

## МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 537.58

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.048-061



### Применение новых технических решений в конструировании термоэлектрических систем

И. Ю. Шелехов\*, Т. И. Шишелова, Е. И. Смирнов  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский  
технический университет» (г. Иркутск, Россия)  
\*[promteplo@yandex.ru](mailto:promteplo@yandex.ru)

*Введение.* В статье представлен анализ применения полупроводников при конструировании устройств, которые работают с использованием возобновляемых источников энергии; показано, что особый интерес проявляется к системам, работающим на основе термоэлектрической энергии. Задача исследования заключается в расширении спектра применения термоэлектрических систем. Показано, что для преобразования рассеянной тепловой энергии в другой вид энергии целесообразно и эффективно использовать системы, созданные с помощью термоэлектрических элементов. *Материалы и методы.* Исследования проводились в Научно-исследовательской лаборатории современных нагревательных приборов ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». Были изготовлены образцы термоэлектрических модулей с использованием толстопленочной технологии. Сравнивалась эффективность работы термоэлектрического модуля классического вида с радиаторами охлаждения и запатентованной авторами конструкции термоэлектрического модуля с пространственной ориентацией сторон теплообмена. В качестве термоэлектрического материала использовался теллурид висмута ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ); показания напряжения и тока термоэлектрических модулей фиксировались универсальным цифровым прибором В7-28; показания температуры теплоносителя и нагревательных элементов измерялись термомпарами и фиксировались с помощью приборов ТРМ 151 и программного комплекса фирмы «ОВЕН». Токовая нагрузка во время проведения экспериментов была постоянной и составляла 1А; корректировка осуществлялась постоянными резисторами марки МЛТ-1.

*Результаты исследования.* В статье приводятся результаты исследования термоэлектрических модулей с поддержанием постоянной температуры на одной стороне модуля и заданием градиента температуры в диапазоне от +50 °С до 190 °С на другой. Детально рассматривается взаимное влияние теплопередающих сторон в процессе длительной эксплуатации при различных конструкциях термоэлектрических модулей.

*Обсуждение и заключения.* Толстопленочная технология – одно из направлений по удешевлению производства термоэлектрических модулей и увеличению эффективности их работы. Исследования в данной области целесообразно проводить в направлении разработки конструкций термоэлектрических модулей и технологий по их изготовлению. Использование толстопленочной технологии изготовления термоэлектрических модулей дает возможность полностью удалить взаимное влияние горячей и холодной сторон, а также увеличить площадь рассеивания тепла в очень широких пределах.



**Ключевые слова:** термоэлектрическое устройство, термоэлектрический элемент, термоэлектрический модуль, устройство преобразования, преобразование энергии, энергоэффективность, толстопленочная технология

**Для цитирования:** Шелехов И. Ю., Шишелова Т. И., Смирнов Е. И. Применение новых технических решений в конструировании термоэлектрических систем // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 48–61. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.048-061

## New Technical Solutions for Designing Thermoelectric Systems

I. Yu. Shelekhov\*, T. I. Shishelova, E. I. Smirnov

*National Research Irkutsk State Technical University*

*(Irkutsk, Russia)*

\**promteplo@yandex.ru*

**Introduction.** The article presents an analysis of using of semiconductors for the design of renewable energy devices with special attention to thermoelectric energy. The aim of the study is to expand the range of using of thermoelectric systems. The article demonstrates the effectiveness of using the systems based on thermoelectric elements to convert the scattered thermal energy into another type of energy.

**Materials and Methods.** Bismuth telluride (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) material was used as a thermoelectric. The readings of the voltage and amperage of thermoelectric modules were measured with the V7-28 universal digital instrument. Temperature of the coolant and heating elements was measured by thermocouples and recorded with the TRM 151 and instruments with OWEN software. Constant current load during the experiments was 1A. Load correction was carried out with the MLT-1 permanent resistors.

**Results.** The article presents the results of studying the thermoelectric modules, which maintained a constant temperature on one side of the module with difference in temperature from +50 °C to +190 °C on the other side. The authors described in detail the mutual influence of heat transfer sides in the process of long-term operation with various designs of thermoelectric modules.

**Discussion and Conclusions.** Thick film technology is one of the directions to reduce the cost of production of thermoelectric modules and increase the efficiency of their operation. The development of new designs of thermoelectric modules and new technologies for their production is desirable. The use of thick film technology for manufacturing thermoelectric modules makes it possible to completely remove the mutual influence of the hot and cold sides, and also to increase the heat dissipation area over a wide range.

**Keywords:** thermoelectric device, thermoelectric element, thermoelectric module, conversion device, energy conversion, energy efficiency, thick film technology

**For citation:** Shelekhov I. Yu., Shishelova T. I., Smirnov E. I. New Technical Solutions for Designing Thermoelectric Systems. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):48–61. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.048-061

### Введение

Одним из приоритетных направлений развития современной науки являются разработки в области возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Значительное место в данном направлении занимают микрогенераторы на основе полупроводниковых элементов.

Ярким примером служит солнечная энергетика, которая уверенно лидирует в области применения, опередив биоэнергетику и ветроэнергетику [1]. Фактически разработки в области электронных компонентов по темпам развития опережают разработки в области биологических, химических и механических

процессов. При этом можно констатировать высокий потенциал разработок в данной сфере. Появляются новые направления, где применение полупроводниковых элементов имеет неоспоримое преимущество (например, компенсация тепловых потерь зданий и сооружений различного назначения).

С помощью современных утепляющих материалов можно решить ряд задач по снижению тепловых потерь от ограждающих конструкций и по транспортировке теплоносителя, однако эффективно бороться с тепловыми потерями, возникающими при воздухообмене и утилизации отходов жизнедеятельности, все еще невозможно. В последние годы проявляется особый интерес к системам, которые работают на основе термоэлектрической энергии. Расширение технологических возможностей, появление новых термоэлектрических материалов привело к созданию новых термоэлементов с повышенным коэффициентом полезного действия (КПД) [2].

В жизнедеятельности человека процесс преобразования какого-либо вида энергии в тепло является основным, причем большая часть этого тепла рассеивается в окружающую среду. По оценкам Программы развития Организации Объединенных Наций<sup>1</sup>, потери энергии и энергоемкость экономики в РФ в 1,5–2,5 раза выше, чем в Европе, где среднечеловеческое потребление энергии превышает аналогичный показатель в РФ [3]. Причем основные потери энергии происходят в виде рассеянного низкопотенциального теплового потока.

Преобразование рассеянной тепловой энергии в другой вид энергии – сложная задача, решить которую в ряде случаев возможно только с помощью термоэлектрических элементов. Системы, созданные на основе таких эле-

ментов, успешно конкурируют с традиционными методами преобразования энергии до нескольких сотен ватт, а для объектов со специальными требованиями по массогабаритным, виброакустическим и надежностным характеристикам практически не имеют конкурентов [4]. Термоэлектрические элементы предоставляют новые возможности при разработке конструкций специальных систем, преобразующих тепловые потери в электрическую энергию для дальнейшего применения [5].

Невозможно избежать тепловые потери при эксплуатации зданий, однако их можно оптимизировать, систематизировать, преобразовать и направить обратно. Как правило, для этих целей используются рекуперационные установки; наиболее обширная область применения данных приборов – системы вентиляции. Работа рекуперационных установок основана на принципе «теплового насоса» – передачи энергии от одного тела к другому, причем тело, у которого забирается энергия, может иметь более низкую температуру, чем тело, которому энергия передается. Несмотря на достигнутые успехи в данной области, производство и внедрение ВИЭ, работа которых основана на внутреннем энергетическом ресурсе, не имеет массового характера не только в РФ, но и во всем мире [6].

Использование термоэлектрических элементов дает возможность возврата части энергетических ресурсов в виде электрической энергии постоянного тока для питания светодиодных светильников, цепей управления и контроля приборов учета, электронной техники, включая персональные компьютеры; для зарядки аккумуляторных батарей; для обеспечения резервным питанием при аварийных ситуациях и т. д. [7].

Кроме этого, при использовании термоэлектрических элементов реша-

<sup>1</sup> Программа развития Организации Объединенных Наций. URL: <http://www.undp.org>



ется одна из основных проблем ВИЭ: расстояние между источником и потребителем энергии сводится к минимуму. К преимуществам термоэлектрических систем по сравнению с традиционными системами относят неограниченный ресурс работы, отсутствие подвижных частей, бесшумность, экологичность, чистота, универсальность в отношении способов подвода и отвода тепловой энергии и возможность рекуперации отработанной энергии [8].

Преимущества очевидны, но существует ряд факторов, которые ограничивают широкое применение термоэлектрических элементов: низкая производительность, сложность технологического процесса, низкая эффективность термоэлектрического модуля из-за высокого коэффициента теплопроводности проводников n- и p-типов и взаимного влияния пластин, узкий спектр применения, поскольку использование термоэлектрических преобразователей возможно в условиях, подразумевающих любые механические воздействия – удары, падения, тряску. Кроме этого, источники или потребители тепловой энергии, как правило, пространственно удалены друг от друга, вследствие чего требуются дополнительные конструктивные решения для перемещения энергии по направлению к теплообменным пластинам преобразователя или от них [9].

В бытовой сфере термоэлектрические элементы практически не применяются из-за высокой стоимости по отношению к массовому бытовому оборудованию (исключение – бытовые автомобильные холодильники). Кроме этого, применение термоэлектрических модулей ограничивается тем, что массовые технологии производства настроены на изготовление термоэлектрических модулей на стандартной ситалловой подложке размерами 40x40 и 60x48 мм [10].

### **Обзор литературы**

Широкое внедрение систем на основе термоэлектрических элементов

сдерживают не столько электрофизические свойства, хотя это немаловажный фактор, сколько технологические и конструктивные особенности технологии, по которой их производят. Если провести аналогию с солнечными батареями, то тот факт, что у современных батарей величина КПД находится в диапазоне 15–25 % (на практике не выше 15 %), а у фотоэлементов из аморфного кремния, на базе которых изготавливают тонкопленочные гибкие панели, – 5–6 %, не оказывает существенного влияния на их распространение [11]. Эффективность термоэлектрических элементов и фотоэлементов находится на одном уровне, но производство фотоэлементов проще и дешевле. Кроме этого, в отличие от фотоэлементов, применение термоэлектрических элементов требует дополнительных устройств для осуществления теплообмена. Анализ литературных данных показывает, что на эффективность работы термоэлектрических систем в большей степени влияют технические решения при проектировании, чем электрофизические характеристики термоэлектрических спаев.

В статье А. С. Марченко и А. Б. Сулина [12] показано, что на современном этапе развития термоэлектрического приборостроения внешние потери в реальной системе сопоставимы с внутренними потерями в термоэлементах. Одним из эффективных методов снижения внутренних потерь является разработка новых конструкций теплообменных устройств. Например, в статьях [13–17] приводятся результаты анализа зависимости площади теплообмена и рассматриваются конструктивные решения, влияющие на снижение внутренних тепловых потерь.

Анализ конструктивных решений в области объемного проектирования конструкций модулей на основе термоэлектрических элементов показал, что применение данных элементов существенно упрощает конструкции систем,

снижает их стоимость и увеличивает эффективность. В работе А. Х. Снапьян и соавт. предлагается оригинальное техническое решение по созданию кольцевого термоэлектрического модуля [18]. Данное решение открывает новые перспективы для дальнейшего совершенствования конструкций термоэлектрических модулей. Особый интерес вызывают исследования авторов, которые работают в области тонкопленочной технологии и специализируются на создании объемных термоэлектрических систем [19–20]. Однако предлагаемые в данных работах технические решения сложно применить в массовом производстве.

### **Материалы и методы**

На современном этапе развития термоэлектрического приборостроения внешние технические потери в реальных системах сопоставимы с внутренними потерями в термоэлементах. В основном это обусловлено взаимным влиянием теплопередающих пластин и теплопроводностью термоэлектрических спаев. Конструкция классического термоэлектрического модуля представляет собой объемную фигуру, где между двух одинаковых параллельных плоскостей небольших размеров последовательно формируются токопроводящие дорожки, которые соединены столбиками полупроводников *n*- и *p*-типа. Расстояние между пластинами определяется техническими возможностями применяемых технологий для изготовления полупроводниковых столбиков (1–3 мм). Площадь теплопередающих пластин незначительна, поэтому конструктивные решения при проектировании радиаторов нагрева и охлаждения не дают существенных результатов в расширении спектра при-

менения и увеличения эффективности термоэлектрических систем.

Для того чтобы применение термоэлектрических элементов приобрело массовый характер, необходимо вести работы по конструированию термоэлектрических модулей технологии массового производства.

Цель данного исследования – применение толстопленочной технологии для создания термоэлектрического модуля с изменением пространственной ориентации зон теплообмена и возможностью значительного увеличения расстояния между ними.

Суть технологии заключается в продавливании через трафарет, нанесенный на сетку, обладающей определенными свойствами пасты. В зависимости от толщины сетки и топологического рисунка можно менять как ширину, так и толщину наносимого слоя, а также варьировать геометрические формы. После нанесения паста проходит процесс полимеризации (вжигания) в специальных печах и приобретает необходимые электрофизические свойства. В мировой практике данная технология широко применяется для массового производства резисторов, конденсаторов и других электронных компонентов.

На ее основе нами был разработан новый способ изготовления пространственно ориентированного термоэлектрического модуля<sup>2</sup>. В отличие от классической технологии, мы переносим объемную фигуру в плоскость и создаем модуль на этой плоскости: на одной части находятся полупроводники *n*-типа; на другой – *p*-типа. При этом размер плоскости может быть значительным, плоскости – пространственно ориентированными, а части плоскостей и расстояние между ними – различными.

<sup>2</sup> Пат. 2663748, Российская Федерация. МПК H01L35/32. Пространственно ориентированный термоэлектрический модуль и способ его изготовления / И. Ю. Шелехов, Е. И. Смирнов, К. П. Кашко, И. В. Шелехова; заявитель и патентообладатель ООО «Термостат+». № 2015153586; заявл. 14.12.2015; опубл. 28.02.2017, Бюл. № 7. 11 с. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/261/2611562.html>



Происходит процесс закрепления полупроводниковых термоэлементов *n*- и *p*-типов проводимости на диэлектрическую подложку (плоскость), на которую методом сетко-трафаретной печати предварительно наносят соединительные (для одноименных элементов) и коммутирующие (для разноименных элементов) дорожки пастой с низким удельным сопротивлением. После этого с помощью диэлектрической пасты наносятся барьерные дорожки для образования углублений (ячеек) между соединительными и коммутирующими дорожками. В углубления (ячейки) наносятся полупроводниковые дорожки пастой, изготовленной на основе полупроводников *n*-типа и *p*-типа, которые затем подвергаются процессу спекания под давлением.

Для проведения экспериментов было изготовлено 2 образца термоэлектрических модулей: один классического вида, второй с пространственной ориентацией. Образцы изготавливались на алюминиевой подложке с диэлектрическим покрытием; в качестве термоэлектрического материала использовался теллурид висмута ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ); количество спаев в образцах было одинаковым – 128. В образце с пространственной ориентацией теплопередающие поверхности были разнесены в параллельной плоскости, причем площадь теплопоглощающей стороны была увеличена в 2 раза по сравнению с тепловыделяющей стороной. Ряд ученых, применяя новые технические решения при конструировании и проектировании радиаторов, отмечали, что данное соотношение увеличивает эффективность работы термоэлектрических модулей [21–23].

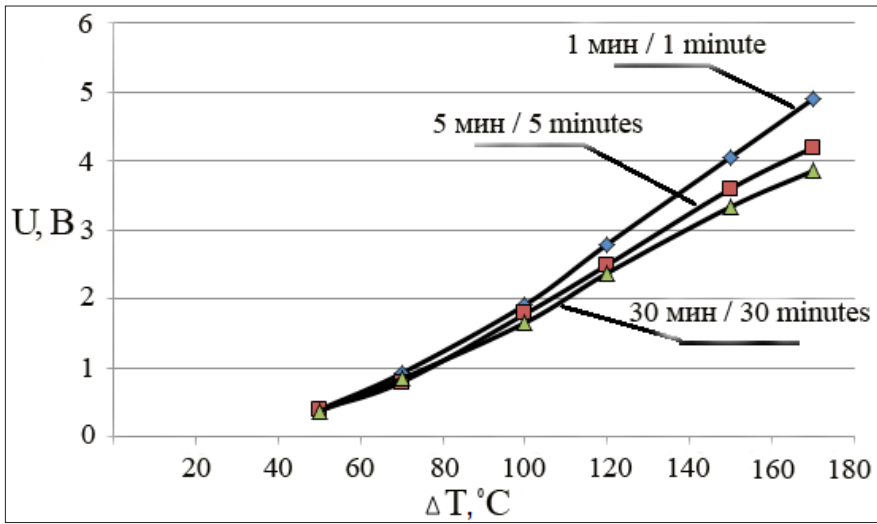
Сравнительный анализ проводился на специализированном стенде в На-

учно-исследовательской лаборатории современных нагревательных приборов ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»; показания напряжения и тока термоэлектрических модулей фиксировались универсальным цифровым прибором В7-28; показания температуры теплоносителя и нагревательных элементов измерялись термомпарами и фиксировались с помощью приборов ТРМ 151 и программного комплекса фирмы «ОВЕН». Токовая нагрузка во время проведения экспериментов была постоянной и составляла 1А; корректировка осуществлялась постоянными резисторами марки МЛТ-1.

### Результаты исследования

Первый образец (термоэлектрический модуль классического вида) испытывался совместно с радиаторами охлаждения. Радиаторы охлаждения были собраны в соответствии с методикой, изложенной в статье М. Ф. Иванова, А. В. Царева, В. В. Чугункова [24]. Одна сторона термоэлектрического модуля охлаждалась с помощью проточной водопроводной воды, на поверхности которой поддерживалась температура  $+10\text{ }^\circ\text{C}$ ; вторая пошагово нагревалась до температуры  $+190\text{ }^\circ\text{C}$  с помощью электронагревателей. Для определения величины взаимного влияния теплопередающих сторон на эффективность работы термоэлектрического модуля изменялось время выдержки фиксированной температуры. Эксперименты проводились при фиксации температуры на второй стороне термоэлектрического модуля в течение 1 мин, 5 мин и 30 мин. Результаты испытания термоэлектрического модуля классического вида представлены в табл. 1.

На рис. 1. представлены графики напряжений, которые вырабатывал термоэлектрический модуль в зависимости от времени фиксации температуры.



Р и с. 1. Графики напряжений, вырабатываемых термоэлектрическим модулем в зависимости от времени фиксации температуры (классическое исполнение)

Fig. 1. Graphic of voltage generated by the thermoelectric module depending on time of fixing the temperature (the classic version)

Таблица 1

Table 1

**Результаты обработки данных при испытании термоэлектрического модуля классического вида**

**Results of data processing during the test of the classic thermoelectric module**

$\Delta T, ^\circ C$	$U_1, V$	$U_2, V$	$U_3, V$	$K, \%$
50	0,40	0,40	0,38	5,00
70	0,93	0,80	0,85	8,60
100	1,92	1,79	1,66	13,54
120	2,80	2,50	2,38	15,00
150	4,06	3,60	3,34	17,73
170	4,90	4,20	3,86	21,22

Примечание:  $\Delta T, ^\circ C$  – градиент температуры между теплопередающими сторонами термоэлектрического модуля;  $U_1, V$  – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 1 мин;  $U_2, V$  – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 5 мин;  $U_3, V$  – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 30 мин;  $K, \%$  – процентное изменение вырабатываемого напряжения в зависимости от времени фиксации температуры (время фиксации температуры в течение 30 мин по отношению к времени фиксации температуры в течение 1 мин) / Note:  $\Delta T, ^\circ C$  – temperature gradient between the heat transfer sides of the thermoelectric module;  $U_1, V$  – voltage produced by the thermoelectric module with temperature fixed for 1 minute;  $U_2, V$  – voltage produced by the thermoelectric module when temperature fixed for 5 minutes;  $U_3, V$  – voltage produced by the thermoelectric module when temperature fixed for 30 minutes;  $K, \%$  – percentage change in the produced voltage, depending on time of fixing the temperature (the time of fixing the temperature for 30 minutes in relation to time of fixing the temperature for 1 minute)



Функция зависимости электродвижущей силы от температуры является линейной. Из представленных данных видно, что несмотря на применение современных технологий по эффективному снижению взаимного влияния теплопередающих сторон в термоэлектрическом модуле, в классическом исполнении избежать данного влияния не удалось. Причем при длительной эксплуатации оно усиливается и снижает эффективность с 5 до 20 %. Также не следует забывать, что для увеличения эффективности работы термоэлектрического модуля были применены радиаторы, стоимость которых в несколько раз превышает стоимость самого модуля.

Второй образец (с пространственной ориентацией сторон) испытывался

без дополнительных радиаторов; охлаждение осуществлялось контактным способом путем механического крепления одной части модуля к водопроводной трубе, а другой – к электронагревателю<sup>3</sup>. Измерение данных осуществлялось аналогично испытанию первого образца. Результаты испытания термоэлектрического модуля с пространственной ориентацией сторон представлены в табл. 2.

На рис. 2. представлен график напряжения, которое вырабатывал термоэлектрический модуль в период проведения экспериментов. В отличие от первого эксперимента, отсутствовала необходимость строить несколько графиков: поскольку значения вырабатываемого напряжения практически

Т а б л и ц а 2

Table 2

**Результаты обработки данных при испытании термоэлектрического модуля с пространственной ориентацией сторон**

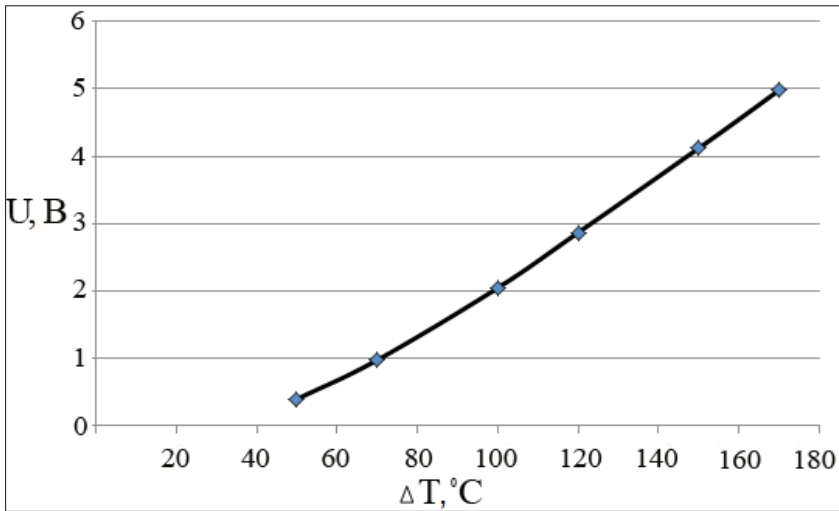
**The results of data processing during the test of the thermoelectric module with spatial orientation of the sides**

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$U_1, \text{B}$	$U_2, \text{B}$	$U_3, \text{B}$	$K, \%$
50	0,40	0,39	0,40	0,00
70	0,98	0,99	0,99	-1,02
100	2,05	2,10	2,10	-2,44
120	2,87	2,91	2,89	-0,70
150	4,12	4,11	4,12	0,00
170	4,98	5,10	5,05	-1,41

Примечание:  $\Delta T, ^\circ\text{C}$  – градиент температуры между теплопередающими сторонами термоэлектрического модуля;  $U_1, \text{B}$  – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 1 мин;  $U_2, \text{B}$  – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 5 мин;  $U_3, \text{B}$  – напряжение, вырабатываемое термоэлектрическим модулем при фиксации температуры в течение 30 мин;  $K, \%$  – процентное изменение вырабатываемого напряжения в зависимости от времени фиксации температуры (время фиксации температуры в течение 30 мин по отношению к времени фиксации температуры в течение 1 мин) / Note:  $\Delta T, ^\circ\text{C}$  – temperature gradient between the heat transfer sides of the thermoelectric module;  $U_1, \text{B}$  – voltage produced by the thermoelectric module with temperature fixed for 1 minute;  $U_2, \text{B}$  – voltage produced by the thermoelectric module when temperature fixed for 5 minutes;  $U_3, \text{B}$  – voltage produced by the thermoelectric module when temperature fixed for 30 minutes;  $K, \%$  – percentage change in the produced voltage, depending on time of fixing the temperature (the time of fixing the temperature for 30 minutes in relation to time of fixing the temperature for 1 minute)

<sup>3</sup> Шелехов И. Ю., Смирнов Е. И., Иноземцев В. П. Новые возможности и перспективы использования термоэлектрических генераторов // Современная наука: теоретический и практический взгляд : сб. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2015. С. 48–52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23275824>  
*Mechanical engineering*





Р и с. 2. График напряжения, вырабатываемого термоэлектрическим модулем в зависимости от времени фиксации температуры (с пространственной ориентацией сторон)

F i g. 2. The graph of voltage generated by the thermoelectric module depending on the time of fixation temperature (with a spatial orientation of the parties)

одинаковы, незначительные отклонения можно отнести к статистической погрешности. Кроме этого, видно, что зависимость носит линейный характер, что показывает отсутствие взаимного влияния теплопередающих сторон. Эффективность термоэлектрического модуля при длительной эксплуатации не снижается, а незначительное увеличение эффективности, скорее всего, связано с изменением внутреннего сопротивления данного модуля при нагреве.

**Обсуждение и заключения**

Вопросы повышения эффективности термоэлектрических модулей в настоящее время рассматривается в рамках 3 основных научных направлений:

- разработка новых термоэлектрических материалов с высоким значением добротности ( $z$ );
- оптимизация соотношения сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления модуля;
- разработка конструкций модулей с оптимальными геометрическими размерами.

Наши научные исследования ведутся в направлении оптимизации геометрических размеров. Как правило, работы по оптимизации геометрических размеров заключаются в верном подборе соотношения между сопротивлением модуля ( $R$ ) и теплопроводностью  $p$ - и  $n$ -элементов ( $G$ ), поскольку эффективность термоэлектрического модуля имеет обратную зависимость от этих параметров. Сопротивление и теплопроводность проводника зависят от его площади ( $S$ ), длины ( $l$ ), удельной электропроводности ( $\sigma$ ) и удельной теплопроводности ( $\lambda$ ):

$$R = \frac{l}{S \cdot \sigma}; \tag{1}$$

$$G = \frac{S \cdot \lambda}{l}. \tag{2}$$

При расчете эффективности термоэлектрического модуля, фактически, учитывается отношение удельной теплопроводности к удельной электропроводности, поскольку добротность



термоэлектрического модуля рассчитывается по формуле:

$$Z = \frac{\alpha^2}{R \cdot G}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Зеебека;  $R$  и  $G$  – две взаимозависимые величины.

Известно, что с увеличением электропроводности увеличивается теплопроводность и наоборот. В конструкции классического термоэлектрического модуля р- и n-элементы расположены перпендикулярно теплопередающим поверхностям и параллельно друг к другу на таком расстоянии, что тепловой поток распределен практически равномерно и направлен от одной поверхности к другой, а потери в окружающую среду практически отсутствуют.

Для эксперимента использовались два термоэлектрических модуля с аналогичными техническими характеристиками и идентичными площадями теплоотдачи. В первом случае (термоэлектрический модуль классического вида) площадь теплоотдачи определялась дополнительными радиаторами, во втором (термоэлектрический модуль с пространственной ориентацией сторон) – технологическими возможностями толсто пленочной технологии. В термоэлектрическом модуле с пространственной ориентацией сторон р- и n-элементы расположены последовательно между теплопередающими поверхностями, а тепловой поток направлен в окружающую среду.

Согласно результатам проведенных экспериментов, работы по оптимизации геометрических размеров термоэлектрических модулей при использовании классических технологий практически исчерпали свои возможности.

Из результатов также видно, что работы в области совершенствования термоэлектрических устройств, связанные с улучшением рассеивания тепла с площади теплопередающих сторон, существенно увеличивают стоимость термоэлектрических устройств по срав-

нению с применяемыми техническими решениями в области толсто пленочной технологии. Изменение топологического рисунка практически не сказывается на стоимости самого устройства.

Дальнейшая работа в области оптимизации геометрических размеров с использованием толсто пленочной технологии будет способствовать созданию новых термоэлектрических материалов, поскольку снимет ограничение в применении материалов с высоким коэффициентом теплопроводности. Толсто пленочная технология – это одно из направлений удешевления производства термоэлектрических модулей и увеличения эффективности их работы. С помощью известных топологий выделяемое или поглощаемое тепло с термоэлектрического модуля можно переместить в сторону, распределить его на большую площадь или, наоборот, сконцентрировать на меньшей площади [26]. Данная технология дает возможность полностью удалить взаимное влияние горячей и холодной сторон, а также увеличить площадь рассеивания тепла в очень широких пределах. По мере повышения своей эффективности термоэлектрические модули смогут конкурировать с традиционными тепловыми насосами в области более высоких мощностей и, таким образом, расширить свой спектр применения.

Продвижение большой энергетики в совокупности с новыми инновационными энергосберегающими технологиями может дать преимущество на российском и международном рынках. Появится возможность предлагать потребителю энергию совместно с технологией ее сбережения и рядом дополнительных сервисов в виде различных станций по зарядке электронных устройств (от мобильных телефонов до электромобилей). Причем данный сервис возможен даже при отсутствии прямой подачи электрической энергии и на разных уровнях, от частных домов до больших промышленных объектов.

## СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Елистратов В. В.** Опыт внедрения ВИЭ в мире и России // Академия энергетики. 2009. Т. 28, № 2. С. 56–66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21849502>
2. **Gujrathi A. S., Gehlot D.** Testing and performance of convex lens concentrating solar power panel prototype // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2008. Vol. 4, Issue 6. P. 242–246. URL: <http://docplayer.net/2935735-Testing-and-performance-of-the-convex-lens-concentrating-solar-power-panel-prototype.html>
3. **Сонина Е. А.** Инвестиции в возобновляемую энергетику // Молодой ученый. 2015. № 10. С. 800–806. URL: <http://www.moluch.ru/archive/90/18992>
4. **Tan G., Zhao D.** Study of a thermoelectric space cooling system integrated with phase change material // Applied Thermal Engineering. Vol. 86, no. 5. P. 187–198. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.054
5. **Anatyshuk L. I., Prybyla A. V.** Optimization of power supply system of thermoelectric liquid pump // Journal of Thermoelectricity. 2015. Vol. 6. P. 51–56. URL: <http://www.its.org/content/journal-thermoelectricity>
6. Анализ возможности использования термоэлектрических генераторов в системах вентиляции / И. Ю. Шелехов [и др.] // Научное обозрение. 2015. № 8. С. 67–75. URL: [https://istina.msu.ru/media/publications/article/eb7/5f7/10454368/07\\_08\\_2015.pdf](https://istina.msu.ru/media/publications/article/eb7/5f7/10454368/07_08_2015.pdf)
7. **Enescu D., Virjoghe E. O.** A review on thermoelectric cooling parameter and performance // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 38. P. 903–916. URL: <https://www.elsevier.com/catalog?producttype=journal>
8. **Anatyshuk L. I., Prybyla A. V.** Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air-conditioners // Journal of Thermoelectricity. 2016. Vol. 2. P. 31–39. URL: [http://jt.inst.cv.ua/jt\\_2016\\_02\\_en.pdf](http://jt.inst.cv.ua/jt_2016_02_en.pdf)
9. Опыт использования термоэлектрических генераторов / И. Ю. Шелехов [и др.] // Фундаментальные исследования. 2013. № 11, Ч. 5. С. 919–923. URL: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33225>
10. **Шостаковский П.** Термоэлектрические источники альтернативного электропитания // Компоненты и технологии. 2010. Т. 113, № 12. С. 131–138. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15543061>
11. **Ajao K. R., Oladosu O. A., Popoola O. T.** Cost-benefit analysis of wind-solar power generation by HOMER power optimization software // Journal of Applied Science and Technology. 2011. Vol. 16, no. 1–2. P. 52–57. DOI: 10.4314/jast.v16i1-2.64779
12. **Марченко А. С., Сулин А. Б.** Эффективные решения теплообменников для термоэлектрических трансформаторов теплоты // Вестник Дагестанского государственного технического университета (Сер. «Технические науки»). 2016. Т. 43, № 4. С. 63–72. DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-63-72
13. **Исмаилов Т. А., Мирземагомедова М. М.** Исследование стационарных режимов работы термоэлектрических теплообменных устройств // Вестник Дагестанского государственного технического университета (Сер. «Технические науки»). 2016. Т. 40, № 1. С. 23–30. URL: <https://socio.net.ru/~cyrccitec/json/spz/neicon/vestnik/y:2016:i:1:p:23-30.pdf>
14. **Sinton C. W., Winnett R.** Solar powered water pumping systems in New York State // New York State for Energy Research and Development Authority National Renewable Energy Laboratory Website. URL: [http://www.nrel.gov/clean\\_energy/solar.html](http://www.nrel.gov/clean_energy/solar.html)
15. Opportunities and challenges in micro and nano technologies for concentrating photovoltaic cooling / M. Leonardo [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 20. P. 595–610. URL: [www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)
16. Analysis of thermosyphon/heat pipe integration for feasibility of dry cooling for thermoelectric power generation / S. P. Benn [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 104, no. 5. P. 358–374. URL: <https://www.journals.elsevier.com/applied-thermal-engineering>
17. Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy / A. Date [et al.] // Solar Energy. 2014. Vol. 105. P. 656–668. URL: <https://www.journals.elsevier.com/solar-energy>



18. Кольцевой термоэлектрический модуль на основе теллурида свинца [Электронный ресурс] / А. Х. Снапян [и др.]. URL: [http://www.ioffe.ru/Thermolab/seminar2012/oral/28o\\_Snapian.pdf](http://www.ioffe.ru/Thermolab/seminar2012/oral/28o_Snapian.pdf)
19. **Громов Г.** Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули // Компоненты и технологии. 2014. № 8. С. 108–113. URL: <http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Components%20and%20Technologies%202014.pdf>
20. **Васильев Е. Н., Деревянко В. А.** Расчет эффективности термоэлектрических модулей для охлаждения радиоэлектронных элементов // Решетневские чтения. 2013. Т. 1, № 17. С. 211–213. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21801868>
21. **Sarkar A., Mahapatra S. K.** Role of surface radiation on the functionality of thermoelectric cooler with heat sink // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 69, Issues 1-2. P. 39–45. URL: <https://www.journals.elsevier.com/applied-thermal-engineering>
22. **Wang X., Yu J., Ma M.** Optimization of heat sink configuration for thermoelectric cooling system based on entropy generation analysis // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 63. P. 361–365. URL: [https://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=490](https://elibrary.ru/title_about.asp?id=490)
23. **Zhu L., Tan H., Yu J.** Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications // Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 76. P. 685–690. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=315>
24. **Иванов М. Ф., Царев А. В., Чугунков В. В.** Моделирование параметров термоэлектрических охлаждающих устройств // Инженерный вестник. 2014. № 11. С. 93–103. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/745021.html>
25. Исследования параметров термоэлектрических генераторов, изготовленных по толстопленочной технологии / И. Ю. Шелехов [и др.] // Металлургия: технологии, инновации, качество. 2015. С. 373–377. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25222657>

*Поступила 13.11.2017; принята к публикации 10.01.2018; опубликована онлайн 20.03.2018*

*Об авторах:*

**Шелехов Игорь Юрьевич**, доцент кафедры городского строительства и хозяйства, Институт архитектуры, строительства и дизайна, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), кандидат технических наук, ResearcherID: V-3045-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7677-3187>, [promtpleo@yandex.ru](mailto:promtpleo@yandex.ru)

**Шишелова Тамара Ильинична**, профессор кафедры физики, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), доктор технических наук, ResearcherID: V-2981-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2372-8144>, [tamara.shishelova@gmail.com](mailto:tamara.shishelova@gmail.com)

**Смирнов Евгений Игоревич**, аспирант кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения, Институт архитектуры, строительства и дизайна, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), ResearcherID: V-3117-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4999-7342>, [jeka7.7.7@mail.ru](mailto:jeka7.7.7@mail.ru)

*Вклад соавторов:*

И. Ю. Шелехов: анализ литературных данных, научное руководство, постановка задачи исследования, обработка данных, написание текста статьи; Т. И. Шишелова: анализ литературных данных, верстка и редактирование текста; Е. И. Смирнов: анализ литературных данных, подготовка образцов, сбор и анализ аналитических и практических материалов, разработка методики проведения эксперимента, компьютерная реализация решения задачи.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Elistratov V. V. [Experience of introduction of renewable energy in the world and Russia]. *Akademiya energetiki* = Energy Academy. 2009; 2(28):56–66. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21849502> (In Russ.)
2. Gujrathi A. S., Gehlot D. Testing and performance of convex lens concentrating solar power panel prototype. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2008; 4(6):242–246. Available at: <http://docplayer.net/2935735-Testing-and-performance-of-the-convex-lens-concentrating-solar-power-panel-prototype.html>
3. Sonina Ye. A. [Investments in renewable energy]. *Molodoy uchenyy* = Young Scientist. 2015; 10:800–806. Available at: <http://www.moluch.ru/archive/90/18992> (In Russ.)
4. Tan G., Zhao D. Study of a space thermoelectric cooling system integrated with phase change material. *Applied Thermal Engineering*. 2015; 86(5):187–198. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.054
5. Anatyshuk L. I., Prybyla A. V. Optimization of power supply system of thermoelectric liquid pump. *Journal of Thermoelectricity*. 2015; 6:51–56. Available at: <http://www.its.org/content/journal-thermoelectricity>
6. Shelekhov I. Yu., Smirnov E. I., Inozemtsev V. P., Fedorova E. D. [Analysis of possibilities of using thermoelectric generators in the ventilation systems]. *Nauchnoye obozreniye* = Scientific Review. 2015; 8:67–75. Available at: [https://istina.msu.ru/media/publications/article/eb7/5f7/10454368/07\\_08\\_2015.pdf](https://istina.msu.ru/media/publications/article/eb7/5f7/10454368/07_08_2015.pdf) (In Russ.)
7. Enescu D., Virjoghe E. O. A review on thermoelectric cooling performance parameter sand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 38:903–916. Available at: <http://www.elsevier.com/catalog?producttype=journal>
8. Anatyshuk L. I., Prybyla A. V. Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air-conditioners. *Journal of Thermoelectricity*. 2016; 2:31–39. Available at: [http://jt.inst.cv.ua/jt\\_2016\\_02\\_en.pdf](http://jt.inst.cv.ua/jt_2016_02_en.pdf)
9. Shelekhov I. Yu., Smirnov E. I., Rupasov V. L., Shishelova T. I. [Experience in the use of thermoelectric generators]. *Fundamentalnyye issledovaniya* = Fundamental Research. 2013; 11(5):919–923. Available at: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33225> (In Russ.)
10. Shostakovskiy P. [Thermoelectric sources of alternative supply]. *Komponenty i tekhnologii* = Components and Technologies. 2010; 12(113):131–138. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=15543061> (In Russ.)
11. Ajao K. R., Oladosu O. A., Popoola O. T. Cost-benefit analysis of wind-solar power generation by HOMER power optimization software. *Journal of Applied Science and Technology*. 2011; 16(1-2):52–57. DOI: 10.4314/jast.v16i1-2.64779
12. Marchenko A. S., Sulin A. B. Effective solutions of heat exchangers for thermoelectric heat transformers. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki* = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 43(4):63–72. DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-63-72 (In Russ.)
13. Ismailov T. A., Mirzemagomedova M. M. Research of stationary operating modes of thermoelectric heatexchange devices. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki* = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 1(40):23–30. Available at: <http://socionet.ru/~cyrcitec/json/spz/neicon/vestnik/y:2016:i:1:p:23-30.pdf> (In Russ.)
14. Christopher C. W., Winnett S. R. Solar powered water pumping systems in New York State. New York State for Energy Research and Development Authority National Renewable Energy Laboratory. Available at: [http://www.nrel.gov/clean\\_energy/solar.html](http://www.nrel.gov/clean_energy/solar.html)
15. Micheli L., Sarmah N., Luo X., Reddy K. S., Mallick T. K. Opportunities and challenges in micro and nano technologies for concentrating photovoltaic cooling: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 20:595–610. Available at: <https://strathprints.strath.ac.uk/45144>
16. Benn S. P., Poplaski L. M., Faghri A., Bergman Th. L. Analysis of the thermosyphon heat pipe integration for feasibility of dry cooling for thermoelectric power generation. *Applied Thermal Engineering*. 2016, 104(5):358–374. Available at: <http://www.journals.elsevier.com/applied-thermal-engineering>
17. Date A., Dixon C., Akbarzadeh A. Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy. *Solar Energy*. 2014; 105:656–668. Available at: <http://www.journals.elsevier.com/solar-energy>



18. Snapyan A. Kh., Grechko N., Kovyrzin A. V., Sudak N. M., Inglizyan P. N. [Ring thermoelectric module based on lead telluride]. Available at: [http://www.ioffe.ru/Thermolab/seminar2012/oral/28o\\_Snapyan.pdf](http://www.ioffe.ru/Thermolab/seminar2012/oral/28o_Snapyan.pdf) (In Russ.)
19. Gromov G. [Volumetric or thin-film thermoelectric modules]. *Komponenty i tekhnologii* = Components and Technologies. 2014; 8:108–113. Available at: <http://www.rmtld.ru/docs/technology/publications/Components%20and%20Technologies%202014.pdf> (In Russ.)
20. Vasiliev Ye. N., Derevianko V. A. Calculation of thermoelectric modules efficiency for cooling the radio electronic components. *Reshetnevskiy chteniye* = Reshetnev's Readings. 2013; 1(17):211–213. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21801868> (In Russ.)
21. Sarkar A., Mahapatra S. K. Role of surface radiation on the functionality of thermoelectric cooler with heat sink. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 69(1-2):39–45. Available at: <http://www.journals.eelsevier.com/applied-thermal-engineering>
22. Wang X., Yu J., Ma M. Optimization of heat sink configuration for thermoelectric cooling system based on the entropy generation analysis // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013; 63:361–365. URL: [http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=490](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=490)
23. Zhu L., Tan H., Yu J. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. *Energy Conversion and Management*. 2013; 76:685–690. URL: <http://elibrary.ru/contents.asp?titleid=315>
24. Ivanov M. F., Tsarev A.V., Chugunkov V. V. [Modelling of thermoelectric cooling devices]. *Inzhenernyy Vestnik* = Engineering Journal. 2014; 11:93–103. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/745021.html> (In Russ.)
25. Shelekhov I. Yu., Smirnov E. I., Inozemtsev V. P. [Research of parameters of thermoelectric generators fabricated on thick-film technology]. In: *Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Scientific-Practical Conference "Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality"*. 2015; p. 48–52. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23275824> (In Russ.)

*Submitted 13.11.2017; revised 10.01.2018; published online 20.03.2018*

*About the authors:*

**Igor Yu. Shelekhov**, Associate Professor, Chair of Urban Construction and Economy, Institute of Architecture, Construction and Design, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova St., 664074 Irkutsk, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-3045-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7677-3187>, [promteplo@yandex.ru](mailto:promteplo@yandex.ru)

**Tamara I. Shishelova**, Professor, Chair of Physics, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova St., 664074 Irkutsk, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: V-2981-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2372-8144>, [tamara.shishelova@gmail.com](mailto:tamara.shishelova@gmail.com)

**Evgeniy I. Smirnov**, Postgraduate Student, Chair of Engineering Communications and Life Support Systems, Institute of Architecture, Construction and Design, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova St., 664074 Irkutsk, Russia), ResearcherID: V-3117-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4999-7342>, [jeka7.7.7@mail.ru](mailto:jeka7.7.7@mail.ru)

*Contribution of the co-authors:*

I. Yu. Shelekhov: analysing the literary data, scientific guidance, problem statement, data processing, article writing; T. I. Shishelova: analysing literary data, word processing and editing the text; E. I. Smirnov: analysing literature data, preparing samples, collecting and analysing analytical and practical materials, developing methods for conducting experiments, computer implementation of the problem solution.

*All authors have read and approved the final version of the manuscript.*