

## УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ БАТАРЕИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

*Розроблено установку для попереднього визначення чутливості спіралі біметалевих термоелементів та для експрес-визначення коефіцієнта перетворення перетворювачів теплового потоку.*

*Разработана установка для предварительного определения чувствительности спирали биметаллических термоэлементов и для экспрес-определения коэффициента преобразования преобразователей теплового потока.*

*Device for preliminary definition of a bimetallic thermoelements coil sensitivity and for express-definition of heat-flow meters transformation factor is developed.*

$d$  – диаметр, м;  
 $E$  – выходной сигнал ПТП, мВ;  
 $f$  – площадь сечения, м<sup>2</sup>;  
 $h$  – толщина ПТП, м;  
 $K$  – коэффициент преобразования, Вт/(м<sup>2</sup>·мВ);  
 $L$  – длина отрезка спирали, м;  
 $n$  – плотность навивки термоэлектродного провода, витков/м;  
 $q$  – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $S$  – чувствительность ПТП, мВ·м<sup>2</sup>/Вт;  
 $T$  – температура, °С или К;  
 $\alpha$  – термоэлектрический коэффициент Зеебека, мВ/К;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  
 $\theta$  – поправочный коэффициент;  
 $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;  
 $\Phi$  – формпараметр.

### Индексы:

к – контрольный;  
пТП – преобразователь теплового потока;  
сп – спираль;  
эл – элемент спирали;  
эт – эталонный.

### Сокращения:

ПТП – преобразователь теплового потока.

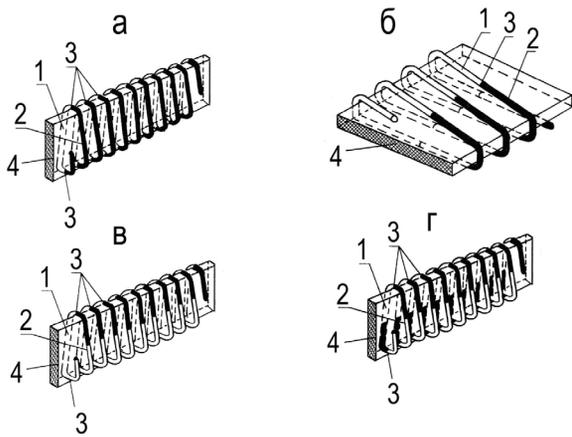
В настоящее время наибольшее распространение в практике измерений теплового потока (или его поверхностной плотности), сопровождающего различные физические и биологические процессы как в научных экспериментах, так и в производственных условиях, получили термоэлектрические преобразователи теплового потока (ПТП) по ГОСТ 30619-98 (ДСТУ 3756-98) [1].

В ИТТФ НАН Украины разработаны и выпускаются преобразователи различных моделей и габаритов, учитывающих особенности контролируемого объекта и условий эксплуатации [2]. Также ПТП являются неотъемлемой частью разработанных в ИТТФ НАН Украины приборов и установок для исследования различных теплофизических характеристик материалов и теплоэнергетического оборудования [3 – 5] и служат первичными термоэлектрическими преобразователями теплового потока в электрический сигнал

постоянного тока.

ПТП изготавливают в виде вспомогательной стенки, состоящей из батареи идентичных гальванических термоэлементов, включенных параллельно по измеряемому тепловому потоку и последовательно по генерируемому электрическому сигналу. Монолитность обеспечивается заливочным электроизоляционным компаундом в жестком или гибком исполнении [6].

В основу конструкции ПТП положена ленточная спираль из термоэлектродной проволоки с дискретно нанесенным покрытием парного термоэлектродного материала, навитой на каркасную ленточку из электроизоляционной пленки. Границы перехода от основного термоэлектрода к покрытым участкам являются спаями термоэлементов. На рис.1 приведены схемы спиральных батарей биметаллических термоэлементов, которые в различных сочетаниях используются при изготовлении ПТП [7].



**Рис.1. Схемы спиральных батарей биметаллических термоэлементов:**

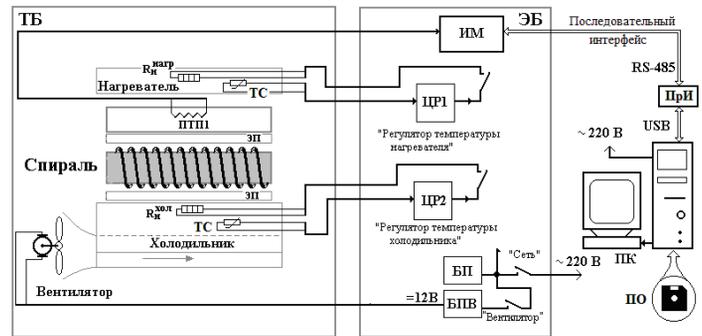
1 – основной термоэлектрод; 2 – биметаллический термоэлектрод (участок основного термоэлектрода с нанесенным покрытием); 3 – спай термоэлектродов; 4 – каркасная полоска электроизоляционной пленки.

Для изготовления ПТП с заданными техническими параметрами необходимо предварительно знать чувствительность термобатареи, чтобы корректно определить длину спиралей для его изготовления, а также выявить на ранней стадии технологического процесса части спирали термоэлементов, которые не соответствуют предъявляемым им параметрам. Чувствительность ПТП или обратная величина – коэффициент преобразования определяют взаимосвязь между измеряемой поверхностной плотностью теплового потока и выходным сигналом ПТП:

$$q = \frac{E_K}{S} = K_{\text{ПТП}} \cdot E \quad (1)$$

Решение этих задач потребовало разработки специального устройства для предварительного определения чувствительности спирали термоэлементов (далее по тексту контролируемая спираль) еще до укладки ее в матрицу, на которой осуществляют формование плоского ПТП. Установка, функционально-структурная схема которой приведена на рис. 2, представляет собой совокупность функционально объединенных теплового блока (ТБ), в котором размещают образец исследуемой спирали термоэлементов и обеспечивают требуемые температурный и тепловой режимы, и электронного блока (ЭБ), содержащего средства регулирования тепловых режимов, приема и обработки первичной измерительной информации и передачи ее с использованием последовательного интерфейса USB / RS-485 в персональный компьютер (ПК) для дальнейшей

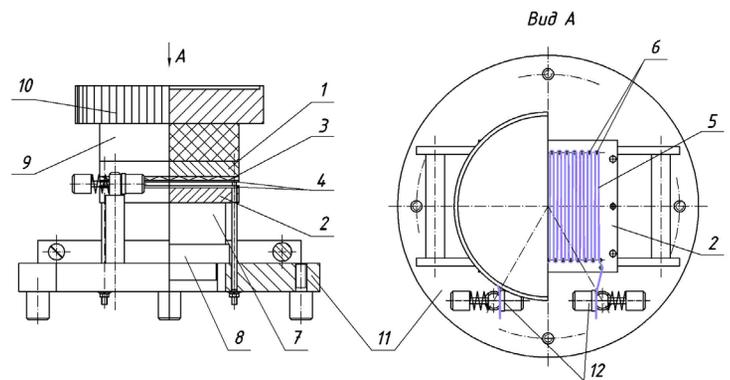
обработки по соответствующей программе.



**Рис. 2. Функционально-структурная схема установки для предварительного тестирования батареи термоэлементов ПТП:**

ТБ – тепловой блок: ПТП – преобразователь теплового потока; ЭП – эластичные прокладки; ТС – термометры сопротивления;  $R_{\text{НАГР}}$ ,  $R_{\text{ХОЛ}}$  – нагревательные элементы; ЭБ – электронный блок: ИМ – измерительное микроконтроллерное устройство; ЦР1, ЦР2 – цифровые регуляторы температуры; БП – блок питания ЭБ; БПВ – блок питания вентиляторов; При – преобразователь интерфейсов USB / RS-485; ПК – персональный компьютер; ПО – программное обеспечение.

Принцип работы ТБ установки, конструктивная схема которого приведена на рис.3, состоит в организации постоянного однонаправленного теплового потока через термоэлементы спирали.



**Рис. 3. Конструктивная схема теплового блока установки для предварительного тестирования батареи термоэлементов ПТП:**

1 – нагреватель верхний; 2 – нагреватель нижний; 3 – контрольный ПТП; 4 – силиконовые прокладки; 5 – спираль термоэлементов; 6 – штырьки для фиксирования поворотов спирали; 7 – радиатор (тепlostок); 8 – вентилятор; 9 – слой теплоизоляции; 10 – груз; 11 – основание; 12 – электрические контакты.

## 11 – основание; 12 – фиксатор спирали.

ТБ установки содержит два электрических плоских нагревателя: верхний 1 и нижний 2, между которыми помещают спираль термоэлементов. На нижнюю поверхность верхнего нагревателя 1 последовательно приклеены контрольный ПТП 3 с известной градуировочной характеристикой и силиконовая прокладка 4. Такая же силиконовая прокладка приклеена на верхнюю поверхность нижнего нагревателя 2.

Между силиконовыми прокладками 4 зажимают контролируемую спираль термоэлементов 5, предварительно уложенную на поверхности нижнего нагревателя с фиксацией поворотов спирали на специальных штырьках 6.

Нижний нагреватель 2 приклеен к радиатору 7, выполняющему роль теплостока. Отведение теплоты от радиатора осуществляется вентилятором 8.

Нагреватель 1 сверху изолирован слоем теплоизоляции 9 для предотвращения тепловых утечек и снабжен грузом 10 для обеспечения теплового контакта со слоями термоэлементов спирали. Тепловой блок установки смонтирован на основании 11.

Путем электронного регулирования температуры поверхностей обоих электронагревателей 1 и 2 разность значений их температуры ( $T_1$  и  $T_2$ ) поддерживается постоянной:  $T_1 - T_2 = \text{const} > 0$ . Благодаря этому через контролируемые термоэлементы проходит однопольный тепловой поток. Из сравнения измеряемых сигналов контрольного ПТП и спирали термоэлементов находят коэффициент преобразования отрезка спирали при условии, что площадь, по которой распределились термоэлементы, равна площади нагревателя:

$$K_{\text{СП}} = \frac{E_{\text{К}} \cdot K_{\text{К}}}{E_{\text{СП}}}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{СП}}$  – коэффициент преобразования отрезка спирали;

$E_{\text{К}}$  – сигнал контрольного ПТП;

$K_{\text{К}}$  – коэффициент преобразования контрольного ПТП;

$E_{\text{СП}}$  – сигнал отрезка спирали.

Далее, если это необходимо, рассчитывают средний коэффициент преобразования одного термоэлемента, исходя из известной длины спирали  $L$  и плотности навивки  $n$  парного термоэлектродного провода на каркас:

$$K_{\text{ЭЛ}} = \frac{E_{\text{СП}}}{L \cdot n}, \quad (3)$$

где  $K_{\text{ЭЛ}}$  – средний коэффициент преобразования одного термоэлемента.

Для пересчёта ожидаемого коэффициента преобразования ПТП через коэффициент преобразования спирали необходимо знать поправочный коэффициент  $\theta$ , который рассчитывается по следующему соотношению:

$$\theta = K_{\text{ПТП}}/K_{\text{СП}} = \left( 2 + \frac{\lambda_2 f_2}{\lambda_1 f_1} + \frac{\lambda_{3\text{К}} f_3}{\lambda_1 f_1} \right) / \left( 2 + \frac{\lambda_2 f_2}{\lambda_1 f_1} + \frac{\lambda_{3\text{В}} f_3}{\lambda_1 f_1} \right), \quad (4)$$

где индексы обозначают:

- 1 – основной материал проволоки,
- 2 – гальванически наносимый материал,
- 3К – заливочный компаунд,
- 3В – воздух.

Зависимость (4) получена с использованием формулы для расчета коэффициентов преобразования ПТП  $K_{\text{ПТП}}$  и спирали  $K_{\text{СП}}$  [8]:

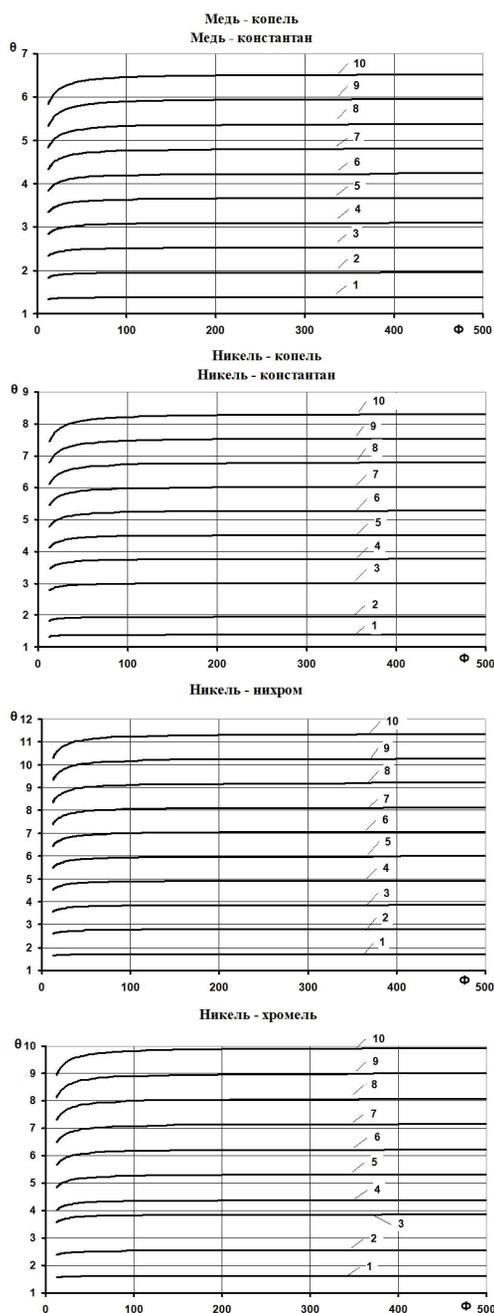
$$K = \frac{\lambda_1}{\alpha_1 - \alpha_2} \times \left( 2 + \frac{\lambda_2 f_2}{\lambda_1 f_1} + \frac{\lambda_3 f_3}{\lambda_1 f_1} \right) \times \left( 1 + \frac{\rho_2 f_1}{\rho_1 f_2} \right) \times \frac{f_1}{f_{\text{ПТП}} \cdot h}, \quad (5)$$

где  $f_{\text{ПТП}}$  – площадь поверхности датчика.

На рис. 4 приведены графики зависимости поправочных коэффициентов  $\theta$  от формпараметра  $\Phi = (2f_1 + f_2 + f_3)/f_1$  при различных значениях коэффициента теплопроводности заливочного компаунда для материалов основного термоэлектродного провода и парного термоэлектродного материала, которые наиболее часто используются при изготовлении ПТП.

Используя поправочный коэффициент  $\theta$  (рис. 4), находят ожидаемый коэффициент преобразования ПТП для выбранной гальванической пары.

Установка для предварительного тестирования батареи термоэлементов преобразователей теплового потока также позволяет определить коэффициент преобразования уже изготовленного ПТП с погрешностью не более 10 % за 5...10 минут, что позволяет выявить некачественные ПТП до проведения их метрологической аттестации, которая занимает значительное количество времени. Для этого необходимо провести серию из двух последовательных измерений: первое проводится с эталонным ПТП, второе выполняется с идентичным по геометрическим параметрам тестируемым ПТП, коэффициент которого определяется по следующей формуле:



**Рис. 4. Графики зависимости поправочных коэффициентов  $\theta$  от формпараметра  $\Phi$  для различных значений коэффициента теплопроводности  $\lambda$  заливочного компаунда:**

$\lambda = 1 - 0,1; 2 - 0,2; 3 - 0,3; 4 - 0,4; 5 - 0,5; 6 - 0,6; 7 - 0,7; 8 - 0,8; 9 - 0,9; 10 - 1,0.$

$$K_{\text{ПТП}} = \frac{K_{\text{ЭТ}} \cdot E_{\text{ЭТ}} \cdot E_{\text{К}}}{E_{\text{ПТП}} \cdot E_{\text{К}}^{\text{ЭТ}}}, \quad (5)$$

где  $K_{\text{ЭТ}}$  – коэффициент преобразования эталонного ПТП;

$E_{\text{ЭТ}}$  – сигнал эталонного ПТП;  
 $E_{\text{К}}^{\text{ЭТ}}$  – сигнал контрольного ПТП при измерении сигнала эталонного ПТП;  
 $E_{\text{ПТП}}$  – сигнал тестируемого ПТП.

### Выводы

1. Создана установка для предварительного тестирования батареи термоэлементов преобразователей теплового потока, позволяющая сократить время и материальные затраты при изготовлении ПТП.

2. Установка позволяет провести экспресс-определение коэффициента преобразования изготовленного ПТП до проведения его метрологической аттестации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 30619-98 (ДСТУ 3756-98) Энергосбережение. преобразователи теплового потока термоэлектрические общего назначения. Общие технические условия.

2. Приборы для теплофизических измерений: Каталог/ Ин-т проблем энергосбережения АН УССР – Киев: Час, 1991. – 56 с.

3. Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива // Инженерно-физический журнал, т. 70, №5. – 1997. – С. 828-839.

4. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И. Комплекс аппаратуры для измерения и регистрации тепловых параметров пламени / Пром. теплотехника, т. 24, №1.– 2002. – С. 113-116.

5. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Воробьев Л.И. Полостной приемник теплового излучения // Пром. теплотехника, т. 24, №4. – 2002. – С. 89-92.

6. Геращенко О.А., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. Методика конструирования оптимальных преобразователей теплового потока // Проблемы энергосбережения. – 1990, вып. 3. – С. 36-42.

7. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И. Измерения теплового потока и их стандартизация в Украине // Светопрозрачные конструкции. – С.-Петербург, 2009. – № 4 (66). – С. 10-14.

8. Геращенко О.А. Основы теплотрии. – К.: Наук. думка, 1971. – 192 с.