

УДК 537

**Анатичук Л.І.,** *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
**Микитюк П.Д.,** *канд. фіз.-мат. наук*<sup>1,2</sup>  
**Микитюк О.Ю.,** *канд. фіз.-мат. наук, доцент*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;  
*e-mail: anatyuch@gmail.com;*

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

<sup>3</sup>Вищий державний навчальний заклад України  
«Буковинський державний медичний університет»,  
Театральна площа, 2, Чернівці, 58012, Україна

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ДЖЕРЕЛА СТРУМУ З КІЛЬЦЕВОЮ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЮ БАТАРЕЄЮ

---

*Наведено результати досліджень термоелектричного джерела струму (ДС) одноразової дії з кільцевою термоелектричною батареєю. Результати досліджень підтвердили працездатність макетних зразків ДС з кільцевою термобатареєю (ТЕБ) і відповідність їх електричних параметрів вимогам технічного завдання за договором 3/2019. Бібл. 2, рис. 6, табл. 1.*

**Ключові слова:** термоелектрична батарея, джерело струму, номінальна напруга, вихідна потужність.

### Вступ

Відповідно до технічного завдання(ТЗ) за договором 3/2019 від 16.04.2019 р. було необхідно виготовити і дослідити термоелектричне джерело струму (ДС) з кільцевою термобатареєю. Термоелектричний перетворювач для ДС конструктивно мав бути виготовлений у вигляді тороїдного кільця із зовнішнім і внутрішнім діаметрами 50 і 39 мм, відповідно, і шириною 16.5 мм При цьому ДС повинен забезпечити вихідну потужність не менше 20 Вт при нарузі 5 В. Робочий перепад температури  $\Delta T$  при цьому не повинен перевищувати 300 К.

### Дослідження елементарних термобатарей для кільцевої ТЕБ

На кожному етапі виготовлення складової частини кільцевої термобатареї здійснювався післяопераційний візуальний контроль гілок термоелементів для ДС – елементарних однорядних ТЕБ з відбракуванням дефектних елементів по геометричних розмірах, також проводилось розбракування за опором гілок термоелементів.

Кожна ТЕБ, складена з гілок, які пройшли післяопераційний контроль (рис. 1), і яка, в свою чергу, є складовою частиною кільцевої ТЕБ для ДС, проходила випробування і

відбиралася після виміру її основних параметрів на спеціально створеній в Інституті термоелектрики установці "Алтек-10002", зовнішній вигляд якої показаний на рис. 2.

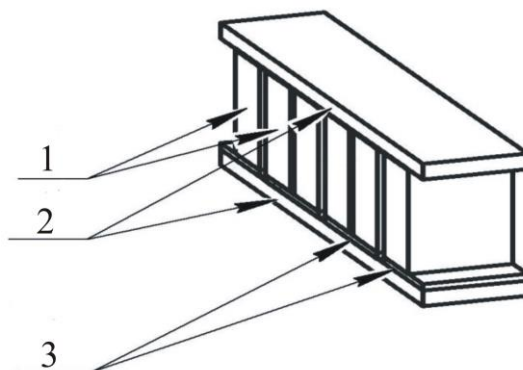


Рис. 1. Зовнішній вигляд елементарних ТЕБ.  
1 – гілки термоелемента *n* - *i* *p*- типів провідності,  
2 - керамічні пластини, 3 – мідні комутаційні пластини.

Цю установку призначено для визначення електричних і теплових параметрів термоелектричних модулів, які працюють в генераторному режимі.



Рис. 2. Установа «Алтек-10002».

Принцип дії установки при її використанні для виміру ТЕБ полягає в прямому вимірі термоЕРС або напруги на заданому навантаженні ТЕБ. ТЕБ розміщується між теплообмінниками, які створюють регульований стаціонарний тепловий потік. Установка також дозволяє виконувати виміри струму в колі навантаження ТЕБ, теплового потоку, який протікає через ТЕБ і визначення її потужності і ККД на встановленому навантаженні.

У ході лабораторних досліджень на вимірвальній установці відтворювалися теплові умови, аналогічні заданим в ТЗ. Метою таких досліджень було точне завдання робочого перепаду температур  $\Delta T$  на ТЕБ, призначених для складання макетних зразків кільцевої ТЕБ і визначення їх початкових характеристик.

Під елементарною ТЕБ розміщується тепломір – пристрій для вимірювання теплового потоку, який створюється перепадом температур між робочими поверхнями ТЕБ. Тепломір є сукупністю мідних стержнів однакової довжини і площі поперечного перерізу, у бічних поверхнях яких на однаковій відстані від торців вмонтовано диференціальні термомпари. Для збільшення

чутливості тепломіра ці термопари сполучені між собою послідовно. Тепловий потік, який проходить уздовж стержнів, створює в місцях розміщення термопар задану різницю температур  $\Delta T$ , яка пропорційна до величини теплового потоку. Коефіцієнт пропорційності для кожного розміру тепломіра розрахований і залежить від геометричних розмірів і констант матеріалів, з яких він виготовлений. Торці стержнів з двох сторін впаяно у тепловирівнюючі мідні пластини, які є основами тепломіра. На верхній основі тепломіра вбудовано спай вимірювальної диференціальної термопари. ЕРС цієї термопари відображає температуру холодної сторони ТЕБ. Те, що тепломір знаходиться з холодної сторони ТЕБ, дозволяє значно збільшити точність виміру теплового потоку, оскільки теплові втрати з тепломіра при цьому мінімальні.

Гарячий теплообмінник і тепломір змінні і вибираються відповідно до розмірів ТЕБ, які вимірюються.

Для ефективнішого теплообміну між теплообмінниками і ТЕБ зусилля притиску між ними має бути оптимізованим і контрольованим. Це досягається за допомогою важільно-гирьового пристрою, робота якого зрозуміла з схеми стенду. Зусилля притиску має бути обмежене міцністю застосованих в створенні ТЕБ матеріалів (для  $Bi_2Te_3$  – найменш міцного матеріалу з якого зроблені гілки модуля, зусилля має бути не більше  $20 \text{ кГ/см}^2$ ).

В процесі вимірів для визначення величини струму ТЕБ треба навантажувати зовнішнім опором. Для цього в установці використовується реостат з лінійними провідниками високого питомого опору. Така форма реостату вибрана для зручності точного підбору опору навантаження. При вимірі теплових величин похибки в основному визначаються втратами на теплопереходах між термопарами і тими об'єктами, куди вони вмонтовані. Якість теплового контакту також залежить від чистоти обробки поверхонь ТЕБ. Має місце також і неконтрольована втрата тепла з бічної поверхні тепломіра за рахунок підвищеного конвективного теплообміну і випромінювання тепла з поверхні тепломіра в довкілля, якщо температура холодної сторони модуля значно відрізняється від кімнатної.

На установці "Алтек-10002" було досліджено і відібрано по 36 шт. зразків ТЕБ (з висотою 5.5 мм і завдовжки 16.5 мм) для складання кільцевих ТЕБ для макетних зразків ДС. Характерні параметри і характеристики ТЕБ для кільцевої батареї наведено в таблиці.

*Таблиця*

*Параметри елементарних ТЕБ*

№ модуля	R, Ом	$\Delta T$ , °C	U, В	W, Вт	$\eta$ , %
1	2	3	4	5	6
1	0.026	270	0.123	0.351	3.78
2	0.025	270	0.130	0.384	3.77
3	0.023	270	0.109	0.327	3.25
4	0.025	270	0.130	0.384	3.93
5	0.025	270	0.118	0.313	3.62
6	0.025	270	0.130	0.357	3.54
7	0.025	270	0.132	0.403	3.94
8	0.024	270	0.132	0.409	3.82
9	0.026	270	0.120	0.306	3.28
10	0.025	270	0.129	0.348	3.49

Продовження таблиці

11	0.024	270	0.128	0.365	3.31
12	0.025	270	0.123	0.326	3.55
13	0.026	270	0.120	0.282	3.39
14	0.024	270	0.125	0.331	3.43
15	0.026	270	0.131	0.347	3.65
16	0.025	270	0.134	0.395	3.81
17	0.025	270	0.127	0.381	3.78
18	0.025	270	0.126	0.359	3.75
19	0.026	270	0.131	0.367	3.69
20	0.025	270	0.122	0.329	3.51
21	0.025	270	0.132	0.383	3.77
22	0.025	270	0.133	0.392	3.72
23	0.025	270	0.128	0.333	3.35
24	0.025	270	0.135	0.398	3.86
25	0.024	270	0.127	0.349	3.59
26	0.028	270	0.110	0.242	2.90
27	0.026	270	0.119	0.292	3.01
28	0.027	270	0.121	0.296	3.39
29	0.024	270	0.107	0.256	3.13
30	0.026	270	0.128	0.346	3.60
31	0.028	270	0.132	0.343	3.61
32	0.027	270	0.128	0.339	3.56
33	0.026	270	0.128	0.358	3.59
34	0.026	270	0.118	0.301	3.43
35	0.025	270	0.123	0.338	3.50
36	0.025	270	0.121	0.296	3.25

де  $R$  – опір ТЕБ,  $\Delta T$  – робочий перепад температури на ТЕБ,  $U$  - напруга, генерована ТЕБ,  $W$  – потужність ТЕБ,  $\eta$  – ККД ТЕБ. З однорядних ТЕБ було виготовлено кільцеві ТЭБ, зовнішній вигляд яких показано на рис. 3.

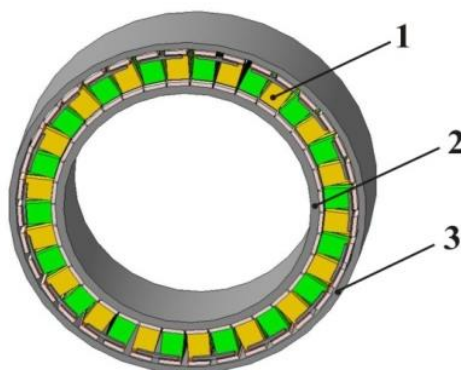


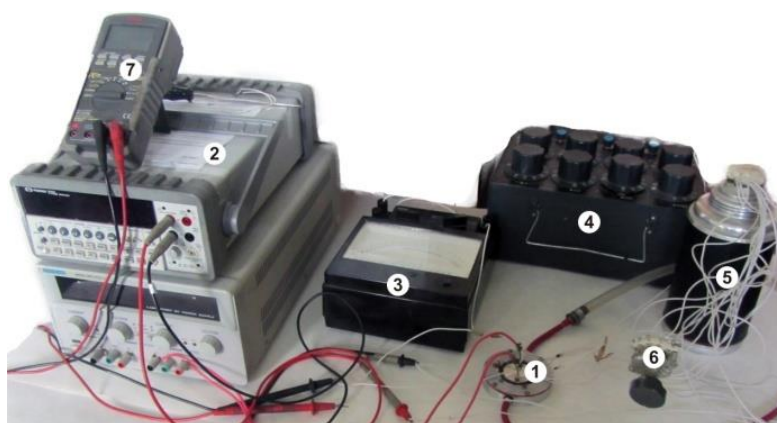
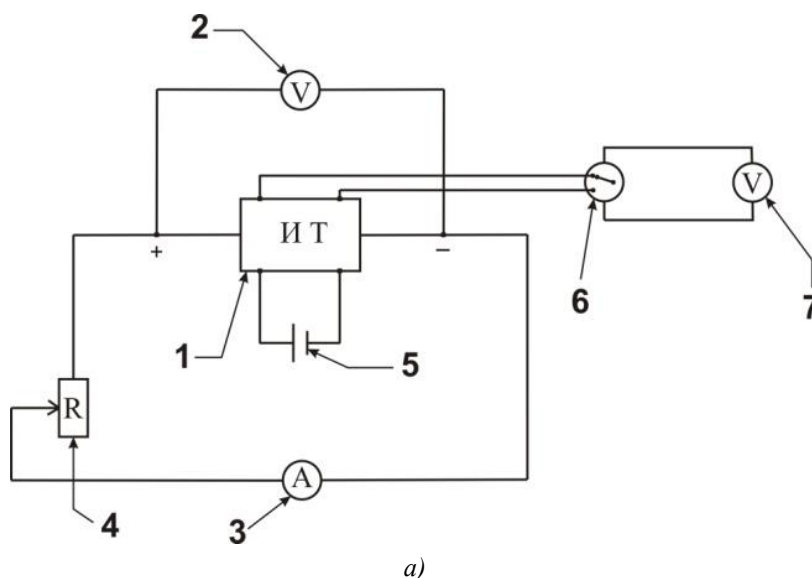
Рис. 3 – Схематичне зображення кільцевої ТЕБ : 1 – кільцева термоелектрична батарея; 2 - кільце гарячого теплообмінника; 3 – кільце холодного теплообмінника

Приведені в таблиці дані підтверджують працездатність ТЕБ відібраних для кільцевої ТЕБ, а також можливість забезпечення при їх використанні вихідних характеристик макетних зразків ДС на рівні, необхідному у відповідності з ТЗ за договором 3/2019.

### Дослідження макетних зразків ІТ

Дослідження макетних зразків ДС проводилися у відповідності з розробленою програмою та методикою попередніх випробувань [2]. Як джерело тепла використовувався резистивний імітатор теплового навантаження. В ході досліджень електричних параметрів макетних зразків ДС на відповідність вимогам ТЗ визначалися залежності вихідних електричних параметрів (потужності  $P$  і напруги  $U$ ) від перепаду температури  $\Delta T$ .

Дослідження макетних зразків ДС здійснювалися на експериментальному стенді, схему і зовнішній вигляд якого наведено на рис. 4.



б)

Рис. 4. Схема (а) і зовнішній вигляд(б) експериментального стенду для дослідження макетних зразків ДС :

1 – макетний зразок ДС; 2 - мультиметр; 3 - амперметр;  
4 – магазин опорів; 5 - блок живлення; 6 - перемикач терморпар;  
7 - цифровий вольтметр; 8 – посудина Дьюара з льодом.

Згідно ТЗ вихідна електрична потужність  $P$  і електрична напруга  $U$  макетного зразка ДС повинні складати 2 Вт і 5 В. З урахуванням наведених в ТЗ електричних параметрів, випробування макетного зразка ДС проводилися за значення зовнішнього опору  $R = 12.5$  Ом, яке задавалося магазином опорів 4. Потужність імітатора теплового навантаження збільшувалася блоком живлення 5. За допомогою перемикача 6 і вольтметра 7, хромель-копелевими термопарами вимірювалися температури  $T_h$ ,  $T_c$  теплообмінників ДС з подальшим визначенням робочого перепаду температури  $\Delta T$  на кільцевій термобатарей. При цьому спай однієї термопари розташовувався безпосередньо на гарячому теплообміннику, а іншої термопари – на холодному теплообміннику. Інший спай термопари вміщувався в посудину Дьюара з льодом 8. Мультиметром 2 і амперметром 3 вимірювалися вихідна електрична напруга і сила струму макетного зразка ІТ.

Результати експериментальних досліджень макетного зразка ДС і залежності його електричних параметрів від перепаду температури  $\Delta T$  наведено на рис. 5.

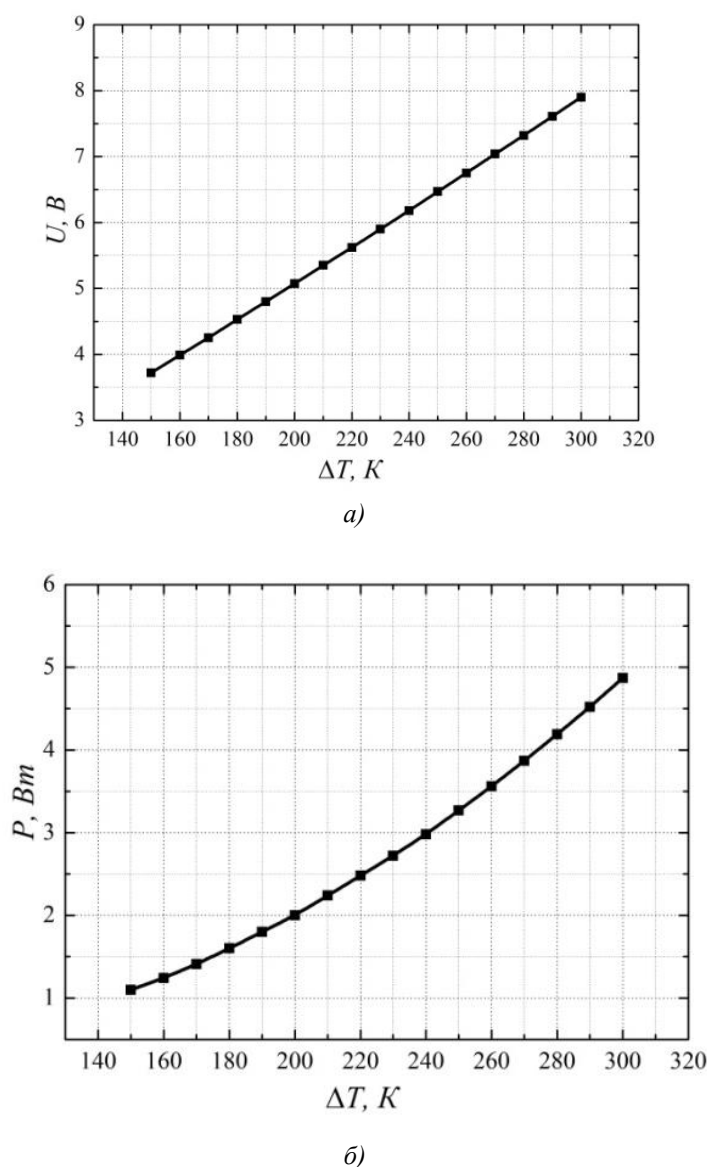


Рис. 5. Залежність електричної напруги  $U$  (а) і потужності  $P$  (б) макетного зразка ДС від робочого градієнта температури  $\Delta T$ .

З рис. 5 видно, що зі збільшенням градієнта температури  $\Delta T$  на термобатареї спостерігається зростання електричної напруги  $U$  і потужності  $P$  макетних зразків. Зокрема, для ДС необхідні у відповідності з ТЗ вихідні параметри досягаються вже за робочому перепаду температур 200 К. При цьому електрична потужність і напруга макетного зразка складають 2 Вт і 5 В. Зі збільшенням  $\Delta T$  вихідні характеристики ДС покращуються, перевищуючи необхідні у відповідності з ТЗ значення.

Проте, слід враховувати, що у процесі вищеописаних досліджень ДС використовувався імітатор теплового навантаження, який забезпечує практично квазістаціонарний режим роботи ДС. Такий режим не забезпечуватиметься при використанні піротехнічного елемента (ПЕ). При використанні ПЕ матимуть місце більш жорсткі режими роботи ДС, для забезпечення яких знадобиться більша кількість тепла. Передбачувана залежність теплової потужності джерела тепла (ПЕ) від часу приведена на рис. 6.

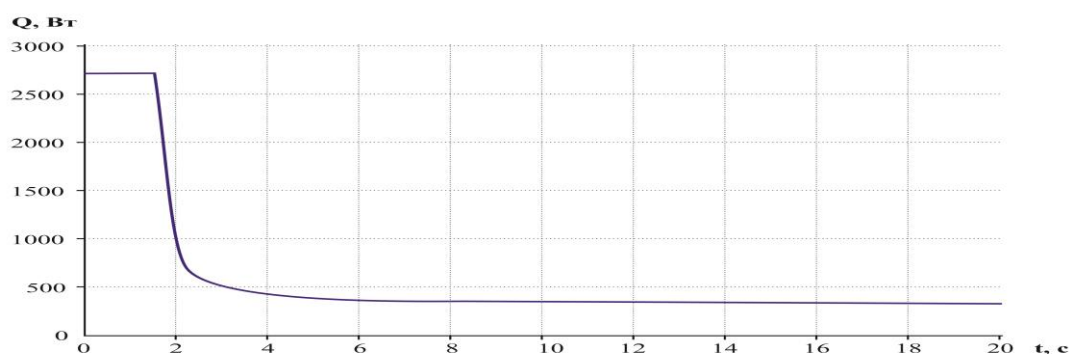


Рис. 6. Залежність теплової потужності ПЕ – джерела тепла від часу.

## Висновки

Результати досліджень підтвердили працездатність макетних зразків ІТ і відповідність їх електричних параметрів вимогам ТЗ, викладеним в додатку 1 до договору 3/2019.

## Література

1. Анатичук Л.І., Микитюк П.Д. «Проектування кільцевої термобатареї для джерела струму одноразової дії» // Термоелектрика – 2019, №3.
2. Програма і методика дослідження термоелектричного джерела струму з кільцевою термобатареєю. Договір 3/2019 від 16.04.2019 р. Інститут термоелектрики.

Надійшла до редакції 15.05.2019

Анатичук Л.І., акад. НАН України<sup>1,2</sup>  
Микитюк П.Д., канд. физ.-мат. наук<sup>1,2</sup>  
Микитюк О.Ю., канд. физ.-мат. наук, доцент<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектричності НАН і МОН України,  
ул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна, e-mail: anatyck@gmail.com;

<sup>2</sup>Черновицкий національний університет  
імені Юрія Федьковича, ул. Коцюбинського,  
2, Чернівці, 58012, Україна;

<sup>3</sup>Высшее государственное учебное заведение Украины  
«Буковинский государственный медицинский университет»,  
Театральная площадь, 2, Чернівці, 58002, Україна

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА С КОЛЬЦЕВОЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БАТАРЕЕЙ

*Приведены результаты исследований термоэлектрического источника тока (ИТ) однократного действия с кольцевой термоэлектрической батареей. Результаты исследований подтвердили работоспособность макетных образцов ИТ с кольцевой термоэлектрической батареей (ТЭБ) и соответствие их электрических параметров требованиям технического задания по договору 3/2019. Библ. 2, рис. 6, табл. 1.*

**Ключевые слова:** термоэлектрическая батарея, источник тока, напряжение, выходная мощность.

**L.I. Anatyckuk** acad. National Academy of Sciences of Ukraine<sup>1,2</sup>

**P.D. Mykytiuk.** Cand.Sc. (Physics and Mathematics)<sup>1,2</sup>

**O.Yu. Mykytiuk.** Cand.Sc. (Physics and Mathematics),  
Assistant Professor<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

## EXPERIMENTAL STUDIES OF A THERMOELECTRIC CURRENT SOURCE WITH AN ANNULAR THERMOPILE

*The results of studies of a single-acting thermoelectric current source with an annular thermopile are presented. The research results confirmed the efficiency of current source breadboard models with an annular thermopile and the compliance of their electrical parameters with the requirements of the Performance Specification under Contract 3/2019. Bibl. 2, Fig. 6, Tabl. 1.*

**Key words:** thermoelectric battery, current source, voltage, output power.

### References

1. Anatyckuk L.I., Mykytiuk P.D. (2019). Design of an annular thermopile for a single acting current source. *J.Thermoelectricity*, №3
2. Program and methods of research on a thermoelectric current source with an annular thermopile. *Contract 3/2019 of 16.04.2019*. Institute of Thermoelectricity.

Submitted 15.05.2019