

# ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у грудні 1993 р.,  
видається 6 разів на рік

---

№ 5

2018

---

## Редакційна колегія

Головний редактор Л.І. АНАТИЧУК

П.І. Баранський

Б.І. Стадник

Л.М. Вихор

О.Я. Лусте

В.В. Лисько

О.І. Рогачова

С.В. Мельничук

А.О. Снарський

## Міжнародна редакційна рада

Л.І. Анатичук, *Україна*

А.І. Касіян, *Молдова*

С.П. Ашмонтас, *Литва*

Т. Кадзікава, *Японія*

Ж.К. Теденак, *Франція*

Т. Трітт, *США*

Х.Дж. Голдсмід, *Австралія*

С.О. Філін, *Польща*

Л. Чен, *Китай*

Д. Шарп, *США*

Т. Кайя, *США*

Ю.Г. Гуревич, *Мексика*

Ю. Грін, *Німеччина*

Засновники – Національна академія наук України,  
Інститут термоелектрики Національної академії  
наук та Міністерства освіти і науки України

Свідоцтво про державну реєстрацію – серія КВ № 15496-4068 ПР

Редактори

В.М. Крамар, П.В. Горський, О.Я. Лусте, Т.Г. Подбегаліна

Схвалено до друку Вченою радою Інституту термоелектрики  
Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України

Адреса редакції:

Україна, 58002, м.Чернівці, Головоштамт, а/с 86

Тел. : + (380-372) 90 31 65.

Факс :+(380-3722) 4 19 17

E-mail: [jt@inst.cv.ua](mailto:jt@inst.cv.ua)

<http://www.jt.inst.cv.ua>

---

Підписано до друку: 26.11.2018 Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк  
офсетний. Ум. друк. арк. 11.5. Обл.-вид. арк. 9.2. Наклад 400 прим. Замовлення 4.

---

Надруковано з оригінал-макету, виготовленого редакцією журналу «Термоелектрика»,  
у типографії видавництва “Букрек”,  
Україна, 58000, м. Чернівці, вул. Радищева, 10.

© Інститут термоелектрики Національної академії  
наук та Міністерства освіти і науки України, 2018

## ЗМІСТ

### **Конструювання**

<i>Дзундза Б.С.</i> Автоматизований програмно-апаратний комплекс для вимірювання термоелектричних параметрів напівпровідникових матеріалів	5
--	---

### **Конструювання**

<i>Анатичук Л.І., Прибила А.В.</i> Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності, двокаскадними термобатареями та акумуляторами електричної енергії	13
<i>Ніцович О.В.</i> Комп'ютерне моделювання процесу кристалізації $Bi_2Te_3$ при наявності електричного струму	20
<i>Горський П.В., Разінков В.В.</i> Вплив геометрії контейнера на орієнтацію та ступінь паралельності площин спайності монокристалів телуриду вісмуту	30
<i>Закордонець В.С., Кутузова Н.В.</i> Розрахунок термоелектричної системи охолодження світлодіода	41

### **Надійність**

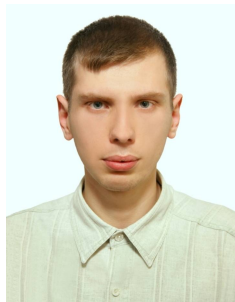
<i>Максимук М.В.</i> Про економічні аспекти використання передпускових нагрівників з термоелектричними джерелами електрики	52
--	----

### **Термоелектричні вироби**

<i>Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Науменко В.О., Задорожний О.С., Гаврилюк М.В., Кобилянський Р.Р.</i> Термоелектричний прилад для визначення теплового потоку з поверхні очей	60
<i>Микитюк П.Д., Микитюк О.Ю.</i> До питання вибору матеріалу термопари для термоперетворювачів метрологічного призначення	76
<i>Запаров С.Ф., Захарчук Т.В.</i> Обладнання для одержання зразків термоелектричного матеріалу прямокутної форми	84



УДК 537



*Дзундза Б.С.*

**Дзундза Б.С.** канд. фіз-мат. наук

Прикарпатський національний університет  
імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57,  
Івано-Франківськ, 76018, Україна,  
*e-mail: bohdan.dzundza@pu.if.ua*

---

## **АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

---

*Описано методику вимірювання коефіцієнта Зеебека, холлівської концентрації носіїв, питомої електропровідності напівпровідникових плівкових термоелектричних матеріалів. Представлена електрична схема та розроблена комп'ютерна програма, що забезпечує автоматизацію вимірювань, реєстрацію і первинною обробку даних, з можливість побудови графіків часових залежностей для попереднього аналізу експериментальних даних вже в процесі вимірювання. Бібл. 6, рис. 6.*

**Ключові слова:** термоелектрика, холлівські вимірювання, автоматизація, мікроконтролер, тонкі плівки.

### **Вступ**

Проблема автоматизації вимірювань коефіцієнта Зеебека, холлівської концентрації носіїв, питомої електропровідності та їх залежностей від температури та магнітного поля для напівпровідникових термоелектричних матеріалів, зокрема сполук типу AIVBVI актуальна завдяки перспективі їх використання для створення термоелектричних перетворювачів енергії [1]. Такі вимірювання вимагають точної стабілізації температур, величини магнітного поля, струму через зразок, прецизійної та дорогої електрометричної техніки, а дослідження термоелектричних параметрів таких зразків є достатньо трудомістким.

В останні десятиліття швидкий розвиток мікропроцесорної та комп'ютерної техніки відкриває нові можливості автоматизації складних технологічних процесів та лабораторних досліджень. Спеціалізовані мікросхеми та мікроконтролери з великою кількістю пам'яті, широко розвиненою периферією та невеликою ціною в поєднанні з простотою освоєння є оптимальними для їх використання в автоматизованих вимірювальних комплексах.

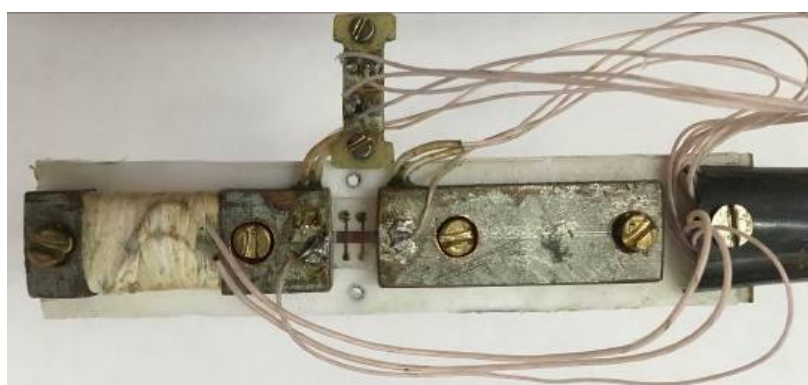
У даній роботі представлена електрична схема та розроблена комп'ютерна програма, що забезпечує автоматизацію вимірювань коефіцієнта Зеебека, питомої електропровідності, та холлівської концентрації носіїв в залежності від температури та магнітних полів для плівкових термоелектричних матеріалів, а також реєстрацію, візуалізацію та первинну обробку отриманих даних.

### **Методика вимірювання**

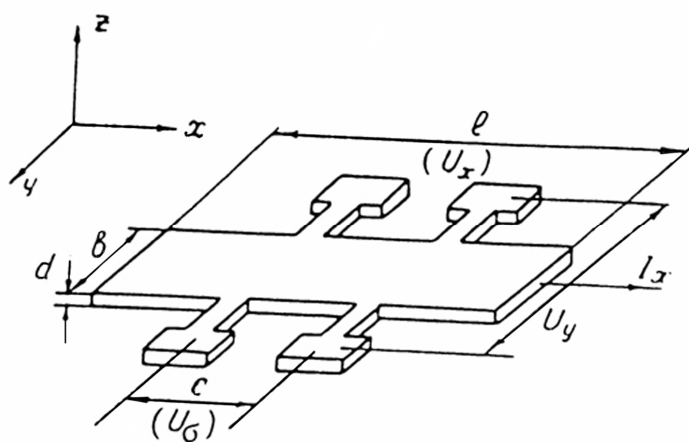
Вимірювання коефіцієнта Зеебека, питомої електропровідності, та холлівської

концентрації проводили у постійних магнітних полях величиною до 2 Тл. При вимірюванні плівкові зразки розташовувалися в тримачі типової конструкції [2] з шістьма вимірювальними зондами (два струмових і чотири холлівських). Виготовлення надійних омичних контактів, які не руйнують плівку і задовольняють всім необхідним вимогам [2, 3], проводилися методами осадження срібла в поєднанні з позолоченими притискними підпружиненими контактами або пайки при  $T < 400$  К. Вибір основного контактної матеріалу визначався його роботою виходу, температурними і механічними властивостями. Для припаювання використовувались індій і його сплави з оловом, свинцем, сріблом і сурмою, а як з'єднувальні елементи - срібний і мідний провід діаметром (0.01-0.05) мм. Для забезпечення омичності контактів і покращення адгезії в місцях пайки хімічним способом осаджувалось золото (для плівок  $p$ - типу провідності) або мідь (для плівок  $n$ - типу). Контроль властивостей виготовлених контактів проводився шляхом аналізу ВАХ зразків [2].

Струмові контакти виконані у вигляді двох масивних мідних пластин, конструкція забезпечувала створення в зразку стабільного градієнта температури величиною (0.3-1.2) К/мм. Інтервал температур у робочій зоні була (77-500) К. Точність вимірювання температур складала 0.1-0.2 К, а магнітних полів  $\pm 3$  %. Криостати для створення низьких температур являли собою кварцові посудини Дьюара або посудини із пінопласту, заповнені рідким азотом і розміщені в зазорі магніту. Проміжні температури між азотною і кімнатною досягались підігрівом за допомогою ніхромової спіралі, біфілярно намотаної на трубчастий циліндр який герметично встановлювався на тримача зразка, що дало змогу проводити вимірювання у вакуумі  $10^{-4}$  Па.



а)



б)

Рис. 1. Загальний вигляд вимірювальної комірки (а) та конфігурація зразка (б) для вимірювання електричних параметрів тонких плівок.

Результати усереднювали вимірювання у двох напрямках струму та магнітного поля по

обох парах контактів зразка (рис. 1). Товщину тонких плівок визначали оптичним методом за допомогою мікроінтерферометра МІІ-4. При цьому забезпечувалась точність  $\sim 0.02$  мкм. Тип провідності визначався за знаком термоЕРС. [2].

## Схемотехніка установки

Функціональна схема установки наведена на рис. 2. Даний вимірювальний комплекс є вдосконаленою і суттєво переробленою версією раніше розробленої установки описаної автором в [4]. Основою вимірювального комплексу є цифровий мультиметр UNI-T UTM1805A який підтримує вивід даних на комп'ютер і в режимі вольтметра постійної напруги забезпечує роздільну здатність 1 мкВ при точності 0.015 % та має режим автоматичного вибору діапазону вимірювання.

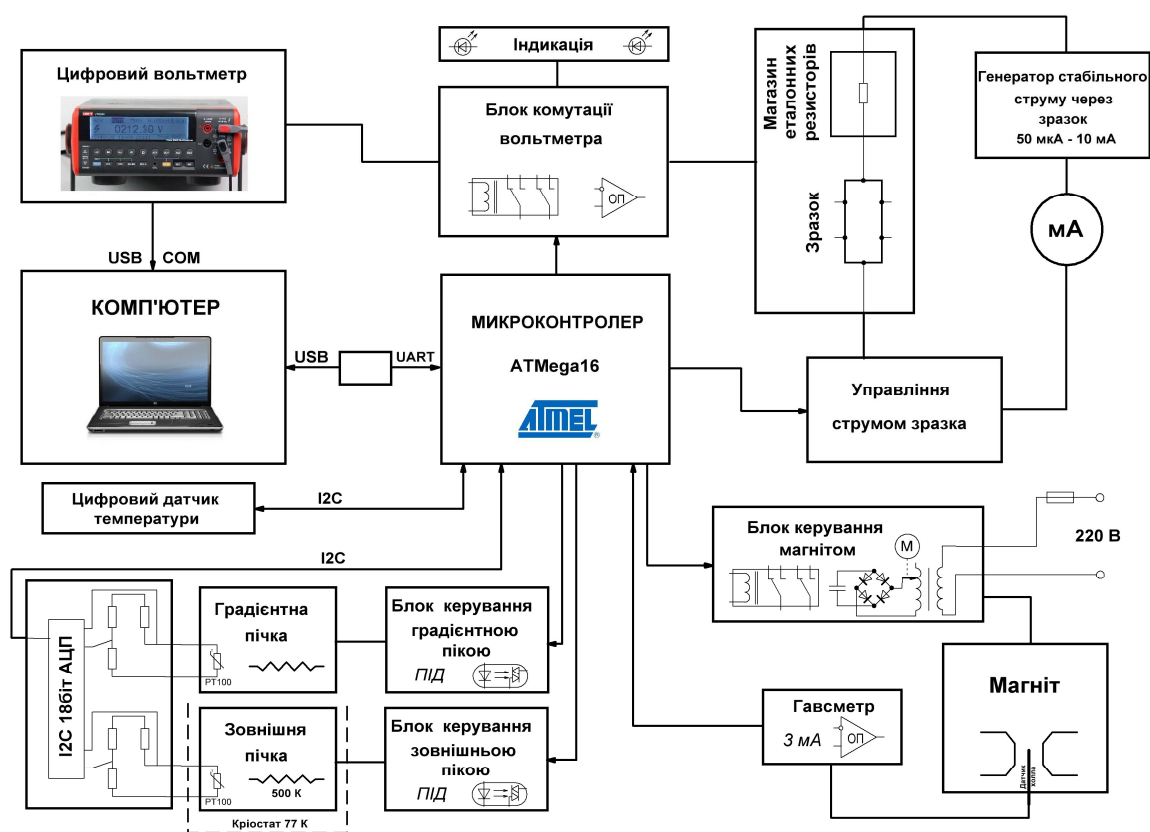


Рис. 2. Функціональна блок-схема установки автоматизованих вимірювань термоелектричних параметрів напівпровідників.

В якості керуючого пристрою вибрано мікроконтролер ATmega16, який характеризується достатньою кількістю пам'яті і добре розвинутою периферією. Використання даного мікроконтролера дало можливість реалізувати поставлену задачу, а також залишилися ресурси для подальшої модернізації та розширення функціоналу. Програма для мікроконтролера написана на С. Зв'язок з комп'ютером на апаратному рівні забезпечується перетворювачем USB-UART, а на програмному за допомогою інтерпретатора текстових команд, що забезпечує двосторонній обмін даними між керуючою програмою на комп'ютері та мікроконтролером установки.

Зняття спаду напруги на зразку, еталонному резисторі, холлівський та струмових парах

контактів здійснюється послідовно за допомогою шести герконових мікрореле блоку комутації. Використання герконових мікрореле забезпечує низький опір контактів у включеному та надзвичайно високий (більше 1 ГОм) у виключеному стані, а також стабільність контактів у часі. Генератор стабільного струму через зразок зібраний на мікросхемі LM234 і має 12 дискретних значень струму які контролюються амперметром. Увімкнення струму та зміна полярності реалізована на електромеханічних реле які управляються мікроконтролером.

Зміна полярності магнітного поля та увімкнення магніту реалізована на електромагнітних контакторах, які гальванічно розв'язані від мікроконтролера за допомогою оптосимісторів. З метою мінімізації електромагнітних завад на всі контактори встановлено іскрогасящі RC ланцюжки. Управління величиною магнітного поля здійснюється плавно за допомогою моторизованого лабораторного автотрансформатора. Управління мотором реалізовано через оптосимістори та реле з метою гальванічної розв'язки від керуючого мікроконтролера. Зворотній зв'язок здійснюється по напрузі через розв'язуючий трансформатор TR3 (рис. 4). У попередній версії була спроба реалізувати плавне керування магнітним полем за допомогою широтно-імпульсної модуляції на силових високовольтних MOS-FET транзисторах, але в зв'язку з великою кількістю електромагнітних завад та нестабільністю роботи на індуктивне навантаження від такої реалізації довелося відмовитися.

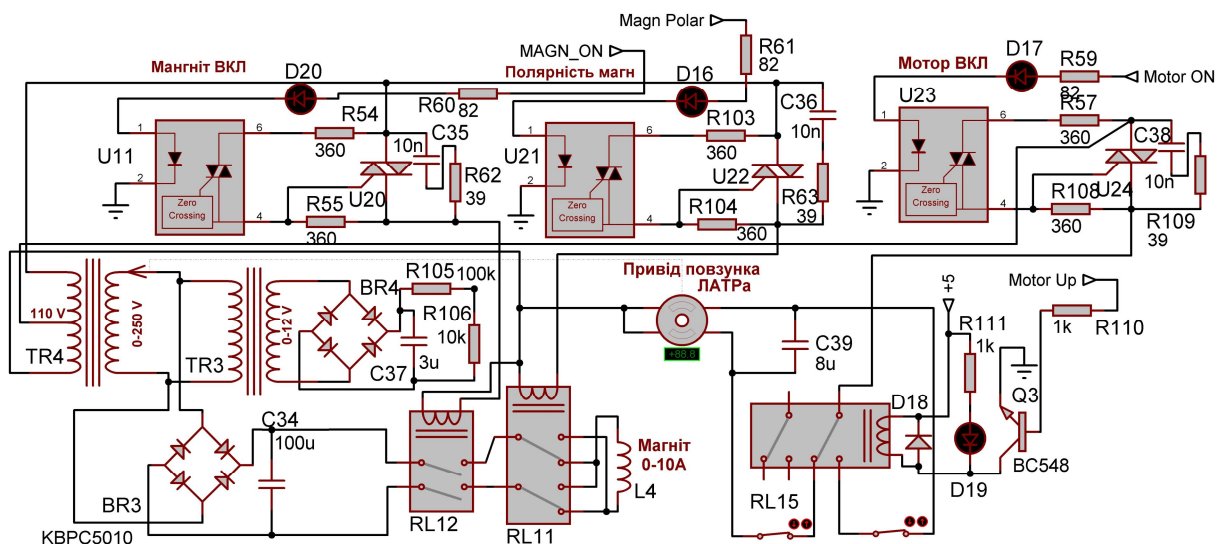


Рис. 3. Електрична принципова схема блоку керування величиною магнітної індукції.

Для вимірювання індукції магнітного поля застосовано давач Холла (ДХК-0,5А, ПХЭ602117Б) який живиться стабільним струмом 3 мА і розміщується на виносному щупі в робочій зоні магніту (рис. 3). Сигнал з датчика нормується операційним підсилювачем і зчитується аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) мікроконтролера. Калібровка і повірка проводилась за допомогою високоточного гавсметра Ш1-8 в діапазоні (0.05-2.0) Тл з занесенням калібрівочної таблиці в пам'ять мікроконтролера.

Температура вимірюється платиновими терморезисторами PT100 ввімкненим в мостову схему (рис. 4), яка живиться від прецизійного джерела опорної напруги AD1583. В якості резисторів у плечах моста використано 0.1 % SMD резистори з малим ТКО. Напруга розбалансу моста вимірюється дискретним I2C сігма-дельта АЦП MCP3424, розміщеним разом з мостовими схемами і джерела опорної напруги на окремій платі в роз'ємні вимірювальної



комірки. Управління нагрівачами забезпечується симісторним регулятором, з комутацією при переході напруги через нуль та опторозв'язкою. Стабілізація температур здійснюється за допомогою пропорційно інтегрально диференціального (ПІД) алгоритму з рівномірним розподілом періодів згідно алгоритму Брезенхема.

Загальний вигляд установки показано на рис. 5. З метою мінімізації електромагнітних завад функціональні блоки зібрані на окремих друкованих платах які розміщуються в закритих алюмінієвих комірках заземленого корпусу і з'єднуються між собою екранованим проводом, а силову частину (блок управління магнітом і нагрівниками) винесено в окремих корпус (рис. 5).

## Програмна реалізація процесу вимірювання

Комп'ютерна програма забезпечує автоматизоване керування процесом вимірювання, реєстрацію даних з цифрового вольтметра, попередню обробку та візуалізацію даних. Написана програма в середовищі Delphi. Дані з вольтметра приймаються і декодуються програмою та відображаються на екрані, а також розраховується і відображається середнє значення по десяти останніх отриманих вимірах. Підтримуються вольтметри UNI-T як з новим протоколом передачі даних (UTM1805A) так і попередні версії (UT804).

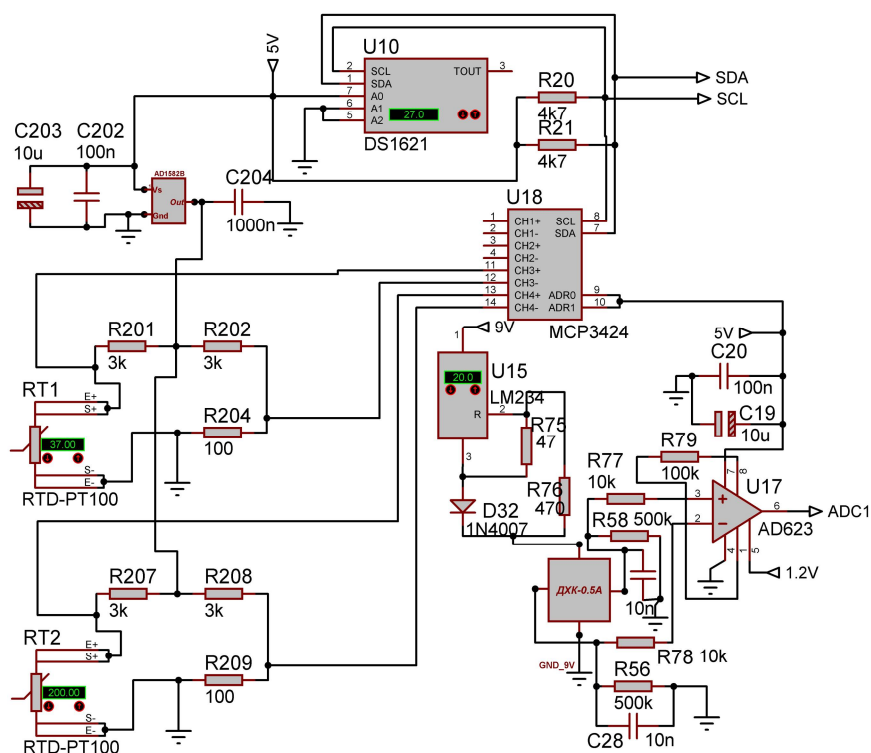


Рис. 4. Електрична принципова схема блоку вимірювання температури та магнітної індукції.

Між контролером і комп'ютером реалізовано двосторонній обмін інформацією через UART (швидкість 9600 біт/с, 8 біт), керування установкою та запит даних здійснюється шляхом відправлення команд та отримання відповіді після їх виконання. Реалізована перевірка правильності команди та повторна відправка в разі помилки. Так як деякі команди виконуються періодично по таймеру з метою уникнення збоїв відслідковується статус очікування результату виконання поточної команди.



Рис. 5. Загальний вигляд установки автоматизованих вимірювань термоелектричних параметрів напівпровідників.

У ручному режимі програма дозволяє управляти окремими функціональними блоками незалежно, що дає можливість проводити налагодження та виконувати нестандартний експеримент з автоматичним чи ручним записом результатів.

В автоматизованому режимі програма дозволяє проводити як одиночні вимірювання електричних параметрів з автоматичним розрахунком коефіцієнта Зеебека, питомої провідності, концентрації та рухливості носіїв, та ін.), так і серії вимірювань від часу, температури чи магнітного поля з побудовою температурно-часової діаграми запланованих вимірювань (рис. 6). У процесі вимірювань можлива візуалізація вибраних параметрів у вигляді графічних залежностей.

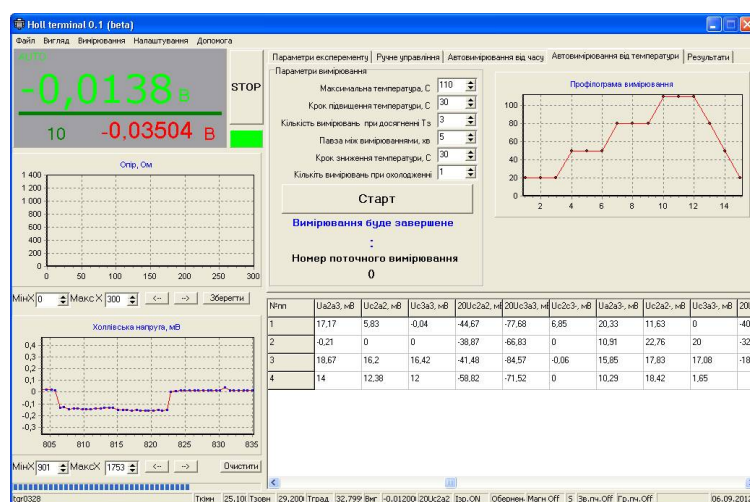


Рис. 6. Загальний вигляд вікна керуючої програми в процесі автоматизованих вимірювань термоелектричних параметрів плівок

Для серії зразків різних товщин реалізується можливість автоматичного фільтрування даних та побудови профілів термоелектричних параметрів. Результати вимірювання кожного зразка зберігаються в окремому MS Excel сумісному файлі з можливістю подальшого продовження експерименту.

Для оцінки похибок проводили вимірювання зразків різного типу провідності з відомими параметрами. Максимальна похибка визначення  $\sigma$  не перевищувала 3 %,  $RH$  – 5 %, а величини  $\alpha$  – 10 %. Результати досліджень термоелектричних напівпровідникових плівок отриманих на

даному вимірювальному комплексу представлено у роботах [4 – 6]. При тривалій регулярній експлуатації установка показала високу надійність і стабільність результатів.

## Висновки

1. Розроблена електрична схема, та сконструйована діюча установка вимірювання коефіцієнта Зеебека, холлівської концентрації носіїв, питомої електропровідності напівпровідникових плівкових термоелектричних матеріалів.
2. Створена комп'ютерна програма що забезпечує автоматизацію вимірювань, реєстрацією і первинною обробку даних, з можливістю їх візуалізації графічних залежностей.

## Література

1. Шперун В.М., Фреїк Д.М., Запихляк Р.І. Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів. Івано-Франківськ, Плай, 2000, 250 с.
2. Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла. Москва, Советское радио, 1974, 328 с.
3. Ковтонюк Н.Ф.. Измерение параметров полупроводниковых материалов. Москва, Металлургия, 1970, 429 с.
4. Saliy Y.P., Dzundza B.S., Bylina I.S., Kostyuk O.B. The influence of the technological factors of obtaining on the surface morphology and electrical properties of the PbTe films doped Bi // Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol 8, N 2, 2016, P. 02045-02051.
5. Дзундза Б.С., Костюк О.Б., Маковишин В.І., Перегінчук М.Ю. Термоелектричні властивості тонких плівок на основі чистого і легованого плюмбум телуриду // Термоелектрика №6, 2016. С. 55-61.
6. Ruvinskii M.A., Kostyuk O.B., Dzundza B.S., Yaremiy I.P., Mokhnatskyi M.L., Yavorskyu Ya.S. Kinetic phenomena and thermoelectric properties of polycrystalline thin films based on PbSnAgTe compounds // Journal of Nano - and Electronic Physics, Vol. 9, N 5, 2017, P. 05004-1 – 05004-6.

Надійшла в редакцію 04.10.2018

**Дзундза Б.С.**, канд. физ.-мат. наук

Прикарпатский национальный университет  
имени Василия Стефаника,  
ул. Шевченко, 57, Ивано-Франковск, 76018, Украина,  
e-mail: bohdan.dzundza@pu.if.ua.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Описана методика измерения коэффициента Зеебека, холловской концентрации носителей, удельной электропроводности полупроводниковых пленочных термоэлектрических*

материалов. Представлена электрическая схема и разработана компьютерная программа, которая обеспечивает автоматизацию измерений, регистрацию и первичную обработку данных, с возможностью построения графиков временных зависимостей для предварительного анализа экспериментальных данных уже в процессе измерения. Библ. 6, рис. 6.

**Ключевые слова:** термоэлектричество, холловские измерения, автоматизация, микроконтроллер, тонкие пленки.

**B.S. Dzundza**  *cand. phys. - math. sciences*

Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University  
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine,  
*e-mail: bohdan.dzundza@pu.if.ua*

### **AUTOMATED HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM FOR MEASUREMENT OF THERMOELECTRIC PARAMETERS OF SEMICONDUCTOR MATERIALS**

*A method of measuring Seebeck coefficient, Hall concentration of current carriers, electrical conductivity of semiconductor films has been described. An electric circuit has been presented and a computer program, which enables automation of measurement, registration and initial processing of data with the possibility of charting time dependences for preliminary analysis of experimental data in the process of measurement, has been developed. Fig. 6, Bibl. 6.*

**Keywords:** thermoelectricity, hall measurements, automation, microcontroller, thin films.

#### **References**

1. Shperun V.M., Freik D.M., Zapukhliak R.I.. Termoelektryka telurydu svyntsiu ta yoho analohiv. Ivano-Frankivsk, Plaj, 2000, 250 s.
2. Kuchys E.V. Методы yssledovaniya эффеkта Kholla. Moskva, Sovetskoe radyo, 1974, 328 s.
3. Kovtoniuk N.F.. Yzmerenye parametrov poluprovodnykovykh materyalov. Moskva, Metallurhyia, 1970, 429 s.
4. Saliy Y.P., Dzundza B.S., Bylina I.S., Kostyuk O.B. The influence of the technological factors of obtaining on the surface morphology and electrical properties of the PbTe films doped Bi// Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol 8, N 2, 2016, P. 02045-02051.
5. Dzundza B.S., Kostiuk O.B., Makovyshyn V.I., Perehinchuk M.Iu. Termoelektrychni vlastyvoli tonkykh plivok na osnovi chystoho i lehovanoho pliumbum telurydu // Termoelektryka №6, 2016. S. 55-61.
6. Ruvinskii M.A., Kostyuk O.B., Dzundza B.S., Yaremiy I.P., Mokhnatskyi M.L., Yavorskyu Ya.S. Kinetic phenomena and thermoelectric properties of polycrystalline thin films based on PbSnAgTe compounds // Journal of Nano - and Electronic Physics, Vol. 9, N 5, 2017, P. 05004-1 – 05004-6.

Submitted 04.10.2018

УДК 536.24

Анатичук Л.І., акад. НАН України<sup>1,2</sup>  
Прибила А.В., канд. физ.-мат. наук<sup>1,2</sup>



Анатичук Л.І.

<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



Прибила А.В.

**ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ З  
ПОЛУМ'ЯНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛА ЗМІННОЇ  
ПОТУЖНОСТІ, ДВОКАСКАДНИМИ ТЕРМОБАТАРЕЯМИ ТА  
АКУМУЛЯТОРАМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

*У роботі виконано розрахунки динамічної потужності двокаскадного термоелектричного генератора з полум'яними джерелами тепла змінної потужності. Наводяться результати розрахунків такого генератора із каскадами, виготовленими із матеріалів на основі  $BiTe$  та  $SiGe$ . Бібл. 6, рис. 2.*

**Ключові слова:** термоелектричний генератор, комп'ютерне проектування, фізична модель.

**Вступ**

*Загальна характеристика проблеми.* Одним із чинників, що обмежують широке практичне застосування термоелектричних генераторів (ТЕГ), є низька ефективність перетворення теплової енергії в електричну, зумовлена використанням в конструкції ТЕГ однокаскадних модулів з низьким значенням безрозмірної добротності термоелектричних матеріалів,  $ZT = 1.0 - 1.6$  [1–3]. Один із способів підвищення ККД термоелектричного перетворення полягає в розширенні діапазону робочих температур модуля шляхом каскадування [4]. Для створення генераторних модулів, оптимізованих на рівень робочих температур 30-600 °С раціонально використовувати двокаскадну схему з термоелементами на основі  $Bi-Te$  *n*- та *p*- типів провідності в низькотемпературному каскаді (до 300 °С) і, відповідно, термоелементами на основі  $Si-Ge$ , що забезпечують високу ефективність у високотемпературному каскаді (300 - 600 °С).

В Інституті термоелектрики НАН і МОН України розроблені спеціалізовані термоелектричні модулі із таких матеріалів для кожного із каскадів ТЕГ. Проте досі не проведені розрахунки параметрів ТЕГ, що використовує схему з термоелементами на основі  $Bi-Te$  в низькотемпературному каскаді і  $Si-Ge$  – у високотемпературному, в режимі, наближеному до його реальної експлуатації. Важливим залишається також питання правильного узгодження каскадів ТЕГ.

Отже, метою даної роботи є розрахунок динамічних робочих характеристик двокаскадного термоелектричного генератора із джерелами тепла змінної потужності у діапазоні температур 30-600 °С.

### Фізична модель

У розрахунках використано фізичну модель блока термоелектричного генератора (рис. 1), яка містить нагріту поверхню джерела тепла змінної потужності 1, теплообмінники для підведення 2 теплового потоку до модуля високотемпературного каскаду ТЕГ (виготовленого із термоелектричного матеріалу на основі Si-Ge [5]) 3 та теплообмінників 7 для відведення теплового потоку від двох модулів високотемпературного каскаду ТЕГ (виготовлених із стандартного термоелектричного матеріалу на основі Bi-Te [5]) 5, тепловирівнюючу пластину 4, теплову ізоляцію 6, стабілізатор електричної напруги 8 та акумулятор електричної енергії 9.

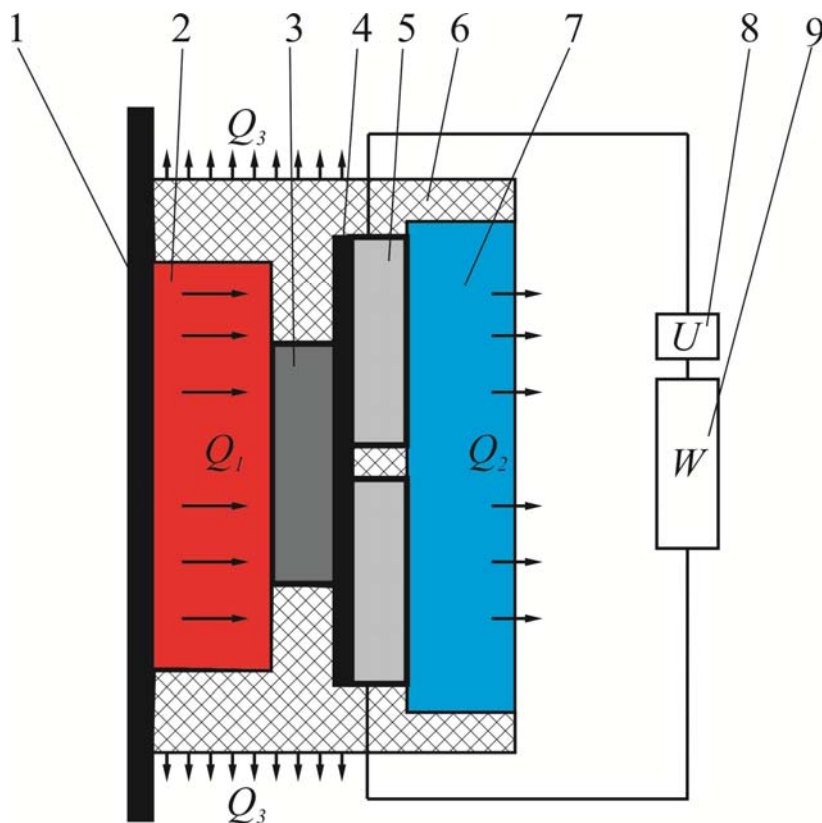


Рис. 1. Фізична модель блока термоелектричного генератора:

1 – нагріта поверхня; 2 – гарячий теплообмінник; 3 – модуль низькотемпературного каскаду ТЕГ; 4 – тепловирівнююча пластину; 5 – модулі високотемпературного каскаду ТЕГ; 6 – тепла ізоляція; 7 – холодний теплообмінник; 8 – стабілізатор напруги; 9 – акумулятор електричної енергії.

Оскільки генератор встановлений на нагріту поверхню, у моделі не розглядаються процеси теплопереносу від реального джерела горіння палива до цієї поверхні. Замість цього, для визначення температури нагрітої поверхні 1, використовуються експериментальні залежності її температури від часу при реальному циклі використання джерела тепла на твердому паливі [2].

### Математичний і комп'ютерний описи моделі

Таким чином, для розрахунку термоелектричного генератора відповідно до фізичної моделі (рис. 1) використано рівняння балансу теплот.

На гарячій стороні міститься джерело тепла змінної потужності  $Q_1[T_1(t)]$ . Його теплова потужність залежить від температури цієї поверхні  $T_1$ , яка, в свою чергу, змінюється із часом  $t$  [3], та подається у вигляді деякої функції  $f[T_1(t)]$ .

$$Q_1 = f[T_1(t)], \quad (1)$$

Підведення тепла від нагрітої поверхні до гарячої сторони термоелектричного модуля та відведення тепла до холодного теплообмінника описується рівняннями:

$$Q_1 = \chi_1[T_1(t) - T_T], \quad (2)$$

$$Q_2 = \chi_2[T_X - T_2], \quad (3)$$

де  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  – теплові опори гарячого і холодного теплообмінників;  $T_T$ ,  $T_X$  – температури гарячої та холодної сторони термоелектричного модуля відповідно;  $T_2$  – температура зовнішньої поверхні холодного теплообмінника.

Теплова потужність  $Q_2$  відводиться від холодного теплообмінника шляхом примусової конвекції повітря у навколишнє середовище:

$$Q_2 = \alpha(T_2 - T_0)S_m, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт конвективного теплообміну між поверхнею теплообмінника і навколишнім середовищем;  $S_m$  – площа поверхні теплообміну;  $T_0$  – температура навколишнього середовища.

Електрична потужність, яка генерується термоелектричним модулем пропорційна  $Q_1[T_1(t)]$  та його ККД  $\eta$ :

$$W = Q_1[T_1(t)] \cdot \eta, \quad (5)$$

Основні втрати тепла  $Q_3$  відбуваються через теплову ізоляцію:

$$Q_3 = \chi_4(T_M - T_0), \quad (6)$$

де  $\chi_4$  – тепловий опір ізоляції,  $T_M$  – температура внутрішньої поверхні теплової ізоляції.

Таким чином, рівняння теплового балансу для обраної моделі термоелектричного генератора можна записати у вигляді:

$$Q_1 = W + Q_2 + Q_3. \quad (7)$$

Для комп'ютерного представлення математичної моделі ТЕГ використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [6]. Для цього необхідно представити наші рівняння у наступному вигляді.

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (8)$$

й електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (9)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (10)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (11)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T. \quad (12)$$

Тут  $\vec{E}$  – щільність потоку енергії,  $\vec{q}$  – щільність теплового потоку,  $\vec{j}$  – щільність електричного струму,  $U$  – електричний потенціал,  $T$  – температура,  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$  – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності.

Враховуючи (10) – (12), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (13)$$

Тоді закони збереження (8), (9) набувають вигляду:

$$-\nabla[(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla[(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (14)$$

$$-\nabla(\sigma \alpha \nabla T) - \nabla(\sigma \nabla U) = 0. \quad (15)$$

З розв'язку рівняння (14) - (15) ми одержимо розподіли фізичних полів, а також інтегральні значення ефективності та потужності ТЕГ.

### Опис динамічних потужностей ТЕГ

Для визначення реальних температурних умов на нагрітих поверхнях пічок із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі (дровах) проведено експериментальні дослідження та визначено залежності температур нагрітих поверхонь пічки від часу, протягом якого із рівними інтервалами відбувалося додавання однакової кількості дров [2].

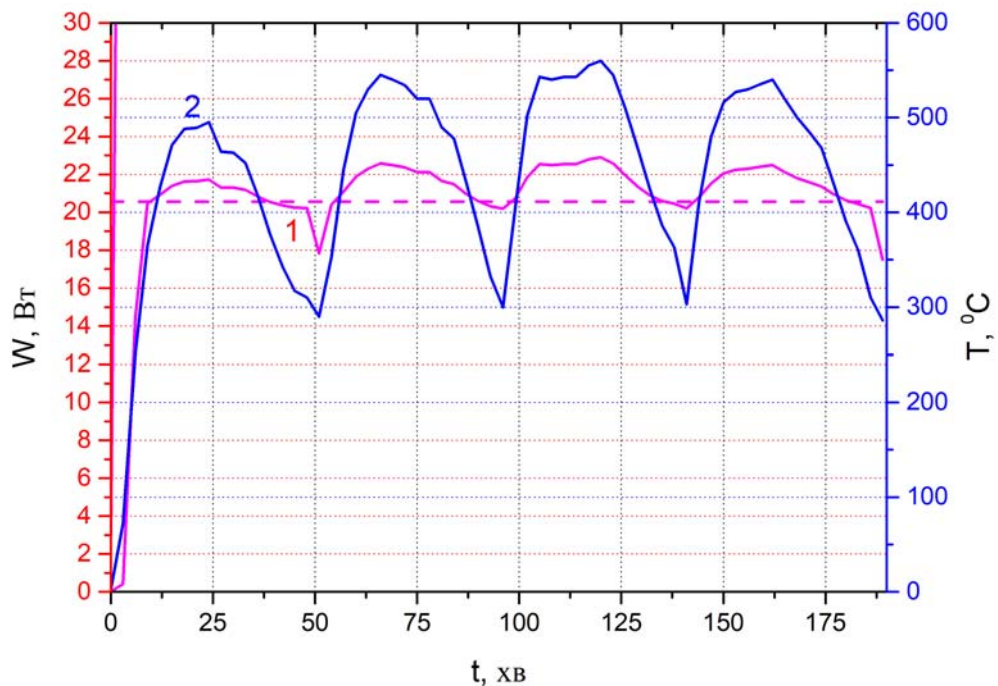


Рис. 2. Залежність потужності ТЕГ розміщеного на задній поверхні пічки від часу:  
 1 – потужність ТЕГ при  $T_{\text{х}}=30^\circ$ , 2 – температура поверхні пічки.

Отримані дані оброблені у вигляді функціональних залежностей температур нагрітих поверхонь пічки від часу і використані при розрахунках характеристик термоелектричного генератора із полум'яними джерелами тепла змінної потужності на твердому паливі.



Таким чином, використовуючи комп'ютерні методи, проведено розрахунок динамічних потужностей ТЕГ за умов його встановлення на поверхні пічки (рис. 2).

Таким чином, на рис.2 наведено залежність потужності ТЕГ, розміщеного на задній поверхні пічки, від часу для температури холодної сторони ТЕГ  $T_{\text{х}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1 на рис.2). Температура гарячої сторони ТЕГ показана суцільною кривою 2 на рис. 2.

Як видно із рис. 2, характер залежності динамічної потужності від часу хоча й відтворює залежності температури поверхні пічки, проте ця залежність від температури є не такою різкою як в однокаскадному варіанті ТЕГ [3]. Для температури холодної сторони  $T_{\text{х}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  усереднене значення потужності ТЕГ, що складається із одного термоелектричного модуля на високотемпературному каскаді (із *Si-Ge*) та двох на низькотемпературному (з *Bi-Te*), за вибраний відрізок часу становить 20.56 Вт. При цьому енергія, що генерується ТЕГ у розрахунку на 1 год, становить  $\sim 70$  кДж.

Отже, досліджуваний варіант двокаскадного ТЕГ із спеціалізованих матеріалів на основі *BiTe – SiGe* дозволяє підвищити його питому потужність на  $\sim 12.5\%$  у порівнянні із однокаскадним варіантом [2].

## Висновки

1. На основі експериментальних даних, розраховано динамічну потужність двокаскадного ТЕГ із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі, що використовують термоелементи на основі *Bi-Te* в низькотемпературному каскаді і *Si-Ge* – у високотемпературному.
2. Усереднене значення потужності ТЕГ, що складається із одного термоелектричного модуля на високотемпературному каскаді (із *Si-Ge*) та двох на низькотемпературному (з *Bi-Te*), у заданому часовому відрізку становить 20.56 Вт (за температури його холодної сторони  $T_{\text{х}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). При цьому енергія, що генерується ТЕГ у розрахунку на 1 год, становить  $\sim 70$  кДж.
3. Встановлено, що досліджуваний варіант двокаскадного ТЕГ із спеціалізованих матеріалів на основі *BiTe – SiGe* дозволяє підвищити його питому потужність на  $\sim 12.5\%$  у порівнянні із однокаскадним варіантом.

## Література

1. Анатичук Л.І., Мочернюк Р.М., Гаврилюк М.В., Андрусак І.С. Термоелектричний генератор, що використовує тепло нагрітих поверхонь // Термоелектрика. – 2017. № 2. – С 84 – 95.
2. Анатичук Л.І., Розвер Ю.Ю., Прибила А.В., Максимук М.В. Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності і стабілізаторами температури термобатарей // Термоелектрика. – 2018. № 2.
3. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності, однокаскадними термобатарейми та акумуляторами електричної енергії // Термоелектрика. – 2018. № 3.
4. Михайловський В.Я. Термоелектричні каскадні модулі із матеріалів на основі *Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-PbTe*-TAGS. / Михайловський В.Я., Білінський-Слотило В.Р. // Термоелектрика, 2012, № 4, С. 67-74.
5. <http://www.ite.inst.cv.ua>
6. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Надійшла до редакції 22.10.2018

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
Прибыла А.В., *канд. физ.-мат. наук*<sup>1,2</sup>

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

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

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА ПЕРЕМЕННОЙ МОЩНОСТИ, ДВУХКАСКАДНЫМИ ТЕРМОБАТАРЕЯМИ И АККУМУЛЯТОРАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*В работе выполнены расчеты динамической мощности двухкаскадного термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла переменной мощности. Приводятся результаты расчетов такого генератора с каскадами, изготовленными из материалов на основе систем Bi-Te и Si-Ge. Библиография, рис. 2.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, компьютерное проектирование, физическая модель.

Anatyshuk L.I., *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*<sup>1,2</sup>  
Prybyla A.V., *cand. Phys.-math. Sciences*<sup>1,2</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

## THERMOELECTRIC GENERATORS WITH FLAME HEAT SOURCES, TWO-STAGE THERMOPILES AND ELECTRIC ENERGY BATTERIES

*This paper presents calculations of the dynamic power of a two-stage thermoelectric generator with flame heat sources of variable power. The results of calculations of such a generator with its stages made of materials based on BiTe and SiGe are given. Bibliography, Fig. 2.*

**Key words:** thermoelectric generator, computer design, physical model.

### References

1. Anatyshuk L.I., Mocherniuk R.M., Havryliuk M.V., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J. Thermoelectricity*, 2, С 84 – 95.
2. Anatyshuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V., Maksimuk M.V. (2018). Thermoelectric generators

with flame heat sources of variable power and temperature stabilizers for thermopiles. *J. Thermoelectricity*, 2.

3. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2018). Thermoelectric generators with flame heat sources of variable power, single-stage thermopiles and electric energy batteries. *J. Thermoelectricity*, 3.
4. Mykhailovsky V.Ya., Bilinsky-Slotylo V.R. (2012). Thermoelectric staged modules of materials based on Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-PbTe-TAGS. *J. Thermoelectricity*, 4, 67-74.
5. <http://www.ite.inst.cv.ua>
6. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010). COMSOLAB, 804 p.

Submitted 22.10.2018



Ніщович О. В.

Ніщович О.В., канд. фіз.-мат. наук<sup>1</sup>

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

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

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ $Bi_2Te_3$ ПРИ НАЯВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

У статті представлений підхід до побудови комп'ютерної моделі процесу вирощування термоелектричних матеріалів методом вертикальної зонної плавки з врахуванням ефекту Пельтьє, що виникає на межі розділу твердої та рідкої фаз вирощуваного матеріалу при пропусканні через злиток електричного струму. Наведено результати візуалізації чисельного рішення моделі. Бібл. 10, рис. 5.

**Ключові слова:** моделювання, вертикальна зонна плавка, термоелектричний матеріал, вирощування в електричному полі.

### Вступ

Термоелектричні перетворювачі енергії – охолоджувачі та термогенератори – знаходять широке використання в багатьох галузях сучасної техніки. Актуальною задачею є підвищення ефективності цих пристроїв, зокрема створення для них матеріалів з високою термоелектричною добротністю  $Z$ .

Найбільш широко використовуються напівпровідникові тверді розчини  $Bi_2Te_3$ - $Bi_2Se_3$  і  $Bi_2Te_3$ - $Sb_2Te_3$ , що мають максимальні значення добротності в області температур 250 – 500 К. Для отримання термоелектричного матеріалу (ТЕМ) на основі  $Bi_2Te_3$  з високими параметрами найбільш перспективними є методи направленої кристалізації розплаву та метод вертикальної зонної плавки. Причому, отримання термоелектричних матеріалів з необхідними властивостями можливе лише в умовах контрольованого процесу кристалізації. Тому актуальним є моделювання процесів вирощування ТЕМ, що дають можливість оптимізувати вибір технологічних параметрів установки.

У роботах [1, 5] розглядалася можливість вирощування монокристалів термоелектричних матеріалів методом вертикальної зонної плавки при наявності електричного струму, що проходить через злиток. Відомо, що границя розділу твердої та рідкої фаз одного і того ж матеріалу є тим місцем де стрибкоподібно змінюється величина коефіцієнта термоЕРС, електропровідність, теплопровідність та інші властивості. На границі розділу фаз змінюється і картина заповнення енергетичних рівнів електронами. Це проявляється в ефекті Пельтьє, що виникає на фронті кристалізації матеріалу при пропусканні через вирощуваний кристал

електричного струму. Та кількість тепла, що виділяється чи поглинається на границі розділу між рідкою та твердою фазами може вплинути на хід кристалізації.

Таким чином, метою даної роботи є створення способу побудови комп'ютерної моделі процесу вирощування термоелектричних матеріалів методом вертикальної зонної плавки, з врахуванням ефекту Пельтьє, що виникає на межі розділу твердої та рідкої фаз вирощуваного матеріалу при пропусканні через злиток електричного струму.

### Фізична модель процесу вертикальної зонної плавки

Фізична модель процесу вирощування монокристалів на основі  $Bi_2Te_3$  методом вертикальної зонної плавки представлена на рис. 1.

На рисунку зображено фрагмент злитка, що включає полікристалічний матеріал 2, розплавлену зону 6 та монокристал 3. Злиток поміщено в кварцову ампулу 1. За допомогою нагрівача 7 та системи охолоджувачів 8, формується розплавлена зона 6, яка, переміщуючись разом з нагрівачем вздовж зразка, забезпечує плавлення полікристалу та кристалізацію розплаву нижче границі 5, яку називають фронтом кристалізації.

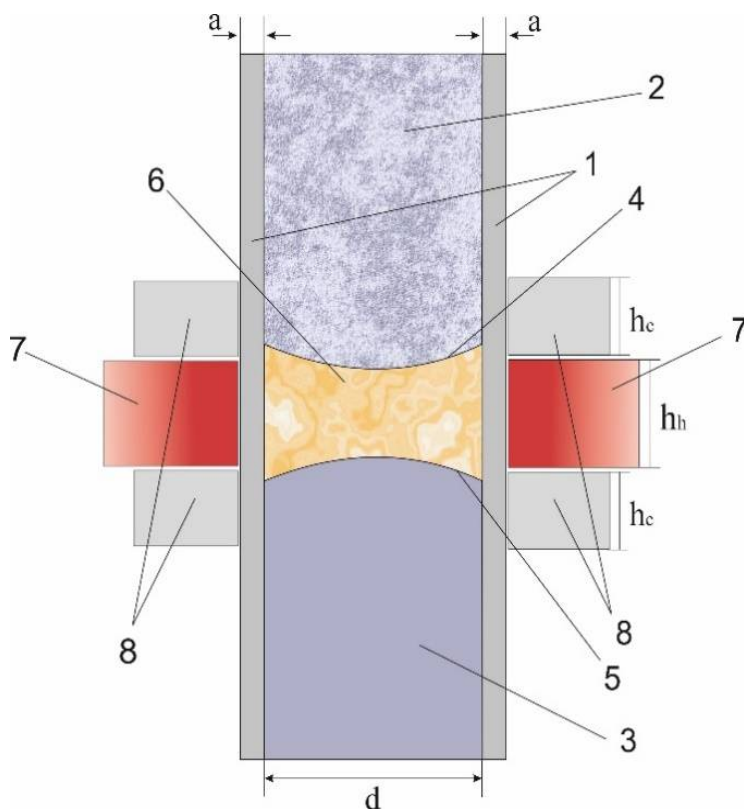


Рис. 1. Фізична модель установки вирощування ТЕМ методом вертикальної зонної плавки:  
 1 – кварцова ампула, 2 – матеріал в твердій фазі (полікристал), 3 – матеріал в твердій фазі (монокристал), 4 – границя фронту розплаву, 5 – границя фронту кристалізації,  
 6 – матеріал в рідкій фазі (зона розплаву), 7 – нагрівник, 8 – охолоджувачі.

Оскільки границі розділу твердої та рідкої фаз 4 та 5 одного і того ж матеріалу є місцем різкої зміни властивостей даного матеріалу, зокрема, величини коефіцієнта термоерс  $\alpha$ , електропровідності  $\sigma$  чи теплопровідності  $\kappa$ , то при пропусканні через дані границі

електричного струму, на одній із них буде поглинатися, а на іншій, відповідно, виділятися тепло Пельтьє.

### Математичний та комп'ютерний опис моделі

При моделюванні процесу теплопровідності в однорідному середовищі з фазовим переходом в програмному комплексі COMSOL Multiphysics розв'язується класична система нестационарних диференціальних рівнянь теплопровідності доповнена залежностями фізичних властивостей досліджуваного твердого тіла, як функції від фазового стану в даній точці при даній температурі:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T + \nabla q = Q, \quad (1)$$

$$q = -k \nabla T, \quad (2)$$

$$q = \theta \rho_{phase} + (1 - \theta) \rho_{phase2}, \quad (3)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \left( \theta \rho_{phase1} C_{p_{phase1}} + (1 - \theta) \rho_{phase2} C_{p_{phase2}} \right) + L \frac{d\alpha_m}{dT}, \quad (4)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 - \theta) \rho_{phase2} - \theta \rho_{phase1}}{\theta \rho_{phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2}}, \quad (5)$$

$$k = \theta k_{phase1} + (1 - \theta) k_{phase2}, \quad (6)$$

де  $\rho$  – густина,  $\text{кг/м}^3$ ;  $C_p$  – теплоємність матеріалу при постійному тиску,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $k$  – теплопровідність,  $\text{Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$ ,  $u$  – швидкість руху середовища,  $\text{м/с}$ , в досліджуваній задачі рівна нулю;  $T$  — температура,  $\text{К}$ ;  $t$  — час,  $\text{с}$ ;  $\theta$  – співвідношення фаз при даній температурі;  $\alpha_m$  – масове відношення між фазами;  $L$  – прихована теплота фазового переходу,  $\text{Дж/кг}$ ;  $Q$  – зовнішній тепловий потік,  $\text{Вт}$ . Індеси  $phase1$  та  $phase2$  показують до якої фази відносяться властивості, тверда фаза чи рідка, відповідно.

Тепло Джоуля-Ленца, що виникає в матеріалі за рахунок проходження електричного струму, враховується в правій частині рівняння (1) ще одним доданком  $Q_e = jE$ .

Для врахування термоелектричних ефектів, зокрема ефекту Пельтьє, що виникає на границях розділу фаз, формулу (2) записуємо наступним чином:

$$q = -k \nabla T + Pj, \quad (7)$$

тут

$$j = \sigma E + j_e, \quad (8)$$

$$j_e = -\sigma \alpha \nabla T, \quad (9)$$

$$P = \alpha T,$$

$$E = -\nabla U.$$

де  $U$  – електричний потенціал, В;  $\alpha$  – коефіцієнт термоерс, мкВ/К;  $\sigma$  – електропровідність,  $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ .

Для моделювання впливу електричного поля на процес вирощування, на верхній та нижній границях злитку задаються наступні граничні умови:

$$U|_{z=0} = U_0, U|_{z=l} = 0.$$

На усіх зовнішніх стінках нагрівника та охолоджувачів задавалася умова теплоізоляції:

$$-n \cdot (-\kappa \nabla T) = 0. \quad (10)$$

На зовнішній стінці кварцової ампули (на ділянках, що не контактують з нагрівачем на охолоджувачами) задається гранична умова теплового потоку, у вигляді функції:

$$-n \cdot (-\kappa \nabla T) = h \cdot (T_{ext} - T), \quad (11)$$

де  $T_{ext}$  – температура навколишнього середовища, К;  $T$  – температура внутрішньої стінки ампули, К;  $n$  – вектор напрямлений по нормалі до поверхні циліндра (ампули);  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К), який виражається формулою [8]:

$$h = \begin{cases} \frac{k}{l} \left( 0,68 + \frac{0,67 Ra_l^{1/4}}{\left( 1 + \left( \frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right), & \text{если } Ra_l \leq 10^9 \\ \frac{k}{l} \left( 0,825 + \frac{0,38 Ra_l^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0,462k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right), & \text{если } Ra_l > 10^9 \end{cases}.$$

тут  $Ra_l$  – число Релея, що визначається наступним виразом:

$$Ra_l = \frac{g \alpha_p \rho^z C_p (T - T_{exp}) l^3}{\mu \kappa},$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha_p$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення, К<sup>-1</sup>;  $l$  – довжина шару повітря, м;  $\mu$  – динамічна в'язкість, (Па·с).

## Результати комп'ютерного моделювання

Як приклад використання розробленої програми, розглядався процес вирощування синтезо-

ваного матеріалу  $Bi_2Te_3$ , в кварцовій ампулі, товщина стінок якої 3мм, довжина злитка 250мм, діаметр  $d = 24$ мм. Температура нагрівача змінювалася в межах 680-950 °С, висота від 24 до 96 мм. Для моделювання впливу електричного струму на процес вирощування, на кінцях злитка створювалася різниця потенціалів від 0 до 4 В. На рис. 2 представлено вигляд змодельованої системи.

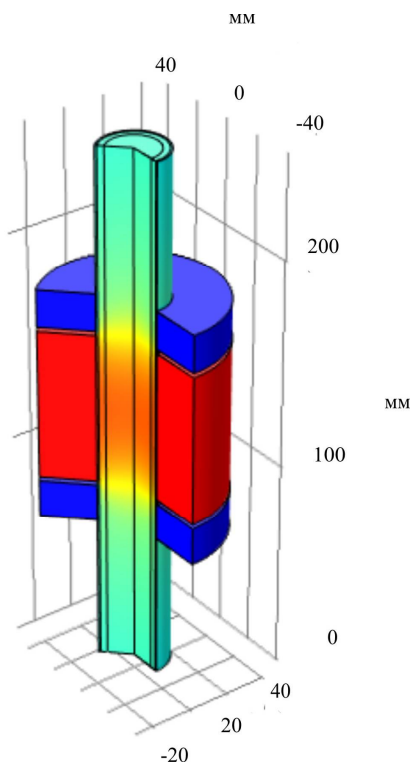


Рис. 2. Комп'ютерна модель установки вирощування ТЕМ методом вертикальної зонної плавки.

Температурні залежності коефіцієнтів термоЕРС  $\alpha(T)$ , електропровідності  $\sigma(T)$  та теплопровідності  $\kappa(T)$  для  $Bi_2Te_3$  показано на рис. 3-5. Наведені залежності були побудовані згідно із даними отриманими з літературних джерел [2, 9].

За рахунок зміни властивостей досліджуваного матеріалу, зокрема, величини та знаку коефіцієнта термоерс  $\alpha$ , електропровідності  $\sigma$  чи теплопровідності  $\kappa$ , при пропусканні через вирощуваний кристал електричного струму, на границях розділу фаз дійсно виникає ефект Пельтьє.

Результати моделювання показали, що тепло Пельтьє поглинається при проходженні струму з твердої фази в рідку і навпаки, виділяється при проходженні струму з рідкої фази в тверду.

Крім того, було встановлено, що змінюючи величину різниці потенціалів прикладеної до країв вирощуваного злитка можливо впливати на форму фронту кристалізації (ФК), який як відомо, має великий вплив на стійкість зростання монокристала і його однорідність.

При заданій конфігурації установки, без врахування електричного струму, плоский ФК досягався лише при температурах 900-910К. Як видно з рис.5, при проходженні електричного струму через розплавлену зону форма фронту кристалізації змінюється, що дає можливість оптимізувати процес вирощування.



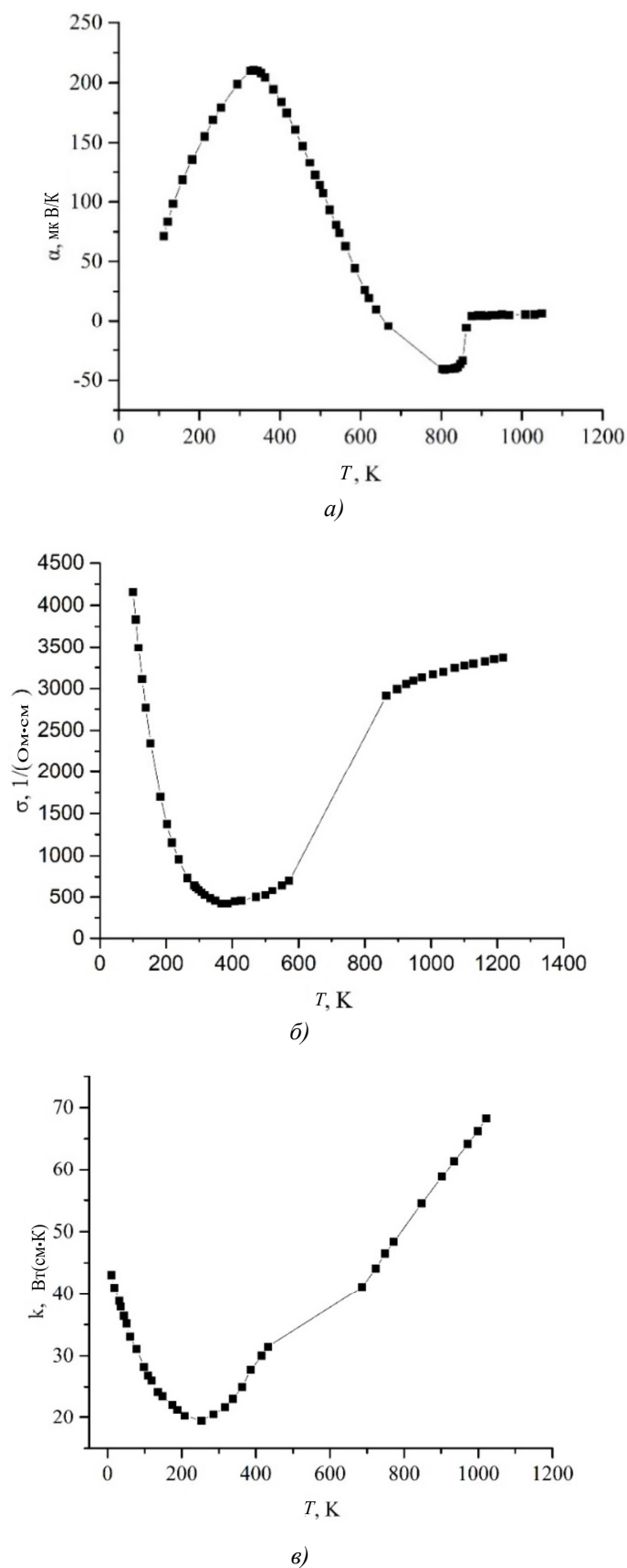


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів термоЕРС  $\alpha$  (а), електропровідності  $\sigma$  (б) та теплопровідності  $\kappa$  (в) телуриду вісмуту від температури.

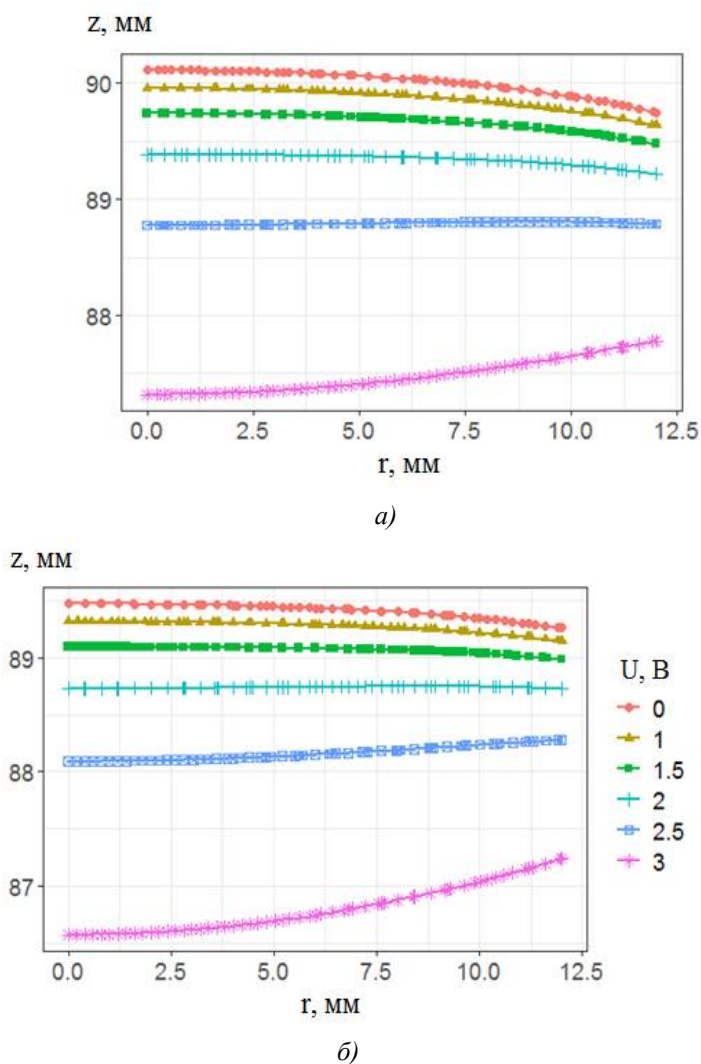


Рис. 4. Залежність форми фронту кристалізації від величини прикладеної різниці потенціалів при температурі нагрівника  $T = 880K$  (а) та  $T = 890K$  (б).

Авторами [10] було проведено ряд експериментів по впливу електричного струму на властивості матеріалів на основі  $Bi_2(Te, Se)_3$  легованих  $Hg_2Cl_2$  та  $Cd_2Br_2$  вирощених методом напрямленої кристалізації. Було зазначено можливість досягнення збільшення добротності вирощених матеріалів на 9% за рахунок вирощування ТЕМ з оптимізованим розподілом густини носіїв струму вздовж злитка, що досягалося програмованою зміною величини та напрямку струму, який протікав через фронт кристалізації під час вирощування.

## Висновки

1. Розроблено комп'ютерний метод визначення теплових умов вирощування монокристалів на основі  $Bi_2Te_3$  методом напрямленої кристалізації при пропусканні через зразок електричного струму.
2. Приклад використання методу підтверджує вплив ефекту Пельтьє на умови росту монокристалів і можливість керування розподілом температур в злитку під час вирощування.

Автор вважає своїм приємним обов'язком висловити подяку акад. Л.І. Анатичуку за запропоновану тему, постановку задачі та корисне конструктивне обговорення отриманих результатів.

## Література

1. Пфан У.Г. Зонная плавка // Под ред. В.Н.Вигдоровича. М.: Мир. – 1970. – 336с.
2. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе  $Bi_2Te_3$  / Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов // Под редакцией Б.Я. Мойжеса. М.: Наука – 1972. – 320с.
3. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства/ Анатичук Л.И. // – К.: Наукова думка – 1979. – 768 с.
4. Вильке К.Т. Методы выращивания кристаллов / Вильке К.Т. // Л.: Недра – 1977. – 329с.
5. Гольцман Б.М. Кристаллизация в электрическом поле термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута. / Гольцман Б.М., Ляшенко В.И., Стрекопытова Н.И. //Термоэлектрические источники тока: материалы, конструкция, применение. Тезисы докладов всесоюзного совещания. – Ашхабад. – 1986.
6. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOL AB. – 2010. – 804р.
7. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена/ Ши Д.// М.:Мир. – 1988. – 543 с.
8. Incropera F.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th Edition / Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S.// John Wiley & Sons Ltd., New York. – 2007. – 1070 p.
9. Ivanova L. D. Thermoelectric properties of  $Bi_2Te_3$ - $Sb_2Te_3$  single crystals in the range 100–700 K / Ivanova L. D., Granatkina Yu.V.//Inorganic Materials. – 2000. – Vol. 36, Issue 7. – P. 672–677.
10. Liaschenok V.I. Influence of electric current flow during crystallization process on thermoelectric properties of materials / Liaschenok V.I., Strekopytova N.I. // XIV International Conference of Thermoelectrics. – 1995. – P.112-114.

Надійшла до редакції 19.10.2018

**О.В. Ницович**, канд. физ.-мат. наук<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatyck@gmail.com;

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет им. Ю.Федьковича,  
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина;

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ $Bi_2Te_3$ ПРИ НАЛИЧИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

*В статье представлен подход к построению компьютерной модели процесса выращивания термоэлектрических материалов методом вертикальной зонной плавки с использованием*

эффекта Пельтье, который возникает на границе раздела твердой и жидкой фаз выращиваемого материала при пропускании через слиток электрического тока. Приведены результаты визуализации численного решения модели. Библ. 8, Рис. 4.

**Ключевые слова:** моделирование, вертикальная зонная плавка, термоэлектрический материал, выращивание при наличии электрического тока.

**O.V. Nitsovych**  *cand. phys.-math. sciences*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine; e-mail: *anatych@gmail.com*

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
2 Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

### COMPUTER SIMULATION OF $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ CRYSTALLIZATION PROCESS IN THE PRESENCE OF ELECTRICAL CURRENT

*This paper presents an approach to constructing a computer model of the process of growing thermoelectric materials by the method of vertical zone melting taking into account the Peltiereffect which occurs at the interface between the solid and liquid phases of material being grown when passing electrical current through the ingot. The results of visualization of numerical model solution are presented. Bibl. 10, Fig. 4.*

**Keywords:** simulation, vertical zone melting, thermoelectric material, growing in electrical field

#### References

1. PfanU.G. (1970). *Zonnaiaplavka [Zonemelting]*. V.N.Vigdorovich (Ed.). Moscow: Mir [in Russian].
2. Goltsman B.M., Kudinov V.A., Smirnov I.A. (1972). *Poluprovodnikovyye termoelektricheskiye materialy na osnove  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [Semiconductor thermoelectric materials based on  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ]*. B.Ya.Moizhes (Ed.). Moscow: Nauka [in Russian].
3. Anatychuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: NaukovaDumka [in Russian].
4. VilkeK.T. (1977). *Metody vyrashchivaniia kristallov [Methods of crystal growth]*. Leningrad: Nedra [in Russian].
5. Goltsman B.M., Liaschenok V.I., Strekopytova N.I. (1986). *Kristallizatsiia v elektricheskom pole termoelektricheskikh materialov na osnove telluride vismuta [Crysallization in the electrical field of thermoelectric materials based on bismuth telluride]*. *Termoelektricheskiye istochniki toka: materialy, konstruktsiia, primeniie. Tezisy dokladov v sesoiuznogo soveshchaniia– Thermoelectric current sources: materials, construction, application. Abstracts of All-Union conference reports*. Ashgabad [in Russian].
6. *COMSOL Multiphysics User's Guide (2010)*. COMSOL AB.
7. ShiD. (1988). *Chislennyemetody v zadachakteploobmena [Numerical methods in heat exchange problems]*. Moscow: Mir [in Russian].

8. Incropera F.P. , DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S.(2007). *Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed.* New York: John Wiley & Sons Ltd.
9. Ivanova L. D., Granatkina Yu. V. (2000). Thermoelectric properties of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  single crystals in the range 100–700 K. *Inorganic Materials*, 36, 7.
10. Liaschenok V.I., Strekopytova N.I. (1995). Influence of electric current flow during crystallization process on thermoelectric properties of materials. *Proc. of XIV International Conference of Thermoelectrics* (St.Petersburg, Russia, June 27-30, 1995) (pp.112-114).

Submitted 19.10.2018



Горський П.В.

Горський П.В. докт. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>,  
Разіньков В.В. канд. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>

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

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



Разіньков В.В.

## ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ КОНТЕЙНЕРА НА ОРІЄНТАЦІЮ ТА СТУПІНЬ ПАРАЛЕЛЬНОСТІ ПЛОЩИН СПАЙНОСТІ МОНОКРИСТАЛІВ ТЕЛУРИДУ ВІСМУТУ

*В статті шляхом розв'язання рівняння теплопровідності для циліндричного та щілинного контейнерів показано, що за однієї і тієї ж питомої потужності нагрівника і однієї і тієї ж температури зовнішніх стінок контейнера поперечний градієнт температури у розплаві тим більший, чим більшим є діаметр циліндричного або ширина щілинного контейнера. Окрім того показано, що в ідеалізованому випадку фронт кристалізації в разі застосування циліндричного контейнера має форму параболоїда обертаня, а в разі застосування щілинного контейнера – форму параболічного циліндра з твірними, паралельними до довгої сторони поперечного перерізу контейнера, яка істотно ближча до плоскої. Але діаметр циліндричного контейнера різко зменшити не можна, в той час, як ширину щілини щілинного контейнера можна зменшити до мінімальної величини, яка є технологічно прийнятною для подальшого розрізання отриманої монокристалічної пластини у вигляді прямокутного паралелепіпеда на гілки. Ця обставина разом з можливістю обертаня печі Бріджмена навколо вертикальної вісі з оптимальною кутовою швидкістю з метою згладжування поперечного градієнту температури дає можливість за умови застосування щілинних контейнерів максимально наблизити форму фронту кристалізації до плоскої, і, отже, домогтися максимальної паралельності площин спайності монокристалу до широких граней контейнера та максимальної однорідності розподілу легуючих домішок в отриманому монокристалі. Бібл., рис., табл..*

**Ключові слова:** щілинний контейнер, циліндричний контейнер, питома потужність нагрівника, форма фронту кристалізації, параболоїд обертаня, параболічний циліндр, максимальний градієнт температури, ступінь паралельності площин спайності до широких граней щілинного контейнера, ступінь однорідності розподілу домішок у монокристалі.

### Вступ

Відомо, що на якість термоелектричного матеріалу істотним чином впливають концентраційні неоднорідності, які виникають у процесі спрямованої кристалізації з розплаву [1]. Як зазначалось раніше, на виникнення цих концентраційних неоднорідностей істотним чином впливає співвідношення між поздовжнім градієнтом температури поблизу фронту

кристалізації та швидкістю росту. У відповідності з наближеною оцінкою Тілера [2] концентраційне переохолодження виникає, якщо відношення  $(G/v)$  поздовжнього градієнта температури  $G$  до швидкості росту  $v$  монокристалу у напрямку цього градієнта менше за певну критичну величину:

$$(G/v) < (G/v)_{cr} = \frac{mC_0(1-K_0)}{K_0D_0}, \quad (1)$$

В цій формулі  $m$  – нахил лінії ліквідусу,  $C_0$  – концентрація домішок у основній масі розплаву,  $K_0$  – коефіцієнт розподілу домішки,  $D_0$  – коефіцієнт дифузії домішки у розплаві.

Нерівномірний розподіл домішок та концентрації вільних носіїв заряду є основним чинником впливу умов росту на властивості термоелектричних матеріалів. В [1] зазначається, що за інших рівних умов безрозмірна термоелектрична ефективність матеріалу тим більша, чим більшим є відношення  $(G/v)$ .

Вважається, що існують дві групи неоднорідностей, які відрізняються за протяжністю та причинами їх виникнення: макронеоднорідності з масштабами, порівняними з розмірами зразка та мікронеоднорідності з масштабами, істотно меншими за розміри зразка. До макронеоднорідностей належить, зокрема, монотонна зміна складу матеріалу за перерізом і довжиною зливків, вирощених з розплаву шляхом спрямованої кристалізації. Зміна складу матеріалу за перерізом пов'язана з неплоскою (зазвичай увігнутою в бік твердої фази) формою фронту кристалізації, спотвореною виділенням теплоти кристалізації та дією поперечних теплових потоків у зливку. Швидкість росту та умови конвекції у різних ділянках неплоского фронту кристалізації різні і це веде до зміни ефективного коефіцієнту розподілу і до зміни складу по перерізу зливку. А на поперечний градієнт температури і можливість керування ним, а, отже, і фронтом кристалізації, істотно впливає геометрія поперечного перерізу контейнера (щілинна чи циліндрична). Саме аналіз різних аспектів цього впливу і є метою даної статті.

## Опис фізичної моделі процесу вирощування монокристалів телуриду вісмуту у щілинному контейнері

Фізичну модель процесу росту монокристалів телуриду вісмуту у щілинному контейнері зображено на рис. 1.

У відповідності з цією моделлю ріст монокристалу телуриду вісмуту найбільш інтенсивно відбувається по площинах спайності. При цьому кожен новий шар 1 складається з орієнтованих гексагональних «стовпчиків». Цей шар поступово наростає поверх попереднього шару 2. При цьому єдиним безконкурентним зародком слугує затвердлий об'єм зі своїми площинами спайності 3, який і росте, поглинаючи речовину з розплаву 4. З моделі зрозуміло, що при вирощуванні у щілинному контейнері фронт кристалізації був би ідеально плоским, якби був відсутній поперечний градієнт температури у перерізі контейнера, а мав би місце лише осьовий (поздовжній) градієнт, і, окрім того, коефіцієнт розподілу легуючих домішок був

би якомога ближчим до одиниці. Тоді б всі шари монокристалу росли б одночасно з однаковою швидкістю і їх орієнтація відносно широких граней щільного контейнера була б близькою до ідеальної. Однак насправді поперечний градієнт температури існує. Окрім того внаслідок більшої чи меншої неоднорідності розподілу легуючих домішок у кристалі від координат у площині поперечного перерізу контейнера виявляються залежними температура плавлення, коефіцієнти дифузії складових твердої фази і розплаву, теплопровідність та питома теплоємність їх, теплота фазового переходу, коефіцієнт поверхневого натягу на межі «тверда фаза-розплав». Внаслідок цього фронт кристалізації не лише не є плоским і навіть не являє собою якоїсь гладкої, хоча і неплоскої, поверхні, а й має своєрідну «східчасту» структуру [1, 2].

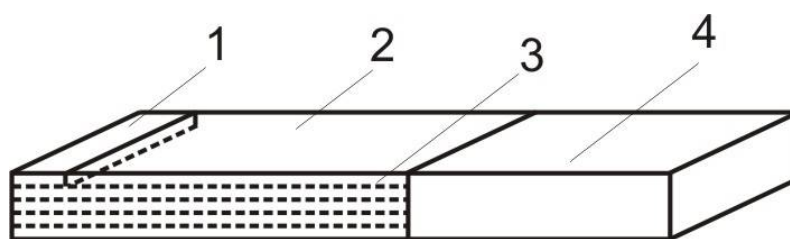


Рис. 1. Фізична модель росту монокристалів телуриду вісмуту у щільному контейнері:

1)наростаючий шар, паралельний до площин спайності; 2)попередній шар;

3)площини спайності затвердлого об'єму; 4)розплав

З усього сказаного зрозуміло, що форма фронту кристалізації і характер розподілу легуючих домішок у вирощеному монокристалі істотним чином залежить від геометрії контейнера, тобто від форми його поперечного перерізу. Розглянемо дане питання більш докладно.

### Вплив геометрії контейнера на розподіл температури у процесі вирощування монокристалів телуриду вісмуту та на форму фронту кристалізації

На рис. 2 зображено поперечні перерізи щільного та традиційного циліндричного контейнерів.

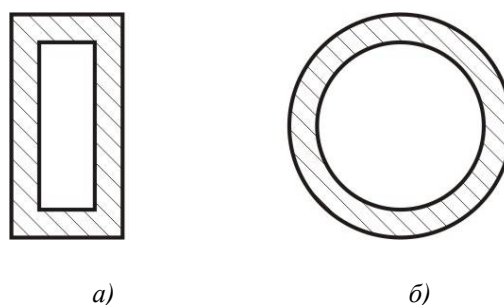


Рис. 2. Поперечні перерізи контейнерів: а)щільного;

б)традиційного циліндричного

Розглянемо задачу про стаціонарний розподіл температури у цих контейнерах у максимально спрощеній постановці, яка, однак, дасть можливість правильно уявити форму фронту кристалізації. Будемо вважати, що тепло надходить до речовини, яка міститься у контейнерах, з боку зовнішніх стінок. Потужність теплового потоку, яка надходить до одиниці об'єму речовини будемо вважати в обох випадках однаковою. У випадку щільного контейнера (рис. 2а) стаціонарне рівняння теплопровідності матиме вигляд:



$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{q}{\kappa} (q > 0), \quad (1)$$

де  $q$  – теплова потужність, яка надходить до одиниці об’єму речовини у контейнері,  $\kappa$  – її теплопровідність.

Розв’язок цього рівняння за граничних умов  $T(l/2) = T(-l/2) = T_0$ , де  $l$  – ширина щілини, матиме вигляд:

$$T = \frac{q}{2\kappa} \left( x^2 - \frac{l^2}{4} \right) + T_0. \quad (2)$$

У відповідності з (2) максимальне значення поперечного градієнту температури при застосуванні щілинного контейнера дорівнює:

$$G_{t\max} = ql/2\kappa. \quad (3)$$

У випадку циліндричного контейнера рівняння (1) набуває вигляду:

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = \frac{q}{\kappa}. \quad (4)$$

Його несингулярний розв’язок за граничної умови  $T(R) = T_0$ , де  $R$  – внутрішній радіус контейнера, має вигляд:

$$T = T_0 + \frac{q}{4\kappa} (r^2 - R^2). \quad (5)$$

В цьому випадку максимальне значення поперечного градієнту температури дорівнює:

$$G_{t\max} = qR/2\kappa = qD/4\kappa, \quad (6)$$

де  $D$  – внутрішній діаметр циліндричного контейнера.

Фронти кристалізації у наближенні однорідного розподілу домішок для розглянутих випадків зображено на рис. 3. та 4.

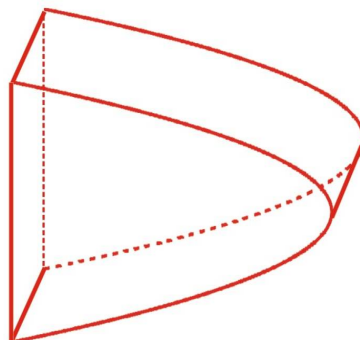


Рис.3. Форма фронту кристалізації у випадку щілинного контейнера

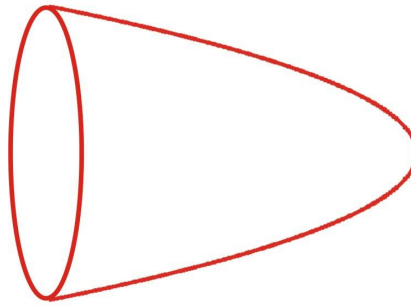


Рис.4. Форма фронту кристалізації у випадку традиційного циліндричного контейнера

З рис. 3 та 4 видно, що у випадку щілинного контейнера фронт кристалізації має форму параболічного циліндра, а у випадку традиційного циліндричного контейнера – форму параболоїда обертання. Саме ця відмінність створює принципово різні умови росту монокристалу телуриду вісмуту при його вирощуванні у цих контейнерах методом Бріджмена. У випадку щілинного контейнера монокристал, що росте, внаслідок спільної дії затравки та сили тяжіння являє собою сукупність шарів, паралельних до широких граней контейнера. Внаслідок наявності поперечного градієнту температури ці шари ростуть з дещо різною швидкістю, внаслідок чого поверхня параболічного циліндра є їх обвідною. Але з формули (3) випливає, що зробивши ширину контейнера малою, і, отже, відношення довгої сторони прямокутного поперечного перерізу контейнера до короткої достатньо великим, можна зробити максимум поперечного градієнту температури малим, і, отже, домогтися майже ідеальної паралельності площин спайності до широких граней контейнера. Таким чином, коротку сторону поперечного перерізу щілинного контейнера слід робити мінімально допустимою технологічним процесом, в той час, як довгу сторону цього перерізу, навпаки, слід робити максимально допустимою технологічним процесом, тобто такою, щоб з отриманої монокристалічної пластини можна було отримати максимальну кількість термоелектричних гілок із заданими розмірами. Додатковим засобом компенсації поперечного градієнту температури може слугувати обертання печі Бріджмена навколо вертикальної вісі з оптимальною кутовою швидкістю. Але при цьому у відповідності зі співвідношенням (1), яке є вірним не лише для поздовжнього (осьового), але й для поперечного градієнту температури, слід зменшувати швидкість, і, отже, збільшувати час кристалізації.

У випадку вирощування монокристалів телуриду вісмуту методом Бріджмена у традиційному циліндричному контейнері має місце принципово інша ситуація. Монокристал у цьому випадку являє собою не сукупність широких площин, а сукупність паралельних векторів земного тяжіння брусків з порівняно малим поперечним перерізом, обвідною яких є поверхня параболоїда обертання. В такому випадку безконкурентний ріст монокристалу з єдиного надкритичного зародка вже не має місця, оскільки такого єдиного зародка, якщо не враховувати затравки, не існує. Більше того, наявність поперечного градієнту температури і викликана цим залежність коефіцієнту поверхневого натягу на межі «розплав-тверда фаза» від відстані до вісі циліндра може спричинити утворення дендритної структури, тим паче, що при використанні традиційного циліндричного контейнера не існує переважних напрямків росту монокристалу у поперечному перерізі. Таким чином, площини спайності, як це зазначено, наприклад, у описі до патенту [3] і у статті [4], можуть мати довільну орієнтацію. Це і спричиняє необхідність отримання термоелектричних гілок з неповних дисків, або їх ділянок.

З формули (6) на перший погляд може здатись, що у випадку циліндричного контейнера можна компенсувати поперечний градієнт температури шляхом зменшення діаметру контейнера. Але різке зменшення цього діаметру змусило б отримувати циліндричні термоелектричні гілки, що не є технологічним. З іншого боку великий діаметр зливку призвів би, навпаки, до різкого збільшення поперечного градієнту температури, що внаслідок температурної залежності коефіцієнту дифузії домішок у кристалі призвело б до різкої неоднорідності їх радіального розподілу, а, отже, не лише до істотного розкиду термоелектричних параметрів отримуваних гілок, а й до появи механічних напруг, які призвели б до виникнення у зливку поздовжніх тріщин, і, отже, до руйнування гілок, а тим самим – і до зниження виходу придатних виробів. Таким чином при вирощуванні монокристалів телуриду вісмуту та сплавів на його основі у традиційних циліндричних контейнерах виникає необхідність підбору оптимального діаметру контейнера.

Співставимо наші теоретичні результати з результатами експериментів інших авторів, які досліджували термоелектричні та міцнісні властивості сплавів на основі телуриду вісмуту, у тому числі вирощених у плоских щілинах [5–7].

У праці [5] досліджувалась міцність термоелектричних гілок зі сплавів на основі телуриду вісмуту  $p$  та  $n$ -типів виготовлених трьома способами. За першим способом гілки вирізались з вирощених у плоских щілинах суцільних пластин розміром  $41 \times 49 \times 1.4$  мм. При цьому розмір 1.4 мм відповідав розміру перерізу гілки. За другим способом гілки виготовлялись збірними з пластин розміром  $41 \times 49 \times 0.27$  мм. Пластини з'єднувались шляхом паяння з торців. За третім способом пластини розміром  $41 \times 49 \times 0.27$  мм з'єднувались шляхом пресування. Кожним способом виготовлялось 20 зразків. Виявилось, що гілки, виготовлені за першим способом (за стандартної товщини пластини) мали середній модуль пружності для  $p$  та  $n$ -типу відповідно рівний 68.9 та 52.3 МПа за середньоквадратичного відхилення 27.7 та 14.5 МПа відповідно. Границя міцності цих гілок при згині склала 14.0 та 16.6 МПа відповідно за середньоквадратичного відхилення 3.76 та 4.92 МПа відповідно. Збірні гілки  $p$  та  $n$ -типу, виготовлені за другим способом, мали середній модуль пружності відповідно рівний 78.4 та 70.2 МПа за середньоквадратичного відхилення 18.0 та 9.7 МПа відповідно. Границя міцності цих гілок при згині склала 15.8 та 19.8 МПа відповідно за середньоквадратичного відхилення 3.2 та 1.86 МПа відповідно. Пресовані гілки, виготовлені за третім способом, мали середній модуль пружності відповідно рівний 72.9 та 82.8 МПа за середньоквадратичного відхилення 27.0 та 12.1 МПа відповідно. Границя міцності цих гілок при згині склала 12.5 та 17.8 МПа відповідно за середньоквадратичного відхилення 2.82 та 3.97 МПа відповідно. Таким чином ми бачимо, що зменшення ширини щілини сприяє як покращенню механічних характеристик гілок, так і покращенню відтворюваності цих характеристик.

У праці [6] досліджувався вплив умов вирощування злиwkів твердих розчинів  $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$  на анізотропію їх фізичних властивостей. Виявилось, що у разі вирощування в плоских щілинах (один з варіантів методу Бріджмена) спостерігається така структура зливку, в якій площини спайності не лише паралельні напрямку росту кристалу, що характерне і для традиційного зонного плавлення, але й практично паралельні одна одній та площині пластини, тобто широкій грані щілинного контейнера. Це дозволяє уникнути термопружних напруг, які виникають при спряженні зерен з різними коефіцієнтами термічного розширення. Зливok отримувався у вигляді пластини товщиною, рівною стороні перерізу «гілки». Така пластинка є найбільш зручним об'єктом як для контролю характеристик, так і для наступного різання на гілки. Дослідження впливу швидкості кристалізації на текстуру починали з пластинки товщиною 0.5

мм. Далі за вибраного часу кристалізації досліджували вплив товщини пластини на текстуру. Виявилось, що за швидкої кристалізації нормалі до площин  $(11\bar{2}0)$  відхиляються на кути від  $0$  до  $25^{\circ}$  від вісі росту. При цьому спостерігається дендритна структура зливу, яка характеризується випадковим кристалографічним орієнтуванням кристалу відносно вісі росту. Текстура за довжиною зливу принципово не змінювалась. Збільшення часу кристалізації пластини до 120 хв призвело до придушення дендритного типу кристалізації. Результати дослідження текстури засвідчили, що до середини пластини нормалі до площин  $(11\bar{2}0)$  орієнтовані вздовж вісі росту з незначним розсіюванням текстури до  $3-4^{\circ}$  у центрі та на периферії пластини. За характером зміни орієнтації зерен по перерізу пластини було зроблено висновок, що фронт кристалізації є практично плоским. До середини пластини характер текстури та її розподіл за перерізом практично не змінювались. На відстані 30 мм від початку пластини в центральній частині орієнтація зерна зберігалась, але на краях пластини з'явилися невеликі зерна з відмінною від основного об'єму орієнтацією. Далі відхилення площин спайності від вісі зливу на краях пластини збільшується і складає з одного краю  $8^{\circ}$ , а з іншого – до  $10^{\circ}$ . Така зміна структури свідчить про викривлення фронту кристалізації.

При збільшенні часу кристалізації до 420 хв нормалі до площин спайності  $(0001)$  паралельні нормалі до площини пластини або відхилені від неї на  $3^{\circ}$  від площини, перпендикулярної до вісі росту з незначним розсіюванням  $\pm 2^{\circ}$ . Така орієнтація позитивно впливає на міцнісні характеристики матеріалу.

Чітка текстура матеріалу, за якої площини спайності орієнтовані паралельно до вісі росту, спостерігалась лише для товщини пластини, рівної 0.5 мм. За товщини пластини 1 мм нормалі до площин  $(11\bar{2}0)$  для різних зерен відхилялись від вісі пластини на  $2, 4, 7$  та  $9^{\circ}$ . Спостерігався вигин фронту кристалізації. За довжиною пластини товщиною 1 мм текстура принципово не змінювалась. За товщини пластини 1.4 мм нормалі до площин  $(11\bar{2}0)$  відхилялись від вісі росту на кути до  $10^{\circ}$ . Дослідження текстури за довжиною пластини товщиною 1.4 мм засвідчило, що після середини пластини відхилення нормалей до площин  $(11\bar{2}0)$  від вісі пластини збільшувалось і досягало  $15^{\circ}$ .

Контроль положення кристалографічних площин  $(0001)$  відносно площини пластини засвідчив, що зі збільшенням товщини пластини зростає розорієнтування площин спайності однієї відносно одної та відносно площини пластини. Таким чином і ці дані підтверджують наш висновок про те, що зменшення ширини щілини збільшує ступінь паралельності площин спайності однієї до одної і до широких граней щілинного контейнера.

У працях [7,8] показано, що на пластинах товщиною 1 мм придушити дендритний ріст та отримати чітку орієнтацію площин спайності відносно площини пластини з розсіюванням, яке не перевищувало  $5^{\circ}$ , вдалось лише за часів кристалізації в інтервалі 210 – 420 хв. Це підтверджує висновок про збільшення часу кристалізації у разі зменшення градієнту температури.

## Висновки

1. Шляхом розв'язання рівняння теплопровідності встановлено, що внаслідок існування поперечного градієнту температури у наближенні однорідного розподілу легуючих домішок у кристалі фронт кристалізації у випадку щілинного контейнера має форму параболічного

циліндра з твірними, паралельними широкій стороні щілини, а у випадку традиційного циліндричного контейнера – форму параболоїда обертання.

2. Внаслідок таких особливостей фронту кристалізації монокристал у випадку щілинного контейнера являє собою сукупність шарів, паралельних до широких граней контейнера, які ростуть з різною швидкістю. Тому з метою досягнення близької до ідеальної паралельності площин спайності монокристалу до широких граней контейнера пропонується вузьку сторону щілини робити мінімально допустимою, а широку, навпаки – максимально допустимою технологічним процесом.
3. При вирощуванні монокристалів телуриду вісмуту та сплавів на його основі методом Бріджмена у традиційному щілинному контейнері компенсувати негативний вплив поперечного градієнту температури на форму фронту кристалізації шляхом зменшення діаметру контейнера не можна, оскільки це б призвело до необхідності виготовляти термоелектричні гілки циліндричної форми, що не технологічно. З іншого боку збільшення діаметру контейнера призвело б до зростання максимуму поперечного градієнту температури, що внаслідок різкої неоднорідності розподілу домішок у кристалі а також залежності коефіцієнту поверхневого натягу на межі «рідина-тверда фаза» від віддалі до вісі контейнера викликало б утворення у зливку дендритної структури, різкого розкиду термоелектричних параметрів отримуваних гілок а також зниження механічної міцності гілок внаслідок утворення у зливку поздовжніх тріщин внаслідок зростання механічних напруг. Отже існує необхідність вибору оптимального діаметру циліндричного контейнера.
4. Таким чином, існують очевидні беззаперечні переваги вирощування монокристалів телуриду вісмуту та сплавів на його основі у щілинному контейнері в порівнянні з традиційним циліндричним.

## Література

1. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе  $Bi_2Te_3$ / Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов // Под редакцией Б.Я. Мойжеса. М.: Наука – 1972. – 320с.
2. Струтинская Л.Т. Моделирование процесса роста термоэлектрического материала на основе  $Bi_2Te_3$  методом вертикальной зонной плавки / Л.Т. Струтинская, В.В. Жихаревич // Термоэлектричество – 2012. – №2. – С.79-87.
3. Белов Ю.М., Маекава Н. Литая пластина, изготовленная из термоэлектрического материала. – Патент РФ и Японии. – Оpubл.10.12.2000, заявка от 01.08.1998. – Патентообладатели: Кристалл Ltd., Мацушита Электрик Уорк.
4. Belov Ju. M. Review of methods of thermoelectric materials mass production / Ju. M. Belov, S.M. Maniakin, I. V. Morgunov // In book: Thermoelectric handbook. Macro to nano. Edited by D. M. Rowe, Ph.D., D.Sc. – P.20-1 – 20.12. –Taylor & Francis group, LLC CRC Press. – Boca Raton (FL) – 2006.
5. Воронин А.И. Механическая прочность ветвей термоэлементов на основе  $Bi_2Te_3$  при различных методах их получения / А.И. Воронин, А.С. Осипков, Т.А. Горбатовская // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – №2 (115) – С.17-21.
6. Бублик В.Т. Влияние условий выращивания слитков твердых растворов  $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$  на анизотропию физических свойств / В.Т. Бублик, А.И. Воронин, Е.А. Выговская [и др.] // Материалы электронной техники. – 2010. – №1. – С.58-62.

7. Аленков В.В. Влияние условий кристаллизации на структуру пластин твердых растворов термоэлектрических материалов на основе  $Bi_2Te_3$ , выращенных из расплава / В.В. Аленков, Ю.М. Белов, В.Т. Бублик [и др.] // Материалы электронной техники. – 2008. – №2. – С.22-25.
8. Voronin A.I. Structure of profiled crystals based on solid solutions of  $Bi_2Te_3$  and their X-ray diagnostics / A.I. Voronin, V.T. Bublik, N.Yu. Tabachkova, Yu.M. Belov // Journal of electronic materials. – 2011. – Vol.40. – No5. – P.794-800 (doi: 10.1007/s11664-011-1573-5).

Надійшла в редакцію 01.11.2018

**Горский П. В.,<sup>1,2</sup> докт. физ.-мат. наук,**  
**Разиньков В.В.,<sup>1,2</sup> канд. физ.-мат. наук.**

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,  
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatysh@gmail.com;

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет  
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,  
Черновцы, 58000, Украина

### **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КОНТЕЙНЕРА НА ОРИЕНТАЦИЮ И СТЕПЕНЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОСТИ ПЛОСКОСТЕЙ СПАЙНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТЕЛЛУРИДА ВИСМУТА**

*В статье посредством решения уравнения теплопроводности для цилиндрического и целевого контейнеров показано, что при одной и той же удельной мощности нагревателя и одной и той же температуре внешних стенок контейнера поперечный градиент температуры в расплаве тем больше, чем больше ширина щели целевого контейнера или диаметр цилиндрического контейнера. Кроме того показано, что в идеализированном случае при использовании цилиндрического контейнера фронт кристаллизации имеет форму параболоида вращения, а при использовании целевого контейнера – форму параболического цилиндра с образующими, параллельными длинной стороне поперечного сечения контейнера. Но диаметр цилиндрического контейнера резко уменьшить нельзя, в то время как ширину щели можно снизить до минимальной величины, технологически приемлемой для дальнейшей резки полученной монокристаллической пластины в форме прямоугольного параллелепипеда на ветви. Это обстоятельство вместе с возможностью вращения печи Бриджмена вокруг вертикальной оси с оптимальной угловой скоростью с целью сглаживания поперечного градиента температуры дает возможность максимально приблизить форму фронта кристаллизации к плоской, и следовательно, добиться максимальной параллельности плоскостей спайности монокристалла широким граням целевого контейнера и максимальной однородности распределения легирующих примесей в полученном монокристалле. Библ. 4, рис. 4.*

**Ключевые слова:** целевой контейнер, цилиндрический контейнер, удельная мощность нагревателя, форма фронта кристаллизации, параболоид вращения, параболический цилиндр, максимальный градиент температуры, степень параллельности плоскостей спайности широким граням целевого контейнера, степень однородности распределения примесей в монокристалле.

**P.V. Gorskyi**, doctor Phys.-math. Science<sup>1,2</sup>

**V.V.Razinkov**, cand Phys-math. Science<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

*e-mail: anatysh@gmail.com*

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,

2 Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

## INFLUENCE OF CONTAINER GEOMETRY ON THE ORIENTATION AND THE DEGREE OF PARALLELISM OF CLEAVAGE PLANES OF BISMUTH TELLURIDE SINGLE CRYSTALS

*In the paper, by solving the heat conduction equation for a cylindrical and slotted container, it is shown that, with the same specific power of the heater and the same temperature of container exterior walls, the transverse temperature gradient in the melt is the greater, the larger the diameter of the cylindrical or the width of the slotted container. In addition, it is shown that in the idealized case, the crystallization front when using a cylindrical container has the shape of a paraboloid of revolution, and in the case of using a slotted container, the shape of a parabolic cylinder with generators parallel to the long side of the container cross section, which is significantly closer to flat. But the diameter of the cylindrical container cannot be drastically reduced, while the slot width of the slotted container can be reduced to the minimum value technologically acceptable for further cutting the resulting single-crystal plate in the shape of a rectangular parallelepiped into legs. This circumstance, together with the ability to rotate the Bridgman furnace around the vertical axis with the optimal angular velocity in order to smooth the transverse temperature gradient, makes it possible, under the condition of using slotted containers, to bring the crystallization front as close as possible to the flat one, and therefore to achieve maximum parallelism of the single crystal cleavage planes and maximum homogeneity of the distribution of dopants in the resulting single crystal. Bibl. 8, Fig. 4.*

**Key words:** slotted container, cylinder container, specific power of the heater, crystallization front shape, paraboloid of revolution, parabolic cylinder, maximum temperature gradient, the degree of parallelism of cleavage planes to the wide edges of the slotted container, the degree of homogeneity of the distribution of impurities in a single crystal.

### References

1. Goltsman B.M., Kudinov V.A., Smirnov I. A. (1972). *Poluprovodnikovyye termoelektricheskiye materialy na osnove Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>* [Semiconductor thermoelectric materials based on Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>]. B.Ya.Moizhes (Ed.). Moscow: Nauka [in Russian].
2. Strutynska L.T., Zhikharevich V.V. (2012). Simulation of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thermoelectric material growth by vertical zone melting method. *J.Thermoelectricity*, 2, 79-87.
3. *Patent of RF and Japan* (2000). Belov Yu.M., Maekawa H. Cast plate made of thermoelectric material.

4. Belov Ju. M., Maniakin S.M., Morgunov I.V. (2006). Review of methods of thermoelectric materials mass production. In: *Thermoelectric handbook. Macro to nano*. D. M. Rowe (Ed.). Boca Raton (Fl): –Taylor & Francis group, LLC CRC Press.
5. Voronin A.I., Osipkov A.S., Gorbatovskaia T.A. (2010). Mekhanicheskaiia prochnost vetvei termoelementov na osnove  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  pri razlichnykh metodakh ikh polucheniia [Mechanical strength of thermoelement legs based on  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  with different methods of their production]. *Nano-i mikrosistemnaia tekhnika – Nano- and Microsystems Technology*, 2 (115), 17-21.
6. Bublik V.T., Voronin A.I., Vygovskaya E.A., et al. (2010). Vliianiie uslovii vyrashchivaniia slitkov tverdykh rastvorov  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$  na anisotropiiu fizicheskikh svoistv [Influence of conditions for growing  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$  solid solutions on the anisotropy of physical properties]. *Materialy elektronnoi tekhniki – Electronic Materials*, 1, 58-62 [in Russian].
7. Alenkov V.V., Belov Yu.M., Bublik V.T., et al. (2008). Vliianiie uslovii kristallizatsii na strukturu plastin tverdykh rastvorov termoelektricheskikh materialov na osnove  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , vyrashchennykh iz rasplava [Influence of crystallization conditions on the structure of plates of solid solutions of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  based thermoelectric materials]. *Materialy elektronnoi tekhniki – Electronic Materials*, 2, 22-25 [in Russian].
8. Voronin A.I., Bublik V.T., Tabachkova N.Yu., Belov Yu.M. (2011). Structure of profiled crystals based on solid solutions of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and their X-ray diagnostics. *J. Electronic Materials*, 40, 5, P.794-800 (doi: 10.1007/s11664-011-1573-5).

Submitted 01.11.2018



**Закордонець В.С.** канд. фіз.-мат. наук  
**Кутузова Н.В.**



Закордонець В.С.

Тернопільський національно технічний університет,  
вул. Руська, 56, Тернопіль,  
46001, Україна;  
e-mail: wladim21@gmail.com



Кутузова Н.В.

## **РОЗРАХУНОК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ СВІТЛОДІОДІВ**

*В роботі побудована теплова математична модель термоелектричної системи охолодження. Розв'язана система рівнянь, яка включає стаціонарне рівняння теплопровідності, рівняння термогенерації та рівняння генерації холоду. Розрахована температура гетеропереходу СД в залежності від його потужності, загального теплового опору системи охолодження, температури навколишнього середовища та холодопродуктивності ТЕМ. Отримані аналітичні залежності температури гетеропереходу від струму живлення ТЕМ при різних потужностях СД та при різних значеннях теплового опору системи охолодження. При даній тепловій потужності СД та тепловому опорі системи охолодження знайдено оптимальну величину струму живлення ТЕМ, при якому температура гетеропереходу СД досягає мінімуму. Показано, що застосування ТЕМ дає можливість зменшити температуру гетеропереходу СД до значень нижчих ніж температура навколишнього середовища. Це особливо актуально в умовах, коли температура середовища близька до критичної температури гетеропереходу. Показано, що ефективність використання ТЕМ знижується при збільшенні потужності СД, температури навколишнього середовища і сумарного теплового опору системи охолодження. Бібл. 11, рис. 4, табл. 1*

**Ключові слова:** світлодіод, гетероперехід, тепловий режим, тепловий опір, термостабілізація, термоелектричний модуль охолодження, радіатор.

### **Постановка проблеми.**

Сучасні напівпровідникові джерела світла мають ККД перетворення електричної енергії в світлову близький до 30 % [1, 2]. Таким чином, майже 70 % підведеної енергії перетворюється в тепло. В умовах збільшення потужності світлодіодів (СД) традиційні системи термостабілізації не завжди справляються із забезпеченням адекватних теплових режимів. Якщо теплову енергію не відводити, то надмірний нагрів СД приведе до деградації світлових характеристик і зменшить його термін експлуатації. Крім того, збільшення температури зменшить яскравість свічення і світловий потік.

Для підвищення ефективності термостабілізації потужних СД застосовуються активні способи тепловідводу: вентилятори, рідинне охолодження, термоелектричне охолодження та ін.. Термоелектричні системи охолодження мають ряд переваг в порівнянні з іншими системами а саме: високу надійність і відсутність рухомих частин, компактність і невелику

вагу, малу інерційність і безшумність роботи. Застосування термоелектричних модулів охолодження (ТЕМ) наділяє тепловідвідну систему функцією охолодження, тобто дає можливість досягти температури гетеропереходу СД нижчої ніж температура навколишнього середовища. Особливо актуальним це стає в умовах, коли температура середовища стає рівною або більшою від температури гетеропереходу СД.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Проблема стабілізації теплового режиму СД вже висвітлювалася в ряді робіт. Зокрема, в [3, 4] розглянуті питання забезпечення теплового режиму СД. Особливу увагу приділено проблемі мінімізації теплового опору при використанні різних моделей радіаторів. Розглянуті інноваційні технології охолодження СД з використанням струйного обдуву. Однак, розрахунок теплового режиму не проводився. В [5] при допомозі відомих формул теплотехніки і експериментальних спостережень за температурними режимами побудована методика вибору ефективного радіатора. При цьому, для інтенсифікації теплообміну радіатора із зовнішнім середовищем використовувався вентиляторний обдув. В [6] проведений теоретичний аналіз теплового режиму СД з виносним радіатором та традиційним охолодженням. Розрахована температура перегріву гетеропереходу СД в залежності від його потужності та параметрів теплопроводу і радіатора. Однак, термоелектричне охолодження СД не розглядалося.

**Метою роботи** є побудова теплової математичної моделі термоелектричної системи охолодження СД та розрахунок на її основі температури перегріву гетеропереходу в залежності від його потужності СД, теплового опору системи охолодження та холодопродуктивності ТЕМ.

**Постановка завдання.** Шляхом теоретичного аналізу встановити аналітичні співвідношення між потужністю СД, тепловим опором системи охолодження, холодопродуктивністю ТЕМ та температурою гетеропереходу СД, що дасть можливість раціонально вибрати схему охолодження СД з метою забезпечення максимального світлового потоку при мінімальній температурі гетеропереходу.

### **Виклад основного матеріалу**

Відомо, що СД генерує теплову потужність

$$P_t = (1 - \eta_e) U_f I_f, \quad (1)$$

де  $I_f$  та  $U_f$  прямиий струм та пряма напруга СД,  $\eta_e$  – його квантова ефективність.

Очевидно, що ТЕМ повинен поглинати потужність не меншу ніж теплова потужність СД, оскільки, в протилежному випадку стабілізація теплового режиму буде неможлива. Якщо ж ТЕМ буде поглинати надлишкову потужність, то на його холодній поверхні буде утворюватися конденсат, що може привести до короткого замикання. Єдино можливим способом зробити використання ТЕМ ефективним є застосування електронного блоку, який зможе регулювати потужність модуля в залежності від температури гетеропереходу СД.

Будемо вважати, що теплова потужність СД повністю поглинається холодною поверхнею ТЕМ

$$P_t = P_c, \quad (2)$$

а від гарячої поверхні при допомозі радіатора відводиться теплова потужність  $P_h$ .

Для розрахунку теплового режиму СД скористаємося методом електротеплової аналогії [7]. Схема термоелектричної системи охолодження СД приведена на рисунку 1. На схемі кожен елемент характеризується своїм тепловим опором. Зокрема,  $\Theta_{js}$  – тепловий опір між гетеропереходом та контактною площадкою,  $\Theta_{sc}$  і  $\Theta_{hr}$  – теплові опори між контактною площадкою і холодною поверхнею ТЕМ та між гарячою поверхнею ТЕМ і радіатором,  $\Theta_{ra}$  – тепловий опір між радіатором та середовищем,  $\Delta T = T_h - T_c$  – перепад температури між гарячою та холодною поверхнями ТЕМ обумовлений ефектом Пельтьє.

Тепловій схемі відповідає рівняння термічної рівноваги:

$$T_j = T_a + P_c \cdot (\Theta_{js} + \Theta_{sc}) + P_h \cdot (\Theta_{hr} + \Theta_{ra}) - \Delta T, \quad (3)$$

Теплова потужність, яка поглинається ТЕМ (холодопродуктивність) визначається співвідношенням [8,9]:

$$P_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T, \quad (4)$$

а від гарячої поверхні при допомозі радіатора відводиться теплова потужність  $P_h$

$$P_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T, \quad (5)$$

де  $\alpha$ ,  $\kappa$ , і  $R$  – коефіцієнт диференціальної термоЕРС, теплопровідність і опір напівпровідникового матеріалу віток ТЕМ,  $T_c$ , і  $T_h$  температура холодної і гарячої поверхонь ТЕМ,  $I$  – струм джерела живлення ТЕМ.

Потужність, яка виділяється на гарячій поверхні ТЕМ більша від потужності, яку поглинає холодна поверхня на величину затрат електроенергії джерела живлення

$$P_h = P_c + W. \quad (6)$$

Потужність  $W$  витрачається на виконання роботи по переміщенню зарядів проти різниці електричних потенціалів, які виникають згідно із законом Зеебека в термоелектричному колі, та на теплові втрати Джоуля:

$$W = P_h - P_c = \alpha I \Delta T + I^2 R. \quad (7)$$

Із рівняння термічної рівноваги для температури перегріву гетеропереходу СД отримаємо:

$$\Delta T_j = T_j - T_a = P_c \cdot (\Theta_c + \Theta_h) + (\alpha I \Delta T + I^2 R) \cdot \Theta_h - \Delta T \quad (8)$$

де  $\Theta_c = \Theta_{js} + \Theta_{sc}$ , і  $\Theta_h = \Theta_{hr} + \Theta_{ra}$  – теплові опори з боку холодної і гарячої поверхонь ТЕМ, перепад температури.

$$\Delta T = \frac{1}{\kappa} \cdot \left( \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - P_c \right), \quad (9)$$

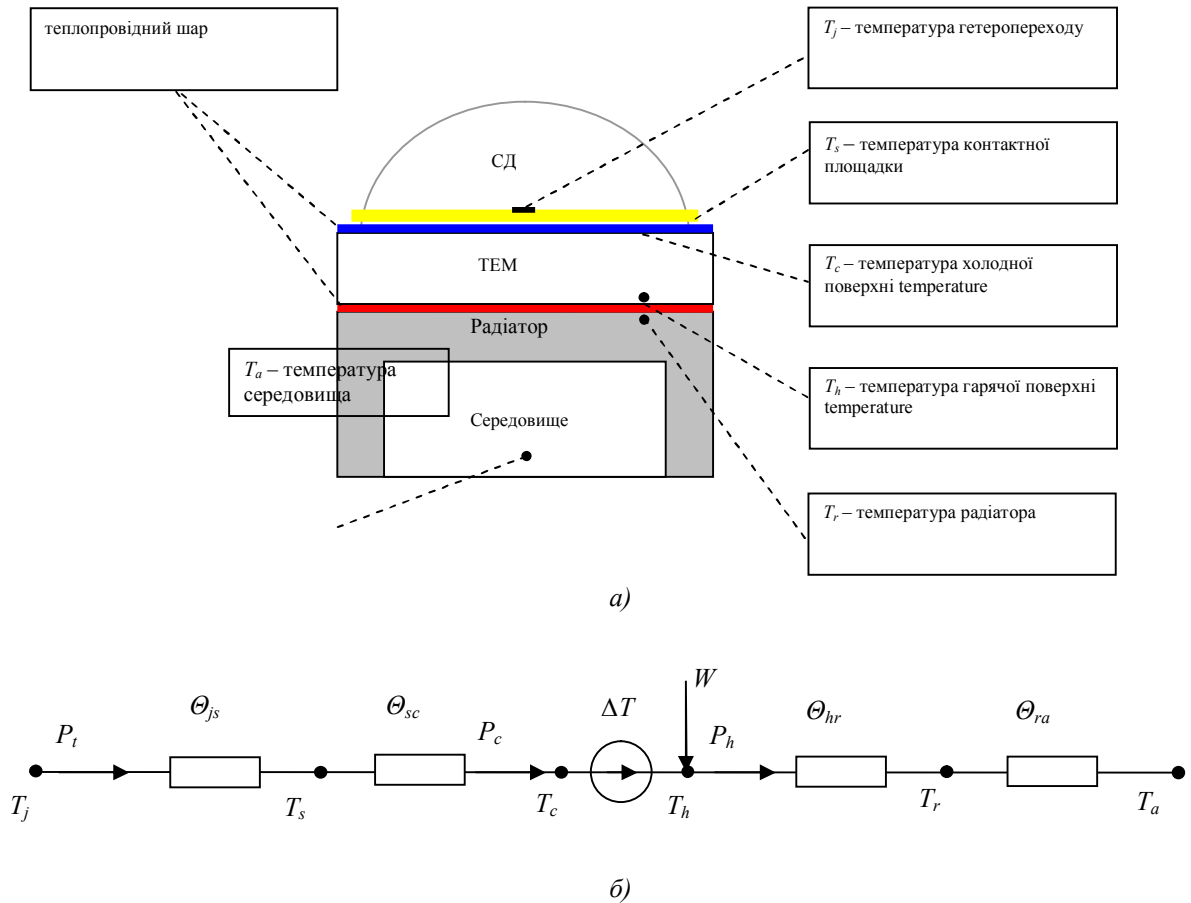


Рис. 1. Схема термоелектричної системи охолодження світлодіоду з ТЕМ та радіатором (а) та її тепла схема (б). Тут  $T_j$  - температура гетеропереходу СД,  $T_s$  - температура контактної площадки,  $T_c$  і  $T_h$  - температура холодної і гарячої поверхні ТЕМ відповідно,  $T_r$  - температура радіатора,  $T_a$  - температура середовища,  $\Delta T$  - перепад температури між гарячою та холодною поверхнями ТЕМ.

В формулі (8) перший доданок, описує збільшення температури гетеропереходу при передачі теплової потужності, яка виділяється СД і самим модулем. Два останні доданки визначають вплив ТЕМ на температуру гетеропереходу СД. Охолодження забезпечується за рахунок перепаду температур між гарячою і холодною поверхнями ТЕМ. У підсумку, саме від взаємного співвідношення величин цих доданків залежить ефективність роботи термоелектричної системи охолодження.

Температура гетеропереходу СД визначається його потужністю, тепловим опором системи охолодження, температурою оточуючого середовища та режимом роботи ТЕМ. Керування режимом роботи модуля здійснюється шляхом зміни величини струму живлення. При розробці і експлуатації термоелектричної системи охолодження важливим питанням є вибір оптимального струму при якому відбувається ефективне охолодження.

## Аналіз отриманих результатів

Розглянемо вплив струму живлення TEM на ефективність охолодження СД при заданих значеннях його потужності і термічного опору системи охолодження. В якості джерела світла виберемо сучасну світлодіодну матрицю *XLamp CMA1516*, параметри якої приведені в таблиці [11].

*Таблиця*

Параметри СД *XLamp CMA1516*

Максимальний струм, $A$	Максимальна напруга, $B$	Максимальна потужність, $Bt$	Світловий потік, $lm$	Тепловий опір LED $\Theta_{j-s}$ , $K/Bt$
1.05	39	41	1400-4800	0.4

Потужністю СД можна керувати в широких межах змінюючи напругу живлення або струм. Очевидно, що максимальна потужність СД повинна бути не більшою від максимальної холодопродуктивності TEM. Для даної світлодіодної матриці максимальна теплова потужність складає величину:

$$P_{t \max} = (1 - \eta_e) U_{f \max} I_{f \max} = 30 \text{ W.}$$

Модель TEM виберемо керуючись тепловою потужністю, габаритами і вимогами до температурного режиму експлуатації СД. При проведенні розрахунків були використані характеристики серійних *TEM TB-161* [12] з параметрами: максимальний струм  $I_{\max} = 5.7 A$ , максимальна напруга  $U_{\max} = 18.3 B$ , максимальна холодопродуктивність при нульовій різниці температури  $P_{c, \max} = 66.3 Bt$ , максимальний перепад температури при нульовій холодопродуктивності  $\Delta T_{\max} = 70 K$ .

Застосування термоелектричних модулів завжди пов'язане з використанням того чи іншого радіатора, який повинен розсіяти не тільки тепло, яке виділяє світлодіод, але і тепло Джоуля, яке виділяється в термоелементі при проходженні через нього електричного струму. Тепловий опір сучасних радіаторів оснащених вентиляторами складає  $\Theta_{ra} = 0.3 \div 0.6 K/Bt$ . Кращі зразки з використанням теплових трубок досягають значень  $\Theta_{ra} = 0.1 K/Bt$ . Рідинні тепловідвідні системи ще ефективніші. Їх тепловий опір складає  $\Theta_{ra} = 0.1 \div 0.01 K/Bt$ , але при цьому є громіздкими і важко інсталиуються в освітлювальну систему.

В результаті числового аналізу отриманих співвідношень був отриманий ряд графічних залежностей. Зокрема, на рис. 2 представлена залежність температури перегріву гетеропереходу СД від струму TEM при різних величинах теплової потужності СД.

Мінімуми ліній  $\Delta T_f(I)$  відповідають режимам роботи з максимальною ефективністю системи охолодження, при якій досягається найменша температура гетеропереходу. Очевидно, що при струмах близьких до ефективного, термоелектрична система охолодження дозволяє отримати нижчі значення температури, ніж традиційна. Штриховими лініями на рисунку

відзначені температурні залежності для системи охолодження без ТЕМ, розраховані по формулі (7) для таких же значень теплового опору.

Залежність температури перегріву гетеропереходу від струму ТЕМ при різних значеннях теплового опору з гарячого боку ТЕМ представлена на рис. 3.

Очевидно, що ростом величини  $\Theta_h$  ефективність охолодження погіршується а розташування мінімумів залежностей  $\Delta T_p(I)$  зміщується в область менших значень струму. При певних співвідношеннях між потужністю ТЕМ і СД можливе зниження температури гетеропереходу до температури середовища, а іноді і нижчої ніж температура середовища. Це особливо актуально у випадку коли температура середовища близька до критичної температури гетеропереходу СД.

Залежність перепаду температури від струму ТЕМ при різних потужностях СД представлена на рис. 4.

З графіка випливає, що із збільшенням струму перепад температури між гарячою і холодною поверхнями ТЕМ збільшується. Крім того, він залежить від теплового навантаження. Зокрема, із збільшенням теплової потужності СД перепад температури зменшується і навпаки, при зменшенні потужності - збільшується.

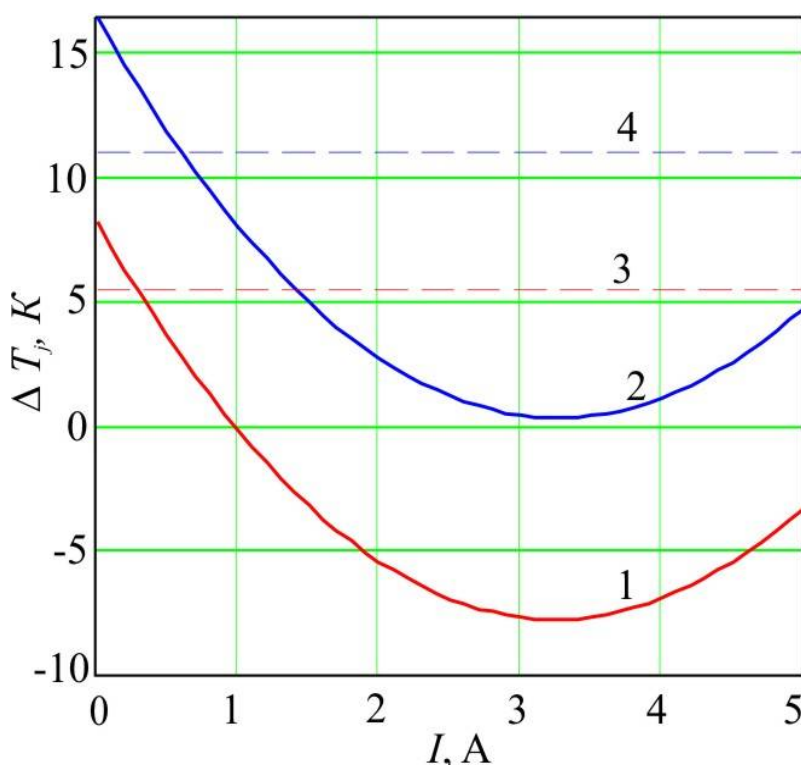


Рис. 2 Залежність температури перегріву гетеропереходу СД від струму ТЕМ при різних величинах потужності СД і при теплових опорах  $\Theta_c=0.6$  К/В,  $\Theta_h=0.2$  К/В. Суцільні лінії 1 і 2 при  $P_c=10$  В, і  $P_c=20$  В відповідно. Штрихові лінії 3 і 4 при тих же потужностях і теплових опорах, але при відсутності ТЕМ.

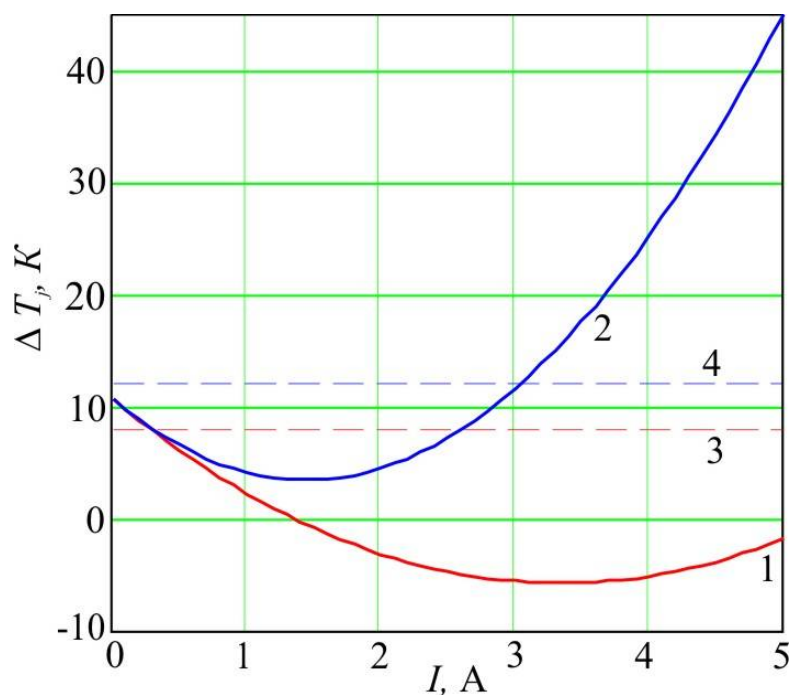


Рис.3. Залежність температури перегріву гетеропереходу від струму ТЕМ при потужності СД  $P_c=10$  В і при різних значеннях теплового опору з гарячого боку ТЕМ. Суцільні лінії 1 і 2 при  $\Theta_h=0.2$  К/В і  $\Theta_h=0.6$  К/В відповідно. Штрихові лінії 3 і 4 при тій же потужності і теплових опорах, але при відсутності ТЕМ.

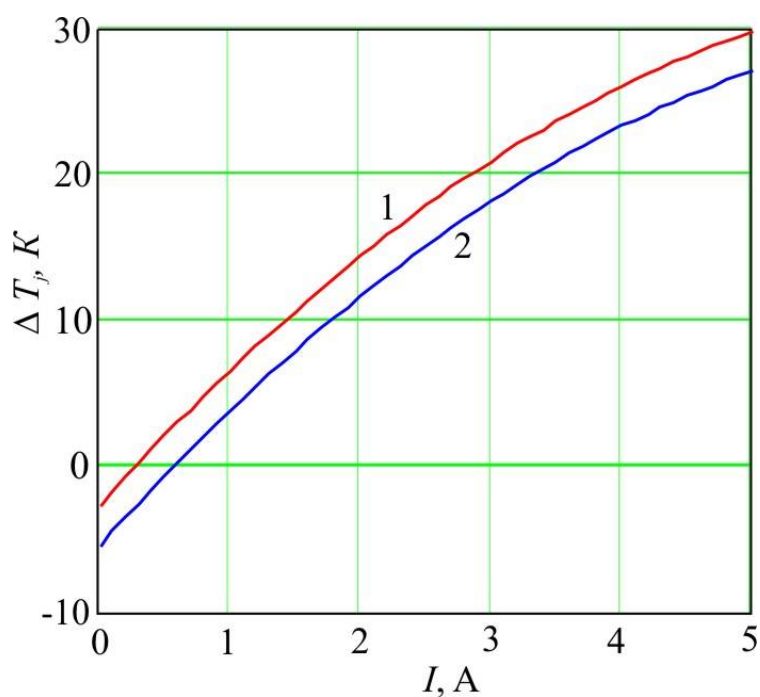


Рис.4. Залежність перепаду температури від струму ТЕМ при різних потужностях СД. Лінія 1 при  $P_c=10$  В, лінія 2 при  $P_c=20$  В.

На величину теплового опору системи охолодження істотно впливає режим роботи ТЕМ та потужність теплового навантаження. Якщо температура гетеропереходу СД зрівняється з температурою середовища або стане нижчою, тепловий опір системи стане нульовим, або навіть негативним.

## Висновки

В умовах, коли температура середовища близька до критичної температури гетеропереходу СД, для стабілізації його теплового режиму доцільно використовувати термоелектричні модулі охолодження.

При даній тепловій потужності СД та тепловому опорі системи охолодження існує оптимальна величина струму живлення ТЕМ, при якому температура гетеропереходу СД досягає мінімуму. При струмах близьких до оптимального, термоелектрична система охолодження дозволяє отримувати нижчі значення температури гетеропереходу ніж традиційна.

При оптимальному співвідношенні між потужностями ТЕМ та СД термоелектрична система охолодження дозволяє знижувати температуру гетеропереходу СД до температур нижчих, ніж температура навколишнього середовища. Ефективність використання ТЕМ знижується при збільшенні теплової потужності СД і сумарного теплового опору системи охолодження.

При аналізі ефективності роботи системи охолодження слід керуватися не лише параметрами ТЕМ, але і параметрами всієї системи охолодження СД в цілому: сумарним тепловим опором системи охолодження, тепловим навантаженням та режимом роботи ТЕМ.

## Література

1. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов. / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 140-146.
2. Гонин М. Спасительная прохлада, или теплоотвод для мощных светодиодных матриц. / М. Гонин // Новости электроники+светотехника. – 2013. – № 2.
3. Полищук А.А. Обеспечение теплового режима светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств. /А.А Полищук // Современная электроника. – 2006. – № 3. – С. 42-45.
4. Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов. / К. Староверов // Новости электроники. – 2008. – № 17. – С. 21-23.
5. Лотар Ноэль. Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов. / Лотар Ноэль // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 3. – С. 13-15.
6. Zakordonets V. Theoretical analysis of thermal conditions and ways of led temperature stabilization / Volodymyr Zakordonets, Natalija Kutuzova // Вісник ТНТУ. — Т. : ТНТУ, 2016. — № 4 (84). — С. 105–112.
7. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности. Ч.1. / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М.: Высш. шк., 1982. –327 с.
8. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наукова думка, 1979. – 768с.
9. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения. / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 12. – С. 40-46.



10. <http://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-CMA1516.pdf>.  
<http://kryothermtec.com/ru/standard-single-stage-thermoelectric-coolers.html>

Надійшла до редакції 08.10.2018

**Закордонець В.С., канд. физ.-мат. наук, доцент**  
**Кутузова Н.В.**

*Тернопольський національний технічний університет  
ул. Русская, 56, г. Тернополь, 46001, Украина,  
e-mail: wladim21@gmail.com*

## **РАСЧЕТ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ**

*В работе построены физическая и математическая тепловые модели термоэлектрической системы охлаждения. Решена система уравнений, включающая стационарное уравнение теплопроводности, уравнение термодинамики и уравнение генерации холода. Рассчитана температура гетероперехода светодиода (СД) в зависимости от его мощности, полного теплового сопротивления системы охлаждения, температуры окружающей среды и холодопроизводительности термоэлектрического охлаждающего модуля (ТЭОМ). Получены аналитические зависимости температуры гетероперехода от тока питания ТЭОМ при различных мощностях СД и значениях теплового сопротивления системы охлаждения. При заданной тепловой мощности СД и тепловом сопротивлении системы охлаждения найдена оптимальная величина тока питания ТЭОМ, при котором температура гетероперехода СД достигает минимума. Показано, что использование ТЭОМ дает возможность уменьшить температуру гетероперехода СД до значений более низких, чем температура окружающей среды. Это особенно актуально в условиях, при которых температура среды близка к критической температуре гетероперехода. Показано, что эффективность использования ТЭОМ снижается при увеличении мощности СД, температуры окружающей среды и полного теплового сопротивления системы охлаждения. Библ. 11, рис. 4, табл. 1.*

**Ключевые слова:** светодиод, гетеропереход, тепловой режим, тепловое сопротивление, термостабилизация, термоэлектрический охлаждающий модуль, радиатор.

**Volodymyr Zakordonets, Cand.Sc. (Physics and Mathematics)**  
**Natalija Kutuzova**

Ternopil National Technical University  
56, Russian st., Ternopol, 46001, Ukraine  
e-mail: wladim21@gmail.com

## **CALCULATION OF HEAT PIPE-BASED LED COOLING SYSTEM**

*In this paper, the thermal mathematical model of thermoelectric cooling system is constructed. The system of equations which includes the stationary thermal conductivity equation, the thermogeneration equation and cold generation equation is solved. The temperature of LED heterojunction is calculated, depending on its power, total thermal resistance of cooling system, ambient temperature and cold productivity of TCM. The analytical dependences of heterojunction temperature on TCM supply current were obtained at different LED powers and at different values of thermal resistance of cooling system. With the given thermal power of LED and thermal resistance of cooling system, an optimal value of the TCM supply current is found, whereby the temperature of LED heterojunction reaches the minimum. It is shown that the use of TCM allows reducing the temperature of LED heterojunction to values lower than ambient temperature. This is particularly relevant under conditions when ambient temperature is close to the critical temperature of heterojunction. It was shown that the efficiency of using TCM decreases with increasing LED power, ambient temperature and total thermal resistance of cooling system. Bibl. 11, Fig. 4, Tabl. 1.*

**Key words:** LED, heterojunction, thermal mode, thermal resistance, thermal stabilization, thermoelectric cooling module, radiator.

### **References**

1. Nikiforov S. (2005). Temperatura v zhizni i rabote svetodiodov [Temperature in the life and work of LEDs]. Komponenty i tekhnologii – Components and Technologies, 9, 140-146 [in Russian].
2. Gonin M. (2013). Spasitelnaia prokhlada, ili teplootvod dlia moshchnykh svetodiodnykh matrits [Saving coolness, or heat sink for high-power LED arrays]. Novosti elektroniki + svetotekhnika – Electronics News and Illumination Engineering, 2 [in Russian].
3. Polishchuk A.A. (2006). Obespecheniie teplovogo rezhima svetodiodnykh lamp pri razrabotke svetotekhnicheskikh ustroystv [Providing thermal mode of LED lamps in the development of lighting devices]. Sovremennaia elektronika – Modern Electronics, 3, 42-45 [in Russian].
4. Staroverov K. (2008). Sistemy okhlazhnediia dlia svetodiodov [Cooling systems for LEDs]. Novosti elektroniki – Electronics News, 17, 21-23 [in Russian].
5. Lotar Noel (2010). Okhlazhediie i regulirovanie temperaturnykh rezhimov svetodiodov [Cooling and control of temperature modes of LEDs]. Poluprovodnikovaia svetotekhnika – Semiconductor Illumination Engineering, 3, 13-15 [in Russian].
6. Zakordonets V., Natalija Kutuzova (2016). Teoretychnyi analiz teplovykh umov i shliakhy stabilizatsii temperatury svitlodiodiv. [Theoretical analysis of thermal conditions and ways of LED temperature stabilization. Bulletin of TNTU]. Visnyk TNTU – Bulletin of TNTU, 4 (84), 105–112 [in Ukrainian].

7. Beliaiev N.M., Riadno A.A. (1982). *Metody teorii teploprovodnosti. Chast1.* [Methods of thermal conductivity theory. P.1] – Moscow: Vysschaia shkola [in Russian].
8. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiie ustroistva* [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
9. Shostakovskii P. (2009). *Sovremennyye resheniia termoelektricheskogo okhlazhdeniia* [Modern solutions of thermoelectric cooling]. *Komponenty i tekhnologii – Components and Technologies*, 12, 40-46 in Russian].
10. <http://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-CMA1516.pdf>.
11. <http://kryothermtec.com/ru/standard-single-stage-thermoelectric-coolers.html>.

Submitted 08.10.2018

УДК 62-69

**Максимук М.В.**



Максимук М.В.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,  
e-mail: anatysh@gmail.com

**ПРО ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ  
ПЕРЕДПУСКОВИХ НАГРІВНИКІВ З  
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРИКИ**

---

*Наведено результати досліджень економічних показників систем передпускового розігріву двигуна внутрішнього згорання, в яких джерелами електричної енергії є термоелектричні генератори. На основі техніко-економічного аналізу визначено, що система з сумісним джерелом тепла є найефективнішим варіантом застосування термоелектричних джерел електрики для передпускової теплової підготовки двигунів транспортних засобів до експлуатації. Встановлено взаємозв'язок між питомою вартістю електричної енергії та корисною тепловою потужністю системи "передпусковий нагрівник-термоелектричний генератор" з сумісним джерелом тепла. Визначено, що особливість використання такої системи полягає в зниженні питомої вартості отриманої електроенергії при підвищенні теплопродуктивності передпускових нагрівників. Бібл. 11, табл. 3.*

**Ключові слова:** передпусковий нагрівник, термоелектричний генератор, ефективність.

## **Вступ**

Одним із перспективних методів вирішення проблеми розряду акумуляторів при теплової підготовці двигунів транспортних засобів до запуску є використання термоелектричних генераторів (ТЕГ) в якості джерел електричної енергії для передпускових нагрівників [1 – 7].

В роботі [8] показано, що варіанти використання передпускових нагрівників з термогенераторами зводяться до трьох основних систем за способом підведення та відведення теплових потоків:

- з індивідуальними джерелами тепла;
- з індивідуальними джерелами тепла та сумісним гідравлічним контуром;
- з сумісним джерелом тепла.

Вибір найефективнішої для застосувань системи вимагає комплексної оцінки її енергетичних характеристик та вартісних показників. На основі проведених в [8] досліджень з визначення термодинамічних особливостей таких систем встановлено, що найвищим коефіцієнтом корисної дії (ККД) характеризується система "термоелектричний генератор-передпусковий нагрівник" з сумісним джерелом тепла, та система, в якій передпусковий нагрівник і ТЕГ об'єднані гідравлічним контуром.

Метою даної роботи є подальший аналіз моделей передпускових нагрівників з термоелектричними джерелами електрики та визначення найбільш ефективного за економічними показниками варіанту використання термоелектричних генераторів в системах передпускового розігріву двигунів транспортних засобів.

### Техніко-економічний аналіз використання передпускових нагрівників з термоелектричними джерелами електрики

Оцінку вартості  $C$  систем передпускового розігріву двигунів проведемо з використанням наступного співвідношення:

$$C = C_1 + C_2 \quad (1)$$

де  $C_1$ ,  $C_2$  – вартість передпускового нагрівника і термоелектричного генератора відповідно. Для системи з сумісним джерелом тепла  $C_1$  – вартість компонент передпускового нагрівника.

Основним фактором, що визначає цінові характеристики термоелектричного генератора є вартість  $C_3$  термоелектричної батареї генератора:

$$C_3 = n \cdot C_4 \quad (2)$$

де  $C_4$  – вартість термоелектричного модуля, з яких складається термобатарея,  $n$  – кількість модулів в термобатареї.

Кількість модулів  $n$ , яку необхідно використати для забезпечення заданого рівня електричної потужності  $W$  ТЕГ можна визначити за співвідношенням:

$$n = \frac{W}{w} \quad (3)$$

де  $w$  – електрична потужність модуля.

Оцінку вартості систем проведемо на прикладі рідинного передпускового нагрівника Webasto Thermo Top EVO 4, цінові характеристики якого наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

*Вартість рідинного передпускового нагрівника  
Webasto Thermo Top EVO 4 та його функціональних компонент [9]*

№	Найменування	Вартість $C_i$ , \$ США
1	Передпусковий нагрівник	850
2	Пальник	155
3	Вентилятор	200
4	Паливний насос	110
5	Циркуляційна помпа	135

В якості термобатареї для ТЕГ використаємо термоелектричні генераторні модулі "Алтек-1061" вихідною електричною потужністю  $w = 10$  Вт, які виготовляються в Інституті термоелектрики [10]. Вартість одного такого модуля дорівнює  $\sim 20$  \$. Крім того, для спрощення розрахунків, будемо вважати, що вартість термоелектричних модулів становить біля 30 % від загальної вартості термоелектричного генератора.

Оскільки рівень вихідної електричної потужності, що дозволяє забезпечити функціонування розглянутих систем, становить близько 50 Вт [8], в конструкції термогенераторів необхідно використати шість генераторних модулів "Алтек-1061". Таким чином, загальна вартість системи з індивідуальними джерелами тепла та системи з сумісним гідравлічним контуром складатиме 1250 \$ при вартості ТЕГ 400 \$. Відповідно вартість системи з сумісним джерелом тепла буде нижчою на 250 \$.

Орієнтовну вартість систем передпускового розігріву двигуна представлено в табл. 2. Для комплексної оцінки ефективності розглянутих систем в таблиці наводяться раніше отримані значення їх сумарного теплового й електричного ККД.

З наведених даних слідує, що найраціональнішою для передпускового розігріву двигуна є система "передпусковий нагрівник-термоелектричний генератор" з сумісним джерелом тепла, оскільки, при рівних значеннях ККД, її вартість нижча в порівнянні із вартістю системи, об'єднаної єдиним гідравлічним контуром.

Таблиця 2

*Ефективність термоелектричних систем  
передпускового розігріву двигуна*

№	Тип системи	ККД $\eta$ , %	Вартість $C$ , \$ США
1	З індивідуальними джерелами тепла	60	1250
2	З індивідуальними джерелами тепла та сумісним гідравлічним контуром	75	1250
3	З сумісним джерелом тепла	75	1000

Проведемо оцінку питомої вартості електроенергії  $c$ , отриманої від застосування системи передпускового розігріву двигуна з сумісним джерелом тепла:

$$c = \frac{C}{W} = \frac{C_1 + C_2}{nw} \quad (4)$$

Розрахунки виконаємо на основі проведеної в [11] класифікації передпускового обладнання за рівнем теплопродуктивності та споживаної електричної потужності, для трьох типів рідинних передпускових нагрівників: Thermo Top Evo 4, Thermo Pro 90, Thermo E200, орієнтованих на використання в транспортних засобах з об'ємом двигуна ( $> 2.5$ ) л, (4-10) л та ( $< 10$ ) л [9]. Крім того встановимо залежність питомої вартості електричної енергії від теплопродуктивності

передпускових нагрівників  $Q'$  та коефіцієнту корисної дії ТЕГ  $\eta_{TEG}$ , визначеного за наступним співвідношенням:

$$\eta_{TEG} = \frac{W}{Q} \quad (5)$$

Затрачена для роботи термогенератора теплова потужність  $Q$  в системі з сумісним джерелом тепла є рівною тепловій потужності пальника передпускового нагрівника:

$$Q = \eta \cdot A \cdot m, \quad (6)$$

де  $\eta$  – ККД пальника передпускового нагрівника;  $A$  і  $m$  – теплотворна здатність і витрата палива, яке використовується для роботи передпускового нагрівника.

Розрахунки проведемо з використанням інформації про технічні характеристики наведених моделей нагрівників [9].

Отримані результати представлено в табл. 3.

Таблиця 3

*Результати розрахунків питомої вартості електричної енергії  
для системи "передпусковий нагрівник-термоелектричний генератор"  
з сумісним джерелом тепла*

Характеристики	Thermo Top Evo 4	Thermo Pro 90	Thermo E200
*Вартість функціональних компонент $C_1$ , \$	600	700	670
**Вартість термоелектричного генератора $C_2$ , \$	670	770	870
Вартість системи $C$ , \$	1270	1470	1540
***Вихідна електрична потужність ТЕГ $W$ , Вт	100	150	200
Питома вартість електричної енергії $c$ , \$/Вт	13	10	8
Теплопродуктивність $Q'$ , кВт	4	9	20
Ефективність термоелектричного перетворення $\eta_{TEG}$ , %	2	1.3	1

\* При розрахунку вартості функціональних компонент рідинних передпускових нагрівників використано дані, наведені в прайс-листах компанії Webasto [9].

\*\* У зв'язку з тим, що конструкція термоелектричних генераторів виконана згідно однієї фізичної моделі, вартість термогенераторів, орієнтованих на вищі значення електричної потужності, визначено як суму вартості ТЕГ найменшої електричної потужності та вартості відповідної кількості термоелектричних модулів.

\*\*\* Вихідна електрична потужність термоелектричного генератора визначена з урахуванням можливості підзарядки акумуляторної батареї [11].

Як слідує з наведених даних особливістю системи з сумісним джерелом тепла є зниження питомою вартості отриманої електричної енергії, що має місце при підвищенні теплопродуктивності передпускових нагрівників. Причиною цього є зв'язок, який існує між питомою вартістю і  $\eta_{TEG}$ , причому зменшення термоелектричного ККД зумовлює зниження питомої вартості отриманої електричної енергії від 13 \$/Вт для теплової потужності 4 кВт до 8 \$/Вт для потужностей рівня 20 кВт, що є ще однією перевагою даної системи.

## Висновки

1. Показано, що найраціональнішою для передпускового розігріву двигуна, як за енергетичними характеристиками, так і з врахуванням вартісних показників, є система "передпусковий нагрівник - термоелектричний генератор" з сумісним джерелом тепла.
2. Встановлено, що система з єдиним гідравлічним контуром є менш ефективною, оскільки, при рівних значеннях ККД, її вартість орієнтовно в 1.2 рази вища в порівнянні із вартістю з сумісним джерелом тепла.
3. Показано, що система з індивідуальними джерелами тепла є найменш ефективною для передпускового розігріву двигуна, як за рівнем ККД, так і з позицій загальної вартості. Проте така система має ряд переваг, які полягають в можливості використання термоелектричного генератора в якості резервного джерела електричної енергії на автомобілі.
4. Визначено, що найвищими значеннями термоелектричного ККД в системі з сумісним джерелом тепла, повинні характеризуватися передпускові нагрівники найменшої теплової потужності. Встановлено, що з ростом теплопродуктивності, ефективність термоелектричного перетворення енергії досягає значення 1 % для теплових потужностей рівня 20 кВт. Останнє є важливим, оскільки існує зв'язок між питомою вартістю отриманої електроенергії і ККД термогенератора, причому зменшення ККД зумовлює зменшення питомої вартості від 13 \$/Вт до 8 \$/Вт.

Автор висловлює подяку акад. Анатичуку Л.І. за тему та ідею наукового дослідження, а також за цінні поради при написанні роботи.

## Література

1. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Режими роботи автомобілів при понижених температурах. Необхідність використання нагрівачів та раціональність застосування термогенераторів для їх роботи // Термоелектрика. – 2014. – №3. – С. 20-31.
2. Пат. (UA) на винахід № 102303 МПК F01N 5/00 H01L 35/00. Термоелектричне джерело живлення для автомобіля / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 25.06.2013, бюл. №12, Заявка u2011 13957 від 28.11.2011.
3. Пат. (UA) №72304. МПК: F01N 5/00; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним



- джерелом живлення / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 10.08.2012, бюл. №15, Заявка u2012 02055 від 23.02.2012.
4. Пат. (UA) №124999. МПК: F02N 19/10; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Максимук М.В. – Опубл. 25.04.2018, бюл. №8, Заявка u2017 11819 від 04.12.2017.
  5. Pat. US6527548B1. Int.Cl. F24H 1/00. Self powered electric generating space heater / Aleksandr S. Kushch, Daniel Allen – Date of patent 4.03.2003, App.No 10/176,312, Filed 20.06.2002.
  6. Pat. US2010/0115968A1. Int.Cl. F25B 21/02. Heating apparatus comprising a thermoelectric devise / Jorn Budde, Jeans Baade, Michael Stelter – Date of patent 13.05.2010, App.No 11/993,608, Filed 23.06.2006.
  7. Пат. (RU) 2268393C1. МПК: F02N 17/04. Устройство для облегчения запуска двигателя внутреннего сгорания / Прилепо Ю.П. – – Опубл. 20.01.2006, бюл. №02, Заявка 2005101942/06 от 27.01.2005.
  8. Анатичук Л.І., Максимук М.В. Ефективність передпускових нагрівників з термоелектричними джерелами електрики. // Термоелектрика. – 2018. – №3.
  9. Електронний ресурс <http://www.webasto.com/>
  10. Електронний ресурс <http://www.inst.cv.ua>
  11. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Рациональні потужності термогенераторів для передпускових нагрівачів транспортних засобів. // Термоелектрика. – 2015. – №4. – С. 65-74.

Надійшла до редакції 19.11.2018

### Максимук М.В.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,  
*e-mail: anatykh@gmail.com*

### ОБ ЭКОНОМИЧЕСКИХ АСПЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДПУСКОВОГО ОТОПИТЕЛЯ С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

*Приведены результаты исследований экономических показателей систем предпускового разогрева двигателя внутреннего сгорания, в которых источниками электроэнергии являются термоэлектрические генераторы. На основе технико-экономического анализа определено, что система с совместимым источником тепла является самым эффективным вариантом применения термоэлектрических источников электричества для предпусковой тепловой подготовки двигателей транспортных средств к эксплуатации. Установлена взаимосвязь между удельной стоимостью электрической энергии и полезной тепловой мощностью системы "предпусковой отопитель – термоэлектрический генератор" с совместным источником тепла. Определено, что особенность использования такой системы заключается в снижении удельной стоимости полученной электроэнергии при повышении тепловой мощности предпусковых нагревателей. Библи. 11, табл. 3.*

*Установлена взаимосвязь между удельной стоимостью электрической энергии и полезной тепловой мощностью системы "предпусковой отопитель – термоэлектрический генератор" с совместным источником тепла. Определено, что особенность использования такой системы заключается в снижении удельной стоимости полученной электроэнергии при повышении тепловой мощности предпусковых нагревателей. Библиография, табл. 3.*

**Ключевые слова:** предпусковой отопитель, термоэлектрический генератор, эффективность.

### **M.V. Maksimuk**

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;  
*e-mail: anatysh@gmail.com*

### **ECONOMIC ASPECTS OF USING STARTING PREHEATERS WITH THERMOELECTRIC HEAT SOURCES**

*This paper presents the results of research on the economic indicators of systems for preheating of the internal combustion engine with thermoelectric generators as the sources of electric power. Based on the feasibility study, it was determined that a system with a common heat source is the most efficient option of using thermoelectric power sources for pre-start thermal preparation of vehicle engines for work. The relationship between the unit cost of electric energy and the useful thermal power of the "starting preheater-thermoelectric generator" system with a common heat source is established. It is determined that the peculiarity of using such a system lies in reducing the specific cost of electric energy generation when increasing the thermal output of starting preheaters. Bibliography, table 3.*

**Keywords:** starting preheater, thermoelectric generator, efficiency.

#### **References**

1. Mykhailovsky V.Ya., Maksimuk M.V. (2014). Automobile operating conditions at low temperatures. The necessity of applying heaters and the rationality of using thermal generators for their work. *J. Thermoelectricity*, 3, 20-31.
2. Patent of Ukraine №102303 (2013). Anatyshuk L.I., Mykhailovsky V.Ya.. Thermoelectric power source for automobile [in Ukrainian].
3. Patent of Ukraine № 72304 (2012). Anatyshuk L.I., Mykhailovsky V.Ya. Automobile heater with thermoelectric power source [in Ukrainian].
4. Patent of Ukraine № 124999 (2018). Maksimuk M.V. Automobile heater with thermoelectric power source [in Ukrainian].
5. Patent of US6527548B1 (2003). Aleksandr S. Kushch, Daniel Allen. Self-powered electric generating space heater.
6. Patent of US2010/0115968A1 (2010). Jorn Budde, Jeans Baade, Michael Stelter. Heating apparatus comprising a thermoelectric device.
7. Patent of RF 2268393C1 (2006). Prilepo Yu.P. A device to facilitate the start of internal combustion engine.
8. Anatyshuk L.I., Maksimuk M.V. (2018). Efficiency of starting pre-heaters with thermoelectric power sources. *J. Thermoelectricity*, 3

9. Retrieved from <http://www.webasto.com/>
10. Retrieved from <http://www.inst.cv.ua>
11. Mykhailovsky V.Ya., Maksimuk M.V. (2015). Rational powers of thermal generators for starting pre-heaters of vehicles. *J. Thermoelectricity*, 4, 65-74.

Submitted 19.11.2018

УДК 537.32

**Анатичук Л.І.**, *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>,  
**Пасєчнікова Н.В.**, *док. мед. наук, професор,*  
*член – кореспондент НАМН України*<sup>3</sup>,  
**Науменко В.О.**, *док. мед. наук, професор*<sup>3</sup>,  
**Задорожний О.С.**, *канд. мед. наук*<sup>3</sup>  
**Гаврилюк Н.В.**, *канд. фіз.-мат. наук*<sup>1,2</sup>  
**Кобилянський Р.Р.** *канд. фіз.-мат. наук*<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна,

<sup>3</sup>ДУ "Інститут очних хвороб та тканинної терапії  
ім. В.П. Філатова НАМН України", Французький бульвар,  
49/51, Одеса, 65000, Україна.

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИЛАД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ З ПОВЕРХНІ ОЧЕЙ

---

*У роботі наведено конструкцію та технічні характеристики вперше розробленого термоелектричного приладу для визначення теплового потоку з поверхні очей. Прилад є перспективним для діагностики та моніторингу офтальмологічних захворювань, що дає можливість підвищити ефективність ранньої діагностики патології органу зору, спостерігати в динаміці за розвитком патологічного процесу в структурах ока, а також підвищити ефективність лікування гострих і хронічних захворювань ока. Розроблений термоелектричний прилад дозволяє здійснювати моніторинг теплового та температурного стану поверхні очей у режимі реального часу, є оригінальним та не має світових аналогів. Бібл. 30, рис. 8, табл. 2.*

**Ключові слова:** термоелектричний прилад, тепловий потік, офтальмологія.

### Вступ

*Загальна характеристика проблеми.* Організм людини, пристосовуючись до мінливих умов навколишнього середовища, здатний підтримувати відносну сталість свого внутрішнього середовища (гомеостаз). Терморегуляція організму людини є одним з найважливіших аспектів підтримки гомеостазу. Для забезпечення сталості температури тіла необхідно, щоб кількість теплової енергії (теплопродукція), що утворюється в організмі, дорівнювала кількості теплової енергії, що віддається у навколишнє середовище (тепловіддача). Генерація теплової енергії в організмі людини відбувається безперервно в процесі метаболічних екзотермічних реакцій розпаду або окислення складних речовин (глюкоза, білки, ліпіди тощо) на простіші [1]. Рівень

теплопродукції, у свою чергу, залежить від активності метаболізму [2]. Віддача тепла у навколишнє середовище здійснюється за допомогою чотирьох основних механізмів: випромінювання, теплопередача, конвекція та випаровування [3].

Оцінка процесів теплообміну організму людини базується на вимірюванні температури і теплового потоку. Температура характеризує якісну сторону теплового явища, а тепловий потік – кількісну [4, 5]. Область вимірювання температури, в тому числі в офтальмології, традиційно добре забезпечена апаратурою і метрологією. Температура в різних відділах ока може бути визначена безконтактними або контактними методами. Ці методи термометрії мають як переваги, так і певні недоліки [6]. Що стосується локального вимірювання теплового потоку з поверхні тіла людини, то останнім часом досягнуто відчутний успіх у розробці сучасних засобів його вимірювання [7-14]. Для дослідження локального тепловиділення організму людини перспективними є термоелектричні сенсори теплового потоку, які поєднують в собі високу чутливість, точність, швидкодію, стабільність параметрів в широкому інтервалі робочих температур і узгоджуються з сучасною реєстраційною апаратурою [15 – 17]. Використання таких сенсорів дозволяє досягати високої точності теплотричних вимірювань [18]. Однак, слід зазначити, що у світі досі не існує жодного термоелектричного приладу для вимірювання теплового потоку з поверхні очей.

В оці тварини та людини кровообіг у судинній оболонці є основним джерелом тепла. Кров, поступаючи в око з температурою, що практично дорівнює температурі тіла, формує тепловий градієнт, який індукує перехід тепла від крові до тканин ока. Чим інтенсивніший кровообіг, тим більша кількість тепла передається тканинам ока. Тепло, розподілене по очних тканинах, переходить у навколишнє середовище через зовнішні оболонки ока [6, 19, 20]. На сьогоднішній день в офтальмології існує проблема ранньої та диференціальної медичної діагностики різноманітних захворювань, що характеризуються змінами внутрішньоочною кровообігу (запальні процеси, пухлини судинної оболонки, глаукома тощо). Очевидно, що порушення кровообігу ока мають супроводжуватися динамікою показників теплообміну [20, 21]. Отже, розробка нових високочутливих методів реєстрації змін теплообміну ока, в тому числі на основі застосування термоелектричних сенсорів теплового потоку, дозволить підвищити ефективність ранньої діагностики даної патології.

Відомо, що ряд офтальмологічних гострих і хронічних захворювань супроводжується зміною внутрішньоочних теплових процесів. Так, в деяких дослідженнях був продемонстрований взаємозв'язок температури зовнішньої поверхні ока зі станом кровообігу очей, внутрішньоочним тиском, наявністю запального процесу [22, 23]. Зміна теплових характеристик тканин ока може відбуватися в ранній фазі захворювання до появи вираженої клінічної симптоматики. Реєстрація цих змін є перспективним напрямком ранньої діагностики різної офтальмопатології. Діагностика патологічного процесу на ранньому етапі розвитку призведе до підвищення ефективності лікування і зниження ризику ускладнень.

Тому *метою даної роботи* є розробка термоелектричного приладу для визначення теплового потоку з поверхні очей, що дає можливість підвищити ефективність ранньої діагностики офтальмологічних захворювань.

## **Конструкція і технічні характеристики приладу**

Термоелектричний прилад для визначення теплового потоку з поверхні очей був розроблений в Інституті термоелектрики НАН та МОН України в рамках договору про співробітництво з ДУ "Інститут очних хвороб та тканинної терапії ім. В.П. Філатова НАМН України". Прилад

призначений для діагностики та моніторингу офтальмологічних захворювань, що дає можливість підвищити ефективність ранньої діагностики патології органу зору, спостерігати в динаміці за розвитком патологічного процесу в структурах ока, а також підвищити ефективність лікування гострих і хронічних захворювань ока. Розроблений термоелектричний прилад є оригінальним та не має світових аналогів [24]. Зовнішній вигляд приладу та технічні характеристики наведено на рис. 1 і в табл. 1.

На передній панелі приладу розміщений програмований терморегулятор типу RE-202, роз'єм для підключення термоелектричного сенсора теплового потоку, роз'єм для підключення термоелектричного термопарного датчика температури та тумблер включення приладу (рис. 1). На задній панелі розміщений роз'єм для підключення зарядного пристрою. Слід зазначити, що категорично забороняється проводити вимірювання теплового потоку і температури живих біологічних об'єктів при підключеному зовнішньому мережевому зарядному пристрої. Працювати з приладом можна тільки при відключеному зарядному пристрої.

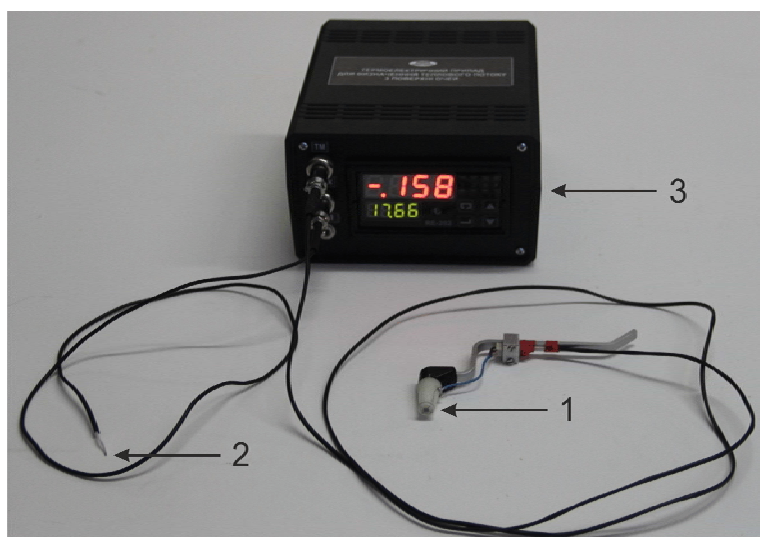


Рис. 1. Термоелектричний прилад для визначення теплового потоку з поверхні очей:  
1 – термоелектричний сенсор теплового потоку, 2 – термоелектричний термопарний датчик температури, 3 – електронний блок керування

Таблиця 1

Технічні характеристики приладу

№	Технічні характеристики приладу	Значення параметрів
1.	Кількість каналів вимірювання	4
2.	Кількість термоелектричних сенсорів теплового потоку	1
3.	Кількість термоелектричних датчиків температури	1
4.	Діапазон вимірювання густини теплового потоку	0.01 ÷ 50 мВт/см <sup>2</sup>
5.	Точність вимірювання густини теплового потоку	± 5 %
6.	Діапазон вимірювання температур	0 ÷ 50 °С
7.	Дискретність вимірювання температур	± 0.01 °С
8.	Діапазон вимірювання кімнатної температури	0 ÷ 50 °С
9.	Дискретність вимірювання кімнатної температури	± 0.01 °С
10.	Діапазон вимірювання напруги акумулятора	3.7 ÷ 4.5 В
11.	Час неперервної роботи приладу від зарядженого акумулятора	12 год.
12.	Габаритні розміри термоелектричного сенсора теплового потоку	Ø3 × 0.7 мм
13.	Габаритні розміри електронного блоку керування	180 × 140 × 90 мм
14.	Вага приладу	0.6 кг

Багатоканальний термоелектричний прилад (рис. 1) представляє собою автономний пристрій з акумуляторним джерелом живлення, що дає можливість проводити високоточні вимірювання теплових потоків і температур біологічних об'єктів контактним способом. Блок-схема такого приладу наведена на рис. 2.

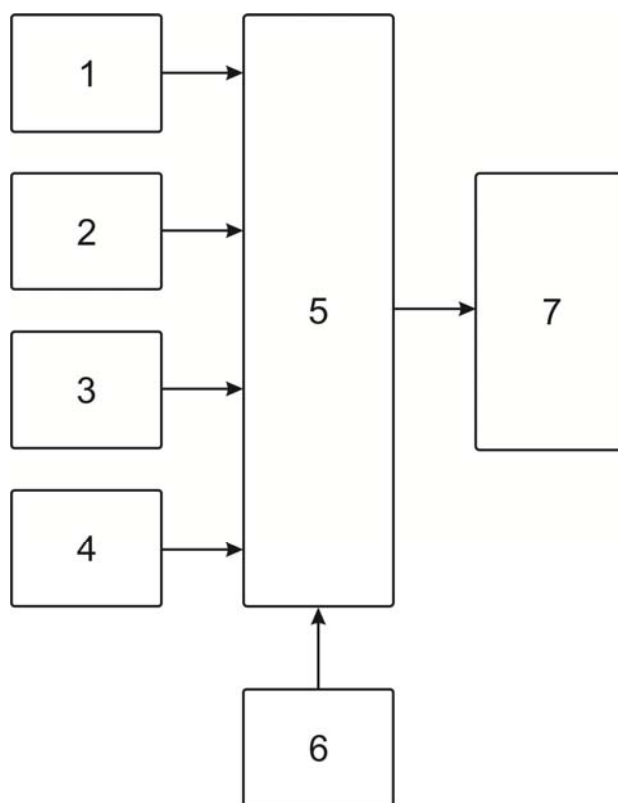


Рис. 2. Блок-схема термоелектричного приладу для визначення теплового потоку з поверхні очей: 1 – канал вимірювання теплового потоку, 2 – канал вимірювання температури, 3 – канал вимірювання напруги на акумуляторному джерелі живлення, 4 – канал вимірювання кімнатної температури, 5 – цифровий мікроконтролер, 6 – акумуляторний блок живлення із зарядним пристроєм, 7 – цифровий дисплей

Прилад складається з наступних функціональних вузлів: каналу вимірювання теплового потоку 1, каналу вимірювання температури 2, каналу вимірювання напруги на акумуляторному джерелі живлення 3, каналу вимірювання кімнатної температури 4, цифрового мікроконтролера 5, акумуляторного блоку живлення із зарядним пристроєм 6 та цифрового дисплею 7.

Канал вимірювання теплового потоку 1 призначений для точного вимірювання генерованої напруги термоелектричного сенсора теплового потоку і подальшого її перетворення у фізичну величину в одиницях густини теплового потоку ( $\text{мВт}/\text{см}^2$ ). Дискретність вимірювання напруги каналу становить  $\pm 1 \text{ мкВ}$ , що дозволяє проводити вимірювання теплового потоку з максимальною точністю.

Канал вимірювання температури 2 призначений для високоточного вимірювання температури термоелектричним термопарним датчиком. Особливістю розробленого приладу є те, що вперше у лікаря з'явилася можливість за допомогою простого переносного автономного приладу проводити вимірювання температури біологічного об'єкта з дискретністю  $\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ . Оскільки в якості датчика температури використовується термопара хромель-копель, що може бути виготовлена з мінімальними геометричними розмірами, то це дає можливість вимірювати температуру мініатюрних біологічних об'єктів з високою швидкодією.

Канал 3 призначений для вимірювання та контролю напруги на акумуляторному джерелі живлення. Оскільки прилад живиться від акумулятора, то тривалість його безперервної роботи залежить від рівня зарядки акумулятора, який, у свою чергу, залежить від залишкової напруги на ньому. Якщо напруга на акумуляторі стане менше, ніж  $3.7 \text{ В}$ , то його слід зарядити згідно інструкції по експлуатації приладу.



Канал вимірювання кімнатної температури 4 призначений для точного вимірювання температури навколишнього середовища. Датчик температури розташований на лицьовій панелі приладу біля роз'ємів. Вимірювання кімнатної температури проводиться з дискретністю  $\pm 0.01$  °С і цей сигнал використовується для компенсації температури холодного спаю термопари хромель-копель.

Цифровий мікроконтролер 5 призначений для керування вимірювальними каналами, нормування і перетворення генерованих сигналів у фізичні величини. Цифровий мікроконтролер можна програмувати за допомогою кнопок, розташованих на передній панелі приладу, вибирати тип датчика та межі вимірювання.

Акумуляторний блок живлення із зарядним пристроєм 6 призначений для гальванічної розв'язки приладу та досліджуваного біологічного об'єкта з метою можливого запобігання ураження його електричним струмом. Завдяки гальванічній розв'язці приладу від електромережі створено безпечне та ефективне використання приладу в офтальмологічній практиці. Низька напруга автономного живлення приладу (не більше 4.5 В) не представляє загрози ураження електричним струмом будь-якого досліджуваного біологічного об'єкта. Зарядний пристрій запобігає виходу з ладу літій-іонного акумулятора в разі його критичних режимів роботи.

Цифровий дисплей 7 відображає результати вимірювань (значення густини теплового потоку – у мВт/см<sup>2</sup> та температури – у °С) на передній панелі приладу. Цифровий дисплей є світлодіодним, великим та яскравим, що дозволяє проводити вимірювання у затемнених приміщеннях з великих відстаней.

Прилад простий, компактний, переносний, автономний та надійний в експлуатації, що дає можливість лікарю або медичному працівнику користуватися ним без спеціальної підготовки. Отже, до технічних переваг такого приладу слід віднести: наявність високочутливого специфічного термоелектричного сенсора теплового потоку, можливість вимірювання температури з дискретністю  $\pm 0.01$  °С, безпека використання приладу завдяки його гальванічній розв'язці від електромережі та можливість моніторингу теплового і температурного стану поверхні очей людини у режимі реального часу.

## Виготовлення та градування термоелектричного сенсора теплового потоку

Для вказаного термоелектричного приладу було розроблено та виготовлено мініатюрний термоелектричний сенсор теплового потоку за спеціальною запатентованою технологією Інституту термоелектрики НАН та МОН України [25 – 27]. Термоелектричний мікромодуль розмірами (2 × 2 × 0.5) мм містить 100 шт. кристалів *n*- та *p*-типів провідності розмірами (0.17 × 0.17 × 0.4) мм з високоефективного термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te*. Такий термоелектричний мікромодуль поміщається між двома керамічними пластинами на основі *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* діаметром 3 мм та товщиною 0.1 мм кожна, а бокова поверхня герметизується за допомогою спеціального герметика. Таким чином, діаметр та висота виготовленого термоелектричного сенсора теплового потоку складає 3 мм та 0.7 мм відповідно (рис. 3). Значення діаметру розробленого сенсора теплового потоку було визначено згідно медичних вимог [28]. Електричний опір такого термоелектричного сенсора складає  $R = 14$  Ом.

Наступним етапом роботи було визначення вольт-ватної чутливості термоелектричного сенсора теплового потоку [29, 30]. Для визначення вольт-ватної чутливості сенсора теплового потоку вказаного приладу в якості джерела теплового потоку був використаний випромінювач теплової енергії типу абсолютно чорного тіла (АЧТ). Схема стенду для визначення вольт-ватної чутливості термоелектричного сенсора теплового потоку наведена на рис. 4.



Рис. 3. Термоелектричний сенсор теплового потоку  
діаметром 3 мм і висотою 0.7 мм

Вольт-ватної чутливість термоелектричного сенсора теплового потоку визначається згідно наступного виразу:

$$v = \frac{E}{Q}, \quad (1)$$

де  $v$  – вольт-ватна чутливість термоелектричного сенсора теплового потоку (В/Вт),  $E$  – термоЕРС термоелектричного сенсора теплового потоку (В),  $Q$  – величина теплового потоку (Вт).

Величина теплового потоку, що випромінюється АЧТ і поглинається приймальною площадкою термоелектричного сенсора теплового потоку, визначається наступним чином:

$$Q = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_0^4) \cdot S_1 \cdot S_0}{\pi \cdot l^2}, \quad (2)$$

де  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12}$  Вт/(см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постійна Больцмана,  $\varepsilon_1 = 1$  для випромінювача АЧТ,  $\varepsilon_2 = 0.82$  для приймальної площадки – шліфованої кераміки на основі  $Al_2O_3$ ,  $T_1$ , К – температура корпусу АЧТ,  $T_0$ , К – температура приймальної площадки, що фактично близька до температури навколишнього середовища,  $S_1$ , см<sup>2</sup> – площа випромінювального отвору АЧТ,  $S_0$ , см<sup>2</sup> – площа приймальної площадки,  $l$ , см – відстань між вихідним отвором випромінювального АЧТ і приймальною площадкою, які між собою паралельні та їх центри знаходяться на одній осі.

Для даного сенду (рис.4) маємо наступні значення:  $S_1 = 0.059$  см<sup>2</sup>,  $S_0 = 0.07065$  см<sup>2</sup>,  $l = 0.9$  см.

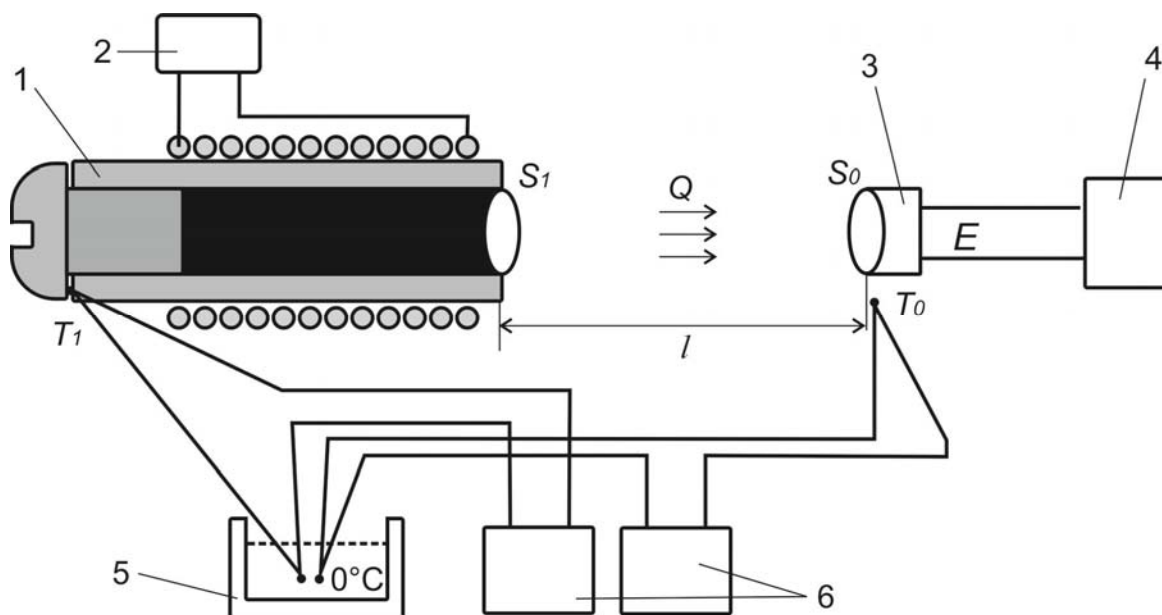


Рис. 4. Схема стенду для визначення вольт-ватної чутливості термоелектричного сенсора теплового потоку: 1 – АЧТ, 2 – блок живлення нагрівника АЧТ, 3 – термоелектричний сенсор теплового потоку, 4 – мілівольтметр, 5 – нуль-термостат термоелектричних терморпар, 6 – вимірювачі температури

Результати визначення вольт-ватної чутливості термоелектричного сенсора теплового потоку наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати визначення вольт-ватної чутливості термоелектричного сенсора теплового потоку

$T_0, ^\circ\text{C}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ мВ}$	$Q, \text{ мВт}$	$\nu, \text{ В/Вт}$
18.5	50	0.096	27.9	3.43
18.5	58	0.124	36.44	3.40

Таким чином, було проведено градування термоелектричного сенсора теплового потоку та визначено коефіцієнт перетворення ( $k = 4.163 \text{ мВт/мВ} \times \text{см}^2$ ) значення генерованої напруги термоелектричного сенсора у фізичну величину в одиницях густини теплового потоку ( $\text{мВт/см}^2$ ).

### Порядок роботи з приладом

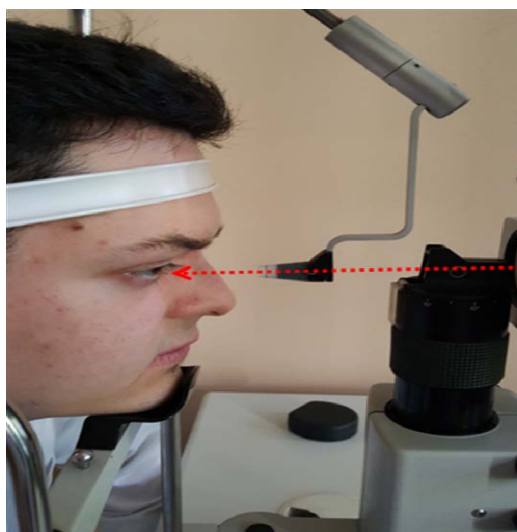
Розроблений термоелектричний сенсор теплового потоку вказаного приладу закріплено на контактну призму та штатив, що є аналогічними стандартному апіанаційному тонометру Гольдмана (медичний пристрій, що застосовується для вимірювання внутрішньоочного тиску) [28].

Вказані контактна призма та штатив є універсальними та можуть кріпитися до біомікроскопів різних виробників (рис. 5-8). Особливістю конструкції контактної призми є те, що вона має можливість зніматися з штативу для обробки після кожного пацієнта. Термоелектричний сенсор теплового потоку, що закріплений у центрі контактної призми, безпосередньо контактує із зовнішньою поверхнею ока людини (з центром рогівки). Також слід зазначити, що контактну поверхню термоелектричного сенсора теплового потоку зроблено атравматичною (зі згладженими краями) та передбачено можливість обробки і дезінфекції цієї поверхні.

Термоелектричний сенсор теплового потоку (діаметр 3 мм) розміщено в центрі робочої поверхні контактної призми (діаметр 7 мм) та конструктивно передбачено невелику оптичну зону контролю між ними для того, щоб лікар дивлячись у біомікроскоп мав можливість точно встановити вказаний термоелектричний сенсор на центр рогівки ока (рис. 8).



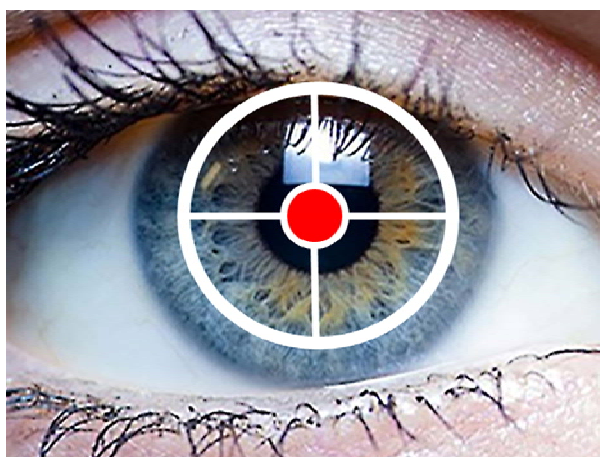
*Рис. 5. Штатив тонометра Гольдмана, закріпленій на біомікроскопі*



*Рис. 6. Контактна призма та штатив тонометра Гольдмана, закріплені на біомікроскопі (на рисунку вказано напрямок погляду лікаря)*



*Рис. 7. Положення контактної призми, закріпленої в штативі тонометра Гольдмана, в процесі дослідження за допомогою термоелектричного сенсора теплового потоку*



*Рис. 8. Схематичне зображення області вимірювання теплового потоку з поверхні рогівки ока людини за допомогою розробленого приладу*

## **Висновки**

1. Вперше розроблено та виготовлено термоелектричний прилад для визначення теплового потоку з поверхні очей. Прилад призначений для діагностики та моніторингу офтальмологічних захворювань, що дає можливість підвищити ефективність ранньої діагностики патології органу зору, спостерігати в динаміці за розвитком патологічного процесу в структурах ока, а також підвищити ефективність лікування гострих і хронічних захворювань ока. Розроблений термоелектричний прилад є оригінальним та не має світових аналогів.
2. Розроблений термоелектричний прилад дає можливість здійснювати моніторинг теплового та температурного стану поверхні очей людини у режимі реального часу, що є вкрай важливим для діагностики офтальмологічних захворювань на ранніх стадіях.

3. Впровадження розробленого термоелектричного приладу в медичну практику матиме надзвичайно важливу соціальну та економічну значимість, оскільки дозволить зменшити ризик виникнення офтальмологічних ускладнень, зберегти життєздатність структур очей пацієнтів та забезпечити надання висококваліфікованої допомоги як в спеціалізованих медичних закладах, так і в екстремальних умовах.

## Література

1. Чебышев Н.В. Биология. Справочник. - 2-е изд., испр. и доп. / Н.В. Чебышев, Г.С. Гузикова, Ю.Б. Лазарева, С.Н. Ларина – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2011. – 608с.
2. Царев А. В. Целевой температурный менеджмент в клинической практике интенсивной терапии критических состояний / А. В. Царев // Медицина неотложных состояний. – 2014. – № 7. – С.186-191.
3. Кубарко А.И. Нормальная физиология : учебник. В 2 ч. Ч. 2 / А.И. Кубарко [и др.]; под ред. А.И. Кубарко. - Минск : Вышэйшая школа, 2014. - 604 с.
4. Декуша Л. В. Средства теплотрии на базе термоэлектрических преобразователей теплового потока : дис ... докт. техн. наук : 05.11.04 / Декуша Леонид Васильевич. – Львов, 2016. – 495 с.
5. Грищенко Т. Г. Теплотрия: теория, метрология, практика. Монография в трех книгах. / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев [и др.]; под ред. д-р техн. наук Т. Г. Грищенко. Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока - К.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2017. - 438 с.
6. Анатичук Л.И., Пасечникова Н.В., Задорожний О.С., Назаретян Р.Э., Мирненко В.В., Кобилянський Р.Р., Гаврилюк Н.В. Оригинальное устройство и подходы к изучению распределения температуры в различных отделах глаза // Офтальмологический журнал. – № 6. – 2015. – С. 50-53.
7. Гищук В.С. Електронний реєстратор сигналів сенсорів теплового потоку людини // Термоелектрика. – № 4. – 2012. – С. 105-108.
8. Гищук В.С. Електронний реєстратор з обробкою сигналів термоелектричного сенсора теплового потоку // Термоелектрика. – № 1. – 2013. – С. 82-86.
9. Гищук В.С. Модернізований прилад для вимірювання теплових потоків людини // Термоелектрика. – № 2. – 2013. – С. 91-95.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. L.I. Anatychuk, R.R. Kobylanskyi, R.G. Cherkez, I.A. Konstantynovych, V.I. Hoshovskiy, V.A. Tiumentsev. Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory

- processes in the human organism // *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2017, № 6, pp. 44-48.
15. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / Л.И. Анатичук – К.: Наукова думка, 1979. – 766 с.
  16. Геращенко О.А. Основы теплотриии / О.А. Геращенко – К.: Наукова думка, 1971. – 192 с.
  17. Ладыка Р.Б. Применение полупроводниковых тепломеров в диагностике и лечении / Р.Б. Ладыка, О.Н. Дакалюк, Л.П. Булат [и др.] // *Медицинская техника*. – 1996. – №6. – С. 36 – 37.
  18. Анатичук Л.І. Про вплив температури навколишнього середовища на покази термоелектричних сенсорів медичного призначення / Л.І. Анатичук, О.І. Іващук, Р.Р. Кобилянський, І.Д. Постевка, В.Ю. Бодяка, І.Я. Гушул, Ю.Я. Чупровська // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. - 2018. - Т. 15, № 1. - С. 17-29.
  19. Mapstone R. Determinants of corneal temperature / R. Mapstone // *Brit. J. Ophthalmol.* – 1968. – Vol. 52. – P. 729-741.
  20. Tan J.H. Infrared thermography on ocular surface temperature: A review / J.H. Tan, E.Y.K Ng, U. R. Acharya, C. Chee // *Infrared Phys. Techn.*, 2009. – Vol. 52. – P. 97–108.
  21. Zadorozhnyy O.S. Infrared thermography of external ocular surface in patients with absolute glaucoma in transscleral cyclophotocoagulation: a pilot study / O. S. Zadorozhnyy, O. V. Guzun, A. Iu. Bratishko, [et al.] // *J. ophthalmol. (Ukraine)* – 2018. – Vol.2. – P. 23-28.
  22. Galassi F. Evaluation of ocular surface temperature and retrobulbar haemodynamics by infrared thermography and colour Doppler imaging in patients with glaucoma / F.Galassi, B.Giambene, A.Corvi [et al.] // *British Journal of Ophthalmology*, 2007. – № 91. – P. 878–881.
  23. Sodi A.A. Ocular surface temperature in central retinal vein occlusion: preliminary data/ A.A. Sodi, B.A.D. Giambene, G.B. Falaschi [et al.] // *European Journal of Ophthalmology*, 2007. – №17. – P. 755–759.
  24. Заявка на корисну модель № u201901535 від 15.02.2019 р. Термоелектричний прилад для вимірювання температури і теплового потоку з поверхні очей // Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Бухараєва Н.Р., Гаврилюк М.В., Тюменцев В.А. – 2019.
  25. Патент UA 93217. Спосіб виготовлення термоелектричної мікробатарей // Анатичук Л.І., Константинович І.А. – 2014.
  26. Патент UA 117719. Спосіб виготовлення термоелектричної мікробатарей // Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р. – 2017.
  27. 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.
  28. Kim N.R. Comparison of Goldmann applanation tonometer, noncontact tonometer, and TonoPen XL for intraocular pressure measurement in diferent types of glaucomatous, ocular hypertensive, and normal eyes / N.R. Kim, C.Y. Kim, H. Kim [et al.] // *Curr. Eye Res.*, 2011. – № 36. – P. 295-300.
  29. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Константинович І.А. Градування термоелектричних сенсорів теплового потоку // *Труди XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» 26-30 травня 2014 року*. – Т. 2. – Одеса, Україна. – 2014. – с. 30-31.
  30. 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.

Надійшла до редакції 16.10.2018

**Анатичук Л.І.**, *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>,  
**Пасечникова Н.В.**, *док. мед. наук, професор,*  
*член – корреспондент НАМН України*<sup>3</sup>,  
**Науменко В.О.**, *док. мед. наук, професор*<sup>3</sup>,  
**Задорожний О.С.**, *канд. мед. наук*<sup>3</sup>  
**Гаврилюк Н.В.**<sup>1</sup>, *канд. физ.-мат. наук*<sup>1,2</sup>  
**Кобылянський Р.Р.** *канд. физ.-мат. наук*<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Черновицький національний університет ім. Ю.Федьковича,  
ул. Коцюбинського, 2, Черновці, 58012, Україна,  
*e-mail: anatysh@gmail.com;*

<sup>3</sup>ГУ "Інститут очних захворювань і тканинної терапії  
ім. В.П. Філатова НАМН України", Французький бульвар,  
49/51, Одеса, 65000, Україна,

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА С ПОВЕРХНОСТИ ГЛАЗ**

*В работе приведена конструкция и технические характеристики впервые разработанного термоэлектрического прибора для определения теплового потока с поверхности глаз. Прибор является перспективным для диагностики и мониторинга офтальмологических заболеваний, дающий возможность повысить эффективность ранней диагностики патологии органа зрения, наблюдать в динамике за развитием патологического процесса в структурах глаза, а также повысить эффективность лечения острых и хронических заболеваний глаза. Разработанный термоэлектрический прибор позволяет осуществлять мониторинг теплового и температурного состояний поверхности глаз в режиме реального времени, является оригинальным и не имеет мировых аналогов. Библ. 30, Рис. 8, Табл. 2.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический прибор, тепловой поток, офтальмология.

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

**N.V. Pasechnikova**, *doctor Medical Sciences, Professor*<sup>3</sup>

*Corresponding Member of the National  
Academy of Sciences of Ukraine*

**V.O. Naumenko**, *medical sciences, professor*<sup>3</sup>

**O.S. Zadorozhnyi**, *cand. Medical. of Sciences*<sup>3</sup>

**M.V. Havryliuk**, *cand. Phys. - math. Sciences*<sup>1,2</sup>

**R.R. Kobylanskyi**, *cand. Phys. - math. Sciences*<sup>1,2</sup>



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

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
2 Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;  
*e-mail: anatykh@gmail.com,*

<sup>3</sup>State Institution “The Filatov Institute of Eye Diseases and Tissue  
Therapy of the NAMS of Ukraine”, 49/51 Frantsuzskyi Boulevard,  
Odesa, 65000, Ukraine

## THERMOELECTRIC DEVICE FOR DETERMINING HEAT FLUX FROM THE SURFACE OF THE EYES

*The paper presents the design and technical characteristics of a newly developed thermoelectric device for determining heat flux from the surface of the eyes. The device is promising for the diagnosis and monitoring of ophthalmic diseases, which makes it possible to increase the efficiency of the early diagnosis of the pathology of the organ of vision, to observe the dynamics of the development of the pathological process in the structures of the eye, as well as to increase the effectiveness of treatment of acute and chronic eye diseases. The developed thermoelectric device allows real-time monitoring of the thermal and temperature state of eye surface, is original and has no world analogues. Bibl. 30, Fig. 8, Tabl. 2.*

**Key words:** thermoelectric device, heat flux, ophthalmology

### References

1. Chebyshev N.V., Guzikova G.S., Lazareva Yu.B., Larina S.N. (2011). *Biologiya. Spravochnik.- 2 izdaniie, ispravlennoie i dopolnennoie [Biology. Handbook. 2<sup>nd</sup> ed., revised and enlarged]*. Moscow: GEOTAR-Media [in Russian].
2. Tsarev A.V. (2014). Tselevoi temperaturnyi menedzhment v klinicheskoi praktike intensivnoi terapii kriticheskikh sostoianii [Special-purpose temperature management in the clinical practice of intensive care of critical states]. *Medsina neotlozhnykh sostoianii – Medicine of Emergencies*, 7, 186-191.
3. Kubarko A.I. (2014). *Normalnaia fiziologiya: Uchebnik. V 2 chastiakh. Chast 2. [Normal physiology: textbook. In 2 parts. Part 2]*. A.I.Kubarko (Ed.). Minsk: Vysheishaiia shkola [in Russian].
4. Dekusha L.V. (2016). Sredstva teplometrii na base termoelektricheskikh preobrazovatelei teplovogo potoka [Heat metering means based on thermoelectric heat flux converters]. *Doctor's thesis (Engineering)*.
5. Grishchenko T.G., Dekusha L.V., Vorobiov L.I. (2017). *Teplometriia: teoriia, metrologiia, praktika. Monografiia v 3 knigakh [Heat flow metering: theory, metrology, practice. Monograph in three books]*. T.G.Grishchenko (Ed.). *Kniga 1: Metody i sredstva izmereniia teplovogo potoka [Book 1: Methods and facilities of heat flow measurement]*. Kyiv: Institute of Engineering Thermophysics [in Russian].
6. Anatykhuk L.I., Pasechnikova N.V., Zadorizhnyi O.S., Nazaretian R.E., Mirnenko V.V., Kobylianskyi R.R., Havryliuk N.V. (2015). Originalnoie ustroistvo i podkhody k izucheniiu raspredeleniia temperatury v razlichnykh otdelakh glaza [Original device and approaches to studying temperature distribution in different sections of eye]. *Ophtalmologicheskii zhurnal - J. Ophthalmology*, 6, 50-53 [in Russian].
7. Gischuk V.S. (2012). Electronic recorder of signals from human heat flux sensors. *J. Thermo-*

- electricity*, 4, 105-108.
8. Gischuk V.S. (2013). Electronic recorder with processing signals from heat flux thermoelectric sensor. *J.Thermoelectricity*, 1, 82-86.
  9. Gischuk V.S. (2013). Modernized device for human heat flux measurement. *J.Thermoelectricity*, 2, 91-95.
  10. Gischuk V.S., Kobylianskyi R.R., Cherkez R.G. (2014). Bahatokanalnyi prylad dlia vymiriuvannia temperatury i hustyny teplovykh potokiv [Multichannel device for temperature and heat flux density measurement]. *Naukovy visnyk Chernivetskoho Universytetu. Fyzyka.Elektronika – Scientific Bulletin of Chernivtsi University. Physics. Electronics*, 3 (1), 96-100 [in Ukrainian].
  11. Kobylianskyi R.R., Boichuk V.V. (2015). Vykorystannia termoelektrychnykh teplomiriv u medychnii diagnostytsi [The use of thermoelectric heat flow meters in medical diagnostics]. *Naukovy visnyk Chernivetskoho Universytetu. Fyzyka.Elektronika – Scientific Bulletin of Chernivtsi University. Physics. Electronics*, 4 (1), 90-96 [in Ukrainian].
  12. Anatyshchuk L.I., Ivashchuk O.I., Kobylianskyi R.R., Postevka I.D., Bodiaka V.Yu., Hushul I.Ya. (2016). Thermoelectric device for temperature and heat flux density measurement “Altec-10008”. *J.Thermoelectricity*, 1, 76-84.
  13. Anatyshchuk L.I., Yuryk O.Ye., Kobylianskyi R.R., Roi I.V., Fishchenko Ya.V., Slobodianiuk N.P., Yuryk N.Ye., Duda B.S. (2017). Thermoelectric device for the diagnosis of inflammatory processes and neurological manifestations of vertebral osteochondrosis. *J.Thermoelectricity*, 3, 54-67.
  14. Anatyshchuk L.I., Kobylianskyi R.R., Cherkez R.G., Konstantynovych I.A., Hoshovskiy V.I., Tiumentsev V.A. (2017). Termoelektricheskoe ustroystvo s elektronnyim blokom upravleniia dlia diagnostiki vospalitelnykh protsessov v organizme cheloveka [Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in human organism]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 6, 44-48 [in Russian].
  15. Anatyshchuk L.I. (1979). Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva: Spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices: Handbook]. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
  16. Gerashchenko O.A. (1971). *Osnovy teplometrii [Fundamentals of heat flow metering]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
  17. Ladyka R.B., Dakaliuk O.N., Bulat L.P., et al. (1996). Primeneniye poluprovodnikovyykh teplomerov v diagnostike i lechenii [The use of semiconductor heat flow meters in diagnostics and treatment]. *Meditinskaya tekhnika – Biomedical Engineering*, 6, 36 – 37 [in Russian].
  18. Anatyshchuk L.I., Ivashchuk O.I., Kobylianskyi R.R., Postevka I.D., Bodiaka V.Yu., Gushul I.Ya., Chuprovskaya Yu.Ya. (2018). Pro vplyv temperatury navkolynshniho seredovyscha na pokazy termoelektrychnykh sensoriv medychnoho pryznachennia [On the effect of ambient temperature on the readings of medical purpose thermoelectric sensors]. *Sensorna elektronika i mikrosystemni tekhnologii – Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 15 (1), 17-29 [in Ukrainian].
  19. Mapstone R. (1968). Determinants of corneal temperature. *Brit. J. Ophthalmol.*, 52, 729-741.
  20. Tan J.H., Ng E.Y.K., Acharya U.R., Chee C. (2009). Infrared thermography on ocular surface temperature: A review. *Infrared Phys. Techn.*, 52, 97–108.
  21. Zadorozhnyy O.S., Guzun O.V., Bratishko A.Iu., et al. (2018). Infrared thermography of external ocular surface in patients with absolute glaucoma in transscleral cyclophotocoagulation: a pilot study. *J. Ophthalmol.*, 2, 23-28.
  22. Galassi F., Giambene B., Corvi A., et al. (2007). Evaluation of ocular surface temperature and retrobulbar haemodynamics by infrared thermography and colour Doppler imaging in patients with glaucoma. *British Journal of Ophthalmology*, 91, 878–881.

23. Sodi A.A., Giambene B.A.D., Falaschi G.B. , et al. (2007). Ocular surface temperature in central retinal vein occlusion: preliminary data. *European Journal of Ophthalmology*, 17, 755–759.
24. *Application for utility model № u201901535 of 15.02.2019*. (2019). Anatyshuk L.I., Kobylianskyi R.R., Bukharaieva N.R., Havryliuk M.V., Tiumentsev V.A. Термоелектричний прилад для вимірювання температури і теплового потоку з поверхні очей [Thermoelectric device for measurement of temperature and heat flux from the surface of eyes] [in Ukrainian].
25. *Patent of Ukraine № 9321* (2014). Anatyshuk L.I., Konstantynovych I.A. Method for manufacturing thermoelectric microthermopile [in Ukrainian].
26. *Patent of Ukraine № 117719* (2017). Anatyshuk L.I., Kobylianskyi R.R. (2017). Method for manufacturing thermoelectric microthermopile [in Ukrainian].
27. Anatyshuk L.I., Kobylianskyi R.R., Konstantynovych I.A., Kuz R.V., Manik O.M., Nitsovych O.V., Cherkez R.G. (2016). Technology for manufacturing thermoelectric microthermopiles. *J.Thermoelectricity*, 6, 49-54.
28. Kim N.R. (2011). Comparison of Goldmann applanation tonometer, noncontact tonometer, and TonoPen XL for intraocular pressure measurement in different types of glaucomatous, ocular hypertensive, and normal eyes. *Curr. Eye Res.*, 36, 295-300.
29. Anatyshuk L.I., Kobylianskyi R.R., Konstantynovych I.A. (2014). Hraduiuvannia termoelektrychnykh sensoriv teploвого потоку [Calibration of thermoelectric heat flow sensors]. *Trudy XV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Suchasni informatsiini ta elektronni tekhnologii" – Proc. of International scientific and practical conference "Modern Information and Electronic Technologies"* (Ukraine, Odessa, May 26-30, 2014). (Vol.2, pp.30-31) [in Ukrainian].
30. Anatyshuk L.I., Kobylianskyi R.R., Konstantynovych I.A., Lysko V.V., Pugantseva O.V., Rozver Yu.Yu., Tiumentsev V.A. (2016). Calibration bench for thermoelectric converters of heat flux. *J.Thermoelectricity*, 5, 71-79.

Submitted 16.10.2018



Микитюк П.Д.

**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: anatykh@gmail.com;*

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

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



Микитюк О.Ю.

## ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ТЕРМОПАРИ ДЛЯ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МЕТРОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Розглянуто особливості застосування термоелектричного матеріалу (ТЕМ) при конструюванні термоелектричних перетворювачів (ТП) метрологічного призначення. Порівняння математичних виразів для основних параметрів різних термоелектричних пристроїв показало, що існують суттєві відмінності у виборі ТЕ для термопари ТП. Зокрема, максимальна термоелектрична ефективність ТЕМ Z для ТП не завжди є визначальною у забезпеченні найкращих параметрів ТП. Для ТП, крім високих значень Z, важливими є максимальні значення термоЕРС ТЕМ та раціональне використання тепла, що виділяється нагрівником ТП (так званий "конструктивний фактор"). Бібл. 12, рис. 1.*

**Ключові слова:** термоелектричний перетворювач, нагрівник, термопара, чутливість, термоелектричний матеріал.

### Вступ

Створення високоточних приладів для вимірювання величин змінного струму є важливим завданням сучасного термоелектричного приладобудування. Підвищення чутливості таких приладів безпосередньо пов'язане з підвищенням чутливості термоелектричного перетворювача (ТП) метрологічного призначення [1].

Збільшення чутливості ТП в основному досягається за рахунок покращання параметрів термоелектричного матеріалу (ТЕМ). Однак, поряд з пошуком нових ТЕМ і покращанням якості відомих матеріалів, можливості збільшення добротності ( $z$ ) яких на даному етапі практично вичерпані, існують можливості підвищення параметрів ТП за рахунок їх конструктивних удосконалень, оптимізації теплових режимів роботи з метою збільшення ефективності використання тепла, що виділяється нагрівником ТП. Актуальним залишається завдання оптимального застосування ТЕМ саме для ТП, оскільки у даному випадку існує

суттєва відмінність від використання ТЕМ для інших термоелектричних пристроїв – термогенераторів (ТЕГ), приймачів випромінювання, охолоджувачів та ін.

Тому важливим завданням і метою даної роботи є встановлення особливостей застосування ТЕМ саме при розробці ТП.

### Відмінності у виборі ТЕМ для різних типів термоелектричних пристроїв

Відомо [2], що застосування напівпровідникового матеріалу для перетворювачів теплової енергії в електричну призвело до різкого покращання їхнього коефіцієнту корисної дії (ККД) і створило хороші передумови для широкого використання таких перетворювачів. У значно меншій мірі вивчені можливості покращання параметрів ТП метрологічного призначення. Часто спроби використання ТЕМ, розроблених для енергетичних використань не мали очікуваного успіху. Це зумовлено тим, що ТЕМ, призначені для вимірювальної техніки і метрології, повинні відповідати ряду додаткових вимог, що не враховуються при розробці ТЕМ для інших застосувань. Наприклад, для ТЕГ, термоелектричних холодильників (ТЕО) і пристроїв термоелектричного нагрівання.

При виборі ТЕМ для термопари ТП видозмінюються критерії оптимізації ТЕМ. В ТЕГ, ТЕО і пристроях для термоелектричного нагрівання, основним параметром, що визначає їх якість є ККД. Для ТЕГ ККД ( $\eta_{\max}$ ) в режимі максимальної потужності визначається виразом [3]:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{2} \frac{T_1 - T_2}{T_1 + \frac{2}{z} - \frac{1}{4}(T_1 - T_2)}, \quad (1)$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – температури гарячих і холодних спаїв, відповідно,  $z$  – термоелектрична добротність ТЕМ, що визначається за формулою:

$$z = \frac{\alpha^2 \sigma}{x}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт термоЕРС,  $\sigma$  – електропровідність,  $x$  – теплопровідність.

Для характеристики ТЕО використовують холодильний коефіцієнт  $\varepsilon_{\max}$ , що визначається з рівняння [4]:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{\sqrt{1 + 0,5z(T_1 + T_2)} - T_1/T_2}{\sqrt{1 + 0,5z(T_1 + T_2)} + T_1/T_2}. \quad (3)$$

Опалювальний коефіцієнт  $K_T$  для пристроїв термоелектричного нагрівання визначається так [5]:

$$K_T = \frac{1}{4} \left( \frac{T_2}{2} - \frac{T_1 - T_2}{zT_2} \right). \quad (4)$$

Формули (1), (2), (3), (4) залишаються правильними незалежно від того, який тип пристрою із вищезгаданих розглядається. У цих формулах основним параметром, що

характеризує ефективність пристрою, є  $z$ . Тому основною вимогою, що висувається до ТЕМ, є досягнення максимально можливого значення  $z$ . Іншою, не менш важливою, вимогою є збереження добротності ТЕМ у широкому інтервалі температури.

Лише для невеликої групи вимірювальних приладів – приймачів випромінювання, мікрокалориметрів, термопар – знайдено співвідношення, з яких визначається зв'язок між параметрами ТЕМ і основними характеристиками пристрою з врахуванням можливості досягнення ними граничних значень, обмежених лише тепловими і температурними шумами [5].

Основними параметрами, що описують приймачі випромінювання, є здатність до виявлення сигналу та вольт-ватна чутливість. Для мікрокалориметрів вводяться аналогічні параметри. Ці параметри давно досліджені і описані в роботах [3,4]. Математичні вирази для визначення цих параметрів не враховують цілий ряд додаткових факторів, властивих різним термоелектричним пристроям. Вирази для реальних конструкцій є значно складнішими [5]. В них у різних комбінаціях входять параметри ТЕМ:  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\chi$ . Крім вимог досягнення максимальної чутливості до ТЕМ для ТП висувається і ряд додаткових умов: стабільність у заданому діапазоні температури, висока часова стабільність та ін.

Із наведеного видно, що вимоги, котрі висуваються до ТЕМ, призначених для ТЕГ, ТЕО і теплових насосів, суттєво відрізняються від вимог до ТЕМ, призначених для конструювання ТП як вимірювальних приладів. Наприклад, добротність ТЕМ є визначальною для ТЕГ і її ККД при малих значеннях  $zT$  залежить від добротності за законом, близьким до лінійного. Тоді як для вимірювальних приладів вирази, в які входить  $z$ , визначаються степеневу залежністю [6] і іншими коефіцієнтами. З цієї причини умови оптимізації ТЕМ для досягнення максимального значення чутливості, швидкодії та ін., будуть відрізнятися між собою. Крім того має місце відмінність у вимогах до ТЕМ і для різних вимірювальних приладів [7]. Через це не може бути створений універсальний ТЕМ, однаково придатний для різних термоелектричних виробів.

У вимірювальній системі з використанням ТП, точність вимірювання цих величин змінного струму цілком залежить від якості ТП, котра в значній мірі визначається властивостями ТЕМ. Однак, вимоги, що висуваються до ТЕМ для досягнення гранично можливих параметрів ТП, або не в повній мірі досліджені та визначені, або вибираються з міркувань, що не завжди впливають із фізичних принципів роботи ТП, а обумовлені експлуатаційними підходами. У зв'язку з цим часто виникають труднощі з вибором оптимального варіанту ТЕМ для ТП.

### Зв'язок основних параметрів ТП з властивостями ТЕМ

Для визначення методики вибору і оптимізації ТЕМ для ТП розглянемо основні параметри ТП,

Найвпливовішими параметрами, що описують властивості ТП, є ті, що визначають зв'язок між вихідними величинами (сила струму, напруга) і вихідними (термоЕРС термопар, термоелектричний струм, потужність в колі термопар). Для опису цього зв'язку в літературі [8] прийняті:

а) чутливість  $S_I = \partial E_T / \partial I_H$ , як відношення приросту термоЕРС термопар  $E_T$  до приросту струму  $I_H$  через нагрівник ;

б) чутливість  $S_U = \partial E_T / \partial U_H$ , як відношення приросту термоЕРС термопар  $E_T$  до приросту напруги  $U_H$ ;

в) чутливість  $S_W = E_T / P_H$ , як відношення  $E_T$  до потужності  $P_H$ , що розсіюється нагрівником.

Для визначення  $S_I$  і  $S_U$  використовують формули:

$$S_I = 2K_1 I_H, \quad (5)$$

$$S_U = 2K_2 U_H. \quad (6)$$

Коефіцієнти перетворення  $K_1$  і  $K_2$  зв'язані співвідношенням:

$$K_I = K_2 R_H^2, \quad (7)$$

де  $R_H$  – опір нагрівника.

Коефіцієнт перетворення  $K_I$  наближено можна записати у вигляді:

$$K_I = \frac{\alpha R_H}{S\lambda}, \quad (8)$$

де  $S$  – поверхня теплообміну,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

Вирази (5) і (6) для чутливості  $S_I$  і  $S_U$  включають лише один параметр ТЕМ –  $\alpha$ . Формули (5) і (7) вірні тільки для деяких типів ТП, у яких відвід тепла нагрівником значно більший, ніж відвід тепла термопарою.

У більшості конструкцій ТП термопара і нагрівник подібні як за геометричними розмірами, так і за теплофізичними параметрами матеріалів. При цьому, як показано у [8], теплопровідність термопари впливає на розподіл температури вздовж нагрівника. Тому вирази (5) і (6) не повністю враховують фізичні процеси, що мають місце в ТП.

Вольт-ватна чутливість для малих перепадів температури дорівнює [8]:

$$S_W = \frac{\alpha r_T}{S\lambda}, \quad (9)$$

де  $r_T$  – тепловий опір термопари, який визначається за формулою:

$$r_T = \frac{l_T}{xS_T}, \quad (10)$$

де  $l_T$  і  $S_T$  – довжина і переріз вітки термопари.

Вольт-ватна чутливість зв'язана з коефіцієнтом перетворення  $K_I$  співвідношенням:

$$S_W = \frac{K_I}{R_H}. \quad (11)$$

З врахуванням (11) загальний вираз для чутливості ТП можна записати у вигляді:

$$S_I = \frac{r_\alpha r_T R_H I_H}{S\lambda}. \quad (12)$$

Таким чином, вираз (12) визначає зв'язок між основними параметрами термопари. Із формули (12) видно, що  $S_I$  дозволяє з більшою визначеністю встановити залежність властивостей

ТП від параметрів ТЕМ, однак і чутливість  $S_\eta$  не характеризує їх у повній мірі.

Для найповнішого визначення залежності параметрів ТП від властивостей ТЕМ введемо параметр чутливості

$$S_\eta = \frac{P}{P_H}, \quad (13)$$

Який є відношенням потужності, отриманої на електричному навантаженні термоелементу до підведеної до ТП електричної потужності змінного струму. Для знаходження  $S_\eta$  розглянемо еквівалентну схему безконтактного ТП з навантаженням  $r_H$ , рис. 1.

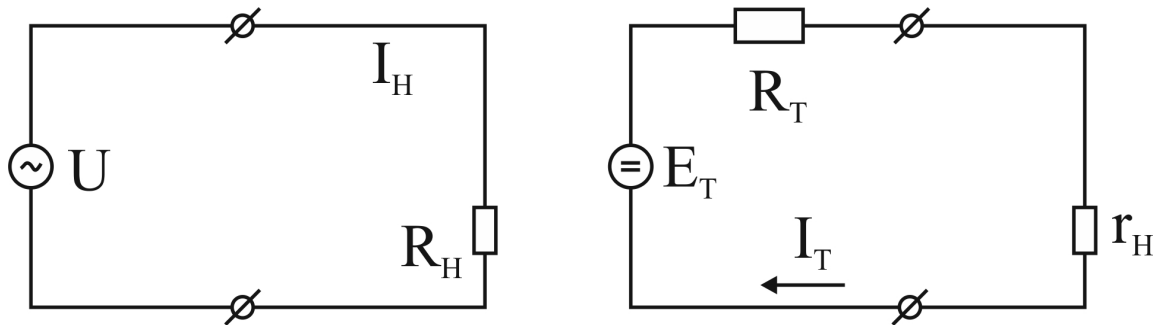


Рис. 1. Схема безконтактного ТП з навантаженням.

Якщо опір навантаження узгоджений з опором термопарі ( $r_H = R_T$ ), то ТП працює в режимі близькому до режиму максимального ККД і тоді

$$S_\eta = \frac{E_T^2}{4R_T R_H I_H^2}. \quad (14)$$

З іншої сторони ват-ватна чутливість  $S_\eta$  може бути записана через теплофізичні параметри ТЕМ термопарі у вигляді:

$$S_\eta = \frac{z(T_1 - T_2)}{4F_p}, \quad (15)$$

де  $F_p$  – коефіцієнт, що характеризує раціональність використання тепла, що виділяється нагрівником у ТП. Причому

$$F_p = \frac{2P_H r_T}{T_1 - T_2}. \quad (16)$$

Формула (15) згідно [3] відповідає виразу для ККД ТЕГ при умові малих перепадів температури в термопарі та при умові, що параметри ТЕМ для термопарі не залежать від температури. Більше того, вираз для  $S_\eta$  може бути записаний [5] у вигляді:

$$S_\eta = \eta = \frac{(T_1 - T_2)\sqrt{1 + zT} - 1}{(T_1\sqrt{1 + zT} - T/T_1)F_p}. \quad (17)$$



Із аналізу (15) і (17) слідує, що основні експлуатаційні параметри ТП задаються термоелектричною добротністю  $TEM z$ , робочим перепадом  $\Delta T = T_1 - T_2$  і коефіцієнтом  $F_p$ , залежним від конструкції ТП.

Отже, збільшення чутливості ТП може досягатися як збільшенням  $z$  і  $\Delta T$ , так і зменшенням коефіцієнту  $F_p$ . Однак, збільшення  $\Delta T$  однозначно погіршує параметри ТП: квадратичність перетворення (коефіцієнт  $K_I$  у формулі (5) стає залежним від температури), здатності до переважань по струму, стабільність у часі через старіння металу нагрівника та прискорення процесів дифузії на спаях термопари. Тому суттєве збільшення  $\Delta T$  є недоцільним.

Оцінка раціональності конструкції ТП, що враховує можливість зменшення теплових втрат за рахунок вакуумізації корпусу ТП або наповнення його інертними газами з малою теплопровідністю (наприклад, ксеноном) [10, 11], оптимальне співвідношення геометричних розмірів нагрівника і термопари, використання нагрівника зі змінним перерізом [12], що оптимізує використання тепла від нагрівника та ін. суттєво покращують параметри ТП. Але основне збільшення чутливості все ж забезпечується шляхом використанням  $TEM$  із максимальним значенням  $z$  і коефіцієнтом термоЕРС  $\alpha$ .

## Висновок

Поєднання різних варіантів підвищення параметрів ТП з використанням ефективних матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$  створює сприятливі можливості для розробки ТП з граничними значеннями чутливості.

## Література

1. Анатичук Л.І. Диференційний термоелектричний перетворювач змінного струму в режимі різночасового компарування / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Д.Д. Ташук. // Термоелектрика. – 2015. – №4. – С. 77–82.
2. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л.И. Анатичук. – Київ: Наукова думка, 1979. – 766 с.
3. Охотин А.С. Термоэлектрические генераторы / А.С. Охотин, А.А. Ефремов, В.С. Охотин. – М.: Атомиздат, 1971. – 288 с.
4. Коленко Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборы / Е.А. Коленко. – Л.: Наука, 1967. – 282 с.
5. Анатичук Л.И. Термоэлектрические преобразователи энергии. Том II / Л.И. Анатичук. – Киев - Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. – 376 с.
6. Шоль Ж., Марфон И., Монш М и др. Приемники инфракрасного излучения. – М.: Мир, 1969. – 269 с.
7. Ando E. Radiation Thermocouples with  $(BiSb)_2(TeSe)_3$ . Jap. J. Appl. Phys. 13,N5, 1974, P. 363-369.
8. Рождественская Т.Б. Метрологические работы в области измерения тока, напряжения и мощность при повышенных частотах/ Т.Б.Рождественская.// Тр. ин-тов Госкомитета.– 1964.– Вып.76 (136).– С.65-75.
9. Микитюк П.Д. Про вплив термопари на розподіл температури в нагрівнику вимірювального термоперетворювача / П.Д. Микитюк, О.Ю. Микитюк. // Термоелектрика. – 2018. – №1. – С. 64–59.
10. Анатичук Л.И. Монография. Физика термоэлектричества. Том I. 2008. –388 с.

11. Микитюк П.Д. Про фактори впливу на точність термоперетворювачів / П.Д. Микитюк. // Термоелектрика. – 2017. – №5. – С. 76–83.
12. Микитюк П.Д. Розподіл температури в нагрівнику зі змінним поперечним перерізом у термоелектричному перетворювачі / П.Д. Микитюк, О.Ю. Микитюк. // Термоелектрика. – 2018. – №2. – С. 79–74.

Надійшла в редакцію 08.11.2018

**P.D.Mykytiuk<sup>1,2</sup>. Cand.Sc. (Physics and Mathematics)<sup>1,2</sup>**  
**O.Yu.Mykytiuk<sup>3</sup>. 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;  
*e-mail: anatykh@gmail.com;*

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

<sup>3</sup>Higher State Educational Institution of Ukraine “Bukovinian State Medical  
University”, 2, Theatre Square, Chernivtsi, 58002, Ukraine

## IN REFERENCE TO THE CHOICE OF THERMOCOUPLE MATERIAL FOR METROLOGICAL-PURPOSE THERMAL CONVERTERS

*Peculiarities of application of thermoelectric material (TEM) in the design of metrological-purpose thermoelectric converters (TC) are considered. Comparison of mathematical expressions for the basic parameters of various thermoelectric devices showed that there are significant differences in the choice of TEM for the TC thermocouple. In particular, the maximum thermoelectric figure of merit Z for TC TEM is not always decisive in providing the best TC parameters. For TC, in addition to the high values of Z, the maximum values of thermoelectric material thermoEMF and the rational use of heat released by the TC heater (so-called "constructive factor") are important. Bibl. 12, Fig. 1.*

**Key words:** thermoelectric converter, heater, thermocouple, sensitivity, thermoelectric material.

### References

1. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Taschuk D.D. (2015). Differential thermoelectric AC converter in the non-simultaneous comparison mode. *J. Thermoelectricity*, 4, 77–82.
2. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
3. Okhotin A.S., Yefremov A.A., Okhotin V.S. (1971). *Termoelektricheskiye generatory [Thermoelectric generators]*. Moscow: Atomizdat [in Russian].
4. Kolenko E.A. (1967). *Termoelektricheskiye okhlazhdaiushchie pribory [Thermoelectric cooling devices]*. Leningrad: Nauka [in Russian].
5. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektricheskiye preobrazovateli energii. Tom II. [Thermoelectric power converters. Vol.II]* Kyiv-Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity [in Russian].

6. Shol J., Marfon I., Monsh M., et al. (1969). *Priiomniki infrakrasnogo izlucheniia [Infrared radiation receivers]*. Moscow: Mir [Russian transl].
7. Ando E. (1974). Radiation thermocouples with  $(\text{BiSb})_2(\text{TeSe})_3$ . *Jap. J. Appl. Phys.* 13 (5), 363-369.
8. Rozhdestvenskaia T.B. (1964). Metrologicheskiie raboty v oblasti izmereniia toka, napriazheniia i moshchnosti pri povyshennykh chastotakh [Metrological works in the field of measuring current, voltage and power at elevated frequencies]. *Trudy Institutov Goskomiteta - Proceedings of State Committee Institutes*, 76 (136), 65-75 [in Russian].
9. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Impact of thermocouple on temperature distribution in the heater of measuring thermal converter. *J. Thermoelectricity*, 1, 64–59.
10. Anatyshuk L.I. (2008). *Fizika termoelektrichestva. Tom I [Physics of thermoelectricity. Vol. I]* [in Russian].
11. Mykytiuk P.D. (2017). Factors of influence on the accuracy of thermal converters. *J. Thermoelectricity*, 5, 76–83.
12. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Temperature distribution in a heater with a resistance variable along its length in a thermoelectric converter. *J. Thermoelectricity*, 2, 79–74.

Submitted 08.11.2018



Запаров С.Ф.

Запаров С.Ф.<sup>1</sup>, Захарчук Т.В.<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58012, Україна,  
*e-mail: anatysh@gmail.com*



Захарчук Т.В.

## ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ЗРАЗКІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МАТЕРІАЛУ ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ

*У даній роботі наведено методи та описано устаткування для механічного розрізування термоелектричного матеріалу із застосуванням вільного абразиву й струнами із закріпленими алмазними зернами. Пробні різи показали, що точність і найбільш щадний режим при обробці термоелектричного матеріалу досягаються різальним інструментом з використанням вольфрамового дроту діаметром 0.11мм-0.14мм. Бібл. 3, рис. 9, табл. 2.*

**Ключові слова:** обладнання для різання, інструмент для різання вільним абразивом, інструмент для різання зв'язаним абразивом

### Вступ

Процес різання термоелектричного матеріалу має свої специфічні особливості, тому пряме використання сучасного серійного устаткування для різання напівпровідників не завжди виправдане щодо термоелектричного матеріалу.

Технологія різання є важливою частиною при обробці термоелектричних матеріалів, якість різання суттєво впливає на результати обробки, а, отже, параметри термоелектричних пристроїв.

Мета роботи – дослідження в лабораторних умовах розрізування термоелектричного матеріалу на малогабаритному настільному верстаті «Алтек – 13009» для випадку, коли продуктивність не відіграє істотної ролі і є можливість використовувати два методи розрізування термоелектричного матеріалу: інструментом з вільним і зв'язаним абразивом.

### Різання вільним абразивом

Перед початком різання заготовку необхідно міцно закріпити на нерухомій підставці (робочому столику). Найпоширенішим способом є наклеювання за допомогою різних матеріалів, наприклад, воску, каніфолі, шелаку, гліфталевого мастила.

Після механічної обробки розрізані зразки відмивають від частинок матеріалу з невеликим підігрівом у спеціально підібраних розчинниках.

Руйнування крихкого термоелектричного матеріалу при обробці вільним абразивом відбувається так. Частки абразиву, у вигляді суспензії (карбід бору  $B_4C_3$ , карбід кремнію  $SiC$ , електрокорунд  $Al_2O_3$ ), які подаються у зону різання, вдавлюючись у поверхню оброблюваного термоелектричного матеріалу, викликають утворення у ньому мікротріщин. У процесі обробки ці мікротріщини збільшуються й поширюються вглиб від поверхні. Подальша обробка призводить до створення мережі тріщин, які, змикаючись, викликають відколювання окремих ділянок термоелектричного матеріалу. Частини, які відпали, видаляються з поверхні вихідного зразка. Таким чином, відбувається пошарове видалення матеріалу й здійснюється механічна обробка вихідного зразка. Наявність рідини сприяє процесу обробки, тому що абразивний порошок перебуває в рідині у зваженому стані й рівномірно розподіляється в ній. Це, у свою чергу, дає можливість розподілу абразивних зерен по всій оброблюваній поверхні. Абразивна суспензія досить добре відводить тепло із зони різання й спеціального охолодження не потребує (рис. 1).

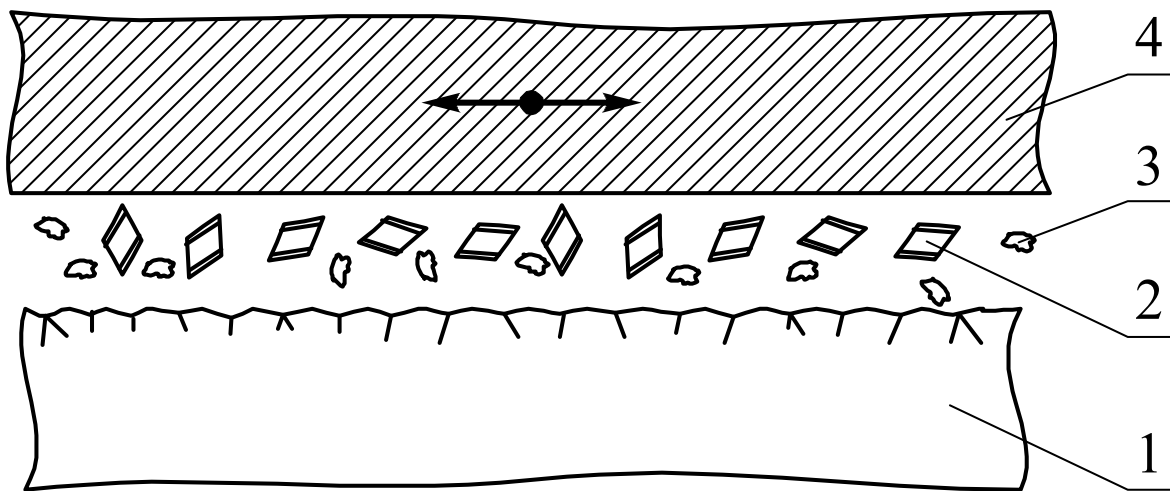


Рис. 1 Схема різання вільним абразивом.

1 – термоелектричний матеріал; 2 – зерна абразиву;  
3 – відокремлені частини термоелектричного матеріалу;  
4 – інструмент.

Змінна дротяна пилка, яка є різальним інструментом, являє собою набір вольфрамових струн, які намотують на рамку з максимальним натягом, крок задається пазами розмірних планок (рис. 2).

Різальний інструмент із використанням вільного абразиву дозволяє виконувати одночасно розрізання по всій площині пластини з точністю  $\pm 0.01$  мм. Але основна перевага дротового різання полягає в тому, що при цьому методі можна одержати оброблені зразки з мінімальними порушеннями структури кристалу, які виникають у зоні контакту інструмента з оброблюваними зразками термоелектричного матеріалу (товщина порушеного приповерхневого шару складає  $5 \div 15$  мкм). Однак йому властиві й обмеження (висота пластин не більше від 0.5 мм), які не дозволяють широко й ефективно використовувати даний спосіб при розрізуванні великих заготовок. Тому розглянутий спосіб застосовується при різанні на невелику глибину в лабораторних умовах (рис. 3).

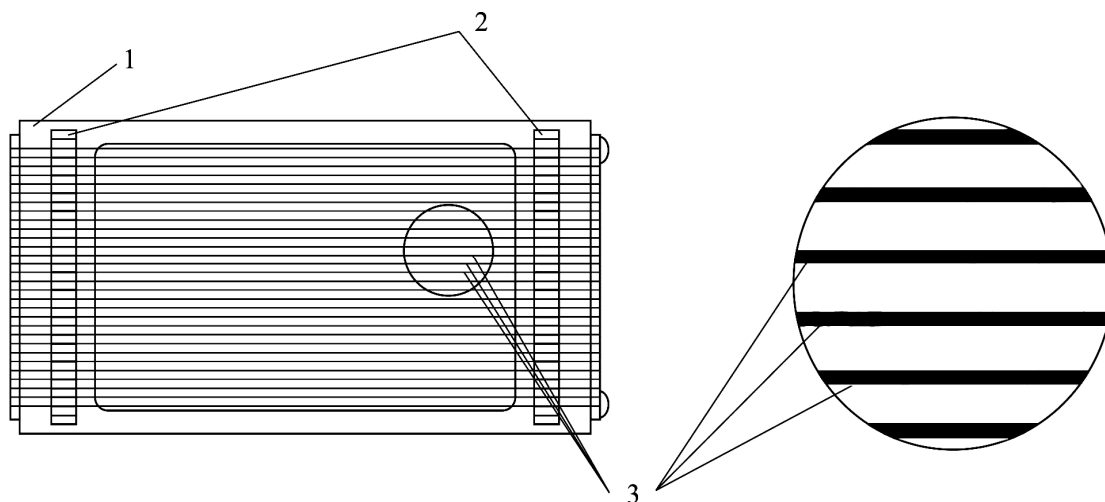


Рис. 2 Інструмент для різання струнами з використанням вільного абразиву. 1 – інструмент; 2 – розмірні планки; 3 – струни.

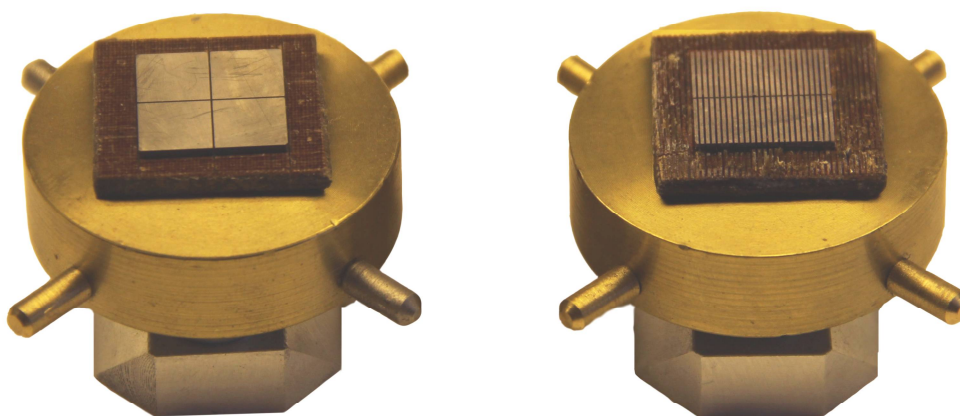


Рис. 3 Різання термоелектричного матеріалу вільним абразивом

### Різання зв'язаним абразивом

Механізм різання дріткою пилкою зі зв'язаним абразивом дещо відрізняється від обробки вільним абразивом. При обробці зв'язаним абразивом до руйнування під дією нормальної сили, спрямованої перпендикулярно до поверхні (випадок обробки вільним абразивом), додається руйнування оброблюваної поверхні за рахунок зрізування мікровиступів закріпленими в ріжучій кромці алмазними зернами. Нормальні зусилля, передані від робочої кромки через зерна алмазу на заготовку термоелектричного матеріалу, викликають появу мікротріщин, які, збільшуючись у процесі обробки, поширюються вглиб і замикаються, утворюючи виколоті частини. Потім ці частини викришуються і видаляються із зони обробки. Видалення продуктів різання й охолодження ріжучої кромки струн здійснюється водою або 3.5 % водним розчином кальцинованої соди, який під тиском подається в зону обробки (рис. 4).

Змінна дротяна пилка для різання термоелектричного матеріалу виготовляється за принципом описаним вище, але для обробки зв'язаним абразивом на поверхню дроту наносять гальванічним методом алмазний мікропорошок АСН 40/28 і закріплюють осадженням металів перехідної групи (кобальт, нікель, хром) (рис. 5).

У даний час спосіб різання зв'язаним абразивом є найбільш перспективним і прогресивним з усіх існуючих. До переваг належить гарна якість обробки поверхні, точність різання становить  $\pm 0.02$  мм.

Після механічних операцій на поверхні напівпровідника залишається порушений шар, який істотно впливає як на подальшу технологічну обробку (травлення, окиснення) так, в остаточному підсумку, на параметри напівпровідникових приладів (рис. 6).

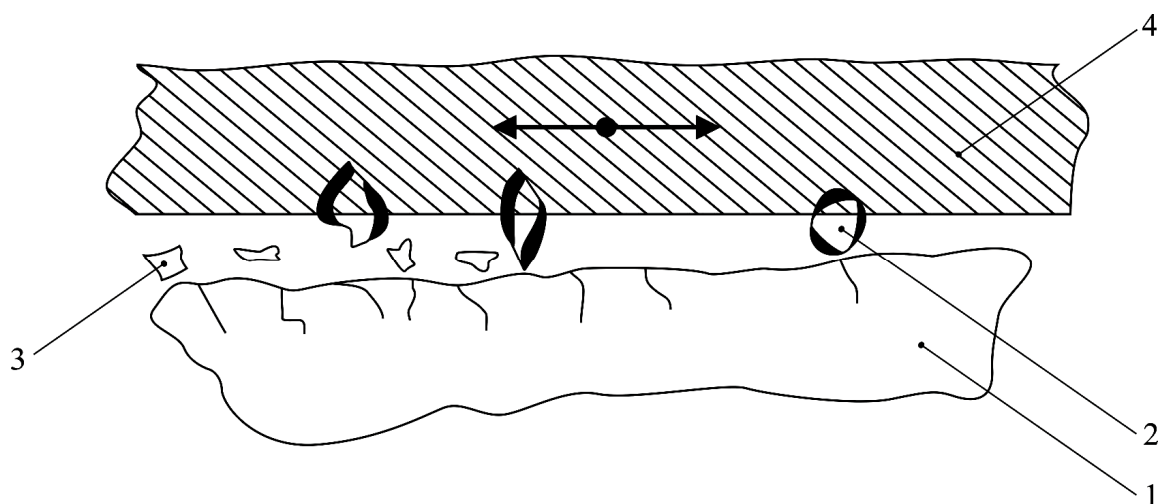


Рис. 4 Схема різання зразка зв'язаним абразивом.  
1 – термоелектричний матеріал; 2 – закріплені зерна абразиву;  
3 – відділені частини термоелектричного матеріалу; 4 – інструмент.

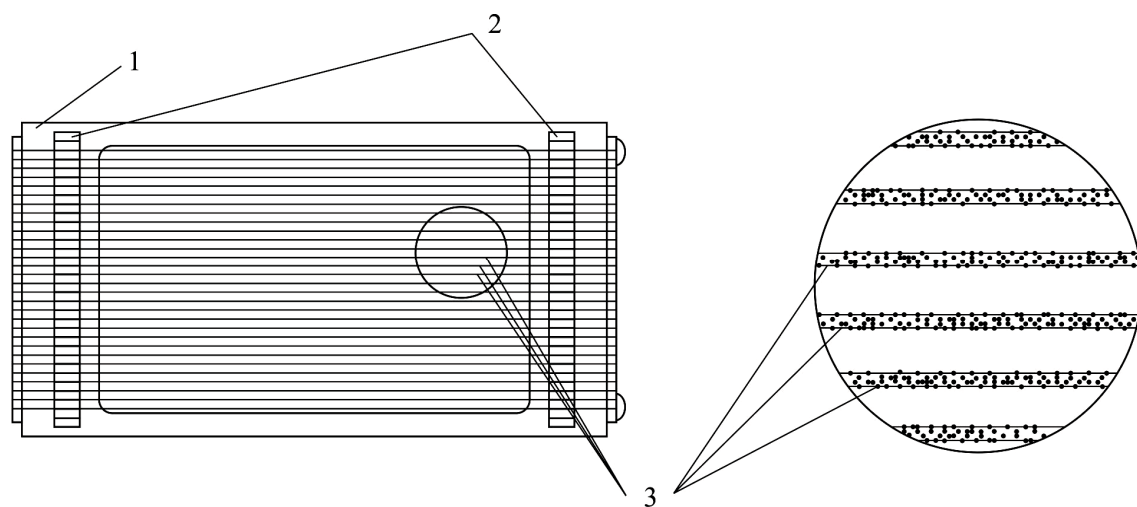


Рис. 5 Інструмент для різання струнами із закріпленими алмазними зернами. 1 – інструмент; 2 – розмірні планки;  
3 – струни із закріпленими алмазними зернами.

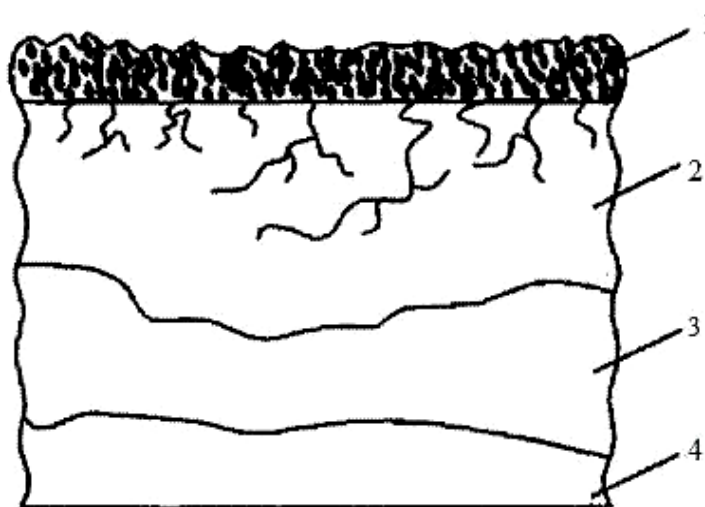


Рис. 6 Структура порушеного при механічній обробці поверхневого шару.  
1 – рельєфний шар; 2 – мікротріщини;  
3 – область скупчення дислокацій; 4 – монокристал.

При перерахованих методах обробки (табл. 1), порушені приповерхневі шари мають знижені механічні властивості, у результаті чого міцність зчеплення знижена, що знижує механічну міцність.

Таблиця 1

Метод розрізування	Товщина порушеного шару, мкм
Струнне різання вільним абразивом	5 ÷ 15
Струнне різання із закріпленими алмазними зернами	10 ÷ 25

Малогабаритний настільний верстат «Алтек-13009» призначений для одержання в лабораторних умовах зразків прямокутної форми з термоелектричного матеріалу. На процес різання істотний вплив справляють швидкість подачі заготовки та сила притискання до робочої кромки інструмента. При малих швидкостях подачі заготовки (0.1 ÷ 0.3 мм /хв) продуктивність різання занадто мала. Зі збільшенням швидкості подачі (0.4 ÷ 0.6 мм/хв) продуктивність підвищується, а точність обробки знижується за рахунок прогину струн. Пластина, що відрізається, буде мати викривлену поверхню. При малій товщині пластини це може призвести до її розламування в процесі різання. Тому рекомендується більш низька швидкість подачі для тонких пластин і більш висока швидкість подачі для більш товстих пластин, товщина порушеного приповерхневого шару при цьому становить 10-25 мкм (рис. 7).





Рис. 7 Різання термоелектричного матеріалу зв'язаним абразивом

Робочим інструментом верстата є рамка з паралельно розташованими на ній дротами. Верстат дозволяє робити розрізування за малих деформуючих впливів. Кріплення рамки на каретці, що рухається, виконується двома притискними гайками. Цими ж гайками ріжучі струни виставляються паралельно до напрямку руху інструмента. Підшипникове ковзання напрямних каретки забезпечує точність і легкість їх зворотно-поступального руху. На малогабаритному настільному верстаті початок і кінець процесу розрізування термоелектричного матеріалу контролюється індикатором ИЧ-10; пристрій регулювання стола дозволяє регулювати в горизонтальній площині по осях  $X$ ,  $Y$ . Загальний вид верстата наведено на рис. 8).

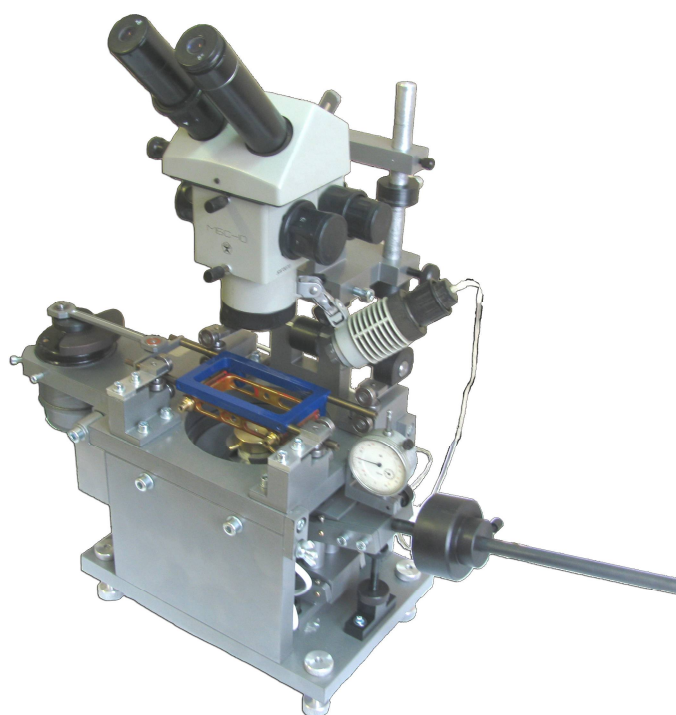


Рис. 8 Верстат «Алтек – 13009.

Верстат складається з каретки з різучим інструментом 7 поступально-зворотний рух якої здійснюється за допомогою шатуна 2 від електродвигуна 3 (СЛ-329 24В); вузлів кріплення каретки 4; механізму підйому-опускання стола 5 з противагою регулювання тиску на кромку різального інструменту; системи регулювання глибини різання 8, індикатора 9 (ІЧ-10) для контролю глибини розрізування; пристосування подачі охолоджувальної рідини 11 (рис. 9).

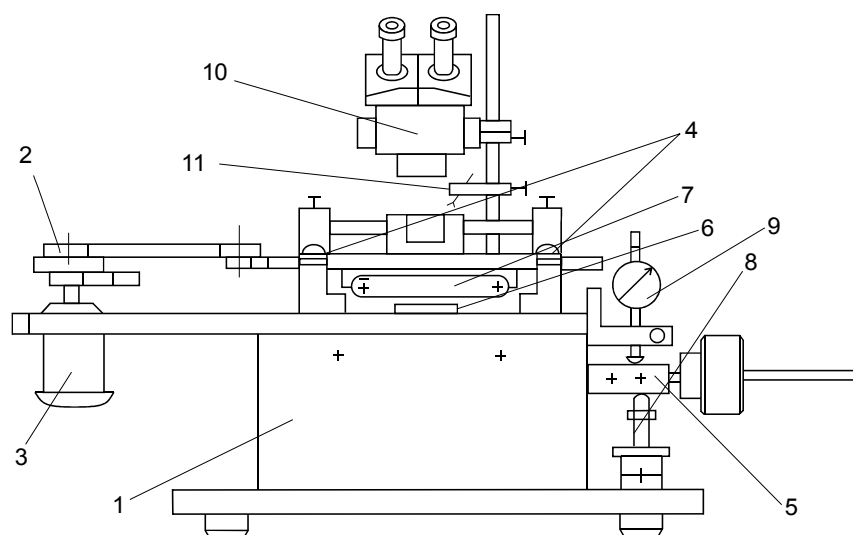


Рис. 9 Схема малогабаритного настільного верстата.  
1-станина; 2- блок приводу; 3- електродвигун СЛ-329 24В;  
4- вузол кріплення каретки; 5- механізм підйому-опускання стола;  
6- матеріал; 7- різальний інструмент; 8-система регулювання й контролю  
глибини різання; 9-індикатор ІЧ-10; 10- мікроскоп МБС-10;  
11- подача охолоджувальної рідини.

Основні технічні дані й характеристики наведено в табл.1.

Таблиця 2

№п/п	Характеристики	
1	Максимальні розміри заготовки для розрізування, мм	40 × 40 × 15
2	Число струн Ø 0.14 на рамці мінімальне, шт.	1
3	Число струн Ø 0.14 на рамці максимальне, шт.	95
4	Ширина різ з алмазним покриттям, мм	0.22
5	Ширина різ з вільним абразивом, мм	0.15
6	Вага, кг, не більше	30
7	Споживана електрична потужність, Вт	60
8	Блок живлення, CODEGEN 300W, шт	1
9	Габарити, мм	340 × 690 × 630

## Висновки

1. Малогабаритний настільний верстат економічний по споживанню електроенергії (60Вт), не вимагає більших матеріальних витрат. Порушення приповерхнього шару при використанні вільного абразиву становить (5-15мкм), а зв'язаним абразивом (10-25мкм).
2. Верстат для різання «Алтек-13009» зручний в експлуатації для виконання дослідницької роботи в лабораторних умовах.

## Література

1. Готра З.Ю. Справочник по технологии микрорезисторных устройств. – Львов: Каменяр, 1986.–287с.
2. Сатиго А.В., Запаров С.Ф. О влиянии различных методов резания  $Bi_2Te_3$  на свойства термоэлектрических модулей охлаждения // Термоэлектричество. – 2002.-№4.– с. 57–60.
3. Малогабаритный настольный станок для резки термоэлектрических материалов «Алтек – 13009». Рекламный проспект.

Надійшла в редакцію 20.11.2018

**Запаров С.Ф.<sup>1</sup>, Захарчук Т.В.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,  
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatysh@gmail.com;

<sup>2</sup>Чернивецкий национальный университет  
имени Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского 2,  
Черновцы, 58012, Украина

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

*В настоящей работе приведены методы и оборудования для механического разрезания термоэлектрического материала с применением свободного абразива и струнами с закрепленными алмазными зернами. Пробныерезы показали, что точность и наиболее щадящий режим при обработке термоэлектрического материала достигаются режущим инструментом с использованием вольфрамовой проволоки диаметром 0.11 мм-0.14 мм. Библ. 3, рис. 9, табл. 2.*

**Ключевые слова:** устройство для резки, инструмент для резки свободным абразивом, инструмент для резки связанным абразивом

**S.F. Zaparov<sup>1</sup>, T.V. Zakharchuk<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;  
*e-mail: anatysh@gmail.com*

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
2 Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

## **DEVICE FOR PRODUCING RECTANGULAR SAMPLES OF THERMOELECTRIC MATERIAL**

*This paper presents methods and equipment for mechanical cutting of thermoelectric material with the use of free abrasive and by the wires with fixed diamond grains. Trial cuts have shown that the accuracy and most sparing mode of thermoelectric material processing is achieved by cutting tool with the use of tungsten wire of diameter 0.11- 0.14 mm. Bibl. 3, Fig. 9, Table. 2.*

**Key words:** cutting device, free abrasive cutting tool, bound abrasive cutting tool

### **References**

1. Gotra Z.Yu. Spravochnik po tehnologii mikroelektronnyih ustroystv. – Lvov: Kamenyar. – 1986.–287c [in Russian].
2. Satigo A.V., Zaparov S.F. On the effect of various  $Bi_2Te_3$  cutting methods on the properties of thermoelectric cooling modules // Thermoelectricity. – 2002. – №4. – с. 57-60.
3. Malogabaritnyiy nastolnyiy stanok dlya rezki termoelektricheskikh materialov «Altek – 13009». Reklamnyiy prospekt [in Russian].

Submitted 20.11.2018

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

До опублікування у фаховому журналі приймаються наукові праці, які ніколи не друкувалися раніше. Стаття має бути написана на актуальну тему, містити результати глибокого наукового дослідження, новизну та обґрунтування наукових висновків відповідно до мети статті (поставленого завдання).

Матеріали, що публікуються в журналу, підлягають внутрішньому та зовнішньому рецензуванню, яке здійснюють члени редакційної колегії та міжнародної редакційної ради журналу або фахівці відповідної галузі. Рецензування проводиться конфіденційно, У разі негативної рецензії чи наявності суттєвих зауважень стаття може бути відхилена або повернута авторові (авторам) на доопрацювання. У випадку, коли автор (автори) не погоджується(ються) з думкою рецензента, за рішення редакційної колегії може бути проведено додаткове незалежне рецензування. Після внесення автором змін відповідно до зауважень рецензента статті підписується до друку.

Редакційна колегія має право на відмову у публікації рукописів, що містять опубліковані раніше дані, а також матеріалів, які не відповідають профілю журналу або матеріалів досліджень, що були проведені з порушенням етичних норм (наприклад, конфлікти між авторами чи між авторами і організацією, плагіат і т. ін.). Редакційна колегія журналу залишає за собою право редагувати та скорочувати рукописи без порушення авторського змісту. Відхилені рукописи авторам не повертаються.

### Подання рукопису до журналу

Рукопис статті подається до редакції журналу в паперовому варіанті у двох примірниках та в електронному вигляді на електронному носії (диск, флешка). Електронний варіант статті повинен повністю відповідати паперовому варіанту. Рукопис має бути підписаний всіма співавторами або відповідальним представником.

В окремих випадках допускається замість електронного носія (диск, флешка) направляти статтю електронною поштою.

Рукописи подаються англійською мовою для англомовних авторів. Для російськомовних та україномовних авторів - англійською мовою і, відповідно, російською чи українською. Формат сторінок А4. Кількість сторінок – не більше 15 (разом з літературою та розширеними анотаціями). За узгодженням з редакцією число сторінок може бути збільшено.

До рукопису додається:

1. Офіційний лист-направлення, підписаний керівником установи, де виконувалась робота.
2. Ліцензійний договір про передачу авторського права (форму договору можна отримати в редакції журналу або завантажити з сайту журналу – [Договір.pdf](#)). Ліцензійний договір набуває чинності після прийняття статті до друку. Підписання ліцензійного договору автором(ами) означає, що вони ознайомлені і згодні з умовами договору.
3. Відомості про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, вчене звання, вчена ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID (за наявності). Відомості про авторів подаються:  
авторами з України трьома мовами – українською, російською та англійською;  
авторами з країн СНД двома мовами – російською та англійською;  
авторами з далекого зарубіжжя – англійською мовою.
4. Носій інформації з текстом статті, рисунками, таблицями, відомостями про авторів в електронному вигляді.
5. Кольорова фотографія автора(ів). Чорно-білі фотографії редакція журналу не приймає. При

числі авторів більше двох їх фотографії не наводяться.

### **Вимоги до оформлення статті**

Стаття має бути структурована за такими розділами:

- *Вступ*. Містить постановку проблеми, актуальність обраної теми, аналіз останніх досліджень і публікацій, мета і завдання.

- *Виклад основного матеріалу* дослідження і отриманих результатів.

- *Висновки*, де підведені підсумки роботи і перспективи подальших досліджень у цьому напрямі.

- *Список використаної літератури*.

Перша сторінка статті містить інформацію:

1. у верхньому лівому куті – індекс УДК (для авторів з України та країн СНД);
2. прізвище(а) та ініціали, вчена ступінь та вчене звання автора(ів);
3. назва установи, де працює автор(и); поштова адреса, номер телефону, адреса електронної пошти автора(ів);
4. назва статті;
5. анотація до статті – не більше 1 800 знаків. Анотація повинна відображати послідовну логіку опису результатів та описувати основні цілі дослідження, підсумовувати найбільш значимі результати;
6. ключові слова – не більше 8-ми слів.

*Текст* статті друкується шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1.2 на папері формату А4, вирівнювання по ширині. У статті не повинно бути переносів слів.

**Параметри сторінки:** «дзеркальні поля» верхнє поле – 2.5 см, нижнє поле – 2.0 см, всередині – 2,0 см, ззовні – 3,0 см, від краю до колонтитула верхнього та нижнього – 1.27 см.

**Графічні матеріали**, фотографії подаються кольоровими, як виняток чорно – білими, у форматах .orj чи .cdr, допускається у форматах .jpg чи .tif. За бажанням автора таблиці і частина тексту також можуть бути кольоровими.

*Рисунки* друкуються на окремих сторінках. Текст на рисунках повинен бути виконаний шрифтом 10 пт. На графіках одиниці виміру вказуються через кому. Рисунки нумеруються в порядку їх розташування в тексті, частини рисунків нумеруються літерами – а, б, .. На звороті рисунка олівцем пишеться назва статті, автор(автори), номер рисунка. Скановані рисунки і графіки вставляти не допускається.

*Таблиці* подаються на окремих сторінках та повинні бути виконані з використанням табличного редактора MSWord. Використання символів псевдографіки для оформлення таблиць недопустиме.

*Формули* необхідно набирати у редакторах формул Equation або MatType. Статті з формулами, вписаними від руки, до друку не приймаються. Необхідно давати визначення (дефініцію) величин, які вперше вживаються у тексті, а далі користуватись відповідним терміном.

*Підписи до рисунків і таблиць* друкуються в рукописі після списку літератури.

*Список використаних літературних джерел* наводиться у кінці статті. Посилання на літературні джерела нумеруються послідовно в порядку їх цитування у тексті статті. Посилання на неопубліковані та незавершені роботи недопустимі.

**Увага!** У зв'язку із включенням журналу до міжнародних бібліографічно-реферативних баз даних, список літератури має складатися з двох блоків: ЛІТЕРАТУРА і REFERENCES (ця вимога діє і для англomовних статей):

**ЛІТЕРАТУРА** – джерела мовою оригіналу, оформлені відповідно до українського стандарту бібліографічного опису ДСТУ 8302:2015. За допомогою VAK.in.ua (<http://vak.in.ua>) Ви можете автоматично, швидко і легко оформити Ваш «Список використаних джерел» відповідно до вимог Державної атестаційної комісії (ДАК) України та оформити посилання на наукові джерела в Україні зрозуміло та уніфіковано. У цьому порталі полегшено процедури оформлення наукових джерел при написанні Ваших публікацій, дисертацій та інших наукових робіт.

**REFERENCES** – той же список літератури, транслітерований в романському алфавіті (рекомендації за міжнародним бібліографічним стандартом APA-2010, правила до оформлення транслітерованого списку літератури References на сайті <http://www.dse.org.ua>, розділ для авторів).

**Для пришвидшення публікації статті просимо дотримуватись наступних правил:**

- У верхньому лівому куті першої сторінки статті – індекс УДК;
- ініціали та прізвище авторів;
- науковий ступінь, учене звання;

з нового рядка шрифтом Times New Roman розміром 12 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру;

- назва організації, адреса (вулиця, місто, індекс, країна), електронна адреса авторів;

з нового рядка на 1 см нижче ініціалів та прізвища авторів шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру;

○ назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, заголовними буквами напівжирним шрифтом New Roman розмір 12 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру. Назва статті має бути конкретною і по можливості короткою;

- анотація розміщується на 1 см нижче назви статті шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, курсивом, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по ширині українською чи російською (для україномовних та російськомовних авторів відповідно) та англійською мовами;

- ключові слова розміщуються нижче анотації шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по ширині. Мова ключових слів відповідає мові анотації. Заголовок «Ключові слова» - шрифт Times New Roman, розмір 10 пт, напівжирний;

- основний текст статті розміщується на 1 см нижче анотації з абзацу 1 см, шрифт Times New Roman, розмір 11 пт, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по ширині;

формули набирають у редакторі формул шрифтами: Symbol, Times New Roman. Розмір шрифтів: «звичайний» - 12 пт, «крупний індекс» - 7 пт, «дрібний індекс» - 5 пт, «крупний символ» - 18 пт, «дрібний символ» - 12 пт). Формула розміщується по тексту, вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка, нумерація формул у круглих дужках справа;

- розмірності всіх величин, що використовуються в статті, подаються в системі СІ, використовувані символи повинні бути пояснені;

• рисунки розміщуються по тексту. Рисунки та фотографії повинні бути чіткими і контрастними; осі графіків - паралельними до країв листка, усуваючи тим самим можливість появи зрушення кутів при масштабуванні; рисунки у журнал подаються кольоровими, чорно-білі - редакція журналу не приймає;

• таблиці розміщують по тексту. Ширина таблиці повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею вказують її порядковий номер, вирівнювання по правому краю. Нумерація таблиць

по всьому тексту статті наскрізна. Назва таблиці розміщується під її номером, вирівнювання по центру;

- список літератури наводять у кінці статті. Посилання на літературу вказують за текстом в квадратних дужках. Послідовність джерел у списку літератури має відповідати порядку їх згадування в тексті. Нижче наведені приклади різних типів посилань на літературу.

### **Приклади оформлення посилань на літературні джерела для ЛІТЕРАТУРИ**

#### Статті в журналах

Анатичук Л.І., Михайловський В.Я., Максимук М.В., Андрусак І.С. Експериментальні дослідження термоелектричного автомобільного передпускового нагрівача на дизельному паливі. *Термоелектрика*. 2016. №4. С.84–94.

#### Книги

Анатичук Л.И. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1979. 768 с.

#### Патенти

Патент України № 85293. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Ніцович О.В. Термоелемент

#### Матеріали конференцій

Лисько В.В. *Современное состояние и ожидаемый прогресс в метрологии термоэлектрических материалов*. Матеріали XVII Международного форума по термоэлектричеству (14-18 мая 2017, г. Белфаст), Черновцы, 2017. 64 с.

#### Автореферати дисертації

Кобилянський Р.Р. *Термоелектричні прилади для лікування захворювань шкіри.*: автореф. дис. фіз.-мат. наук. Чернівці, 2011. 20 с.

### **Приклади оформлення посилань на літературні джерела для REFERENCES**

#### Статті в журналах

Gorskiy P.V. (2015). Ob usloviakh vysokoi dobrotnosti i metodika poiska perpektivny sverhreshetochny termoelektricheskikh materialov [On the conditions of high figure of merit and methods of search for promising superlattice thermoelectric materials]. *Termoelektrichestvo - J.Thermoelectricity*, 3, 5 – 14 [in Russian].

#### Книги

Anatychuk L.I. (2003). *Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.

#### Патенти

Patent of Ukraine № 85293. Anatychuk L. I., Luste O.Ya., Nitzovych O.V. Thermoelements [In Ukrainian].

#### Матеріали конференцій

Rifert V.G.. Intensification of heat exchange at condensation and evaporation of liquid in 5 flowing-down films. In: *Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference Heat Transfer*. May 20-25, 1990, Israel.

#### Автореферати дисертації

Mashukov A.O. *Efficiency hospital state of rehabilitation of patients with color cancer*. Phd (Med.) Odesa, 2011 [In Ukrainian].