

## МЕТРОЛОГІЧНА АТЕСТАЦІЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ

Т.О. Лухтан, Д.П. Коломієць, С.І. Ковтун, Л.Й. Воробйов

---

### METROLOGICAL CERTIFICATION OF THERMOELECTRIC HEAT FLUX TRANSDUCER

T.A. Luhtan, D.P. Kolomiets, S.I. Kovtun, L.I. Vorobyov  
National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine  
Institute of Engineering Thermophysics of NASU

*Research thermoelectric heat flux transducer (TEHFT) type secondary wall. Have been analyzed the causes and consequences of spatial heterogeneity and described methods and settings for metrological certification TEHFT. Are the basic scheme and technique of the absolute method of determining individual static conversion function TEHFT.*

**Keywords:** *Thermoelectric heat flux transducer, heat flow, synergy analysis, metrological certification, an absolute method.*

---

**Вступ.** В низці національних та міждержавних стандартів України, зокрема в ДСТУ 3756-98 (ГОСТ 30619-98), ДСТУ 4035-2001 (ГОСТ 25380-2001), ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99), виконання теплових вимірювань регламентовано проводити із застосуванням термоелектричних перетворювачів теплового потоку (ТЕПТП).

Згідно ДСТУ 3756-98, конструктивно багатоелементний ТЕПТП є первинним перетворювачем, теплочутлива зона якого являє собою батарею термоелементів, виконану у вигляді плоскої стрічкоподібної спіралі, що залита неелектропровідним компаундом.

Спіраль виготовлена з основної електродної проволочки навитої на електроізоляційну каркасну стрічку з періодично нанесеним електролітичним способом покриттям іншого електродного матеріалу. При цьому границі переходу від основного електроду до покритих ділянок виконують роль з'єднань (спаїв) елементів термоЕРС. У даному разі термоелементи між собою з'єднані паралельно - за вимірюваним тепловим потоком, та послідовно - за електричним сигналом, що генерується при проходженні цього теплового потоку. Виготовлений ТЕПТП зазвичай має форму плоского диску або прямокутної пластини.

Функціональна здатність ТЕПТП базується на процесах розповсюдження енергії в його складових. Часто ці процеси проходять нерівномірно, з'являються нестійкості в їх динаміці, в результаті яких виникають просторові неоднорідності в розподілі по товщині та площі визначальних параметрів перетворювача, зокрема теплопровідності, температури, густини, концентрації компаунда тощо. Ці нестійкості проявляються у тому, що за часової еволюції одного з параметрів при його невеликому відхиленні (збуренні) спостерігається зміна цього збурення з частотою, що може експоненціально зростати чи спадати або набувати хвильового характеру. Зазвичай це є негативним явищем, яке призводить до зниження ефективності роботи пристрою, якості та надійності активних матеріалів, з яких він виготовлюється. Тому виявлення та розуміння причин виникнення таких нерівномірностей і, отже, їх обмеження та усунення є актуальною задачею, вирішення якої дозволить розробляти ТЕПТП вищої точності.

**Методи дослідження.** Для виявлення причин виникнення нерівномірностей з метою їх подальшого усунення і досягнення більшої ефективності роботи пристроїв пропонується використовувати метод синергетичного аналізу нелінійних явищ [1], що виникають в процесах перетворення енергії. Цей підхід полягає у визначенні параметрів, від яких залежить збурення, що має нерівномірний характер, наприклад коливальний, та виявленні таких значень параметрів, при яких коливальні процеси не будуть відбуватися.

Так, наприклад, при виготовленні ТЕПТП визначальними є процес затвердіння компаунду, який в значній мірі залежить від теплопровідності активних матеріалів та їх концентрація по об'єму перетворювача. Безпосередньо тут виникають нестійкості динаміки процесу, результатом якого є просторово неоднорідні дисипативні структури – наприклад, коливання температури чи густини. Тут доцільно розглянути систему рівнянь, що описують процес теплопровідності та дифузійні процеси формування структури компаунда при виготовленні ТЕПТП. При цьому система рівнянь термодифузії, нелінійно зв'язаної по джерелах  $F_T(T, u)$  і  $F_n(T, u)$  буде:

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \Delta T &= F_T(T, n); \\ \rho n \frac{\partial n}{\partial t} - D \Delta n &= F_n(T, n), \end{aligned} \quad (1)$$

За умов, що  $\lambda = \lambda(x, y, z)$  і  $D = D(x, y, z)$ , надавши невеликих збурень температурі ( $\delta T$ ) та концентрації ( $\delta n$ ), одержимо:

$$\begin{aligned} T &= T_0 + \delta T, \delta T = \delta T_a \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t); \\ n &= n_0 + \delta n, \delta n = \delta n_a \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t), \end{aligned} \quad (2)$$

де змінні з індексом "0" описують незбурений стан;  $\delta u_{1a}, \delta u_{2a}, \dots, \delta u_{na}$  – амплітуди збурень;  $\vec{k}$  – хвильовий вектор;  $\vec{r}$  – радіус-вектор,  $\omega$  – частота збурень, що визначає зміну параметру з часом;  $j^2 = -1$ .

Дисперсійне рівняння для  $\omega$  в загальному вигляді має вигляд:

$$P_n(\omega, k) = 0; P_n = a_n \omega^n + a_{n-1} \omega^{n-1} + \dots + a_0, \quad (3)$$

корені якого взагалі можуть бути комплексними, тобто  $\omega = \omega_r + j\omega_i$ . причому ненульові значення уявної складової визначають схильність до прояву автоколивань, оскільки

$$\exp(\omega t) = \exp(\omega_r + j\omega_i)t = \exp(\omega_r t) \exp(j\omega_i t) = \exp(\omega_r t) \cdot (\cos \omega_i t + j \sin \omega_i t). \quad (4)$$

Рішення рівняння (2) для  $\omega$  дає квадратичне рівняння вигляду:

$$a\omega^2 + b\omega + c = 0, \quad (5)$$

Оскільки в цьому випадку  $\omega$  є комплексним аргументом, то це свідчить про утворення автоколивань температури та теплопровідності, тобто наявні утворення нерівномірностей, які надалі повинні бути враховані при проведенні метрологічної атестації, обов'язковою для ТЕПТП, що є засобами вимірювальної техніки (ЗВТ).

Метрологічна атестація полягає у встановленні статичної функції перетворення та оцінки похибки її визначення [2]. Особливістю цих ЗВТ є те, що кожний конкретний ТЕПТП має свої функції перетворення та похибку її визначення, які знаходять експериментально при індивідуальній атестації.

Для визначення індивідуальної функції перетворення  $k$  встановлюють залежність між вхідним тепловим впливом  $q$  (у Вт/м<sup>2</sup>) на чутливий елемент ТЕПТП та його вихідним електричним сигналом  $E$  (у мВ):

$$k = q/E. \quad (6)$$

Метрологічну атестацію ТЕПТП проводять в стаціонарному режимі на стендах, в яких теплова енергія до чутливого елемента підводиться, як правило, за допомогою теплового випромінювання, тобто безконтактно, або кондуктивним шляхом, тобто контактено. Так, у спеціалізованій установці РГУ-2 реалізовано порівнювальний метод визначення коефіцієнта перетворення ПТП при радіаційному способі завдання теплового потоку нормованого значення. Метод полягає в тому, що теплове випромінювання з фіксованим значенням поверхневої густини теплового потоку від джерела теплового випромінювання одночасно підводиться до еталонного та атестованого ПТП, які розташовані на спільному термостатованому теплоспліві в зоні одномірного теплового потоку. При цьому забезпечені рівновіддаленість теплоприймальних поверхонь обох ТЕПТП від джерела теплового випромінювання та однакові значення їх коефіцієнтів поглинання інфрачервоного випромінювання. Індивідуальна статична функція перетворення ТЕПТП з огляду на рівність значень густини потоку теплового випромінювання, сприйнятого поверхнями еталонного та атестованого ТЕПТП знаходиться із співвідношення:

$$k = \frac{k_e E_e}{E}, \quad (7)$$

де  $k_e$ ,  $E_e$  – коефіцієнт перетворення та значення вихідного сигналу еталонного ТЕПТП.

Визначення значень функції перетворення виконують в п'яти точках діапазону вимірювання, що відповідають певним фіксованим значенням густини теплового потоку з робочого діапазону вимірювання. За значення коефіцієнта перетворення ТЕПТП, атестованого у вибраному діапазоні густини теплового потоку, приймається середнє арифметичне значення отриманих даних. Похибка вимірювання в даному випадку не перевищує  $\delta < \pm 4\%$ .

Атестація ТЕПТП на РГУ-2 так само, як і майже на всіх інших радіаційних стендах, можлива лише при одному значенні температури і проводиться для ТЕПТП, які працюють в нормальних умовах.

Для визначення індивідуальної функції перетворення ТЕПТП, що призначені для роботи в широкому діапазоні температур, більш прийнятною є атестація з кондуктивним підведенням теплової енергії. Такий метод атестації зводиться до того, що ТЕПТП, який атестується, розташовують з надійним контактом між відповідними поверхнями джерела (нагрівача) і стоку теплоти (холодильника). При цьому теплова енергія від джерела теплоти передається крізь ТЕПТП теплопровідністю і тим краще, чим надійніше забезпечено тепловий контакт дотичних поверхонь.

**Результати досліджень.** В в ІТТФ НАН України розроблена установка (рис. 1), де реалізовано абсолютний метод визначення індивідуальної статичної функції перетворення ТЕПТП при кондуктивному способі підведення нормованого значення поверхневої густини теплового потоку. Тут в якості джерела теплоти застосовано ізотермічний нагрівач 2, що забезпечує на теплосприймаючій поверхні ТЕПТП 1 рівномірну постійну температуру. Рівномірність теплового потоку на виході з цього ТЕПТП досягається шляхом виготовлення теплостоку 3 з високотеплопровідного металу.

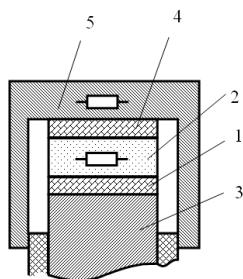
Для реалізації методу атестації в пристрої передбачений допоміжний 4 ТЕПТП, значення сигналу якого підтримують на нульовому рівні за рахунок роботи охоронного нагрівача 5. За дотримання означених умов весь тепловий потік від основного нагрівача

2 направляється в ТЕПТП, що атестується. Це дозволяє визначити індивідуальну статичну функцію перетворення атестованого ТЕПТП площею  $F$  за результатами прямих вимірювань його термоЕРС при заданій постійній електричній потужності  $W$ , яка підводиться до нагрівача 2, за формулою:

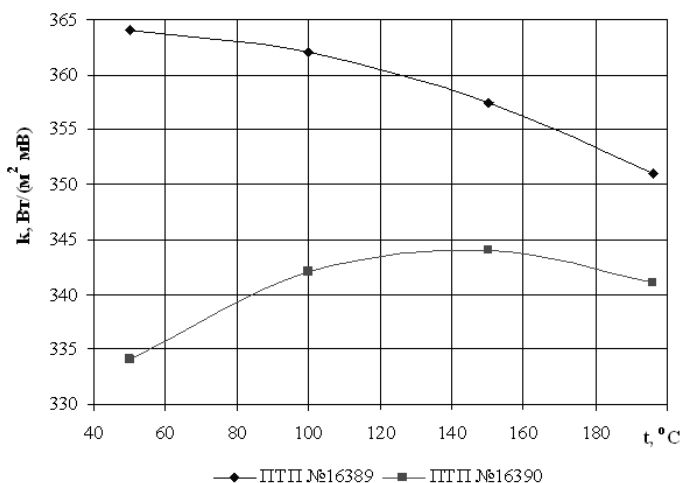
$$k = \frac{W}{E \cdot F} \quad (8)$$

Далі, визначивши значення коефіцієнта перетворення в фіксованих точках діапазону робочої температури, отримують залежність індивідуальної статичної функції перетворення ТЕПТП від температури -  $k = f(T)$ .

На рис. 2 наведені результати досліджень залежності індивідуальних статичних функцій перетворення від температури для двох перетворювачів типу ПТП-1Б.18.2.1.11.Д.00.1.56.00.0-20, які призначені для вимірювання теплових навантажень на головний обтікач ракети-носія під час виходу на орбіту і повинні функціонувати при температурі до 200 °С. Як бачимо, внаслідок нестійкості динаміки структур активних матеріалів на етапі виготовлення, коефіцієнти перетворення однотипних датчиків за різних температур можуть відрізнятись між собою від 3 до 9 %.



**Рис.1.** Схема атестаційної комірки.



**Рис.2.** Результати метрологічної атестації перетворювачів типу ПТП-1Б.18.2.1.11.Д.00.1.56.00.0-20.

### Висновки.

1. Обмеження або взагалі усунення процесів автоколивань дисипативних структур при виготовленні ТЕПТП виду допоміжної стінки зменшать появу просторових неоднорідностей по товщині виробу та покращать його номінальні статичні характеристики перетворення.

2. Розглянуті вище методи та установки дають змогу проводити метрологічні атестації та періодичні повірки широкої номенклатури ТЕПТП виду допоміжної стінки.