні лежати результати калібрування, щоб вважатися достовірними.

Таблиця 3

Мінімальна й максимальна теоретична чутливості датчика теплового потоку на основі поперечного ефекту Зеебека

значення	60 °С		100 °С		150 °С	
	$S(\Delta T)$, мкВК ⁻¹	$S(\dot{q})$, нВВт ⁻¹ м ²	$S(\Delta T)$, мкВК ⁻¹	$S(\Delta T)$, нВВт ⁻¹ м ²	$S(\dot{q})$, мкВК ⁻¹	$S(\Delta T)$, нВВт ⁻¹ м ²
мінімальне	0.46	0.06	0.52	0.07	0.56	0.08
максимальне	421.80	59.89	441.74	62.83	467.90	66.44

Властивості стенда

Стабільність температур поверхні

Кожна з екстрапольованих температур поверхні регулюється відповідно PID-контролером. Ці контролери здатні утримувати задане значення, але з коливаннями із періодом близько 300 сек і величиною менше 30 мК (рис. 4).

Ці коливання викликані періодичною зміною температури в лабораторії у зв'язку зі станом повітря, поперечною чутливістю двох контролерів і відсутністю активного охолодження. Проте такої якості контрольованих температур для калібрування досить, оскільки інтервали інтегрування у 600 секунд є можливими при калібруванні.

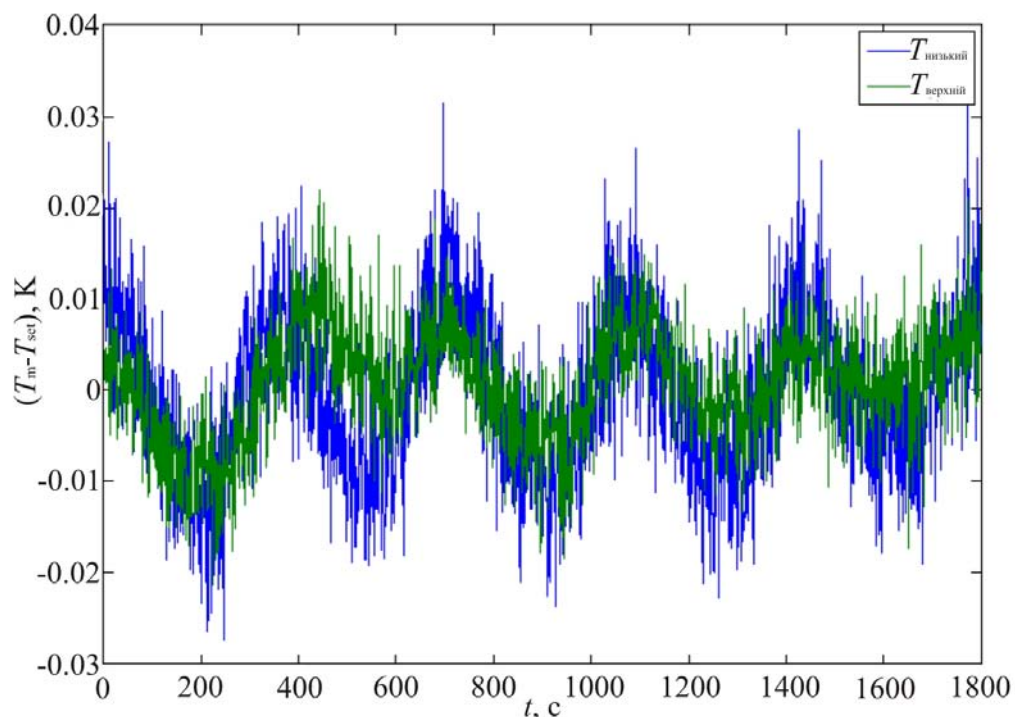


Рис. 4. Різниця температур між заданою температурою T_{set} і вимірюваними температурами поверхні T_m верхнього й нижнього усереднючого блока в стаціонарному режимі.

Осьовий розподіл температури

На рис. 5 показано осьовий розподіл температури в блоках під час калібрування за $T_{set} \sim 100$ °С з різницею температур $T_{upper} - T_{lower} = 100$ мК.

У кожному блоці розподіл температури описується квадратичною функцією. Відхилення лінійного розподілу викликане теплообміном відповідно з іншим блоком і втратами тепла через неідеальну ізоляцію. Розподіл температур на обох блоках є показником впливу теплових контактних опорів між датчиком теплового потоку й поверхнями блоків.

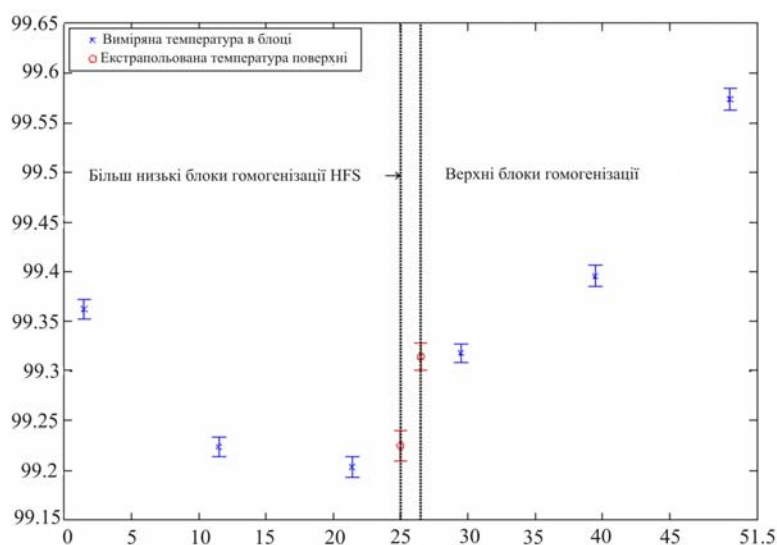


Рис. 5. Аксіальний розподіл температури від висоти $h=0$ мм (низ) до $h=51.5$ мм (верх) стенда за $T_{set} \sim 100$ °C і різниці температур $T_{upper}-T_{lower} = 100$ мК. Планки похибок показують стандартне відхилення температур (2500 точок даних).

Однорідність температурного поля

З метою визначення однорідності температурного поля по обидва боки від датчика теплового потоку використано термопару для вимірювання температур поверхні в декількох точках. Для цього було виготовлено макет датчика теплового потоку з радіальним пазом, у який встановлено термопара. Для кожної серії вимірювань макет повертався на 45°. З кожним кутовим поворотом термопару переміщувалася в пазу від центру назовні на 2.5 мм. Це вимірювання здійснювалось у стаціонарному режимі температур поверхні за 60 °C. Результати на рис.6 показують, що абсолютна різниця температур на кожній поверхні має величину 160 мК. Відмінність між вимірюваним температурним полем і типовим із градієнтом у радіальному напрямку можна пояснити формою нагрівачів. У зв'язку з нерівномірним притоком тепла температурне поле деформується, що було змодельовано методом кінцевих елементів (рис. 7).

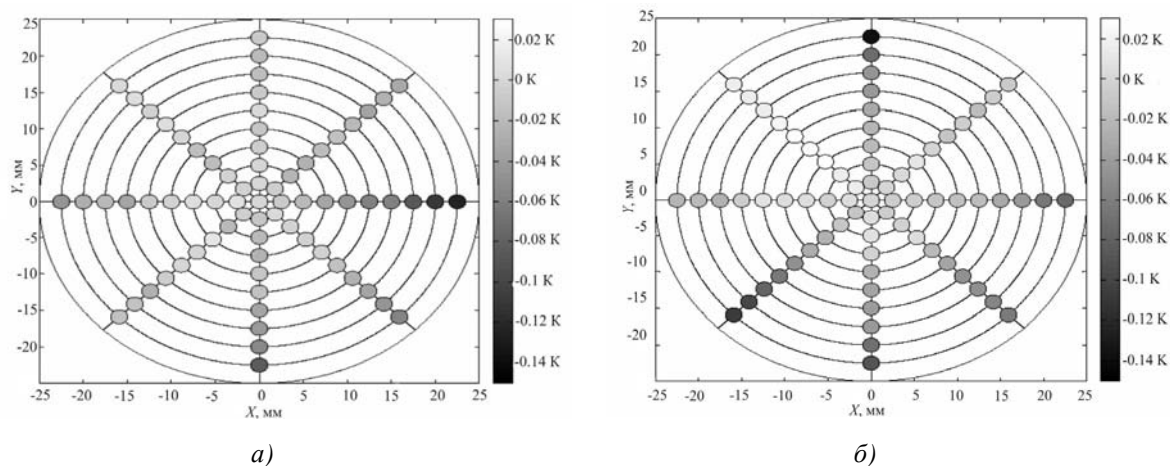


Рис. 6. Температурне поле на поверхні верхнього (а) і нижнього (б) усереднюючого блока за $T_{set} = 60$ °C; показано відмінність від екстрапольованої температури поверхні в центрі.

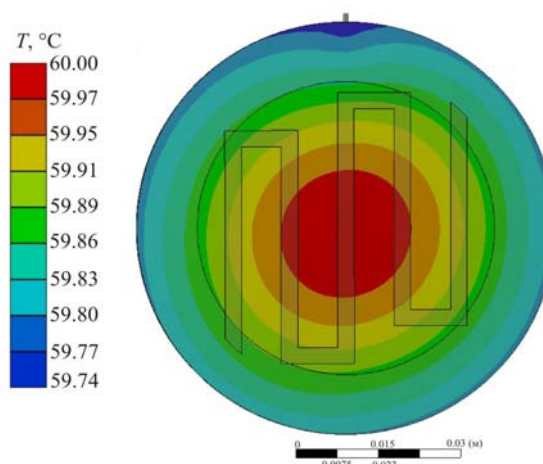


Рис. 7. Моделювання температурного поля методом кінцевих елементів, викликаного неоднорідним притоком тепла. Показано усереднюючий блок, нагрівник і положення датчика теплового потоку.

Результати калібрування

Датчики теплового потоку на основі термобатарей

У зв'язку із тривалим інтервалом інтегрування в кожній точці калібрування за однієї температури триває близько 5 годин. За цей час здійснюються виміри в 5 точках для калібрування (рис. 8, рис. 9).

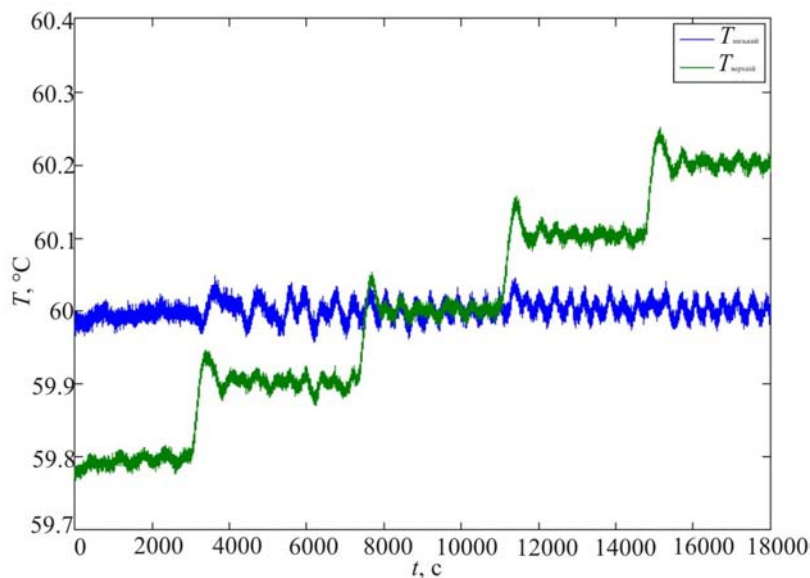


Рис. 8. Температури під час калібрування близько 60 °С.

Для визначення чутливості ці точки приводяться у відповідність із многочленом першого степеня методом найменших квадратів, що задовольняє рівнянню (3). Зсув відбувається в результаті температурних відмінностей, викликаних калібруванням термопари всередині усереднюючих блоків.

Значні відмінності між теоретичними й вимірюваними значеннями (табл. 4) викликані тепловими опорами між датчиком теплового потоку й поверхнями блоків. Ці опори ледь можуть бути виміряні, але також наявні в реальному обладнанні. У зв'язку з цим виміряні

чутливості можуть використовуватися в обладнанні, якщо властивості поверхні й контактні сили порівняні з умовами калібрування.

Таблиця 4

Вимірювана чутливість датчика теплового потоку на основі термобатарей

термобатерея	60 °C		100 °C		150 °C	
	$S(\Delta T)$, мкВК ⁻¹	$S(\dot{q})$, мкВВг ⁻¹ м ²	$S(\Delta T)$, мкВК ⁻¹	$S(\dot{q})$, мкВВг ⁻¹ м ²	$S(\Delta T)$, мкВК ⁻¹	$S(\dot{q})$, мкВВг ⁻¹ м ²
25 з наповнювачем	25.52	182.27	28.56	203.95	29.91	213.59
35 з наповнювачем	36.63	261.31	36.64	261.37	38.66	275.80
25 з наповнювачем	27.19	131.15	30.22	145.75	32.34	155.98
35 з наповнювачем	41.14	198.17	46.60	224.43	50.31	242.31

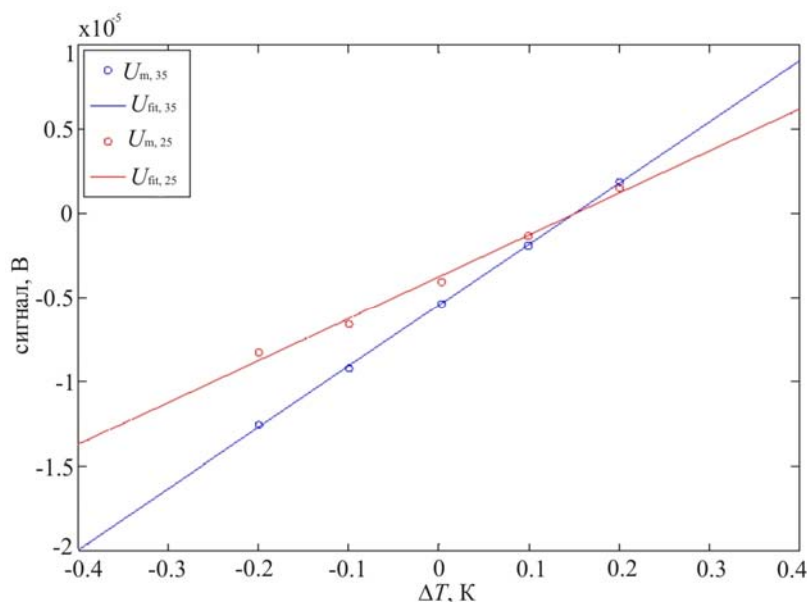


Рис. 9. Сигнали датчика під час калібрування близько 60 °C. U_m – вимірюваний сигнал кожної термобатарей, U_{fit} – апроксимований многочлен першого степеня, від якого вимірюється чутливість.

Відносна похибка E_r (17)

$$E_r = \frac{S_m - S_t}{S_t} \cdot 100 \quad (17)$$

вимірюваної чутливості S_m у порівнянні з теоретичної S_t (таблиця 5) показує, що відносна похибка знижується з підвищенням температури й відсутності наповнювача в датчику теплового потоку. Це свідчить про вплив контактного опору. Ці контактні опори проявляють більше впливу на чутливість, ніж теплопровідність через повітря або керамічний наповнювач. Крім того, вплив теплопередачі за рахунок випромінювання підсилюється за більш високих температур, коли між термобатарейми і поверхнею усереднюючих блоків є тільки повітря.

Таблиця 5

Відносна похибка чутливості

	60 °C	100 °C	150 °C
термобатерея	$E_r, \%$	$E_r, \%$	$E_r, \%$
25 з наповнювачем	-55.20	-51.27	-50.59
35 з наповнювачем	-54.02	-55.30	-54.32
25 з наповнювачем	-32.73	-27.34	-24.70
35 з наповнювачем	-27.20	-19.85	-16.22

Датчики теплового потоку на основі поперечного ефекту Зесбека

Для цього калібрування застосовувалася така ж температурна послідовність, як показано на рис. 8. Результати також показують зсув у зв'язку з калібруванням термопар усередині нормалізуючих блоків.

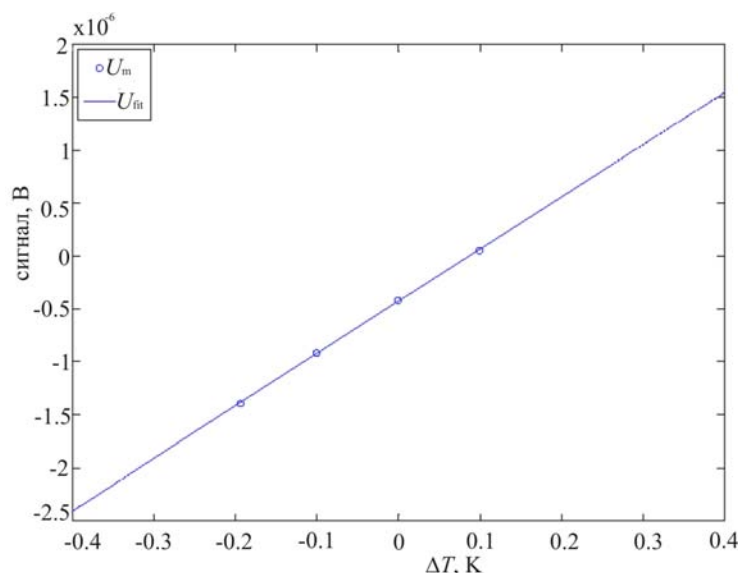


Рис. 10. Сигнали датчика за калібрування близько 60 °C. U_m – вимірюваний сигнал, U_{fit} – апроксимований многочлен першого ступеня, від якого вимірюється чутливість.

Вимірювані значення чутливості наведено в таблиці 6, де властивості матеріалу з табл. 2 використано для розрахунків $S(\dot{q})$. Значення перебувають в очікуваному діапазоні, і спостерігається зростання чутливості з підвищенням абсолютної температури.

Таблиця 6

Вимірювана чутливість датчика теплового потоку на основі поперечного ефекту Зесбека

60 °C		100 °C		150 °C	
$S(\Delta T),$ мкВК ⁻¹	$S(\dot{q}),$ нВВт ⁻¹ м ²	$S(\Delta T),$ мкВК ⁻¹	$S(\Delta T),$ нВВт ⁻¹ м ²	$S(\dot{q}),$ мкВК ⁻¹	$S(\Delta T),$ нВВт ⁻¹ м ²
4.93	0.68	5.50	0.75	6.09	0.83

Висновки й перспективи

Було розроблено, побудовано і випробовано новий стенд для калібрування датчиків теплового потоку. Виміряні теплові властивості стенда такі, як температурна стабільність, аксіальний і радіальний розподіли температури. Результати показують, що стенд може застосовуватися для калібрування датчиків теплового потоку за невеликих потоків тепла. Було відкалібровано два типи датчиків, і порівняння вимірних чутливостей з теоретичними значеннями показало, що кожний вимір датчиком теплового потоку необхідно ретельно перевіряти через теплові контактні опори. Першу серію калібрувань від 60 °С до 150 °С уже проведено, здійснюється випробування за температур аж до 400 °С.

Подяка. Автори висловлюють подяку Федеральному міністерству освіти й наукових досліджень Німеччини за фінансову підтримку VIP-проекту “Tempkal”, у рамках якого розроблений даний калібрувальний стенд.

Література

1. F.Arpinio, M.Dell’Isola, G.Ficco, L.Iacomini, V.Fernicola, Design of a Calibration System for Heat Flux Meters, *International Journal of Thermophysics* **32**(11-12), 2727-2734 (2011).
2. F.Bernhard (Ed.), *Technische Temperaturmessung* (Berlin: Springer-Verlag, 2004).
3. P.R.N.Childs, J.R.Greenwood, C.A.Long, Heat Flux Measurement Techniques. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* (1999), p. 655-677
4. Andrey V.Mityakov, Sergey Z.Sapozhnikov, Vladimir Y.Mityakov, Andrei A.Snarskii, Maxim I.Zhenirovsky, Juha J.Pyrhönen, Gradient Heat Flux Sensors for High Temperature Environments, *Sensors and Actuators A: Physical* **176**,1-9 (2012).
5. K.Fischer, C.Stoiber, A. Kyarad, H.Lengfellner, Anisotropic Thermopower in Tilted Metallic Multilayer Structures, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* **78**, 323-326 (2004).
6. DIN EN 60584-1: Thermopaare. Teil 1: Grundwerte der Thermospannung (1996)
7. ASTM, Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples, 2003.
8. O.Madelung and G.K.White (Ed.): *Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik: Gruppe III: Kristall- und Festkörperphysik. Bd. 15: Metalle: Elektronische Transportphänomene, Teilband c: Wärmeleitfähigkeit von reinen Metallen und Legierungen* (Berlin Heidelberg New York Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest: Springer, 1991).
9. J.R.Davis, *Heat-Resistant Materials*, ASM Specialty Handbook (Materials Park Ohio: ASM International, 1997).

Надійшла до редакції 19.02.2015