

УДК 537.32

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}
Кобилянський Р.Р., *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}
Лисько В.В., *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}
Прибила А.В., *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}
Константинович І.А., *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}
Кобилянська А.К., *канд. фіз.-мат. наук*¹
Гаврилюк М.В.^{1,2}
Бойчук В.В.²

¹ Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна
e-mail: anatykh@gmail.com

МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ СЕНСОРІВ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У даній роботі представлено результати створення експериментального стенду для калібрування термоелектричних датчиків теплового потоку та аналізу їхніх метрологічних властивостей. Розроблені процедури калібрування як для одного, так і для двох датчиків одночасно. Також було створено та випробувано новий тип термоелектричних датчиків, які здатні одночасно вимірювати температуру та тепловий потік на поверхні тіла людини.

Ключові слова: калібрувальний стенд, термоелектричний датчик, тепловий потік, вольт-ватна чутливість.

Вступ

Для оцінки локального теплового випромінювання на поверхні тіла людини використання термоелектричних датчиків є дуже перспективним [1 – 4]. Сучасні термоелектричні датчики теплового потоку, створені на базі високоефективних напівпровідникових матеріалів, відрізняються високою чутливістю, швидкою реакцією, технологічністю, оптимальними масо-габаритними характеристиками, високою надійністю та низькою вартістю [5 – 16]. Ці датчики легкі у обслуговуванні та здатні проводити безперервний моніторинг теплового випромінювання організму людини [17 – 31], а також виявляти втрати тепла на віддалених теплових магістралях.

Питання калібрування термоелектричних датчиків теплового потоку, які застосовуються в пристроях для вимірювання інтегральних теплових потоків біологічних об'єктів, втрат через будівельні елементи, теплозахисні матеріали та на ділянках теплових мереж, залишається актуальним. Зазвичай калібрування цих датчиків виконується за абсолютним методом, що включає використання запірного нагрівача та диференційних термопар як індикаторів нульового перепаду температур [32, 33]. Однак, таке калібрування вимагає підвищення точності вимірювань, оскільки ці датчики є засобами виміральної техніки. Підвищення точності

можливе за рахунок використання додаткового високочутливого термоелектричного датчика теплового потоку [34 – 40].

Отже, основною метою роботи є створення експериментального стенду для калібрування термоелектричних датчиків теплового потоку за вдосконаленою методикою, а також аналіз їх метрологічних властивостей.

1. Структура експериментального стенду для калібрування термоелектричних датчиків теплового потоку (ДТП)

Для аналізу метрологічних параметрів та калібрування термоелектричних датчиків теплового потоку (ДТП) у температурному діапазоні від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ була створена конструкція стенду, представлена на рис. 1.

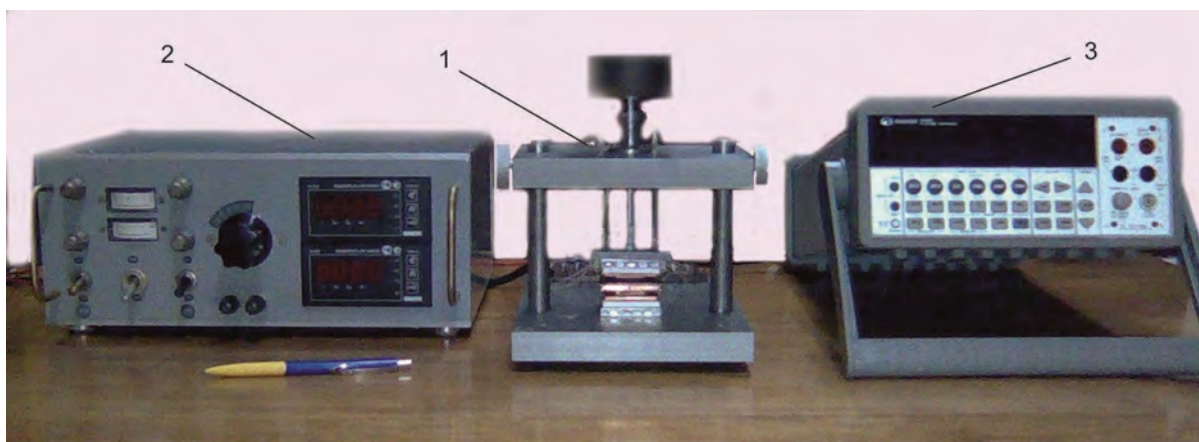


Рис. 1. Візуальний огляд стенду для аналізу метрологічних властивостей та калібрування термоелектричних датчиків теплового потоку (ДТП).

Стенд включає в себе вимірювальний блок 1, блок управління 2 та вимірювальний інструмент 3 (високоточний цифровий мультиметр). Вимірювальний блок 1 оснащений алюмінієвою платформою, на якій встановлені рідинні теплообмінники, пристрій для притискання та комутаційна колодка. Між гарячим та холодним теплообмінниками можуть бути розміщені один або два ДТП, що досліджуються.

Схематичне зображення вимірювального блоку 1 представлено на рис. 2.

Як можна побачити на рисунках 1 та 2, на нижній базі алюмінієвої платформи та на підвісці верхньої бази вимірювального блоку 1 встановлені два ідентичні теплообмінні модулі, призначені для відведення тепла – холодні теплообмінники. Ці теплообмінники є реверсивними, оскільки засновані на термоелектричних охолоджувачах (ТЕО) з рідинним відведенням тепла, і можуть функціонувати як у режимі охолодження, так і у режимі нагрівання залежно від напрямку протікання електричного струму. На робочій стороні ТЕО закріплені мідні пластини для вирівнювання тепла з вбудованими датчиками температури – платиновими термометрами опору. Ці пластини мають відшліфовану з високим ступенем чистоти плоску поверхню – робочу площадку, на якій розміщується досліджуваний ДТП. Протилежна сторона ДТП контактує з гарячим теплообмінником – плоским нагрівником, який має дві відшліфовані робочі поверхні (верхню та нижню). Плоский нагрівник виготовлений достатньо тонким, щоб мінімізувати площу його бічної поверхні та забезпечити рівномірний прогрів по всьому об'єму. У корпусі цього нагрівника також вмонтовано датчик температури – платиновий термометр опору.

Використання платинових датчиків температури дозволяє точно вимірювати та контролювати температуру робочих площадок теплообмінників за допомогою терморегуляторів з точністю до $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ у температурному діапазоні від -30 до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

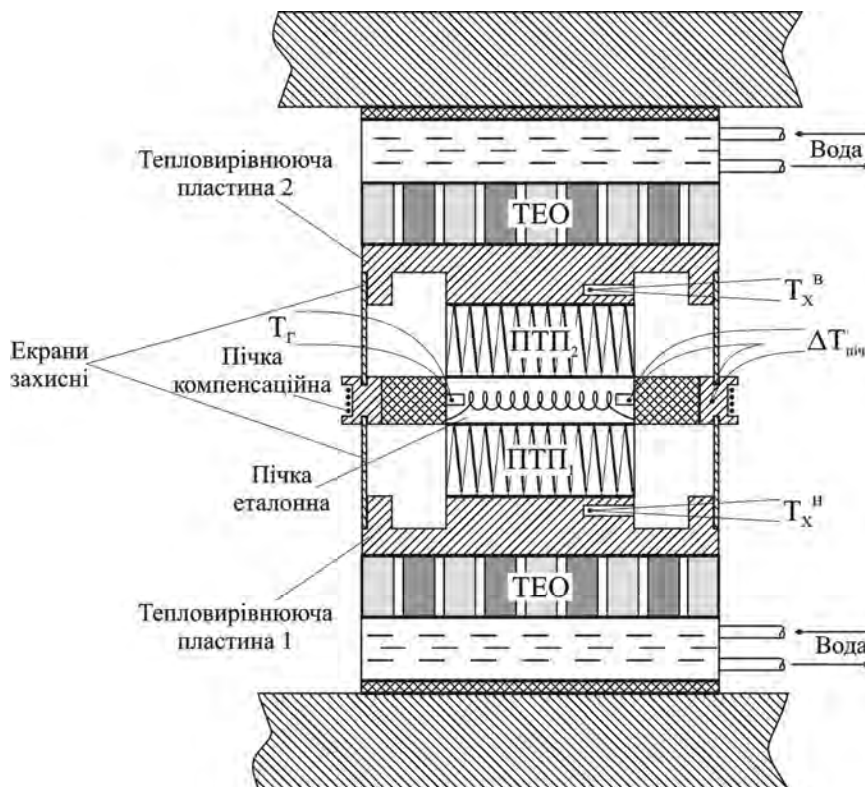


Рис. 2. Схематичне зображення вимірювального блоку стенду для калібрування термоелектричних датчиків теплового потоку (ДТП).

Так як бічна поверхня гарячого теплообмінника не включена в процеси теплообміну з ДТП і може бути джерелом теплових втрат, було встановлено кільцевий захисний нагрівник для мінімізації цих втрат. Основне завдання цього нагрівника полягає у підтриманні температури, яка відповідає температурі гарячого теплообмінника. Регулювання температури здійснюється за допомогою диференційної термопари, яка підключена до вільного каналу терморегулятора. Терморегулятор налаштований таким чином, що відповідне регулювання напруги живлення на нагрівник кільцевої захисної пічки забезпечує нульовий сигнал термопари, що сприяє адіабатичній ізоляції бічної поверхні гарячого теплообмінника.

Кільцевий захисний нагрівник також відіграє важливу роль у передачі своєї температури захисному екрану, розташованому навпроти бічної поверхні досліджуваного ДТП. На нижній та верхній поверхнях кільцевого захисного нагрівника виконані профрезеровані шанці, в які вставляються "гарячі" кінці захисних екранів. "Холодні" кінці цих екранів знаходяться у тепловому контакті з робочими площадками холодних теплообмінників. Це створює градієнт температури на поверхнях захисних екранів у вертикальному напрямку, що відповідає температурі на бічній поверхні ДТП, забезпечуючи таким чином, що під час калібрування ДТП тепло не розсіюється в навколишнє середовище.

У стенді використовуються два холодні теплообмінники, що дозволяє одночасно проводити парне порівняльне градування двох ДТП. Коли градується лише один ДТП, другий холодний теплообмінник функціонує як додатковий захисний нагрівник. На ньому за допомогою

терморегулятора встановлюється температура, аналогічна температурі гарячого теплообмінника, що забезпечує адіабатичний захист від теплових втрат з незадіяної поверхні гарячого теплообмінника. Управління процесом термостатування всіх теплообмінників здійснює блок керування 2, який включає в себе регульовані блоки живлення для ТЕО та нагрівників, два двоканальні мікропроцесорні терморегулятори РЕ-202, комутаційні елементи та контрольні клеми для вимірювань.

Всі електричні з'єднання з вимірювального блоку 1 збираються на клемній колодці і через кабель підключаються до блоку керування 2. До цього блоку також підключений вимірювальний прилад – високоточний цифровий мультиметр М3500, який має можливість передавати результати вимірювань на персональний комп'ютер у реальному часі. Така конфігурація стенду дозволяє ефективно проводити градування термоелектричних ДТП та досліджувати їх метрологічні характеристики в динаміці.

2. Процедура калібрування одного термоелектричного датчика теплового потоку (ДТП)

Використовуючи спеціалізований стенд, зображений на рис 1, калібрування одного термоелектричного датчика теплового потоку (ДТП) проводиться за такою процедурою:

- З'єднати вимірювальний блок 1 з блоком керування 2;
- Підключити вхідний кабель вимірювального приладу 3 до відповідних клем на блоку керування 2;
- Приєднати шланги системи рідинного охолодження ТЕО до водопровідної магістралі, відкрити водопостачання та активувати систему охолодження;
- Підняти та зафіксувати у верхньому положенні верхній холодний теплообмінник;
- Розмістити досліджуваний ДТП на робочій поверхні нижнього холодного теплообмінника;
- Підключити виводи досліджуваного ДТП до відповідних клем на комутаційній колодці;
- Встановити нижній захисний екран;
- Розмістити гарячий теплообмінник з кільцевим захисним нагрівачем на ДТП та на верхній край захисного екрану;
- Встановити верхній захисний екран;
- Опустити верхній холодний теплообмінник так, щоб його тепловирівнююча пластина торкалася верхнього захисного екрану, при цьому сила притиску регулюється за допомогою наважок;
- На терморегуляторах блоку керування 2 налаштувати температуру нижнього холодного теплообмінника.
- На блоку керування 2 встановити перемикач вимірювань у положення "Напруга нагрівника". Включити вимірювальний прилад 3 та переключити його в режим "Напруга постійного струму" з автоматичним вибором діапазону. Використовуючи формулу

$$W = U^2 \cdot R$$

(де R – опір нагрівника), визначте напругу, яка має бути встановлена на нагрівнику гарячого теплообмінника для досягнення необхідної електричної потужності в діапазоні від 10 мВт до 1 Вт.

- Слідкуючи за індикатором "температура гарячого теплообмінника" на відповідному каналі терморегулятора, який функціонує у режимі температурного датчика, і чекаючи на стабілізацію цієї температури, встановіть ідентичне значення температури на верхньому холодному теплообміннику. Температура кільцевого нагрівника при цьому автоматично регулюється;

- Встановіть перемикач на блоку керування 2 у положення "термоЕРС ДТП";
- Після того, як температури на стаціонарних теплообмінниках досягнуть заданих значень, виміряйте величину термоЕРС термоелектричного ДТП;
- Послідовно переключайте перемикач вимірювань у положення "Напруга нагрівника гарячого теплообмінника" та "Струм нагрівника гарячого теплообмінника", щоб точно визначити відповідні електричні параметри.
- Обчислити потужність нагрівника, використовуючи наступну формулу:

$$W = U \cdot I. \quad (2)$$

- Обрахувати вольт-ватну чутливість термоелектричного ДТП, використовуючи задану математичну формулу:

$$v = \frac{E}{W}. \quad (3)$$

3. Процедура калібрування двох термоелектричних датчиків теплового потоку (ДТП)

Парне калібрування двох термоелектричних датчиків теплового потоку (ДТП) одночасно виконується тільки для однакових зразків. Цей процес відрізняється від калібрування одного ДТП тим, що на гарячому теплообміннику розміщується другий ДТП зверху. Виводи цього другого ДТП підключаються до відповідних клем на вимірювальному блоці 1, а вимірювання сигналу термо-ЕРС ДТП проводиться з використанням відповідного положення перемикача вимірювань на блоку керування 2.

На верхньому холодному теплообміннику встановлюється така ж температура, як і на нижньому, за допомогою терморегулятора. Електрична потужність, що виділяється на гарячому теплообміннику, розподіляється порівну між двома ДТП і розсіюється через два холодних теплообмінники. Оскільки температури гарячих сторін обох ДТП є спільними, а температури холодних сторін однакові та контролюються терморегулятором, вольт-ватні чутливості кожного з ДТП можуть бути обчислені за допомогою наступних формул:

$$v_1 = \frac{2 \cdot E_1}{W}, \quad (4)$$

$$v_2 = \frac{2 \cdot E_2}{W}. \quad (5)$$

де E_1 та E_2 – це значення термо-ЕРС для першого та другого досліджуваних ДТП відповідно. Число "2" у чисельнику формули виникає через те, що загальна потужність, що виділяється на гарячому теплообміннику, розділяється порівну між двома ДТП, тому для кожного з них використовується половинне значення потужності. Таким чином, вольт-ватні чутливості кожного з ДТП можуть бути обчислені за допомогою наступного виразу:

$$W_1 = W_2 = \frac{W}{2}. \quad (6)$$

4. Результати вимірювань параметрів ДТП

У результаті модифікації геометричних параметрів напівелементів у складі термоелектричних мікробатарей, було створено прототипи первинних перетворювачів ДТП з розмірами $22 \times 22 \times 4$ мм. Ці прототипи характеризуються вдосконаленою конструкцією, що забезпечує збільшену чутливість та прискорену реакцію на зміни (див. рис. 3). Метрологічні параметри цих перетворювачів, такі як вольт-ватна чутливість та часова стала, були аналізовані за допомогою спеціально розробленого стенду для калібрування ДТП, відповідно до описаної методики.

Візуальний огляд зазначених прототипів ДТП представлено на рис. 3.

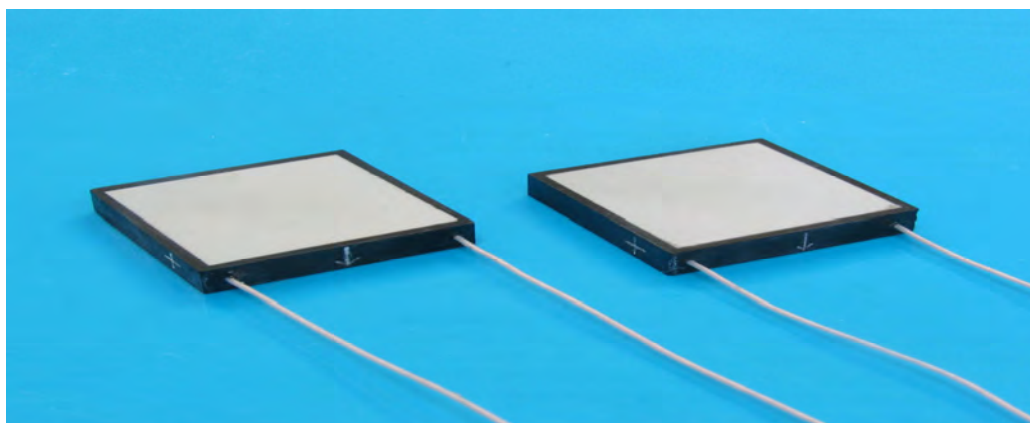


Рис. 3. Візуалізація експериментальних моделей ДТП з габаритами $22 \times 22 \times 4$ мм.

Таблиця 1 представляє дані, отримані в результаті вимірювань характеристик двох прототипів ДТП з розмірами $22 \times 22 \times 4$ мм.

Таблиця 1

Дані вимірювань характеристик термоелектричних датчиків теплового потоку
з розмірами $22 \times 22 \times 4$ мм

№	Назва параметра	ДТП	
		№1	№2
1.	Інтервал теплових потоків, Вт/м ²	$10^{-2} \div 10^3$	$10^{-2} \div 10^3$
2.	Чутливість, В/Вт	1.48	1.51
3.	Постійна часу, с	12	12
4.	Робочий діапазон температур, °С	$-30 \div +130$	$-30 \div +130$
5.	Габаритні розміри ТЕБ, мм	$22 \times 22 \times 4$	$22 \times 22 \times 4$

Була створена нова конструкція термоелектричних перетворювачів, яка дозволяє одночасно фіксувати температуру та тепловий потік на поверхні тіла людини. Візуальний огляд експериментальних прототипів цих ДТП з розмірами $16 \times 16 \times 3$ мм представлено на рис. 4.

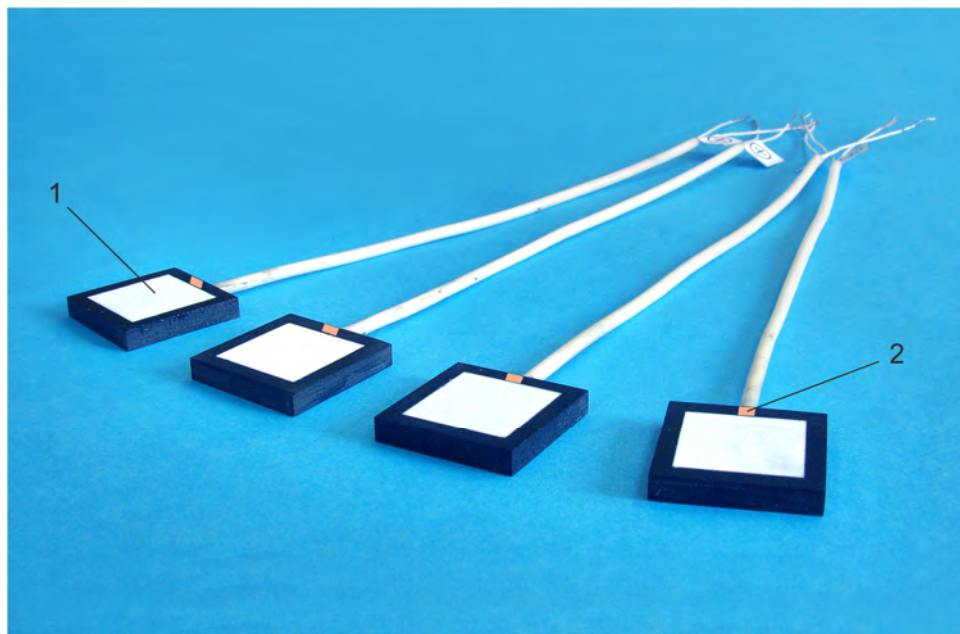


Рис. 4. Візуалізація експериментальних моделей ДТП з габаритами $16 \times 16 \times 3$ мм:
1 – термоелектричний датчик теплового потоку, 2 – сенсор температури.

Таблиця 2 представляє результати вимірювань основних характеристик чотирьох прототипів ДТП з розмірами $16 \times 16 \times 3$ мм.

Таблиця 2

Дані вимірювань характеристик термоелектричних датчиків теплового потоку
з розмірами $16 \times 16 \times 3$ мм

№	Назва параметра	ДТП			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1.	Інтервал теплових потоків, Вт/м ²	$10^{-2} \div 10^3$	$10^{-2} \div 10^3$	$10^{-2} \div 10^3$	$10^{-2} \div 10^3$
2.	Чутливість, В/Вт	3.2	3.32	3.1	3.25
3.	Постійна часу, с	10	11	11	10
4.	Габаритні розміри ТЕБ, мм	$16 \times 16 \times 3$	$16 \times 16 \times 3$	$16 \times 16 \times 3$	$16 \times 16 \times 3$

Часові параметри зазначених термоелектричних ДТП представлені на рисунку 5.



Рис. 5. Графік часової характеристики термоелектричних ДТП з розмірами $16 \times 16 \times 3$ мм, оснащених керамічною приймальною поверхнею.

Отже, спеціалізований стенд для калібрування термоелектричних ДТП забезпечує можливість аналізувати характеристики цих перетворювачів та ефективно передавати дані вимірювань на персональний комп'ютер у режимі реального часу. Водночас, розроблені термоелектричні ДТП, які одночасно вимірюють температуру та тепловий потік, дозволяють проводити неперервний моніторинг температурного та теплового стану людини, що є важливим для різних застосувань у медицині та інших галузях.

Висновки

1. Створено і впроваджено в експлуатацію стенд для калібрування термоелектричних датчиків теплового потоку, який забезпечує можливість аналізу їх метрологічних параметрів та передачу даних вимірювань на персональний комп'ютер в режимі реального часу. Розроблено методику для калібрування як одного, так і двох перетворювачів одночасно.
2. Створено інноваційний тип термоелектричних перетворювачів, що дозволяють одночасно вимірювати температуру та тепловий потік, що відкриває можливості для постійного моніторингу температурного та теплового стану людини в реальному часі.
3. Впроваджено удосконалений метод калібрування термоелектричних сенсорів за допомогою використання додаткового високочутливого перетворювача теплового потоку, що сприяє підвищенню точності визначення вольт-ватної чутливості цих пристроїв.

Література

1. Анатичук Л.І. Термоелектрика. Т.2. Термоелектричні перетворювачі енергії. Київ, Чернівці: Інститут термоелектрики, 2003. – 376 с.
2. Anatychuk L.I. (1998). *Thermoelectricity. Vol.1. Physics of thermoelectricity*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.
3. Анатичук Л.І. Сучасний стан і деякі перспективи термоелектрики // Термоелектрика. – 2007. – № 2. – С. 7 – 20.
4. Демчук Б.М., Кушнерик Л.Я., Рубленик І.М. Термоелектричні датчики для ортопедії.// Термоелектрика. – 2002. – №4. – С. 80 – 85.

5. Патент України 53104 А. Датчик для попередньої діагностики запальних процесів молочних залоз // А.А.Ашеулов, А.В.Клепиковський, Л.Я. Кушнерик та ін. – 2003.
6. Ашеулов А.А., Кушнерик Л.Я. Термоелектричний прилад для медико-біологічної експрес-діагностики // Технологія та конструювання в електронній апаратурі. – №4. – 2004. – С. 38 – 39.
7. Пат. 71619 Україна, МПК H01L 35/00. Термоелектричний медичний тепломір / Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р.; Інститут термоелектрики. – № у 2011 14007; заявл. 28.11.11; опубл. 25.07.12, Бюл. № 14.
8. Пат. 72032 Україна, МПК H01L 35/00. Термоелектричний сенсор для вимірювання температури і теплового потоку / Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р.; Інститут термоелектрики. – № у 2011 14005; заявл. 28.11.11; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15.
9. Пат. 73037 Україна, МПК H01L 35/02. Термоелектричний медичний пристрій / Микитюк П.Д., Кобилянський Р.Р., Слепенюк Т.В.; Інститут термоелектрики. – № у 2012 01922; заявл. 20.02.12; опубл. 10.09.12, Бюл. № 17.
10. Пат. 78619 Україна, МПК H01L 35/00. Метод визначення густини теплового потоку / Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р.; Інститут термоелектрики. – № у 2012 11018; заявл. 21.09.12; опубл. 25.03.13, Бюл. № 6.
11. Пат. 79929 Україна, МПК H01L 35/00. Термоелектричний перетворювач теплового потоку для градієнтних тепломірів / Анатичук Л.І.; Інститут термоелектрики. – № у 2012 11857; заявл. 15.10.12; опубл. 13.05.13, Бюл. № 9.
12. Гишук В.С. Електронний реєстратор сигналів сенсорів теплового потоку людини // Термоелектрика. – № 4. – 2012. – С. 105 – 108.
13. Гишук В.С. Електронний реєстратор з обробкою сигналів термоелектричного сенсора теплового потоку // Термоелектрика. – № 1. – 2013. – С. 82 – 86.
14. Гишук В.С. Модернізований прилад для вимірювання теплових потоків людини // Термоелектрика. – №2. – 2013. – С. 91 – 95.
15. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р. Дослідження впливу термоелектричного тепломіра на визначення тепловиділення людини // Термоелектрика. – № 4. – 2012. – С. 60 – 66.
16. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р. 3D-модель для визначення впливу термоелектричного тепломіра на точність вимірювання тепловиділення людини // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 2, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2012. – С. 15 – 20.
17. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р. Комп'ютерне моделювання показів термоелектричного тепломіра в умовах реальної експлуатації // Термоелектрика. – № 1. – 2013. – С. 53 – 60.
18. Анатичук Л.І., Гіба Р.Г., Кобилянський Р.Р. Про деякі особливості використання медичних тепломірів при дослідженні локальних тепловиділень людини // Термоелектрика. – № 2. – 2013. – С. 67 – 73.
19. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Константинович І.А. Про вплив термоелектричного джерела живлення на точність вимірювання температури і теплового потоку // Термоелектрика. – № 6. – 2013. – С. 53 – 61.
20. Івашук О.І., Морар І.К., Кобилянський Р.Р., Непеляк Л.В., Делей В.Д. Роль теплового потоку черевної порожнини в моніторингу гострого деструктивного панкреатиту // Збірник тез науково-практичної конференції "Актуальні питання хірургії", м. Чернівці, Україна. – 2013. – С. 254 – 259.

21. Кобилянський Р.Р. Про вплив теплової ізоляції на покази термоелектричного сенсора медичного призначення // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 5, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2016. – С. 45 – 49.
22. Кобилянський Р.Р. Комп'ютерне моделювання показів термоелектричного сенсора медичного призначення // Термоелектрика. – № 4. – 2016. – С. 69 – 77.
23. Гищук В.С., Кобилянський Р.Р., Черкез Р.Г. Багатоканальний прилад для вимірювання температури і густини теплових потоків // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 3, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2014. – С. 96 – 100.
24. Кобилянський Р.Р., Бойчук В.В. Використання термоелектричних тепломірів у медичній діагностиці // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 4, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2015. – С. 90 – 96.
25. Анатичук Л.І., Іващук О.І., Кобилянський Р.Р., Постевка І.Д., Бодяка В.Ю., Гушул І.Я. Термоелектричний прилад для вимірювання температури і густини теплового потоку "АЛТЕК-10008" // Термоелектрика. – № 1. – 2016. – С. 76 – 84.
26. Анатичук Л.І., Юрик О.Є., Кобилянський Р.Р., Рой І.В., Фіщенко Я.В., Слободянюк Н.П., Юрик Н.Є., Дуда Б.С. Термоелектричний прилад для діагностики запальних процесів та неврологічних проявів остеохондрозу хребта людини // Термоелектрика. – № 3. – 2017. – С. 54 – 67.
27. Юрик О.Є., Анатичук Л.І., Рой І.В., Кобилянський Р.Р., Фіщенко Я.В., Слободянюк Н.П., Юрик Н.Є., Дуда Б.С. Особливості теплового обміну у пацієнтів з неврологічними проявами остеохондрозу в попереково-крижовому відділі хребта // Травма. – Т.18. – № 6. – 2017.
28. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Кобилянський Р.Р. Інформаційно-енергетична теорія термоелектричних сенсорів температури і теплового потоку медичного призначення // Термоелектрика. – № 4. – 2017. – С. 5 – 20.
29. Anatychuk L.I., Kobylianskyi R.R., Cherkez R.G., Konstantynovych I.A., Hoshovskyi V.I., Tiumentsev V.A. (2017). Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in the human organism. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature – Technology and Design in Electronic Equipment*, 6, 44 – 48.
30. Анатичук Л.І., Іващук О.І., Кобилянський Р.Р., Постевка І.Д., Бодяка В.Ю., Гушул І.Я., Чупровська Ю.Я. Про вплив температури навколишнього середовища на покази термоелектричних сенсорів медичного призначення // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – Т. 15. – № 1. – 2018. – С. 17 – 29.
31. Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Науменко В.О., Задорожний О.С., Гаврилюк М.В., Кобилянський Р.Р. Термоелектричний прилад для визначення теплового потоку з поверхні очей // Термоелектрика. – № 5. – 2018. – С. 52 – 67.
32. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Константинович І.А. Градування термоелектричних сенсорів теплового потоку // Труды XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» 26-30 травня 2014 року. – Т. 2. – Одеса, Україна. – 2014. – С. 30 – 31.
33. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Константинович І.А., Лисько В.В., Пуганцева О.В., Розвер Ю.Ю., Тюменцев В.А. Стенд для градування термоелектричних перетворювачів теплового потоку // Термоелектрика. – № 5. – 2016. – С. 71 – 79.

34. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Константинович І.А., Кузь Р.В., Маник О.М., Ніцович О.В., Черкез Р.Г. Технологія виготовлення термоелектричних мікробатарей // Термоелектрика. – № 6. – 2016. – С. 49 – 54.
35. Анатичук Л.І., Разінков В.В., Бухарасва Н.Р., Кобилянський Р.Р. Термоелектричний браслет // Термоелектрика. – № 2. – 2017. – С. 58 – 72.
36. Анатичук Л.І., Тодуров Б.М., Кобилянський Р.Р., Джал С.А. Про використання термоелектричних мікрогенераторів для живлення електрокардіостимуляторів // Термоелектрика. – № 5. – 2019. – С. 63 – 88.
37. Анатичук Л.І., Юрик О.Є., Страфун С.С., Сташкевич А.Т., Кобилянський Р.Р., Чев'юк А.Д., Юрик Н.Є., Дуда Б.С. Теплометричні показники у пацієнтів з хронічним болем у попереку // Термоелектрика. – № 1. – 2021. – С. 52 – 66.
38. Chunzhi Wang, Hongzhe Jiao, Lukyan Anatychuk, Nataliya Pasyechnikova, Volodymyr Naumenko, Oleg Zadorozhnyy, Lyudmyla Vikhor, Roman Kobylanskyi, Roman Fedoriv, Orest Kochan (2022). Development of a temperature and heat flux measurement system based on microcontroller and its application in ophthalmology. *Measurement Science Review*, 22 (2), 73 – 79.
39. Кобилянський Р.Р., Прибила А.В., Константинович І.А., Бойчук В.В. Результати експериментальних досліджень термоелектричних медичних сенсорів теплового потоку // Термоелектрика. – №3-4. – 2022. – 70 – 83.
40. Yuryk O., Anatychuk L., Kobylanskyi R., Yuryk N. (2023). *Measurement of heat flux density as a new method of diagnosing neurological diseases*. Kharkiv: PC Technology Center, 31 – 68.

Надійшла до редакції: 11.07.2023.

Anatychuk L.I., Acad. NAS Ukraine^{1,2}
Kobylanskyi R.R., Cand.Sc.(Phys-Math)^{1,2}
Lysko V.V., Cand. Sc (Phys &Math)^{1,2}
Prybyla A.V., Cand. Sc (Phys &Math)^{1,2}
Konstantynovych I.A., Cand. Sc. (Phys and Math)^{1,2}
Kobylanska A.K., Cand. Sc (Phys &Math)¹
Havryliuk M.V.^{1,2}
Boyчук V.V.²

¹ Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

² Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi str.,
Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatych@gmail.com

METHOD OF CALIBRATION OF THERMOELECTRIC SENSORS FOR MEDICAL PURPOSES

This paper presents the results of creating an experimental bench for calibrating thermoelectric heat flux sensors and analyzing their metrological properties. Calibration procedures have been developed for both one and two sensors simultaneously. A new type of thermoelectric sensors capable of simultaneously measuring temperature and heat flux on the surface of the human body has also been created and tested.

Key words: calibration bench, thermoelectric sensor, heat flux, volt-watt sensitivity.

References

1. Anatychuk L.I. (2003). *Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.
2. Anatychuk L.I. (1998). *Thermoelectricity. Vol.1. Physics of thermoelectricity*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.
3. Anatychuk L.I. (2007). Current status and some prospects of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 2, 7 – 20.
4. Demchuk B.M., Kushneryk L.Ya., Rublenyk I.M. (2002). Thermoelectric sensors for orthopaedics. *J. Thermoelectricity*, 4, 80 – 85.
5. *Patent of Ukraine 53104 A* (2003). Sensor for preliminary diagnosis of inflammatory processes of the mammary glands. A.A. Ashcheulov, A.V. Klepikovskiy, L.Ya. Kushneryk, et al.
6. Ashcheulov A.A., Kushneryk L.Ya. (2004). Thermoelectric device for medico-biological express diagnostics. *Technology and Design in Electronic Equipment*, 4, 38 – 39.
7. *Patent of Ukraine 71619* (2012). L.I. Anatychuk, R.R. Kobylianskyi. Thermoelectric medical heat meter. Institute of Thermoelectricity (In Ukrainian).
8. *Patent of Ukraine 72032* (2012). L.I. Anatychuk, R.R. Kobylianskyi. Thermoelectric sensor for temperature and heat flux measurement. Institute of Thermoelectricity (In Ukrainian).
9. *Patent of Ukraine 73037* (2012). P.D. Mykytiuk, R.R. Kobylianskyi, T.V. Slepniuk. Thermoelectric medical device. Institute of Thermoelectricity (In Ukrainian).
10. *Patent of Ukraine 78619* (2013). L.I. Anatychuk, R.R. Kobylianskyi. Method for determination of heat flux density. Institute of Thermoelectricity. (In Ukrainian).
11. *Patent of Ukraine 79929* (2013). L.I. Anatychuk. Thermoelectric converter of heat flux for gradient heat meters. Institute of Thermoelectricity (In Ukrainian).
12. Gischuk V.S. (2012). Electronic recorder of human heat flux sensor signals. *J. Thermoelectricity*, 4, 105 – 108.
13. Gischuk V.S. (2013). Electronic recorder with signal processing of thermoelectric heat flux sensor. *J. Thermoelectricity*, 1, 82 – 86.
14. Gischuk V.S. (2013). Modernized device for measuring human heat fluxes. *J. Thermoelectricity*, 2, 91 – 95.
15. Anatychuk L.I., Kobylianskyi R.R. (2012). Study of the influence of thermoelectric heat meter on determination of human heat release. *J. Thermoelectricity*, 4, 60 – 66.
16. Anatychuk L.I., Kobylianskyi R.R. (2012). 3D-model for determination of the influence of thermoelectric heat meter on the accuracy of measuring human heat release. *Scientific Herald of Chernivtsi University: Collected papers. Physics. Electronics. Vol. 2, Issue 1*. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 15 – 20.
17. Anatychuk L.I., Kobylianskyi R.R. (2013). Computer simulation of thermoelectric heat meter readings in real-world operating conditions. *J. Thermoelectricity*, 1, 53 – 60.

18. Anatychuk L.I., Giba R.G., Kobylianskyi R.R. On some features of the use of medical heat meters in the study of local human heat release. *J. Thermoelectricity*, 2, 67 – 73.
19. Anatychuk L.I., Kobylianskyi R.R., Konstantynovich I.A. (2013). On the influence of a thermoelectric power source on the accuracy of temperature and heat flux measurement. *J. Thermoelectricity*, 6, 53 – 61.
20. Ivashchuk O.I., Morar I.K., Kobylianskyi R.R., Nepelyak L.V., Deley V.D. (2013). The role of abdominal heat flow in monitoring acute destructive pancreatitis. *Abstracts of scientific and practical conference "Current issues in surgery"*, Chernivtsi, Ukraine, 254 – 259.
21. Kobylianskyi R.R. (2016). The influence of thermal insulation on the readings of thermoelectric medical sensor. *Scientific Herald of Chernivtsi University: Collected papers. Physics. Electronics. Vol. 5, Issue 1*. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 45 – 49.
22. Kobylianskyi R.R. (2016). Computer simulation of readings of a medical thermoelectric sensor. *J. Thermoelectricity*, 4, 69 – 77.
23. Gischuk V.S., Kobylianskyi R.R., Cherkez R.G. (2014). Multichannel device for measuring the temperature and density of heat fluxes. *Scientific Herald of Chernivtsi University: Collected papers. Physics. Electronics. Vol. 3, Issue. 1*. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 96 – 100.
24. Kobylianskyi R.R., Boychuk V.V. (2015). The use of thermoelectric heat meters in medical diagnostics. *Scientific Herald of Chernivtsi University: Collected papers. Physics. Electronics. Vol. 4, Issue 1*. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 90 – 96.
25. Anatychuk L.I., Ivashchuk O.I., Kobylianskyi R.R., Postevka I.D., Bodiaka V.Yu., Gushul I.Ya. (2016). Thermoelectric device for measuring the temperature and density of heat flux "ALTEC-10008". *J. Thermoelectricity*, 1, 76 – 84.
26. Anatychuk L.I., Yuryk O.E., Kobylianskyi R.R., Roy I.V., Fishchenko Ya.V., Slobodianiuk N.P., Yuryk N.E., Duda B.S. (2017). Thermoelectric device for diagnosing inflammatory processes and neurological manifestations of osteochondrosis of the human spine. *J. Thermoelectricity*, 3, 54 – 67.
27. Yuryk O.E., Anatychuk L.I., Roy I.V., Kobylianskyi R.R., Fishchenko Ya.V., Slobodianiuk N.P., Yuryk N.E., Duda B.S. (2017). Peculiarities of heat exchange in patients with neurological manifestations of osteochondrosis in the lumbosacral spine. *Trauma*, 18(6).
28. Anatychuk L.I., Luste O.J., Kobylianskyi R.R. (2017). Information and energy theory of thermoelectric temperature and heat flux sensors for medical purposes. *J. Thermoelectricity*, 4, 5 – 20.
29. Anatychuk L.I., Kobylianskyi R.R., Cherkez R.G., Konstantynovych I.A., Hoshovskyi V.I., Tiumentsev V.A. (2017). Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in the human organism. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature – Technology and Design in Electronic Equipment*, 6, 44 – 48.
30. Anatychuk L.I., Ivashchuk O.I., Kobylianskyi R.R., Postevka I.D., Bodiaka V.Yu., Gushul I.Ya., Chuprovskaya Yu.Ya. (2018). On the influence of ambient temperature on the readings of thermoelectric medical sensors. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 15 (1), 17 – 29.
31. Anatychuk L.I., Pasychnikova N.V., Naumenko V.O., Zadorozhnyi O.S., Havryliuk M.V., Kobylianskyi R.R. (2018). Thermoelectric device for determination of heat flux from the surface of eyes. *J. Thermoelectricity*, 5, 52 – 67.
32. Anatychuk L.I., Kobylianskyi R.R., Konstantynovich I.A. (2014). Calibration of thermoelectric heat flux sensors. *Proc. of XV International scientific and practical conference "Modern information and electronic technologies"* (Odesa, Ukraine, May 26-30, 2014.) Vol.2, 30 – 31.

33. Anatyshuk L.I., Kobylianskyi R.R., Konstantynovich I.A., Lysko V.V., Pugantseva O.V., Rozver Yu.Yu., Tiumentsev V.A. (2016). Calibration bench for thermoelectric heat flux converters. *J. Thermoelectricity*, 5, 71 – 79.
34. Anatyshuk L.I., Kobylianskyi R.R., Konstantynovich I.A., Kuz R.V., Manyk O.M., Nitsovich O.V., Cherkez R.G. (2016). Manufacturing technology of thermoelectric microthermopiles. *J. Thermoelectricity*, 6, 49 – 54.
35. Anatyshuk L.I., Razinkov V.V., Bukharayeva N.R., Kobylianskyi R.R. (2017). Thermoelectric bracelet. *J. Thermoelectricity*, 2, 58 – 72.
36. Anatyshuk L.I., Todurov B.M., Kobylianskyi R.R., Dzhal S.A. (2019). On the use of thermoelectric microgenerators to power pacemakers. *J. Thermoelectricity*, 5, 63 – 88.
37. Anatyshuk L.I., Yuryk O.E., Strafun S.S., Stashkevich A.T., Kobylianskyi R.R., Cheviuk A.D., Yuryk N.E., Duda B.S. (2021). Thermometric indicators in patients with chronic low back pain. *J. Thermoelectricity*, 1, 52 – 66.
38. Chunzhi Wang, Hongzhe Jiao, Lukyan Anatyshuk, Nataliya Pasychnikova, Volodymyr Naumenko, Oleg Zadorozhnyy, Lyudmyla Vikhor, Roman Kobylianskyi, Roman Fedoriv, Orest Kochan (2022). Development of a temperature and heat flux measurement system based on microcontroller and its application in ophthalmology. *Measurement Science Review*, 22 (2), 73 – 79.
39. Kobylianskyi R.R., Prybyla A.V., Konstantynovich I.A., Boychuk V.V. (2022). Results of experimental investigations of thermoelectric medical heat flux sensors, *J. Thermoelectricity*, 3-4, 70 – 83.
40. Yuryk O., Anatyshuk L., Kobylianskyi R., Yuryk N. (2023). *Measurement of heat flux density as a new method of diagnosing neurological diseases*. Kharkiv: PC Technology Center, 31 – 68.

Submitted: 11.07.2023.