

УДК 537.32

Анатичук Л.І.<sup>1,2</sup>, Кобилянський Р.Р.<sup>1,2</sup>, Константинович І.А.<sup>1,2</sup>, Лисько В.В.<sup>1,2</sup>,  
Пуганцева О.В.<sup>1,2</sup>, Розвер Ю.Ю.<sup>1,2</sup>, Тюменцев В.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1,  
Чернівці, 58029, Україна;

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,  
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна

### СТЕНД ДЛЯ ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ

---

*У роботі наведено результати розробки стенду для градуювання термоелектричних перетворювачів теплового потоку та дослідження їх метрологічних характеристик. Розроблено методики градуювання одного та одночасно двох перетворювачів. Розроблено та виготовлено новий тип термоелектричних перетворювачів з одночасним вимірюванням температури і теплового потоку поверхні тіла людини.*

**Ключові слова:** стенд для градуювання, термоелектричний перетворювач, тепловий потік, вольт-ватна чутливість.

*The results of development of the calibration bench for thermoelectric converters of the heat flux as well as their metrological characteristics analysis are provided in this paper. The calibration methods for one and two converters at a time were developed. The thermoelectric converter of a new type with simultaneous temperature and the heat flux measurements on the human body surface was developed and manufactured.*

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

#### Вступ

Для визначення локального тепловиділення поверхні тіла людини перспективними є термоелектричні перетворювачі [1 – 4]. Сучасні термоелектричні перетворювачі теплового потоку, що виготовлені на основі високоефективних напівпровідникових матеріалів, характеризуються високою чутливістю, швидкодією, технологічністю, оптимальними масо-габаритними параметрами, високою надійністю і низькою вартістю [5 – 9]. Такі перетворювачі є невибагливими в обслуговуванні та можуть здійснювати цілодобовий моніторинг як тепловиділення організму людини [10 – 16], так і втрат тепла на віддалених теплотрасах.

Актуальним є питання градуювання термоелектричних перетворювачів теплового потоку, які використовуються в приладах для вимірювання інтегральних теплових потоків біологічних об'єктів, втрат через будівельні конструкції, теплозахисні покриття та на ділянках теплотрас. Зазвичай градуювання таких перетворювачів проводиться абсолютним методом з використанням компенсаційного нагрівника та диференційних вимірювальних термопар, які є індикатором нульового перепаду температур [17, 18]. Однак таке градуювання потребує підвищення точності вимірювань, оскільки такі перетворювачі є засобами вимірювальної

техніки. Підвищити точність можна за допомогою використання допоміжного високочутливого термоелектричного перетворювача теплового потоку [19 – 21].

Тому метою даної роботи є розробка стенду для градування термоелектричних перетворювачів теплового потоку вдосконаленим методом та дослідження метрологічних характеристик таких перетворювачів.

### Конструкція стенду для градування ПТП

Для дослідження метрологічних характеристик та градування термоелектричних перетворювачів теплового потоку (ПТП) в діапазоні температур  $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \div +130\text{ }^{\circ}\text{C}$  було розроблено стенд, який наведено на рис. 1.

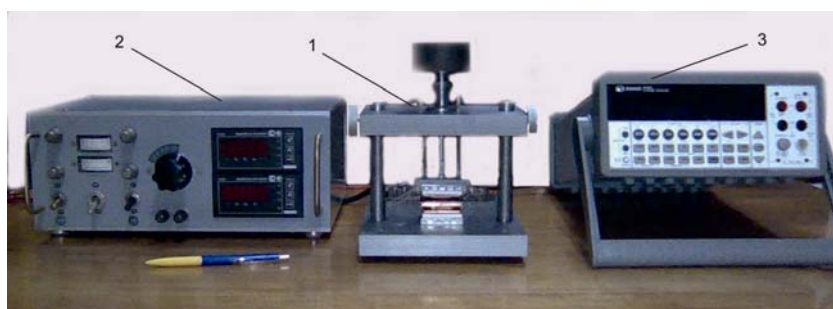


Рис. 1. Зовнішній вигляд стенду для дослідження метрологічних характеристик та градування ПТП.

Стенд складається з вимірювального блоку 1, блоку керування 2 та вимірювального приладу 3 (високоточний цифровий мультиметр).

У свою чергу, вимірювальний блок 1 містить алюмінієву платформу, на якій розміщено рідинні теплообмінники, пристрій притиску і комутаційну колодку. Між гарячим і холодними теплообмінниками може розміщуватись один або два досліджувані ПТП.

Схематично вимірювальний блок 1 зображено на рис. 2.

Як видно з рис. 1 та рис. 2 на нижній основі алюмінієвої платформи та на підвісці верхньої основи вимірювального блоку 1 закріплені два ідентичні теплообмінні вузли, які призначені для відводу тепла – холодні теплообмінники. Ці теплообмінники реверсні, оскільки створені на основі термоелектричних охолоджувачів (ТЕО) з рідинним відведенням відпрацьованого тепла і можуть працювати як у режимі охолодження, так і у режимі нагріву в залежності від напрямку пропускання електричного струму. На робочій стороні ТЕО закріплені мідні тепловирівнюючі пластини з вмонтованими датчиками температури – платиновими термометрами опору. Ці пластини в центральній своїй частині мають відшліфовану з високим класом чистоти площинну поверхню – робочу площадку. На цій площадці розміщують досліджувані ПТП. Інша сторона ПТП контактує з гарячим теплообмінником – плоский нагрівник, що має дві (верхню і нижню) відшліфовані робочі поверхні. Плоский нагрівник виготовлений досить тонким, щоб його бічна поверхня була якомога меншою і він добре прогрівався по всьому своєму об'єму. В корпусі цього нагрівника вмонтовано також датчик температури – платиновий термометр опору. Використання платинових датчиків температури дає можливість вимірювати та підтримувати температури робочих площадок теплообмінників за допомогою терморегуляторів з точністю, не меншою  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в діапазоні температур  $-30 \div +130\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

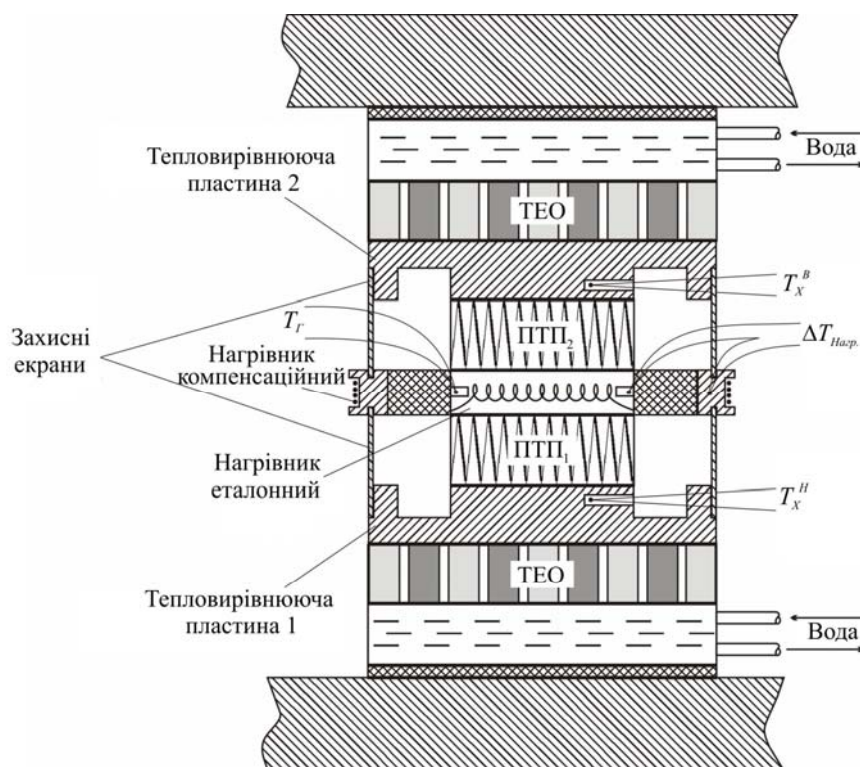


Рис. 2. Схема вимірювального блоку стенду для градування ПТП.

Оскільки бічна поверхня гарячого теплообмінника не бере участі в теплообмінних процесах з ПТП і з неї неминуче можливі втрати тепла, то для запобігання цих втрат навколо його бічної поверхні змонтований кільцевий захисний нагрівник. Основне завдання цього кільцевого нагрівника підтримувати температуру, яка б відповідала температурі гарячого теплообмінника. Це досягається за допомогою диференційної термопари, під'єднаної до вільного каналу терморегулятора, налаштованого таким чином, що подача відповідної напруги живлення на нагрівник кільцевої захисної пічки призводить до нульового сигналу цієї термопари. Таким чином досягається адіабатична ізоляція бічної поверхні гарячого теплообмінника.

Кільцевий захисний нагрівник виконує ще одну важливу роль. Він передає свою температуру захисному екрану, що розташований навпроти бічної поверхні досліджуваного ПТП. На нижній (і верхній) поверхні кільцевого захисного нагрівника зроблено профрезеровані шанці, куди входять "гарячі" торці захисних екранів. Інші, "холодні" торці цих екранів знаходяться в тепловому контакті з робочими площадками холодних теплообмінників. Таким чином, на поверхнях захисних екранів у вертикальному напрямку створюється градієнт температури, що відповідає температурі на бічній поверхні ПТП. Завдяки цьому з бічної поверхні ПТП при його градуванні не розсіюється тепло в навколишнє середовище.

У стенді два холодні теплообмінники застосовуються для парного порівняльного градування одночасно двох ПТП. При градуванні одного ПТП незадіяний холодний теплообмінник використовується як ще один захисний нагрівник, на якому за допомогою терморегулятора виставляється температура гарячого теплообмінника і, таким чином, здійснюється адіабатичний захист від теплових втрат з незадіяної поверхні нагрівника гарячого теплообмінника. Керує процесом термостатування всіх теплообмінників блок керування 2, що

містить регульовані блоки живлення для ТЕО та нагрівників, два двоканальні мікропроцесорні терморегулятори РЕ-202, комутаційні елементи та контрольні клеми вимірювань.

Усі виводи електричних компонентів з вимірювального блоку 1 сходяться на клемній колодці і за допомогою кабелю підключаються до блоку керування 2. До блоку керування підключений також вимірювальний прилад – високоточний цифровий мультиметр М3500 з можливістю передачі результатів вимірювань на персональний комп'ютер у реальному часі. Таким чином, розроблений стенд дає можливість проводити градування термоелектричних ПТП та досліджувати в динаміці їх метрологічні характеристики.

### Методика градування одного ПТП

За допомогою розробленого стенду (рис. 1) градування одного термоелектричного ПТП здійснюється за наступною методикою:

- під'єднати вимірювальний блок 1 до блоку керування 2;
- під'єднати вхідний кабель вимірювального приладу 3 до відповідних клем блоку керування 2;
- під'єднати шланги рідинного охолодження ТЕО до водопровідної магістралі, відкрити кран і пустити воду по системі охолодження;
- підняти і зафіксувати у верхньому положенні верхній холодний теплообмінник;
- встановити досліджуваний ПТП на робочій площадці нижнього холодного теплообмінника;
- під'єднати виводи досліджуваного ПТП до відповідних клем комутаційної колодки;
- встановити нижній захисний екран;
- встановити гарячий теплообмінник із захисним кільцевим нагрівачем на ПТП та на верхній торець захисного екрану;
- встановити верхній захисний екран;
- опустити верхній холодний теплообмінник таким чином, щоб він сів своєю тепловирівнюючою пластиною на верхній захисний екран. При цьому зусилля притиску визначаються наважками;
- на терморегуляторах блоку керування 2 виставити температуру нижнього холодного теплообмінника;
- перемикач вимірювань на блоці керування 2 поставити у положення "Напруга нагрівника", увімкнути вимірювальний прилад 3, переключити його в режим "Напруга постійного струму" з діапазоном "Автоматично" і з виразу

$$W = U^2 / R, \quad (1)$$

(де  $R$  – опір нагрівника) визначити напругу і виставити її на нагрівнику гарячого теплообмінника, яка би відповідала необхідній електричній потужності з діапазону 10 мВт – 1 Вт;

- за показом «температура гарячого теплообмінника» на відповідному каналі терморегулятора, що працює у режимі вимірювача температури, при виході цієї температури на стаціонарний режим, виставити таке ж значення температури на верхньому холодному теплообміннику. При цьому температура кільцевого нагрівника підтримується автоматично;
- перемикач блоку керування 2 виставити у положення «термоЕРС ПТП»;
- при досягненні виставлених температур на стаціонарних теплообмінниках визначити значення величини термоЕРС термоелектричного ПТП;

- переключити по черговому перемикачу вимірювань у положення «Напруга нагрівника гарячого теплообмінника» та «Струм нагрівника гарячого теплообмінника» і визначити точні значення відповідних електричних сигналів;
- визначити потужність нагрівника з виразу:

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

- визначити вольт-ватну чутливість термоелектричного ПТП за формулою:

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

### Методика градування одночасно двох ПТП

Проведення парного градування двох термоелектричних ПТП одночасно проводиться лише при вимірюваннях однакових зразків. Таке парне вимірювання характеристик відрізняється від вимірювання одного ПТП лише тим, що на гарячому теплообміннику зверху розміщують другий ПТП. Виводи другого ПТП під'єднуються до відповідних клем колодки на вимірювальному блоці 1 і вимірювання сигналу термоЕРС ПТП здійснюється при розміщенні у відповідному положенні перемикача вимірювань блоку керування 2.

В цьому випадку на верхньому холодному теплообміннику задається на терморегуляторі така ж температура, як і на нижньому холодному теплообміннику.

Електрична потужність, що виділяється на гарячому теплообміннику розподіляється навпіл, проходить через два ПТП і розсіюється на двох холодних теплообмінниках. Так як температури гарячих сторін кожного ПТП є спільними, а температури холодних сторін є однакові (підтримуються терморегулятором), то вольт-ватні чутливості кожного з ПТП можна вирахувати за допомогою наступних виразів:

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

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

де  $E_1$  та  $E_2$  – відповідні значення термоЕРС першого та другого досліджуваних ПТП. Число "2" у чисельнику перейшло із знаменника, тому що береться половинне значення потужності для кожного ПТП, тобто

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

### Результати вимірювань параметрів ПТП

За рахунок оптимізації геометрії напівелементів термоелектричних мікробатарей ПТП були виготовлені експериментальні зразки первинних перетворювачів розмірами  $22 \times 22 \times 4$  мм удосконаленої конструкції з підвищеною чутливістю та швидкодією (рис. 3). Метрологічні характеристики (вольт-ватна чутливість, постійна часу тощо) таких перетворювачів були досліджені на розробленому стенді для градування ПТП за вказаною вище методикою.

Зовнішній вигляд таких експериментальних зразків ПТП наведено на рис. 3.

Результати вимірювань параметрів двох експериментальних зразків ПТП розмірами  $22 \times 22 \times 4$  мм наведені в табл. 1.

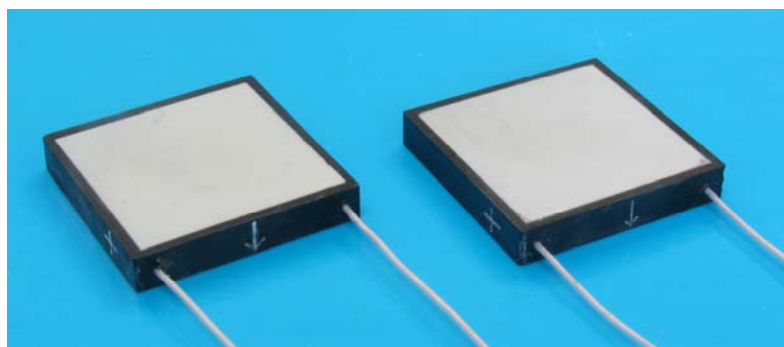


Рис. 3. Зовнішній вигляд експериментальних зразків ПТП розмірами 22 × 22 × 4 мм.

Таблиця 1

Результати вимірювань параметрів ПТП розмірами 22 × 22 × 4 мм

№	Назва параметра	ПТП	
		№1	№2
1.	Діапазон теплових потоків, Вт/м <sup>2</sup>	10 <sup>-2</sup> ÷ 10 <sup>3</sup>	10 <sup>-2</sup> ÷ 10 <sup>3</sup>
2.	Чутливість, В/Вт	1.48	1.51
3.	Постійна часу, с	12	12
4.	Робочий діапазон температур, °С	-30 ÷ +130	-30 ÷ +130
5.	Габаритні розміри ТЕБ, мм	22 × 22 × 4	22 × 22 × 4

Також було розроблено конструкцію нового типу термоелектричних перетворювачів, що об'єднують одночасне вимірювання температури та теплового потоку поверхні тіла людини. Зовнішній вигляд експериментальних зразків таких ПТП розмірами 16 × 16 × 3 мм наведено на рис. 4.

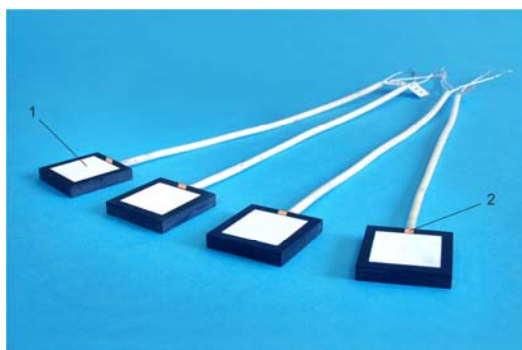


Рис. 4. Зовнішній вигляд експериментальних зразків ПТП розмірами 16 × 16 × 3 мм:  
 1 – термоелектричний сенсор теплового потоку, 2 – датчик температури.

Результати визначення основних параметрів чотирьох експериментальних зразків ПТП розмірами 16 × 16 × 3 мм наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати вимірювань параметрів ПТП розмірами  $16 \times 16 \times 3$  мм

№	Назва параметра	ПТП			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1.	Діапазон теплових потоків, Вт/м <sup>2</sup>	$10^{-2} \div 10^3$	$10^{-2} \div 10^3$	$10^{-2} \div 10^3$	$10^{-2} \div 10^3$
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	$16 \times 16 \times 3$	$16 \times 16 \times 3$	$16 \times 16 \times 3$	$16 \times 16 \times 3$

Часову характеристику таких термоелектричних ПТП наведено на рис. 5.

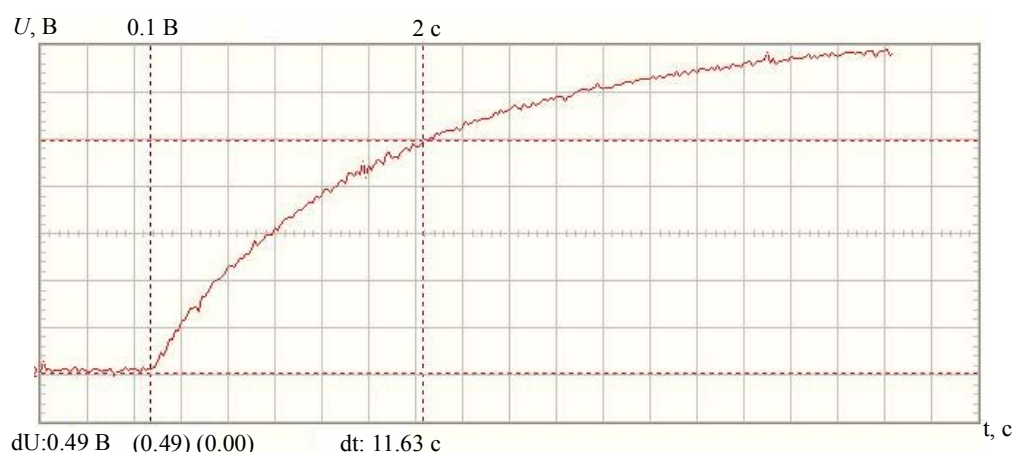


Рис. 5. Часова характеристика ПТП розмірами  $16 \times 16 \times 3$  мм з керамічною приймальною поверхнею.

Таким чином, розроблений стенд для градування термоелектричних ПТП дає можливість проводити дослідження характеристик перетворювачів та передавати результати вимірювань на персональний комп'ютер у реальному часі. А розроблені нового типу термоелектричні ПТП з одночасним вимірюванням температури і теплового потоку дають можливість здійснювати моніторинг температурного та теплового стану людини у реальному часі.

## Висновки

1. Розроблено та виготовлено стенд для градування термоелектричних перетворювачів теплового потоку, що дає можливість досліджувати метрологічні характеристики перетворювачів та передавати результати вимірювань на персональний комп'ютер у реальному часі. Розроблено методики градування одного та одночасно двох термоелектричних перетворювачів теплового потоку.
2. Розроблено новий тип термоелектричних перетворювачів з одночасним вимірюванням

температури і теплового потоку, що дають можливість здійснювати моніторинг температурного і теплового стану людини у реальному часі.

3. Реалізовано вдосконалений метод градування термоелектричних сенсорів з використанням допоміжного високочутливого перетворювача теплового потоку, що дає можливість підвищити точність експериментального визначення вольт-ватної чутливості таких сенсорів.

## Література

1. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. Київ, 1979. 768 с.
2. Герашенко О.А. Основы теплотриии. Київ, 1971. 192 с.
3. Анатичук Л.И., Лусте О.Я. О предельных возможностях микрокалориметров. *ИФЖ*. 1978. 35. №4. С. 638 – 647.
4. Анатичук Л.И., Лусте О.Я. Микрокалориметрия Львов, 1981. 160 с.
5. Анатичук Л.И., Лозинский Н.Г., Микитюк П.Д., Розвер Ю.Ю. Термоэлектрический полупроводниковый тепломер. *Приборы и техника эксперимента*. 1983. №5. С. 236.
6. Анатичук Л.И., Булат Л.П., Гуцал Д.Д., Мягкота А.П. Термоэлектрический тепломер. *Приборы и техника эксперимента*. 1989. №4. С. 248.
7. Герашенко О.А., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. Методика конструирования оптимальных преобразователей теплового потока. *Проблемы энергосбережения*. 1990. Вып.3. С. 36 – 42.
8. Анатичук Л.И., Демчук Б.Н., Лусте О.Я. Теория проектирования вихревых микрокалориметров. *Термоэлектричество*. 2002. №3. С. 18 – 27.
9. Демчук Б.Н., Лусте О.Я. Информационно-энергетическое описание термоэлектрических многоэлементных микробатарей. *Термоэлектричество*. 2003. №2. С. 48 – 50.
10. Ладыка Р.Б., Москаль Д.Н., Дидух В.Д. Полупроводниковые тепломеры в диагностике и лечении заболеваний суставов. *Медицинская техника*. 1992. №6. С. 34 – 35.
11. Ладыка Р.Б., Дакалюк О.Н., Булат Л.П., Мягкота А.П. Применение полупроводниковых тепломеров в диагностике и лечении *Медицинская техника*. 1996. №6. С. 36 – 37.
12. Демчук Б.Н., Кушнерик Л.Я., Рубленик И.М. Термоэлектрические датчики для ортопедии. *Термоэлектричество*. 2002. №4. С. 80 – 85.
13. Ащеулов А.А., Кушнерик Л.Я. Термоэлектрический прибор для медико-биологической экспресс-диагностики. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2004. №4. С. 38 – 39.
14. 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*. 2014. 3 Вип. 1. С. 96 – 100.
15. Кобилянський Р.Р., Бойчук В.В. Використання термоелектричних тепломірів у медичній діагностиці. *Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка*. 2015. 4 Вип.1. С. 90 – 96.
16. Анатичук Л.И., Иващук А.И., Кобылянский Р.Р., Постевка И.Д., Бодяка В.Ю., Гушул И.Я. Термоэлектрический прибор для измерения температуры и плотности теплового потока "АЛТЕК-10008". *Термоэлектричество*. 2016. № 1. 2016. С.80 – 88.
17. Лухтан Т.О., Коломієць Д.П., Ковтун С.І., Воробйов Л.Й. Метрологічна атестація термоелектричних перетворювачів теплового потоку. *Ukrainian Food Journal*. 2012. 1. №3. С. 60 – 63.



18. Градування термоелектричних сенсорів теплового потоку. *Труди XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології»* (26-30 травня, 2014 р. Одеса). Одеса. 2014. С. 30 – 31.
19. ГОСТ 25380-82. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. 1983.
20. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. 2000.
21. ДСТУ 3756 – 98. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. 2000.

Надійшла до редакції 26.10.2016