

**Михайловский В.Я., доктор физ.-мат. наук,**

**Разиньков В.В. канд. физ.-мат. наук,**

**Максимук Н.В., Гаврилюк Н.В.**

Институт термоэлектричества, ул. Науки, 1, Черновцы,  
58029, Украина; e-mail: anatykh@gmail.com

## **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  $30^\circ\text{C}$  и горячей  $200$ - $500^\circ\text{C}$ . Библ. 12, Рис. 9.*

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

### **Введение**

Термоэлектрические генераторные модули каскадного типа в основном используются в промышленном производстве для рекуперации отходов тепла различного энергетического оборудования большой тепловой мощности ( $500$  -  $800^\circ\text{C}$ ): двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин, цементных и сталеплавильных печей и т.п. [1 – 4]. В то же время в термоэлектрических генераторах (ТЭГ), предназначенных для бытовых целей, традиционным остается применение однокаскадных модулей на основе теллурида висмута с максимальной рабочей температурой горячей стороны  $300^\circ\text{C}$  [5 – 8]. Поэтому, несмотря на ряд преимуществ, которыми обладают такие ТЭГ в сравнении с другими автономными источниками питания, им свойственны существенные недостатки, ограничивающие их возможности: низкая эффективность, превышение рабочей температуры модулей, которая приводит к уменьшению ресурса работы ТЭГ, необходимость в системах защиты от перегрева, которые существенно усложняют конструкцию генераторов [9].

Использование каскадных модулей, оптимизированных на уровень горячих температур  $500^\circ\text{C}$  в качестве термоэлектрических преобразователей для ТЭГ бытового назначения, позволяет решить приведенные проблемы, которые, на наш взгляд, очевидны. Однако реальных применений каскадных конструкций в этом направлении пока нет.

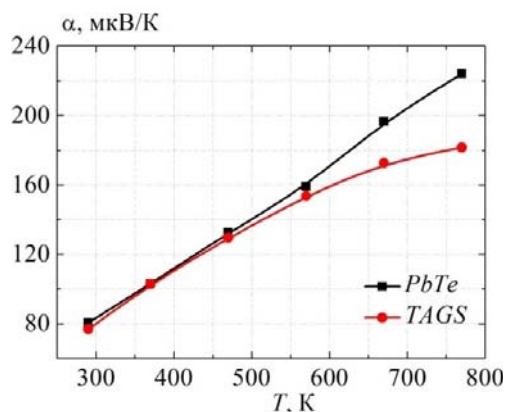
Идея создания генераторного каскадного модуля из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS с выходной электрической мощностью  $20$  Вт для термоэлектрических генераторов, работающих от тепла нагретых поверхностей твердотопливных печей, предложена в [10]. Методами компьютерного проектирования авторами разработана

конструкция и найдены оптимальные условия, при которых достигается максимальная электрическая мощность модуля и эффективность термоэлектрического преобразования.

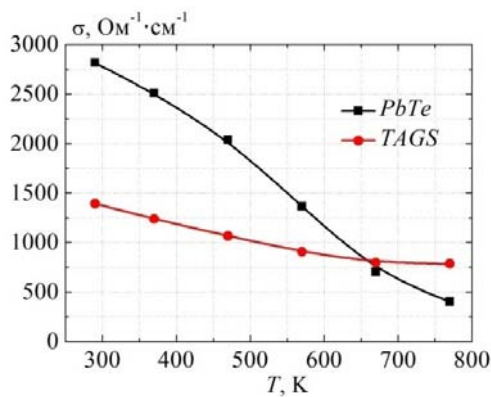
Целью данной работы является изготовление термоэлектрического генераторного двухкаскадного модуля из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS и экспериментальные исследования его характеристик.

### Особенности изготовления горячего каскада

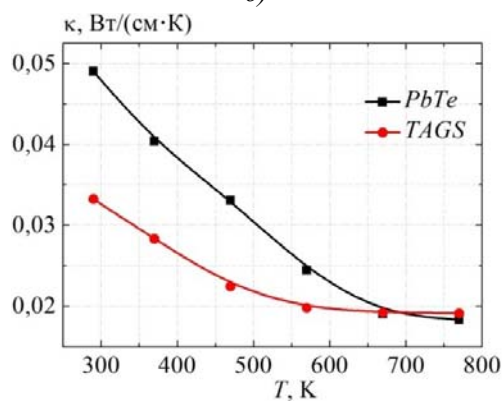
Для создания термоэлементов высокотемпературного (горячего) каскада использованы ветви  $n$ -типа проводимости из  $PbTe$  и  $p$ -типа проводимости с TAGS (рис. 1), полученные методом совместного горячего прессования [11].



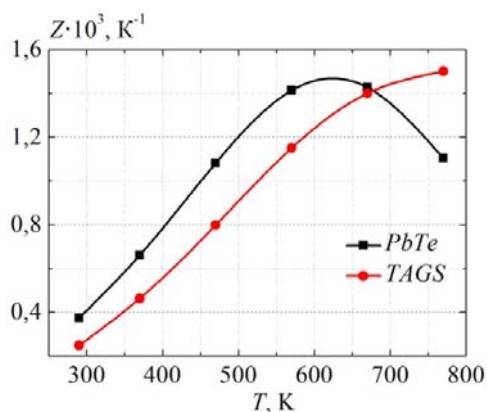
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Температурные зависимости параметров термоэлектрических материалов на основе *n*-PbTe и *p*-TAGS: а) коэффициент термоЭДС; б) электропроводность; в) теплопроводность; г) добротность.

Коммутация ветвей термоэлементов на основе материалов *PbTe* и TAGS осуществлялась серебряными коммутационными пластинами методом диффузионной сварки. Схема устройства для коммутации термоэлементов горячего каскада приведена на рис. 2.

Устройство состоит из разборной решетчатой оснастки 1, в которую вставляются ветви термоэлементов 2 и серебряные коммутационные пластины 3. Оснастку с ветвями и коммутационными пластинами устанавливают в нагреватель 4 и прижимают прижимным механизмом 5. Для снижения температуры элементов прижима промежуточную пластину 6 охлаждали проточной водой. С целью предупреждения перегрева основания 7, нагреватель 4 расположен на перфорированной теплоизолирующей подставке 8.

Конструктивной особенностью устройства коммутации является использование метода гидропластического прессования, который позволяет создавать давление на каждую ветвь термоэлектрического материала отдельно. Это важно, особенно в случаях, когда необходимо осуществить коммутацию ветвей из материалов с различной способностью к пластической деформации. Кроме того, метод гидропластического прессования позволяет модифицировать устройство для случаев коммутации различного количества ветвей.

Коммутация ветвей термоэлементов *n*- и *p*-типов серебряными пластинами осуществлялась в вакууме при температуре 500 °С. Полученные методом диффузионной сварки линейки с 16-тью последовательно коммутированными ветвями одинаковой высоты монтировали в модуль горячего каскада.

В связи с возможной сублимацией компонентов термоэлектрических материалов при рабочих температурах 450 – 500 °С на боковые поверхности веток наносились слои термостойкого антисублимационного покрытия на основе силиконовых смол и композитов легкоплавких эмалей.

Антисублимационные покрытия наносили на боковые поверхности ветвей методом распыления. Сушку покрытия проводили в два этапа: на воздухе при температуре 20 – 30 °С и в термостате при температуре 170 – 180 °С.

Для коммутации горячего каскада линейки с нанесенными антисублимационными слоями устанавливали в специальную оснастку, схема которой представлена на рис. 3. Линейки размещали параллельно друг другу согласно схеме, приведенной на рис. 4.

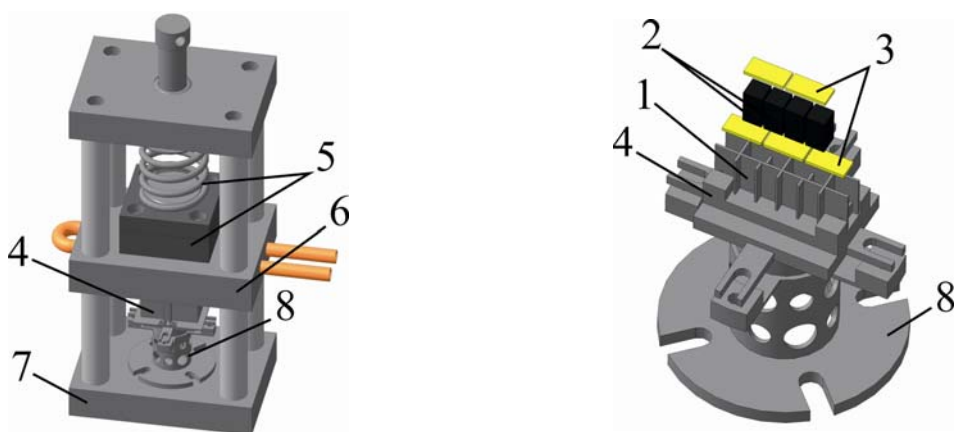


Рис. 2. Схема устройства для коммутации термоэлементов горячего каскада:  
 1 – решетчатая оснастка; 2 – ветви термоэлементов; 3 – коммутационные пластины;  
 4 – нагреватель; 5 – прижимной механизм; 6 – промежуточная пластина;  
 7 – основа; 8 – теплоизолятор.

Коммутацию линеек в модуль горячего каскада осуществляли с помощью коммутационных пластин 3 методом пайки с использованием высокотемпературного припоя и водного раствора  $ZnCl_2$ .

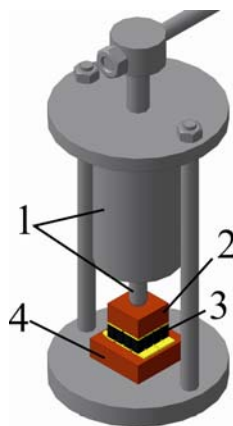


Рис. 3. Оснастка для коммутации горячего каскада:  
 1 – прижимной механизм; 2 – верхняя прижимная пластина;  
 3 – термоэлектрический модуль;  
 4 – нижняя теплоизоляционная прижимная пластина.

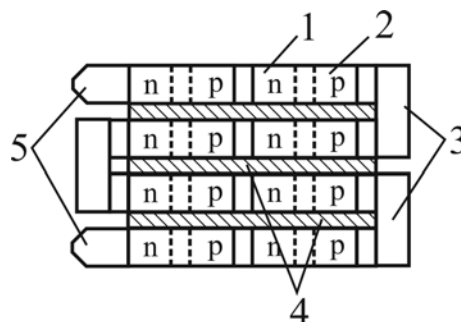
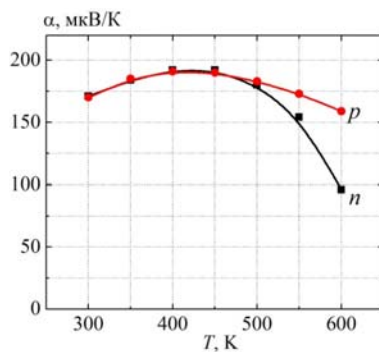


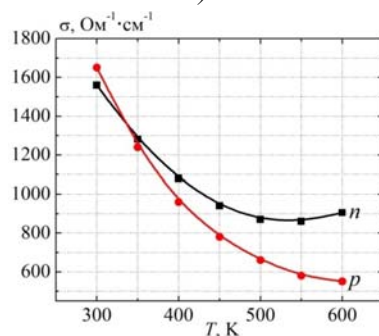
Рис. 4. Схема размещения линеек в горячем каскаде: 1 – ветви n-типа проводимости;  
 2 – ветви p-типа проводимости; 3 – коммутационные пластины;  
 4 – электроизоляция; 5 – электрические контакты.

### Особенности изготовления холодного каскада

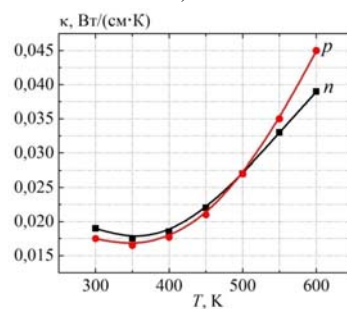
Для изготовления ветвей термоэлементов низкотемпературного (холодного) каскада использованы материалы на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$   $n$ - и  $p$ - типов проводимости, температурные зависимости термоэлектрических параметров которых приведены на рис. 5. Ветви термоэлементов получали из монокристаллического образца, выращенного методом зонной плавки.



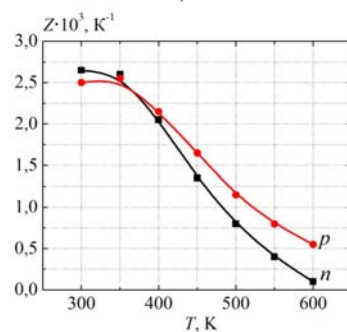
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Температурные зависимости параметров термоэлектрических модулей  $n$ - и  $p$ - типов проводимости на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ : а) коэффициент термоЭДС; б) электропроводность; в) теплопроводность; г) добротность.

Коммутацию холодной и горячей сторон осуществляли медными пластинами в специальной оснастке, схема которой приведена на рис. 6.

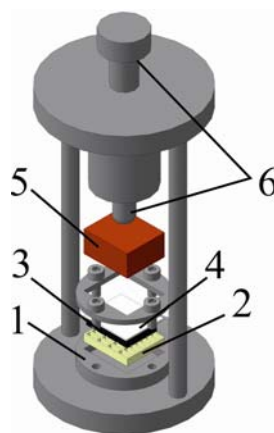


Рис. 6. Оснастка для коммутации холодного каскада: 1 – основание; 2 – силиконовая матрица; 3 – ветви термоэлементов; 4 – керамическая пластина; 5 – нагреватель; 6 – прижимной механизм.

Для этого основание 1 с матрицей 2 и ветвями 3 модуля размещали в оснастке и устанавливали на торце ветвей керамическую пластину 4 с нанесенными коммутационными пластинами. После пайки коммутационных пластин горячую сторону модуля выравнивали методом шлифовки.

### Результаты измерений

На рис. 7а схематически изображено внутреннее устройство полученного двухкаскадного генераторного модуля из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS.

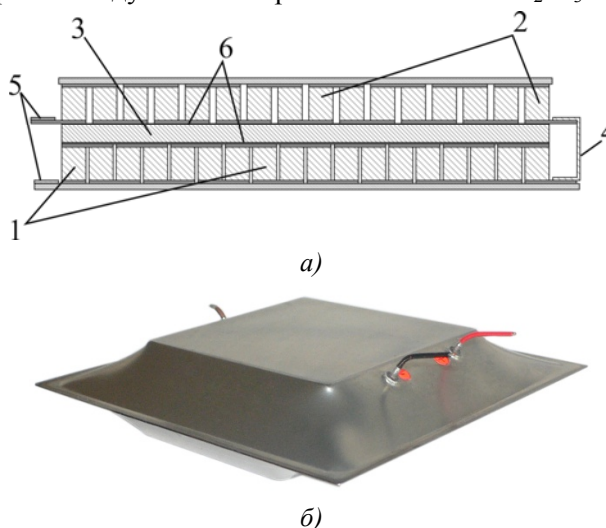


Рис. 7. Термоэлектрический двухкаскадный генераторный модуль из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS для ТЭГ на твердом топливе: а) схематическое изображение; б) внешний вид в герметизированном корпусе: 1 – низкотемпературный каскад; 2 – высокотемпературный каскад; 3 – теплопроводящая пластина; 4 – коммутационная шина; 5 – электрические контакты; 6 – электроизоляционные слюдяные прокладки.

Двухкаскадный модуль состоит из низкотемпературного каскада 1, высокотемпературного каскада 2 и межкаскадной теплопроводящей пластины 3. Каскады соединены между собой последовательно в электрическую цепь коммутирующей шиной 4. Для подсоединения потребителя электрической энергии или коммутации модулей в батарее электрические контакты 5 выведены за границы модуля. Электроизоляция горячего и холодного каскадов от пластины 3 осуществляется прокладками из слюды 6.

Низкотемпературный и высокотемпературный каскады содержат 72 и 64 термоэлемента, соответственно. Поперечное сечение ветвей составляет  $4 \times 4$  мм, их высота с учетом нанесенных слоев составляет 6 мм.

С целью предупреждения деградация контактов вследствие протекания процессов окисления при рабочих температурах, каскадный модуль герметизирован в тонкостенном металлическом корпусе, внутренний объем которого заполнен инертным газом (рис. 7б).

Исследование параметров каскадного модуля осуществлялось при температуре холодной стороны  $T_x = 30$  °С и температуре горячей стороны  $T_2$  от 200 до 500 °С. Результаты измерений приведены на рис.8, 9.

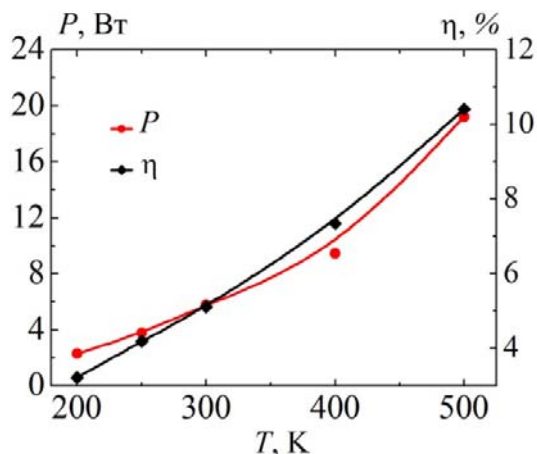


Рис. 8. Зависимость электрической мощности  $P$  и КПД  $\eta$  двухкаскадного генераторного модуля из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS от температуры  $T_2$ .

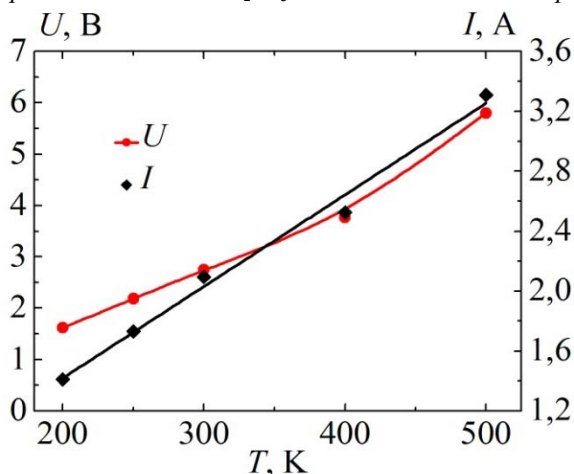


Рис. 9. Зависимость электрического напряжения  $U$  и силы тока  $I$  генераторного модуля из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS от температуры  $T_2$ .

Экспериментальные температурные зависимости энергетических характеристик модуля из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS получены на автоматизированном оборудовании "Алтек-10002", разработанном в Институте термоэлектричества [12].

Из приведенных данных видно, что максимальная исходная электрическая мощность и напряжение модуля достигаются при температуре горячей стороны  $500\text{ }^\circ\text{C}$  и составляют соответственно  $P = 19.2\text{ Вт}$  и  $U = 5.8\text{ В}$ . При этом эффективность термоэлектрического преобразования  $\eta$  находится на уровне  $10.4\%$ .

При дальнейшем повышении  $T_c$  до уровня температур  $550\text{ }^\circ\text{C}$  наблюдалось повышение электрической мощности и КПД до  $24\text{ Вт}$  и  $12.5\%$ . Однако такие температуры являются нежелательными для работы модуля, особенно  $p$ - ветви на основе TAGS, вследствие ускорения деградиционных процессов.

## Выводы

1. Разработана технологическая схема изготовления термоэлементов высокотемпературного каскада из материалов на основе  $n$ -  $PbTe$  и  $p$ -TAGS, что включает в себя диффузионную сварку предварительно спрессованных ветвей с коммутационными пластинами в "линейки" термоэлементов, нанесение антисублимационных слоев на боковые поверхности ветвей и коммутацию "линеек" в модуль высокотемпературного каскада.

2. Показана технология создания низкотемпературного каскада из материалов на основе  $Bi_2Te_3$   $n$ - и  $p$ - типов проводимости, которая включает совместную коммутацию ветвей термоэлементов в модуль низкотемпературного каскада.

3. Определено, что максимальная исходная электрическая мощность и напряжение полученного двухкаскадного генераторного модуля из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS достигается при температуре горячей стороны  $500\text{ }^\circ\text{C}$  и составляют  $19.2\text{ Вт}$  и  $5.8\text{ В}$ , соответственно. При этом эффективность термоэлектрического преобразования составляет  $10.4\%$ .

## Литература

1. Струтинская Л.Т. Проектирование секционных модулей на основе  $PbTe$  / TAGS для термоэлектрических генераторов / Струтинская Л.Т., Билинский-Слотило В.Р., Михайловский В.Я. // Физика и химия твердого тела. – 2012. – Т.13. – №4. – С.1032 – 1036.
2. Вихор Л.Н. Оптимизация материалов и оценка характеристик генераторных модулей для рекуператоров тепла / Вихор Л.Н., Михайловский В.Я., Мочернюк Р.М. // Физика и химия твердого тела. - 2014. - т.15. - №1. - С. 206-213.
3. Михайловский В.Я. Двухкаскадные модули на основе  $Bi_2Te_3$  и  $SiGe$  для термоэлектрических генераторов / Михайловский В.Я., Билинский-Слотило В.Р. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2013. - №2-3. - С.39-42.
4. Михайловский В.Я. Термоэлектрические каскадные модули из материалов на основе  $Bi_2Te_3$ - $PbTe$ -TAGS // Михайловский В.Я., Билинский-Слотило В.Р. // Термоэлектричество. - 2012. - №4. - С. 67-74.
5. 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.



6. 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.
7. 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.
8. Анатычук Л.И. Термоэлектрический генератор, использующий тепло нагретых поверхностей / Анатычук Л.И., Мочернюк Р.М., Гаврилюк Н.В., Андрусяк И.С. // *Термоэлектричество*. - 2017. - №2 - С. 84-95.
9. 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.
10. Вихор Л.Н. Проектирование термоэлектрических каскадных модулей для ТЭГ на твердом топливе / Вихор Л.Н., Максимук Н.В. // *Термоэлектричество*. - 2017. - №4.
11. Михайловский В.Я. Исследование термоэлементов из материалов на основе p-PbTe и p-TAGS термоэлектрического генераторного каскадного модуля / Михайловский В.Я., Лисько В.В., Антонюк В.В., Максимук Н.В. // *Термоэлектричество*. - 2017. - №3. – С. 39-47
12. L.I. Anatyshuk and M.V. Havrylyuk. Procedure and Equipment for Measuring Parameters of Thermoelectric Generator Modules. *Journal of Electronic materials*. -2011. -№5. - p. 1292-1297.

Поступила в редакцию 19.11.2017

**V. Ya. Mykhailovsky** *Doctor Phys.-math. Sciences*,

**V.V.Razinkov** *Candidate Phys.-math. Siences*,

**M.V.Maksimuk, M.V.Havryliuk**

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

*e-mail: anatysh@gmail.com*

## **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<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-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 khimiia 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 khimiia 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 osnove  $Bi_2Te_3$  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., Rezanian 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). Termoelektrychnyi henerator shcho vykorystovuie teplo nahritykh poverkhon [Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces]. *Termoelektryka – J.Thermoelectricity*, 2, 84–95 [in Ukrainian].
  9. Juanico L.E., Rinalde F., Tagliavere 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 genertaoor cascaxade 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