

**Михайловський В.Я.** доктор фіз-мат. наук,  
**Разіньков В.В., Максимук М.В., Гаврилюк М.В.**

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

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО КАСКАДНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ТЕГ НА ТВЕРДОМУ ПАЛИВІ**

*Наведено результати експериментальних досліджень термоелектричного генераторного каскадного модуля із матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS для використання в термоелектричних генераторах на твердому паливі. Описано технологічні аспекти виготовлення низькотемпературного і високотемпературного каскадів, представлено загальну конструкцію модуля, наведено результати вимірювання енергетичних характеристик каскадного модуля за температур холодної сторони  $30^\circ C$  і гарячої  $200$ - $500^\circ C$ . Бібл. 12, Рис. 9.*

**Ключові слова:** каскадний модуль, термоелектричний генератор, термоелемент, ефективність.

### **Вступ**

Термоелектричні генераторні модулі каскадного типу в основному використовуються в промисловому виробництві для рекуперації відходів тепла різноманітного енергетичного устаткування великої теплової потужності ( $500$  -  $800^\circ C$ ): двигунів внутрішнього згорання, газових турбін, цементних та сталеварних печей і т.п [1 – 4]. В той же час у термоелектричних генераторах (ТЕГ) призначених для побутових цілей традиційним залишається застосування однокаскадних модулів на основі телуриду вісмуту з максимальною робочою температурою гарячої сторони  $300^\circ C$  [5 – 8]. Тому, незважаючи на ряд переваг, якими володіють такі ТЕГ в порівнянні з іншими автономними джерелами живлення, існують суттєві недоліки, що обмежують їх можливості: низька ефективність, перевищення робочої температури модулів, що призводить до зменшення ресурсу роботи ТЕГ, необхідність в системах захисту від перегріву, які суттєво ускладнюють конструкцію генераторів [9].

Використання каскадних модулів оптимізованих на рівень гарячих температур  $500^\circ C$  в якості термоелектричних перетворювачів для ТЕГ побутового призначення дозволяє вирішити наведені проблеми, що, на наш погляд, є доволі очевидним фактом. Проте реальних застосувань каскадних конструкцій в цьому напрямку поки немає.

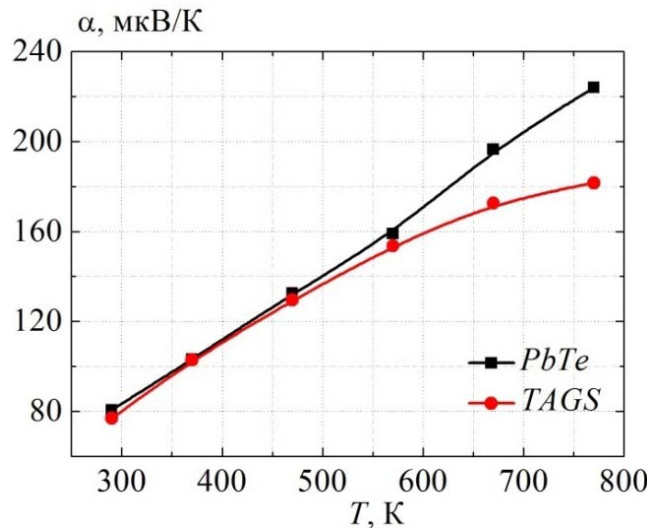
Ідею створення генераторного каскадного модуля з матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS вихідною електричною потужністю  $20$  Вт для термоелектричних генераторів, що працюють від тепла нагрітих поверхонь твердопаливних печей запропоновано в [10].

Методами комп'ютерного проектування авторами розроблено конструкцію та знайдено оптимальні умови, за яких досягається максимальна електрична потужність модуля і ефективність термоелектричного перетворення.

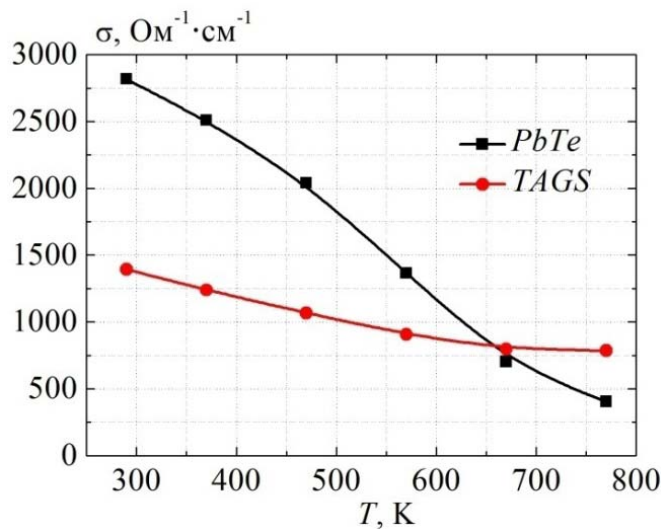
Метою даної роботи є виготовлення термоелектричного генераторного двокаскадного модуля на основі  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS матеріалів та експериментальні дослідження його характеристик.

### Особливості виготовлення гарячого каскаду

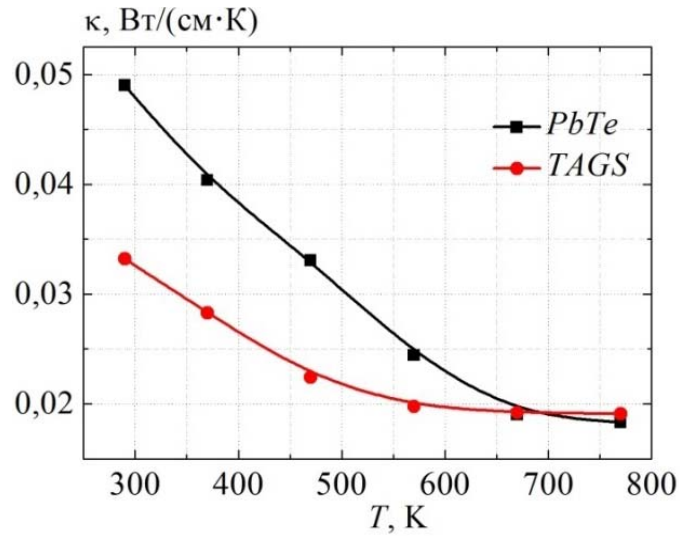
Для створення термоелементів високотемпературного (гарячого) каскаду використано гілки n-типу провідності з  $PbTe$  та p-типу провідності з TAGS (рис. 1) отримані методом спільного гарячого пресування [11].



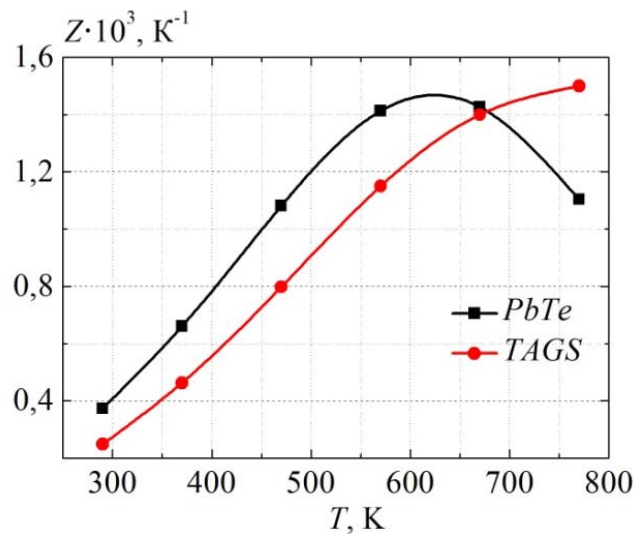
а)



б)



а)



б)

Рис. 1. Температурні залежності параметрів термоелектричних матеріалів на основі n- PbTe і р-TAGS: а) коефіцієнт термоЕРС; б) електропровідність; в) теплопровідність; г) добротність.

Комутація гілок термоелементів на основі матеріалів PbTe і TAGS здійснювалась срібними комутаційними пластинами методом дифузійного зварювання. Схему пристрою для комутації термоелементів гарячого каскаду наведено на рис. 2.

Пристрій складається з розбірної гратчастої оснастки 1, в яку вставляються вітки термоелементів 2 і срібні комутаційні пластини 3. Оснастку з гілками та комутаційними пластинами встановлюють в нагрівник 4 та притискають притискним механізмом 5. Для зниження температури елементів притискання проміжну пластину 6 охолоджували проточною водою. З метою попередження прогрівання основи 7, нагрівник 4 розташований на перфорованій теплоізолюючій підставці 8.

Конструктивною особливістю пристрою комутації є використання методу гідропластичного пресування, що дозволяє створювати тиск на кожну вітку

термоелектричного матеріалу окремо. Це важливо, особливо у випадках, коли необхідно здійснити комутацію гілок із матеріалів з різною здатністю пластично деформуватися. Крім того метод гідропластичного пресування дозволяє модифікувати пристрій для випадків комутації різної кількості гілок.

Комутацію гілок термоелементів  $n$ - і  $p$ -типів срібними пластинами здійснювали у вакуумі при температурі 500 °С. Отримані методом дифузійного зварювання лінійки з 16-ти послідовно комутуваних гілок однакової висоти монтували в модуль гарячого каскаду.

У зв'язку з можливою сублімацією компонентів термоелектричних матеріалів при робочих температурах 450-500 °С на бічні поверхні гілок наносили шар термостійкого антисублімаційного покриття на основі силіконових смол та композитів легкоплавких емалей.

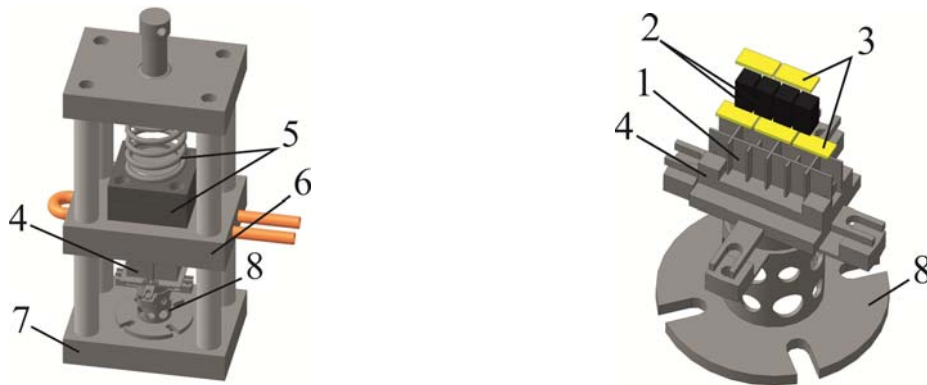


Рис. 2. Схема пристрою для комутації термоелементів гарячого каскаду:  
1 – решітчаста оснастка, 2 – вітки термоелементів; 3 – комутаційні пластини;  
4 – нагрівник; 5 – прижимний механізм; 6 – проміжна пластинка;  
7 – основа, 8 – теплоізолятор..

Антисублімаційні покриття наносили на бічні поверхні гілок методом розпилення. Висушування покриття проводили в два етапи: на повітрі при температурі 20-30 °С та в термостаті при температурі 170-180 °С.

Для комутації гарячого каскаду лінійки з нанесеними антисублімаційними шарами встановлювали в спеціальну оснастку, схему якої представлено на рис. 4. Лінійки розміщували паралельно одну одній у відповідності зі схемою наведеною на рис. 5.

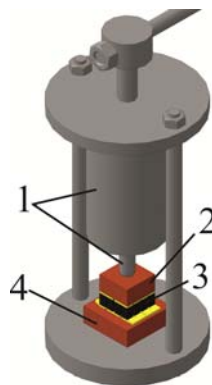


Рис. 3. Оснастка для комутації гарячого каскаду:  
1 – прижимний механізм; 2 – верхня прижимна пластинка;  
3 – термоелектричний модуль;  
4 – нижня теплоізоляційна прижимна пластинка.

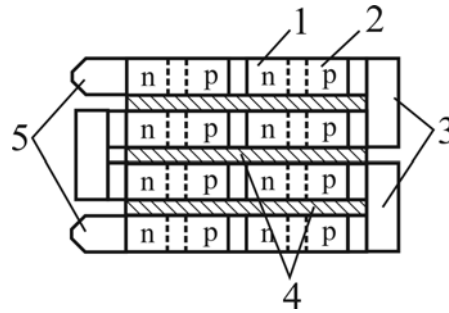


Рис. 4. Схема розміщення лінійок в гарячому каскаді:

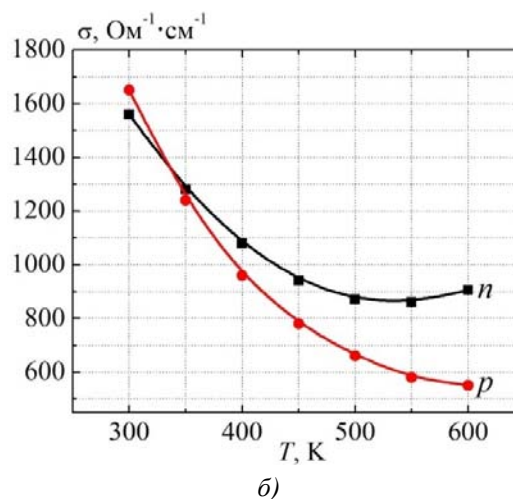
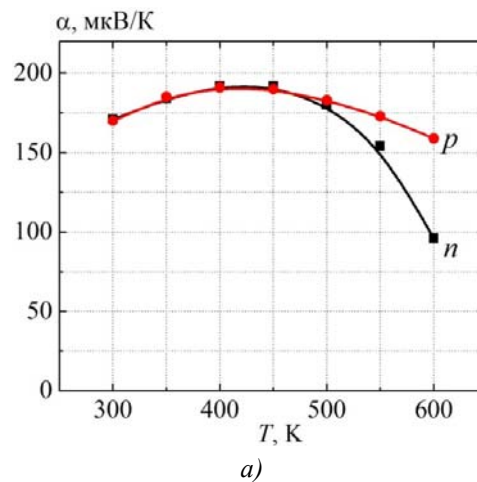
1 – вітки n-типу провідності; 2 – вітки p-типу провідності;

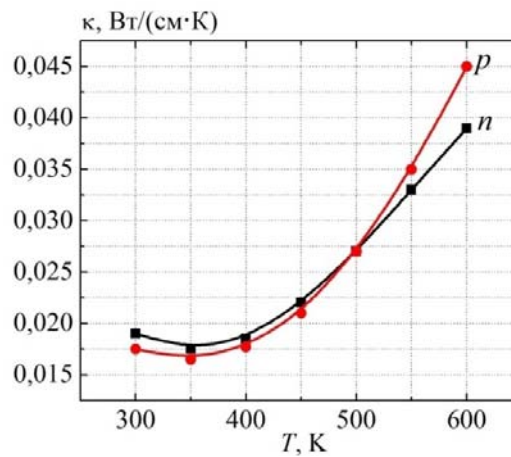
3 – комутаційні пластини; 4 – електроізоляція; 5 – електричні контакти.

Комутація лінійок в модуль гарячого каскаду здійснювалась за допомогою комутаційних пластин 3 методом паяння з використанням високотемпературного припою та водного розчину  $ZnCl_2$ .

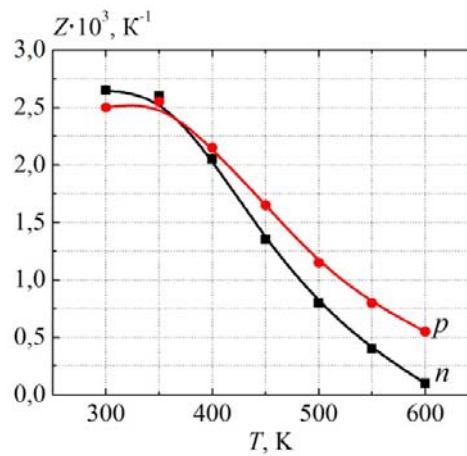
### Особливості виготовлення холодного каскаду

Для виготовлення гілок термоелементів низькотемпературного (холодного) каскаду використано матеріали на основі  $Bi_2Te_3$  n- і p- типу провідності, температурні залежності термоелектричних параметрів яких наведено на рис. 5. Гілки термоелементів отримували з монокристалічного зразка вирощеного методом зонного плавлення.





в)



г)

Рис. 5. Температурні залежності параметрів термоелектричних n- і p- типів провідності на основі  $Bi_2Te_3$ : а) коефіцієнт термоЕРС; б) електропровідність; в) теплопровідність; г) добротність.

Комутацію холодної та гарячої сторони здійснювали мідними пластинами у спеціальній оснастці, схему якої наведено на рис. 6.

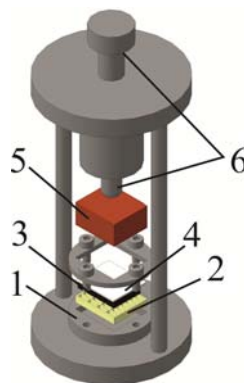


Рис. 6. Оснастка для комутації холодного каскаду: 1 – основа; 2 – силіконова матриця; 3 – вітки термоелементів; 4 – керамічна пластина; 5 – нагрівник; 6 – прижимний механізм.

Для цього основу 1 з матрицею 2 і вітками 3 модуля розміщували в оснастці та встановлювали на торці віток керамічну пластину 4 з нанесеними комутаційними пластинами. Після пайки комутаційних пластин гарячу сторону модуля вирівнювали методом шліфувки.

## Результати вимірювань

На рис.7а наведено схематичну будову отриманого двокаскадного генераторного модуля з матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS.

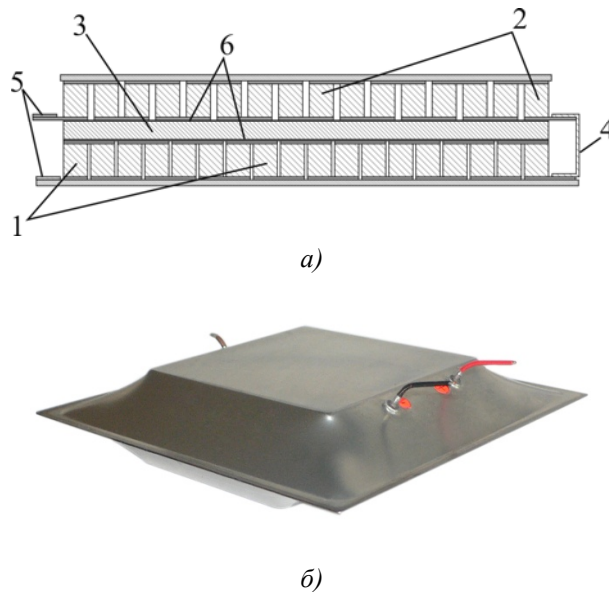


Рис.7 – Термоелектричний двокаскадний генераторний модуль з матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS для ТЕГ на твердому паливі:

а). схематичне зображення; б). зовнішній вигляд в герметизованому корпусі:

- 1 – низькотемпературний каскад; 2 – високотемпературний каскад;  
3 – теплопровідна пластинка; 4 – комутуюча шина; 5 – електричні контакти;  
6 – електроізоляційні слюдяні прокладки.

Двокаскадний модуль складається з низькотемпературного каскаду 1, високотемпературного каскаду 2 та міжкаскадної теплопровідної пластини 3. Каскади сполучені між собою послідовно в електричне коло комутуючою шиною 4. Для під'єднання споживача електричної енергії або комутації модулів у батареї електричні контакти 5 виведено за межі модуля. Електроізоляцію гарячого і холодного каскадів від пластини 3 здійснено прокладками із слюди 6.

Низькотемпературний та високотемпературний каскади містять 72 та 64 термоелементи відповідно. Поперечний переріз гілок становить  $4 \times 4$  мм, висота яких з урахуванням нанесених шарів складає 6 мм.

З метою попередження деградації контактів внаслідок протікання процесів окиснення за робочих температур каскадний модуль герметизовано в тонкостінному металічному корпусі, внутрішній об'єм якого заповнено інертним газом (рис. 7б).

Дослідження параметрів каскадного модуля здійснювали за температури холодної сторони  $T_x = 30$  °С та температури гарячої сторони  $T_z$  від 200 до 500 °С. Результати вимірювань наведено на рис. 8, 9

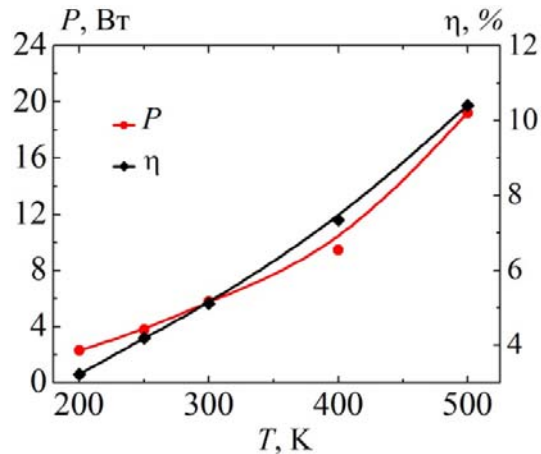


Рис. 8. Залежність електричної потужності  $P$  і ККД  $\eta$  двокаскадного генераторного модуля з матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS від температури  $T_2$

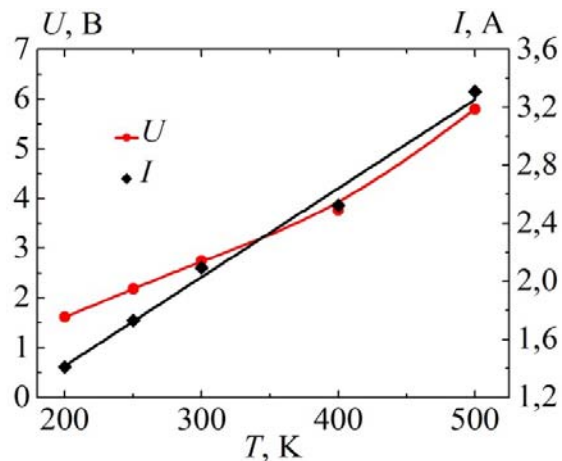


Рис. 9. Залежність електричної напруги  $U$  і сили струму  $I$  генераторного модуля з матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS від температури  $T_2$

Експериментальні температурні залежності енергетичних характеристик модуля з матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS отримано на автоматизованому обладнанні «Алтек-10002», розробленому в Інституті термоелектрики [12].

З наведених даних видно, що максимальна вихідна електрична потужність та напруга модуля досягається за температури гарячої сторони 500 °С і складають відповідно  $P = 19.2$  Вт і  $U = 5.8$  В. При цьому ефективність термоелектричного перетворення  $\eta$  знаходиться на рівні 10.4 %.

При подальшому підвищенні  $T_2$  на рівень температур 550 °С спостерігалось підвищення електричної потужності та ККД до 24 Вт та 12.5%. Однак такі температури є небажаними для роботи модуля, особливо р-гілок на основі TAGS внаслідок пришвидшення деградаційних процесів.

## Висновки

1. Розроблено технологічну схему виготовлення термоелементів високотемпературного каскаду з матеріалів на основі  $n$ -  $PbTe$  і  $p$ -TAGS, яка включає в себе дифузійне зварювання попередньо спресованих гілок з комутаційними пластинами в "лінійки"



термоелементів, нанесення антисублімаційних шарів на бічні поверхні гілок та комутацію "лінійок" в модуль високотемпературного каскаду.

- Показано технологію створення низькотемпературного каскаду з матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$  *n*- і *p*- типу провідності, яка включає спільну комутацію гілок термоелементів в модуль низькотемпературного каскаду.
- Визначено, що максимальна вихідна електрична потужність та напруга отриманого двокаскадного генераторного модуля з матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS досягаються за температури гарячої сторони 500 °С і складають 19.2 Вт і 5.8 В відповідно. При цьому ефективність термоелектричного перетворення становить 10.4 %.

## Література

- Струтинська Л.Т. Проектування секційних модулів на основі  $PbTe$ /TAGS для термоелектричних генераторів. / Струтинська Л.Т., Білинський-Слотило В.Р., Михайловський В.Я. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – Т.13. – №4. – С.1032-1036.
- Вихор Л.М. Оптимізація матеріалів та оцінка характеристик генераторних модулів для рекуператорів тепла. / Вихор Л.М., Михайловський В.Я., Мочернюк Р.М. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2014. – Т.15. – №1. – С. 206-213.
- Михайловський В.Я. Двухкаскадные модули на основе  $Bi_2Te_3$  и  $SiGe$  для термоелектрических генераторов. / Михайловський В.Я., Білинський-Слотило В.Р. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013. – №2-3. – С.39-42.
- Михайловський В.Я. Термоелектричні каскадні модулі із матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS. // Михайловський В.Я., Білинський-Слотило В.Р. // Термоелектрика. – 2012. – №4. – С. 67-74.
- D. Champier, C. Favarel, J.P. Bedecarrats, T.Kousksou, J.F. Rozis Prototype combined heater/thermoelectric power generator for remote applications. Journal of Electronic materials. –2013. –№42. –pp. 1888–1899.
- A. Montecucco, J. Siviter, A.R. Knox Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators. Applied Energy. –2017. –№185(2). –pp. 1336–1342.
- A.M. Goudarzi, P. Mazandarani, R. Panahi, H. Behsaz, A.Rezania, L.A. Rosendahl Integration of Thermoelectric Generators and Wood Stove to Produce Heat, Hot Water, and Electric Power. Journal of Electronic materials. –2013. – №42. – pp. 2127-2133.
- Анатичук Л.І. Термоелектричний генератор, що використовує тепло нагрітих поверхонь. / Анатичук Л.І., Мочернюк Р.М., Гаврилюк М.В., Андрусак І.С. // Термоелектрика. – 2017. – №2 – С. 84–95.
- L.E. Juanico, F.Rinalde, E.Tagliavore, M.Molina Novel Heat Controller for Thermogenerators Working on Uncontrolled Stoves / L.E. Juanico // Journal of Electronic materials. – 2013. -№7. –pp.1776-1780.
- Вихор Л.М. Проектування термоелектричних каскадних модулів для ТЕГ на твердому паливі. / Вихор Л.М., Максимук М.В. // Термоелектрика. – 2017. – №4.
- Михайловський В.Я. Дослідження термоелементів з матеріалів на основі  $n$ - $PbTe$  і  $p$ -TAGS термоелектричного генераторного каскадного модуля. / Михайловський В.Я., Лисько В.В., Антонюк В.В, Максимук М.В. // Термоелектрика. – 2017. – №3.
- L.I. Anatyshuk and M.V. Navtylyuk. Procedure and Equipment for Measuring Parameters of Thermoelectric Generator Modules. Journal of Electronic materials. –2011. –№5. –pp. 1292-1297.

Надійшла до редакції 19.11.2017

**Михайловский В.Я. доктор физ-мат. наук,**  
**Разиньков В.В., Максимук Н.В., Гаврилюк Н.В.**

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРНОГО КАСКАДНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ТЭГ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

*Приведены результаты экспериментальных исследований термоэлектрического генераторного каскадного модуля из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ -PbTe-TAGS для использования в термоэлектрических генераторах на твердом топливе. Описаны технологические аспекты изготовления низкотемпературного и высокотемпературного каскадов, представлена общая конструкция модуля, приведены результаты измерения энергетических характеристик каскадного модуля при температурах холодной стороны 30 °C и горячей 200-500 °C. Библиография, 12, Рис. 9.*

**Ключевые слова:** каскадный модуль, термоэлектрический генератор, термоэлемент, эффективность.

**V. Ya. Mykhailovsky Doctor Phys.-math. Sciences,**  
**V.V.Razinkov, M.V.Maksimuk, M.V.Havryliuk**

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

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON A THERMOELECTRIC GENERATOR CASCADE MODULE FOR SOLID FUEL TEG

*This paper presents the results of experimental research on a thermoelectric generator cascade module of  $Bi_2Te_3$ -PbTe-TAGS-based materials to be used in solid fuel thermoelectric generators. The technological aspects of manufacturing the low-temperature and high-temperature stages are described, the general module design is represented, and the results of measuring energy characteristics of a cascade module at the cold side temperature of 30°C and the hot side temperatures of 200-500°C are given. Bibl. 12, Fig. 9.*

**Key words:** cascade module, thermoelectric generator, thermoelement, efficiency.

### References

1. Strutynska L.T., Bilinsky-Slotylo V.R., Mykhailovsky V.Ya. (2012). Proektuvannia sektsiinykh moduliv na osnovi PbTe/TAGS dlia termoelektrychnykh heneratoriv [Design of segmented modules based on PbTe/TAGS for thermoelectric generators]. *Fizyka i khimiiia tverdoho tila – Physics and Chemistry of the Solid State*, 13 (4), 1032-1036 [In Ukrainian].

2. Vikhor L.M., Mykhailovsky V.Ya., Mocherniuk R.M. (2014). Optymizatsiia materialiv ta otsinka kharakterystyk heneratornykh moduliv dlia rekuperatoriv tepla [Optimization of materials and performance evaluation of generator modules for heat recuperators]. *Fizyka i kmimiia tverdoho tila – Physics and Chemistry of the Solid State*, 15(1), 206-213 [in Ukrainian].
3. Mykhailovsky V.Ya., Bilinskyi-Slotylo V.R. (2013). Dvukhkaskadnyie moduli na osnovi  $Bi_2Te_3$  i SiGe dlia termoelektricheskikh generatorov [Two-stage modules based on  $Bi_2Te_3$  i SiGe for thermoelectric generators]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniie v Elektronnoi Apparature*, 2-3, 39-42 [in Russian].
4. Mykhailovsky V.Ya., Bilinskyi-Slotylo V.R. (2012). Termoelektrychni kaskadni moduli iz materialiv na osnovi  $Bi_2Te_3$ -PbTe-TAGS [Thermoelectric cascade modules of  $Bi_2Te_3$ -PbTe-TAGS based materials]. *Termoelektryka - J. Thermoelectricity*, 4, 67-74 [in Ukrainian].
5. Champier D., Favarel C., Bedecarrats J.P., Kousksou T., Rozis J.F. (2013). Prototype combined heater/thermoelectric power generator for remote applications. *Journal of Electronic Materials*, 42, 1888–1899.
6. Montecucco A., Siviter J., Knox A.R. (2017). Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators. *Applied Energy*, 185(2), 1336–1342.
7. Goudarzi A.M., Mazandarani P., Panahi R., Behsaz H., Rezaia A., Rosendahl R.A. (2013). Integration of thermoelectric generators and wood stove to produce heat, hot water, and electric power. *Journal of Electronic Materials*, 42, 2127-2133.
8. Anatyshuk L.I., Mocherniuk R.M., Havryliuk M.V., Andrusiak I.S. (2017). Termoelektrychni henerator shcho vykorystovuie teplo nahrytykh poverkhon [Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces]. *Termoelektryka – J. Thermoelectricity*, 2, 84–95 [in Ukrainian].
9. Juanico L.E., Rinalde F., Tagliavore E., Molina M. (2013). Novel heat controller for thermogenerators working on uncontrolled stoves. *Journal of Electronic Materials*, 7, 1776-1780.
10. Vikhor L.M., Maksimuk M.V. (2017). Proektuvannia termoelektrychnykh kaskadnykh moduliv dlia TEG na tverdomu palyvi [Design of thermoelectric cascade modules for solid fuel TEG]. *Termoelektryka – J. Thermoelectricity*, 4, [in Ukrainian].
11. Mykhailovsky V.Ya., Lysko V.V., Antoniuk V.V., Maksimuk M.V. (2017). Doslidzhennia termoelementiv z materialiv na osnovi  $n$ -PbTe and  $p$ -TAGS termoelektrychnoho heneratornoho kaskadnoho modulua [Research on thermoelements based on  $n$ -PbTe and  $p$ -TAGS materials for thermoelectric genertaor cascxade module]. *Termoelektryka - J. Thermoelectricity*, 3, 38-46 [in Ukrainian].
12. Anatyshuk L.I. and Havrylyuk M.V. (2011). Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules. *Journal of Electronic Materials*, 5, 1292-1297.

Submitted 19.11.2017